



Моделирование процесса обработки почвы методом концентрации напряжений в обрабатываемом пласте

Н. И. Джабборов¹, А. В. Добринов¹✉, А. П. Савельев²

¹ Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал федерального научного агроинженерного центра ВИМ (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

² Национальный исследовательский Мордовский государственный университет (г. Саранск, Российская Федерация)

✉ a.v.dobrinov@yandex.ru

Аннотация

Введение. Обработка почвы – важнейшее звено в технологии возделывания сельскохозяйственных культур. В настоящее время на обработку почвы в среднем приходится 35–40 % энергетических затрат всего объема полевых работ и до 20 % энергии, потребляемой в сельском хозяйстве. Обработка почвы позволяет регулировать водно-воздушный режим, интенсивность биологических процессов и поддерживать необходимое фитосанитарное состояние почвы и посевов. Энергоемкость и качество обработки почвы зависят от степени совершенства технических средств. Математическое моделирование процесса обработки почвы различными почвообрабатывающими рабочими органами является актуальной задачей, поскольку позволяет разработать более совершенные энергоэффективные технические средства.

Цель статьи. Представить результаты исследования по разработке математических моделей для определения и анализа показателей процесса обработки почвы рабочим органом скобообразной формы.

Материалы и методы. В процессе теоретических исследований скобообразного почвообрабатывающего рабочего органа для сплошной поверхностной обработки почвы использовались методы анализа, обобщения и систематизации, теоретической механики, математической статистики и моделирования, теории вероятности, методы дифференциального исчисления, теория взаимодействия рабочих органов с почвой и их движения по поверхности поля.

Результаты исследования. Получены аналитические модели для определения создаваемого давления, тягового сопротивления, суммарной силы сжатия почвенного пласта, времени его движения через рабочий орган, требуемой мощности и количества энергии, затрачиваемых на сжатие и крошение почвенного пласта в зависимости от скорости перемещения предложенного скобообразного рабочего органа. Приведены графические зависимости исследованных параметров скобообразного почвообрабатывающего рабочего органа и установлены закономерности их изменения. **Обсуждение и заключение.** Предложенные математические модели и выявленные закономерности изменения параметров процесса обработки почвы рабочим органом замкнутого контура позволят разработать новые эффективные рабочие органы, рассчитать их конструктивно-технологические параметры.

© Джабборов Н. И., Добринов А. В., Савельев А. П., 2023



Ключевые слова: обработка почвы, скобообразный рабочий орган, моделирование, тяговое сопротивление, концентрация напряжений, мощность, давление, сила сжатия почвенного пласта

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Джабборов Н. И., Добринов А. В., Савельев А. П. Моделирование процесса обработки почвы методом концентрации напряжений в обрабатываемом пласте // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 175–191. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.175-191>

Original article

Modeling of the Tillage Process by the Method of Stress Concentration in the Tilled Layer

N. I. Jabborov^a, A. V. Dobrinov^a✉, A. P. Saveluev^b

¹ Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM

(Saint-Petersburg, Russian Federation)

² National Research Mordovia State University

(Saransk, Russian Federation)

✉ a.v.dobrinov@yandex.ru

Abstract

Introduction. Tillage is the most important part of the agricultural crops cultivation technology. Currently, tillage accounts for 35–40% of the energy consumption of the total volume of field work and up to 20% of the energy consumed in the agriculture sector. Tillage allows regulating the water-air regime and the intensity of biological processes, maintaining the necessary phytosanitary condition of the soil and crops. The energy intensity and quality of tillage depends on the degree of excellence of technical means. Mathematical modeling of the tillage process by various soil-cultivating working bodies is an urgent task to develop more advanced energy-efficient technical means.

Aim of the Article. The purpose of the research is to develop mathematical models for determining and analyzing the indicators of tilling the soil by the bracket-shaped working body.

Materials and Methods. In the process of theoretical studies of the bracket-shaped tillage working body for continuous surface tillage, there were used the methods of analysis, generalization and systematization, theoretical mechanics, mathematical statistics and modeling, probability theory, differential calculation, and the theory of interaction of working bodies with soil and their movement over the field surface.

Results. The analytical models for determining the pressure, traction resistance, the total force of the soil layer compression, the time of passage of the working body, the required power and the quantity of energy expended on compression of the soil layer depending on the speed of the working body movement are obtained. Graphic dependencies of the investigated parameters of the bracket-shaped tillage working body are presented. The dynamics of parameter changes is identified.

Discussion and Conclusion. The proposed mathematical models and the revealed regularities of changing the parameters of tilling the soil by the closed-cycle working body will make it possible to develop new effective working bodies and optimize the design, technological parameters and modes of their operation.

Keywords: tillage, bracket-shaped working body, modeling, traction resistance, stress concentration, power, head, compressive force of the soil layer

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Jabborov N.I., Dobrinov A.V., Saveluev A.P. Modeling of the Tillage Process by the Method of Stress Concentration in the Tilled Layer. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):175–191. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.175-191>

Введение

В последнее время в сельскохозяйственном производстве резко возрос интерес к поиску и разработке новых методов и способов, обеспечивающих снижение энергоемкости и повышение качества технологических процессов обработки почвы.

На агротехнические показатели и тяговое сопротивление почвообрабатывающих машин значительное влияние оказывают физико-механические свойства почвы (удельное сопротивление, влажность и твердость почвы, коэффициент трения почвы о сталь, абразивные свойства почвы), изменяющиеся в зависимости от погодных условий, севооборота культур, внесения в почву минеральных и органических удобрений и т. д. Эти вопросы достаточно широко изучены в работах многих авторов¹.

Значительное количество результатов теоретических и экспериментальных исследований ученых посвящено раскрытию новых закономерностей процессов обработки почвы различными рабочими органами и машинами [1–4]. При внедрении почвообрабатывающей техники в производство разрабатываются методы оценки эффективности функционирования в различных зонах с учетом ее работоспособности и надежности в процессе эксплуатации [5–7].

При этом обоснование конструктивных параметров новых способов обработки почвы и типов рабочих органов, принципиально отличающихся от традиционных приемов, применяемых на

практике, невозможно без раскрытия теоретических основ их взаимодействия с почвой с учетом ее изменяющихся свойств. Для этого необходима разработка модели процесса взаимодействия рабочих органов с почвой, обеспечивающая возможность определения и анализа агротехнических и энергетических показателей процесса обработки почвы и обоснования их конструктивно-технологических параметров.

Так, на основе применения теории деформации грунтов обрабатываемого материала авторами статьи был разработан оригинальный рабочий орган скобообразной формы, создающий во время движения сжатие внутренних капилляров почвенного пласта. При выходе из конусообразной скобы вследствие отсутствия сжимающей силы пласт почвы под действием давления сжатых внутрипочвенных газов разрушается (крошится), образуя при этом мелкокомковатую структуру [8].

В связи с этим физико-математическое моделирование предлагаемого способа обработки почвы с использованием скобообразного рабочего органа для создания и концентрации напряжения в обрабатываемом слое почвы составляет основу данного исследования.

Цель исследования – разработка математических моделей для определения и анализа показателей процесса обработки почвы рабочим органом скобообразной формы.

Обзор литературы

С целью достижения необходимых агротехнических и энергетических показателей работы для обеспечения

¹ Бурченко П. П. Механико-технологические основы почвообрабатывающих машин нового поколения. Рос. акад. с.-х. наук, Гос. науч. учреждение Всерос. науч.-исслед. ин-т механизации сел. хоз-ва (ГНУ ВИМ). М. : ВИМ, 2002. 211 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002151495> (дата обращения: 20.10.2022); Панов И. М., Ветохин В. И. Физические основы механики почв. Киев: Феникс, 2008. 266 с.; Синеоков Г. Н., Панов И. М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин. М. : Машиностроение, 1977. 328 с.

конкурентоспособности создаваемой техники при теоретическом и практическом обосновании параметров новых рабочих органов и почвообрабатывающих машин исходят из ряда требований, главными из которых являются степень крошения почвы, тяговое сопротивление, устойчивость хода рабочих органов по глубине, выровненность поверхности поля.

При обосновании основных подходов к проектированию почвообрабатывающих машин и в процессе разработки модели взаимодействия рабочих органов с почвой экспериментально подтверждено, что крошение почвенного пласта на лемешно-отвальной поверхности происходит за счет возникновения сил взаимодействия между элементами пласта с разным шагом [9].

При обосновании конструктивных особенностей и исследовании работы нового чизельного комбинированного агрегата, совмещающего за один проход по полю три технологические операции (глубокое рыхление, крошение верхнего слоя почвы и внесение удобрений), установлено, что рациональная конструкция рабочих органов и их комбинация позволяет снизить энергоемкость технологического процесса. Так, Г. Г. Масловым получена аналитическая зависимость для определения потребной мощности двигателя почвообрабатывающего агрегата [10].

Для обеспечения качественной обработки, снижения тягового сопротивления на дисковых рабочих органах с вогнутой стороны выполнены прорезы, с выступающими в направлении его вращения зубьями, которые также имеют вид непрерывной волнистой линии. Установлена форма вырезов между зубьями и число зубьев, обеспечивающих полное схождение с рабочего органа почвы, растительных остатков и исключаящих забивание вырезов [11].

С целью улучшения качества крошения почвы разработаны рабочие органы

с переменным углом резания. Выявлено, что лезвие с переменным углом резания увеличивает давление на почвенный пласт по сравнению с лезвием, имеющим постоянный угол резания. Подтверждено, что рабочие органы с переменным углом резания на 20–50 % лучше крошат обрабатываемый пласт, чем типовые [12].

И. М. Бартечев изучил вопросы ударного разрушения и активного оборота почвенного пласта при вспашке новым комбинированным рабочим органом, использование которого на плугах исключает необходимость в дополнительной обработке почвы, связанной с дроблением почвенных глыб и выравниванием поверхности пашни [13].

Также рассмотрен процесс крошения почвенного пласта под воздействием овалобразного рабочего органа. При этом разделению материала под воздействием лезвия предшествует процесс предварительного его сжатия до возникновения на его кромке разрушающего контактного напряжения. Пласт почвы при проходе через рабочий орган подвергается упруго-пластической деформации. В результате теоретических и практических исследований обоснованы конструктивно-технологические параметры рабочего органа [14].

На основе использования принципов бионики и упрочняющих технологий обоснованы конструктивно-технологические параметры ножа почвенной фрезы для крошения, рыхления, перемешивания, частичного оборачивания почвенного пласта, разрезания растительных и пожнивных остатков, уничтожения сорняков, при этом обеспечивается продолжительная сохранность геометрических параметров [15].

Для ротационных орудий с эллипсовидными дисками обоснованы рациональные значения технологических параметров ротационного орудия с эллипсовидными дисками. Установлено, что в пределах рабочих скоростей



почвообрабатывающий агрегат с эллипсоидными дисками обеспечивает выполнение агротехнических требований к поверхностной обработке почвы [16].

Экспериментальными исследованиями доказана эффективность расположения на стойке комбинированного рабочего органа двух элементов для глубокой и мелкой обработки почвы на одной стойке для послойной безотвальной обработки почвы в виде долота для глубокого рыхления и криволинейного рыхлителя для мелкой обработки почвы. Такое решение обеспечивает заданное качество крошения пласта [17].

Разработанный комбинированный рабочий орган для обработки междурядий посевов пропашных культур состоит из двух элементов: двухъярусного катка и Т-образной лапы. Их работа обеспечивает одновременные разнонаправленные действия на пласт почвы. При этом Т-образная лапа с углом крошения 12° оказывает на почву фронтальное воздействие. Экспериментально установлено, что применение такого рабочего органа снижает площадь испарения на 15–20 %, создает мульчирующий слой [18].

По результатам проведенных экспериментов для определения показателей крошения и рыхления суглинистой почвы были выявлены зависимости между коэффициентом крошения и удельной потенциальной энергией, накопленной суглинистой почвой. Доказано, что для суглинистой почвы, находящейся в состоянии физической спелости, крошение начинается при удельной потенциальной энергии 7 622 Па [19].

Исследованиями по определению прочностных характеристик почв ненарушенного строения, значения пределов прочности дерново-подзолистой почвы на сжатие и растяжение в зависимости от абсолютной влажности и количества растительных остатков, определено, что

наибольшим сопротивлением к сжатию по всем категориям сельскохозяйственных угодий характеризовались почвы супесчаного гранулометрического состава [20]. На основе метода проектирования рабочих органов для рыхления почвы с использованием деформации растяжения доказано, что сухие почвы обладают высокой прочностью при сжатии [21].

По результатам исследований влияния значений абсолютной влажности суглинистой почвы на модуль упругости первого рода получены пределы прочности почвы на растяжение и сжатие, коэффициент рыхления и другие характеристики почв².

Наиболее эффективным способом ударного разрушения почвенных глыб и в целом почвенного пласта является свободный удар – удар на лету по глыбам и пласту, оторванными от массива почвы, поднятыми над дном борозды и находящимися в воздухе, вращающимся ударником. Эффективность способа обоснована в процессе основной обработки почвы в зоне недостаточного и неустойчивого увлажнения с целью получения высокой степени крошения, снижения энергоемкости обработки [22].

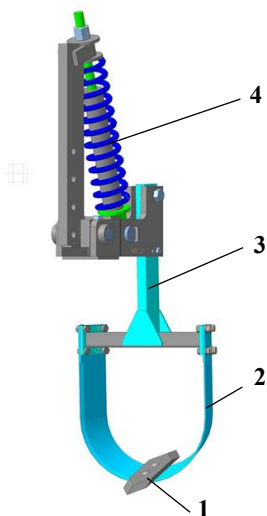
Динамический удар и вибрация почвообрабатывающего разработанного рабочего органа с энергонакопительно-передающим устройством оказывают значительное влияние на почвенный слой в виде дополнительной степени рыхления, а накопленная энергия удара обеспечивает снижение тягового сопротивления рабочего органа [23; 24].

Для оценки эффективности и выбора наиболее энергоэффективных почвообрабатывающих рабочих органов используют следующую систему критериев: удельное тяговое сопротивление активной фронтальной площади, коэффициент террадинамического сопротивления, основные показатели качества обработки почвы [25].

² Лобачевский Я. П., Старовойтов С. И. Физические аспекты суглинистой почвы. Брянск, 2015. 92 с. *Agricultural engineering* 179

Материалы и методы

Объектом исследований являлся скобообразный почвообрабатывающий рабочий орган (рис. 1) для сплошной поверхностной обработки различных типов почв на глубину до 20 см.



Р и с. 1. Общий вид скобообразного рабочего органа: 1 – наральныйник; 2 – скоба; 3 – стойка крепления скобы; 4 – предохранитель

F i g. 1. General view of the bracket-shaped working body: 1 – loosening paw; 2 – bracket; 3 – stand; 4 – safety mechanism

Рабочий орган состоит из скобы 2, боковая поверхность которой выполнена в виде половины усеченного конуса, центры его нижнего и верхнего оснований смещены друг относительно друга. В верхней части скоба 2 крепится к поперечной балке стойки 3. В нижней точке вогнутой боковой поверхности скобы 2 жестко крепится рыхлительная лапа 1. Рабочий орган крепится к раме посредством автоматического предохранителя 4.

В процессе движения пласт почвы, подрезанный передней рабочей кромкой скобы 2 и рыхлительной лапой 1 рабочего органа приподнимается и передвигается вдоль ее конусообразной части. Во время

движения он подвергается сжатию благодаря смещенному центру основания задней конусной части относительно передней рабочей части скобы 2. При выходе пласта из скобы из-за отсутствия сжимающей силы почва под действием давления сжатия начинает разрушаться или рассыпаться, т. е. происходит ее крошение.

В процессе исследования применяли методы анализа, обобщения и систематизации, теоретической механики, математической статистики и моделирования, теории вероятности, дифференциального исчисления, теорию взаимодействия рабочих органов с почвой и их движения по поверхности поля.

Результаты исследований

Анализ исследований показал, что применяемые в настоящее время почвообрабатывающие рабочие органы разрушают связи между отдельными структурными агрегатами почвы посредством упруго-пластической деформации. Почва деформируется вследствие резания, сжатия, сдвига, растягивания и кручения. Сопротивление почвы и ее рыхление при деформации сжатия практически не исследовано, при этом между удельным сопротивлением почвы и ее твердостью, пластичностью, упругостью, вязкостью и хрупкостью существует сильная корреляционная связь³ [26].

В процессе работы почвообрабатывающего рабочего органа для поверхностной обработки почвы и уничтожения сорных растений происходит концентрация напряжений почвенного пласта в зоне его контакта с внутренней боковой поверхностью скобы 2 и ее вертикальной частью (рис. 1). При этом с увеличением скорости движения интенсивность деформации почвы в обрабатываемом пласте повышается.

Математическая модель для определения силы R , сжимающей почвенный

³ Хайлис Г. А. Механико-технологические свойства сельскохозяйственных материалов. Луцк : ЛГТУ, 1998. 268 с.

пласт в зависимости от рабочей скорости перемещения скобообразного рабочего органа и силы сопротивления почвы деформации P , может быть описана следующим выражением [14]:

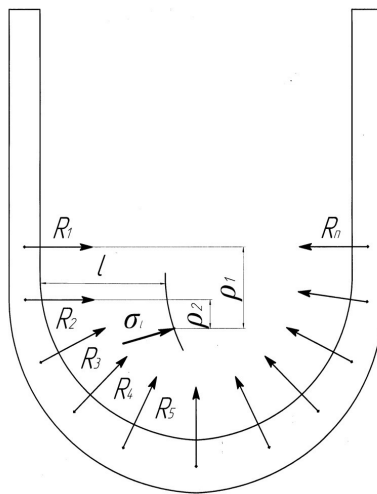
$$R = \frac{2m}{C_1} \left[\frac{8A^2 l_d \cos \beta}{\left(\sqrt{V_p^2 + 4Al_d \cos \alpha} + V_p \right)} - \frac{2AV_p}{\sqrt{V_p^2 + 4Al_d \cos \alpha} - V_p} - \frac{P}{2m} \right], \quad (1)$$

где m – масса почвенного пласта, кг; l_d – ширина зоны деформации почвенного пласта, мм; β – угол между боковыми поверхностями вертикальной части скобы, град.; V_p – скорость перемещения рабочего органа, м/с; α – угол крошения рабочего органа, град.; P – сила сопротивления почвы деформации, кН; $A = b_k(h_1 + \varepsilon b_1 - \varepsilon b_k)$ – коэффициент; b_k – ширина проема при выходе пласта из вертикальной части скобы рабочего органа, мм; h_1 – толщина слоя почвы, поступающего в рабочий орган, мм; b_1 – ширина пласта поступающего в рабочий орган, мм; ε – коэффициент вертикального расширения, зависящий от типа почвы; $C_1 = \frac{\sin \beta - f \cos \beta}{\cos \beta + f \sin \beta}$ – коэффициент; f – коэффициент трения почвы по стали.

Из формулы (1) следует, что на рыхление почвы методом повышения интенсивности ее деформации и концентрации напряжения влияют следующие показатели: твердость и плотность почвы, площадь фронтальной проекции рабочего органа, углы резания и крошения почвы, скорость перемещения рабочего органа, траектория движения почвы, динамическое давление, глубина обработки почвы.

Напряжение в почвенном пласте при действии группы сил по профилю скобы рабочего органа можно представить как сумму напряжений от действия

отдельных сил, если их рассматривать как дискретные величины (рис. 2).



Р и с. 2. Схема возникающих сил напряжения почвенного пласта при движении скобы почвообрабатывающего рабочего органа
F i g. 2. Scheme of the soil layer stress from the moving of the bracket-shaped soil tillage working body

В этом случае суммарная сила напряжения в почвенном пласте может быть определена из выражения:

$$\begin{aligned} \sigma_l &= \frac{1}{l^2} (R_1 \cdot f_1 + R_2 \cdot f_2 + \dots + R_n \cdot f_n) = \\ &= \frac{1}{l^2} \sum_{i=1}^n R_i \cdot f_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где $f = \frac{\rho}{l}$ – коэффициент; ρ – расстояние от точки приложения i – той силы до центра концентрации напряжений, м; l – глубина формирования сил напряжений в почвенном пласте, м.

Скобообразный почвообрабатывающий рабочий орган, в отличие от типовых рабочих органов, которые разрушают связи между отдельными структурными агрегатами почвы, позволяет разрыхлить и раскрошить почву сжатием при условии нарастания интенсивности ее

деформации, создавая концентрацию напряжений.

В этой связи суммарная сила сжатия пласта почвы зависит от ширины l_d зоны деформации почвенного пласта, твердости почвы, скорости перемещения, площади фронтальной проекции и обтекаемости рабочего органа.

В общем случае суммарная сила сжатия почвенного пласта рабочим органом может быть представлена следующей зависимостью:

$$F_t = f(T, V_w, F), \quad (3)$$

где T – твердость почвенного пласта, кг/см²; V_p – скорость перемещения рабочего органа, м/с; F – площадь фронтальной проекции рабочего органа, см².

Площадь фронтальной проекции F рабочего органа зависит от ширины l_d зоны деформации почвенного пласта и глубины обработки почвы. Чем меньше глубина обработки h_{sm} и ширина l_d зоны деформации почвы, тем меньше значение F .

В формуле (3) при фиксированном значении глубины обработки значение $F = \text{const}$, а твердость T почвенного пласта и скорость V_p перемещения рабочего органа являются случайными величинами в вероятностно-статистическом смысле.

Вместе с тем при функционировании рабочего органа только скорость его перемещения V_p является управляемым параметром.

С учетом выражения (3) суммарная сила сжатия почвенного пласта скобообразным рабочим органом может быть рассчитана следующей зависимостью:

$$F_t^\Sigma = 0,5C_p K_d T V_w^2 F, \quad (4)$$

где $C_p = 9,81$ – поправочный коэффициент [25]; K_d – коэффициент террадинамического сопротивления рабочего органа, учитывающий обтекаемость

рабочих органов и зависящий от формы поверхности рабочего органа и твердости почвы.

В формуле (4) произведение $T V_p^2$ представляет скорость напора P_d (или динамическое давление) на почвообрабатывающий рабочий орган. Обозначая $P_d = 0,5 T V_p^2$ и подставив в выражение (3) примет вид:

$$F_t^\Sigma = 0,5 C_p K_d F P_d. \quad (5)$$

С учетом выражения (2) при фиксированных значениях твердости почвенного пласта T и площади фронтальной проекции F рабочего органа суммарная сила сжатия почвенного пласта рабочим органом представляет собой произвольную дифференцируемую функцию $F_t^\Sigma = f(P_d)$.

Так как твердость почвы T и скорость V_p перемещения рабочего органа являются непрерывными случайными величинами, то скорость напора P_d также имеет вероятностный характер.

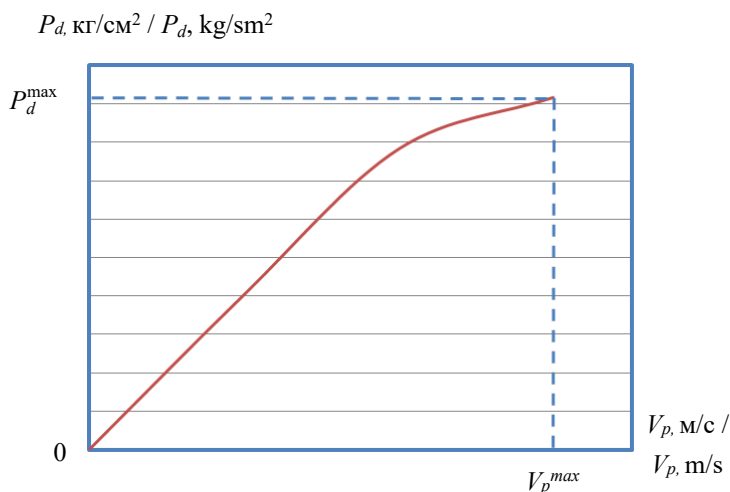
Детерминированная функция $P_d = f(V_p)$ представляет собой кривую второго порядка типа (при $x \geq 0$, рис. 3):

$$y = bx^2, \quad (6)$$

где $b = T$ – угловой коэффициент, равный значению твердости почвы на обрабатываемом агрофоне; $x = V_p$ – аргумент функции (6); P_d^{\max} – максимальное значение скорости напора (или динамического давления (рис. 3), кг/см²; V_p^{\max} – максимальное значение скорости перемещения рабочего органа (рис. 3), м/с.

С учетом выражений (4) и (6) математическое ожидание суммарной силы сжатия почвенного пласта рабочим органом можно определить с помощью соотношения:

$$M(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \varphi(x) dx, \quad (7)$$



Р и с. 3. Схема к определению скорости напора P_d (динамического давления) на рабочий орган
 F i g. 3. Scheme for determining the speed of pressure P_d on the working body

где $\varphi(x) = (\sigma_x \sqrt{2\pi})^{-1} \exp \left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma_x^2} \right]$,
 $f(x) = bV_p^2$ – плотность распределения вероятностей случайной величины x ;
 m , σ_x – соответственно математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение величины x .

С учетом выражений (6) и (7) получим:

$$M(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\varphi(x) dx = \frac{1}{\sigma_{V_p} \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} (bV_p^2) e^{-\frac{(V_p - \bar{V}_p)^2}{2\sigma_{V_p}^2}} dV_p. \quad (8)$$

Решая интегральное выражение (8), окончательно получим формулу для определения математического ожидания (или среднего значения) суммарной силы сжатия почвенного пласта рабочим органом:

$$F_t^\Sigma = 0,5C_p K_d F P_d = 0,5C_p K_d F \left[bV_p^2 (1 + v_{V_p}^2) \right], \quad (9)$$

где F – площадь фронтальной проекции
Agricultural engineering

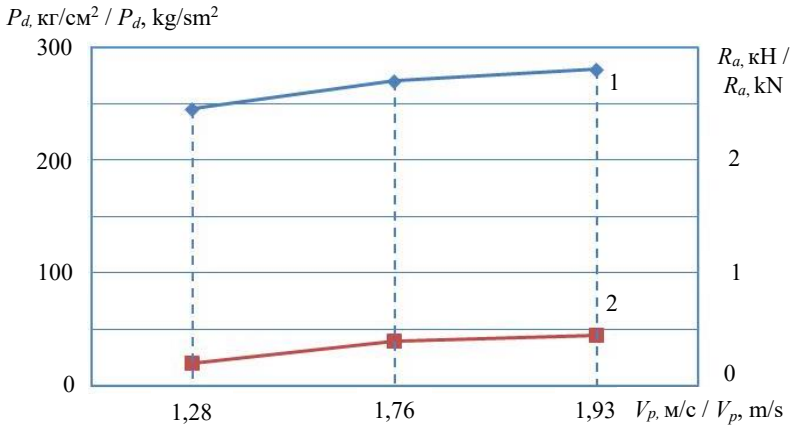
рабочего органа, см²; V_p – скорость перемещения рабочего органа, м/с; $v_{V_p} = \frac{\sigma_{V_p}}{\bar{V}_p}$ –

коэффициент вариации скорости перемещения рабочего органа; σ_{V_p} – среднее квадратическое отклонение скорости перемещения рабочего органа, м/с; \bar{V}_p – среднее значение скорости перемещения рабочего органа, м/с.

На основании проведения теоретических расчетов были получены зависимости скорости напора, тягового сопротивления и суммарной силы сжатия почвенного пласта от скорости перемещения рабочего органа.

На рисунке 4 представлены графические зависимости тягового сопротивления R_a рабочего органа и скорости напора P_d на рабочий орган от скорости его перемещения.

Анализ полученных результатов исследований показывал, что с повышением скорости перемещения рабочего органа от 1,28 до 1,93 м/с скорость напора P_d на рабочий орган увеличивается с 247 до 276 кг/см², при этом тяговое сопротивление рабочего органа R_a возрастает от 2,47 до 2,7 кН.



Р и с. 4. Зависимости тягового сопротивления R_a (кривая 1) и скорости напора P_d (кривая 2) от скорости V_p перемещения рабочего органа (агрофон – вспаханное поле после зерновых, глубина обработки почвы $h = 20$ см)

F i g. 4. Dependencies of the traction resistance R_a (curve 1) and the pressure velocity P_d (curve 2) on the working body on the speed of its movement (agrobground – a plowed field after harvesting grains, tillage depth $h = 20$ cm)

Согласно полученным данным были выявлены закономерности изменения динамического давления P_d и тягового сопротивления R_a рабочего органа от скорости его перемещения, которые описываются следующими моделями:

$$P_d = 0,094944V_p^2 + 0,006747V_p - 0,01853, \quad (10)$$

$$R_a = 4,20750V_p^2 - 36,24550V_p + 324,67360. \quad (11)$$

С использованием формулы (9) была установлена суммарная сила сжатия почвенного пласта рабочим органом при различных скоростях его перемещения и средней глубине обработки почвы 20 см.

На рисунке 5 показана зависимость суммарной силы сжатия F_t почвенного пласта рабочим органом от его скорости перемещения.

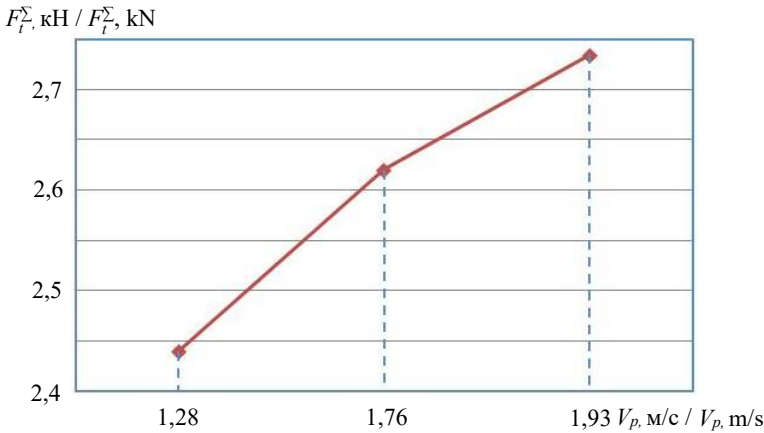
Полученные данные позволили установить закономерность изменения суммарной силы сжатия почвенного пласта рабочим органом при скорости его перемещения V_p от 1,28 до 1,93 м/с, которая описывается следующей зависимостью:

$$\bar{F}_t^{\Sigma} = 34,99390V_p^2 - 277,69185V_p + 2980,36561. \quad (12)$$

С повышением скоростного режима работы рабочего органа наблюдается увеличение суммарной силы сжатия почвенного пласта рабочим органом от 2,44 до 2,74 кН.

Установлена разная динамика изменения тягового сопротивления R_a рабочего органа, динамического давления P_d и суммарной силы F_t сжатия почвенного пласта рабочим органом при повышении скорости V_p его перемещения. Так, при увеличении скорости от 1,28 до 1,93 м/с суммарная сила F_t сжатия почвенного пласта рабочим органом возрастает на 11–12 %, а скорость напора P_d повышается на 127,3 %.

Сила сжатия почвенного пласта рабочим органом значительно зависит от твердости почвы, площади фронтальной проекции рабочего органа и его обтекаемости, скорости его перемещения и динамического давления на него.



Р и с. 5. Зависимость среднего значения суммарной силы сжатия почвенного пласта F_t^Σ рабочим органом от скорости его перемещения (агрофон – вспаханное поле после зерновых, глубина обработки почвы $h = 20$ см)

F i g. 5. Dependence of the average value of the total force of compression of the soil layer F_t^Σ by the working body on its speed of movement (agrobackground – a plowed field after harvesting grains, the depth of tillage $h = 20$ cm)

Время прохождения почвенного пласта через скобу рабочего органа можно определить из формулы:

$$t_{sl} = \frac{b_{sl}}{V_p}, \quad (13)$$

где b_{sl} – ширина зоны деформации почвенного пласта (равна ширине скобы рабочего органа), м; V_p скорость перемещения рабочего органа, м/с.

В пределах изменения скорости перемещения предлагаемого рабочего органа от 1,28 до 1,93 м/с, время прохождения почвенного пласта варьирует в пределах $t_{sl} = 0,0414 - 0,0625$ с.

Потребная мощность на сжатие почвенного пласта рабочим органом определяется из выражения:

$$N_p = 10^{-3} F_t^k \frac{b_{sl}}{t_{sl}}, \quad (14)$$

где F_t^k – суммарная сила сжатия почвенного пласта скобой рабочего органа, Н.

На рисунке 6 представлена зависимость потребной мощности N_p на сжатие почвенного пласта рабочим органом от скорости его перемещения.

При повышении скорости V_p перемещения рабочего органа от 1,28 до 1,93 м/с мощность затрачиваемая на сжатие почвенного пласта увеличивается от 3,12 до 5,3 кВт.

Выявлена закономерность изменения потребной мощности N_p на сжатие почвенного пласта рабочим органом от скорости его перемещения, которая описывается зависимостью:

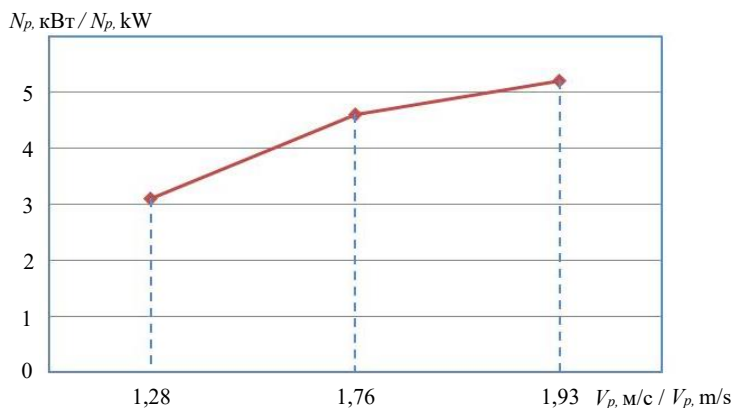
$$N_p = 1,22360V_p^2 - 0,57393V_p + 1,84987. \quad (15)$$

Зависимость справедлива в диапазоне изменения скорости перемещения рабочего органа от 1,28 до 1,93 м/с при глубине обработки почвы 20 см.

Энергия J_p , необходимая для сжатия почвенного пласта рабочим органом, определяется из формулы:

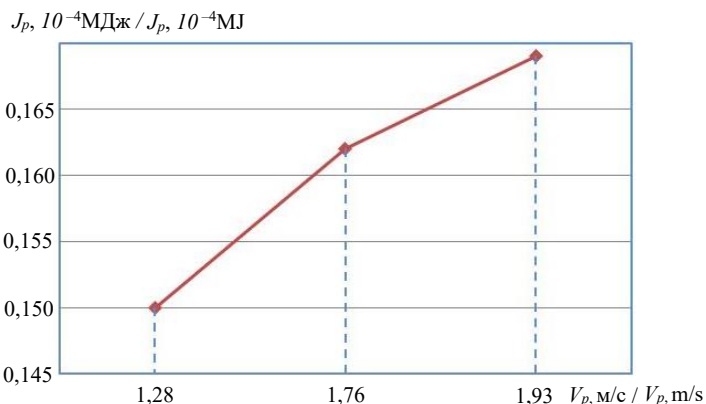
$$J_p = 10^{-3} F_t^k V_p \frac{b_{sl}}{t_{sl}}. \quad (16)$$

На рисунке 7 представлена зависимость изменения энергии от скорости перемещения рабочего органа при сжатии почвенного пласта.



Р и с. 6. Зависимость потребляемой мощности N_p на сжатие почвенного пласта рабочим органом от скорости его перемещения

F i g. 6. Dependence of the required power N_p spent on the compression of the soil layer by the working body on the speed of its movement



Р и с. 7. Зависимость изменения энергии J_p от скорости перемещения рабочего органа при сжатии почвенного пласта

F i g. 7. Dependence of the amount of energy J_p , spent on the compression of the soil layer by the working body on the speed of its movement

В интервале изменения скорости перемещения рабочего органа от 1,28 до 1,93 м/с количество энергии J_p , затрачиваемое на сжатие почвенного пласта рабочим органом, увеличивается от $0,150 \cdot 10^{-4}$ до $0,169 \cdot 10^{-4}$ МДж.

На основании выявленной зависимости получено математическое выражение изменения количества энергии от скорости перемещения рабочего органа при сжатии почвенного пласта:

$$J_p = (0,024887V_p^2 - 0,050666V_p + 0,17407) \cdot 10^{-4}. \quad (17)$$

Зависимость справедлива в диапазоне изменения скорости перемещения рабочего органа от 1,28 до 1,93 м/с при глубине обработки почвы 20 см.

Анализ представленных математических моделей и выявленных закономерностей разработанного скобообразного рабочего органа позволяет

заклЮчить, что обработка почвы становится эффективной при концентрации напряжений в обрабатываемом пласте с рабочими органами замкнутого контура с определенными конструктивными параметрами.

Обсуждение и заключение

Разработанные математические модели расширяют теоретические и практические знания о процессах обработки почвы методом концентрации напряжений в обрабатываемом пласте.

Предложенные модели позволяют определить напряжение в почвенном пласте от действия группы сил в профиле скобы рабочего органа, среднее значение суммарной силы сжатия почвенного пласта, время прохождения почвенного

пласта через рабочий орган, требуемую мощность сжатия почвенного пласта и количество энергии, затрачиваемой на сжатие почвенного пласта рабочим органом.

Установлены закономерности изменения динамического давления, тягового сопротивления, суммарной силы, потребной мощности и энергии сжатия почвенного пласта от скорости перемещения рабочего органа.

Описанные математические модели и выявленные закономерности изменения параметров процесса обработки почвы рабочим органом замкнутого контура в дальнейшем позволят разработать новые эффективные рабочие органы и оптимизировать конструктивно-технологические параметры и режимы их работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Принципы создания и испытания конкурентоспособной почвообрабатывающей техники / Н. К. Мазитов [и др.] // Техніка і технології АПК. Киев. 2014. № 4 (55). С.14–19.
2. Ветохин В. И. Модель крошения почвы под действием клина // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1994. № 10. С. 25–27. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=34175833> (дата обращения: 29.12.2022).
3. Ресурсосберегающая техника для возделывания зерновых культур / В. В. Бледных [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. 2007. № 3. С. 19–22. EDN: [IATTWV](#)
4. Валиев А. Р., Мухамадьяров Ф. Ф., Зиганшин Б. Г. Обоснование конструктивно-технологических параметров нового дискового культиватора // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 1. С. 58–61. EDN: [XTDNZB](#)
5. Мударисов С. Г. Моделирование процесса взаимодействия рабочих органов с почвой // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2005. № 7. С. 27–30. EDN: [ROJUVN](#)
6. Рахимов З. С., Рахимов И. Р., Файрушин, Д. З. Универсальные орудия для безотвальной обработки почвы // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2004. № 5. С. 10–11. EDN: [UUNCHX](#)
7. Итоги многолетних сравнительных испытаний и внедрения новой техники для обработки почвы и посева / Н. К. Мазитов [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30, № 8. С. 91–93. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/itogi-mnogoletnih-sravnitelnyh-ispytaniy-i-vnedreniya-novoy-tehniki-dlya-obrabotki-pochvy-i-poseva/viewer> (дата обращения: 30.12.2022).
8. Рабочий орган для рыхления почвы : патент 2453087 Российская Федерация / Джаббаров Н. И., Добринов А. В. [и др.]. № 2010 128 168; заявл. 07.07.2010; опубл. 20.06.2012. 6 с.
9. Бледных В. В., Свечников П. Г. Крошение почвы корпусом отвального плуга // Вестник Челябинской государственной агроинженерной академии. 2013. Т. 65. С. 68–73. EDN: [RSCPQV](#)
10. Маслов Г. Г. Конструктивные особенности нового чизельного комбинированного агрегата и расчет потребной мощности двигателя на его работу // Политематический сетевой электронный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 109. С. 195–207. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/konstruktivnyye-osobennosti-novogo-chizelnogo-kombinirovannogo-agregata-i-raschet-potrebnoy-moschnosti-dvigatelya-na-ego-rabotu/viewer> (дата обращения: 30.12.2022).

11. Шовкопляс А. В. Теоретическое обоснование формы рабочего органа // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 4 (14). С. 90–96. EDN: [VJKDIN](#)
12. Бледных В. В., Свечников П. Г., Трояновская И. П. Расчетная схема технологического процесса крошения почвы почвообрабатывающими рабочими органами // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 3. С. 22–26. EDN: [WYOOWX](#)
13. Бартенев И. М. Ударное разрушение и активный оборот почвенного пласта при вспашке // Лесотехнический журнал. 2013. № 1 (9). С. 98–110. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/udarnoe-razrushenie-i-aktivnyy-oborot-pochvennogo-plasta-pri-vspashke/viewer> (дата обращения: 23.12.2022).
14. Джабборов Н. И., Сафаров М., Миракилов Дж. Разработка овалообразного рабочего органа и его параметров для поверхностной обработки почвы // Доклады Таджикской академии сельскохозяйственных наук. 2011. № 1 (27). С. 48–52. EDN: [RPCIQB](#)
15. Шовкопляс А. В. Обоснование конструктивно-технологических параметров энергоэффективного ножа почвенной фрезы // Научный вестник государственного образовательного учреждения Луганской Народной Республики «Луганский национальный аграрный университет». 2020. № 8-3. С. 22–26. EDN: [NHWOLG](#)
16. Результаты полевых исследований почвообрабатывающего орудия с эллипсоидными дисками / Ф. Ф. Яруллин [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Т. 14. № 2 (53). С. 123–127. https://doi.org/10.12737/article_5d3e17361cada0.88786874
17. Разработка комбинированного рабочего органа для послонной безотвальной обработки почвы / И. В. Божко [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 8. С. 3–6. EDN: [XSNUWN](#)
18. Санжаровская М. И. Что лучше раскрошит комок почвы // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2009. № 1. С. 236. EDN: [JXBSTJ](#)
19. Старовойтов С. И., Старовойтова Н. П., Чемисов Н. Н. О крошении суглинистой почвы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 3. С. 30–34. EDN: [SIWANX](#)
20. Алдошин Н. В., Васильев А. С., Голубев В. В. Исследование пределов прочности почвы на сжатие и растяжение // Агроинженерия. 2020. № 3 (97). С. 27–33. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-3-27-33>
21. Щириков В. Н., Пархоменко Г. Г. Проектирование рабочих органов для рыхления почвы с использованием деформации растяжения // Вестник АПК Ставрополя. 2016. № 3 (23). С. 57–62. EDN: [XCCEZD](#)
22. Бартенев И. М. Выбор вида деформации и типа деформатора обработки сухих твердых почв // Лесотехнический журнал. 2018. № 3 (31). С. 162–170. https://doi.org/10.12737/article_5b97a15e471834.37136442
23. Dzhaborov N., Dobrinov A., Sergeev A. Vibration Parameters and Indicators of a Dynamic Tillage Tool // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 937 (2021) 032048, AFE 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032048>
24. Рабочий орган для рыхления почвы : патент 2755317 Российская Федерация / Джабборов Н. И., Добринов А. В. [и др.]. № 2021106319; заявл. 11.03.2021 ; опубл. 15.09.2021. 7 с.
25. Dzhaborov N. I., Dobrinov A. V., Sergeev A. V. The Basics for Choosing Energy-Efficient Working Tools of Tillage Machines // Nexo Revista Científica. 2022. Vol. 35, Núm. 02 P. 498–516. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i02.14626>
26. Дьяков В. П. Зависимость сопротивления почвы от скорости сжатия // Техника в сельском хозяйстве. 2011. № 2. С. 9–11. EDN: [WNRQBP](#)

Поступила 09.01.2023; одобрена после рецензирования 06.03.2023; принята к публикации 16.03.2023

Об авторах:

Джабборов Нозим Исмоилович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного

агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Фильтровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, nozimjon-59@mail.ru

Добринов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела агроэкологии в растениеводстве Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Фильтровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

Савельев Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: GPF-8674-2022, tbsap52@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Н. И. Джабборов – научное руководство; формулирование концепции решения; постановка задачи; проведение исследований; анализ результатов исследования.

А. В. Добринов – формирование структуры статьи; анализ литературных данных; обработка данных; разработка и доработка решения.

А. П. Савельев – определение методологии исследования; критический анализ результатов исследования; составление выводов и заключения; доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mazytov N., Lobachevskyy Ya., Sharafyev L., Sadriyev F., Bahmanov R., Rakhimov I., et al. Principles of Construction and Testing of Competitive Tillage Equipment. *Tekhnika i tekhnologii APK*. 2014;(4):14–19. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Vetokhin V.I. [Model of Soil Crumbling Under the Action of a Wedge]. *Traktory i sel'skokhozyaistvennyye mashiny*. 1994;(10):25–27. (In Russ.)
3. Blednykh V.V., Mazitov N.K., Rakhimov R.S., et al. Resource-Sparing Technical Means for Cultivation of Grain Crops. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve*. 2007;(3):19–22. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: IATTWV
4. Valiev A.R., Muhamadyarov F.F., Ziganshin B.G. Substantiation of Constructive and Technological Parameters of a New Disc Harrow. *Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka*. 2017;(1):58–61. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: XTDNZB
5. Mudarisov S.G. [Modeling the Process of Interaction of Working Bodies with Soil]. *Traktory i sel'skokhozyaistvennyye mashiny*. 2005;(7):27–30. (In Russ.) EDN: ROJUVN
6. Rakhimov Z.S., Rakhimov I.R., Fayrushin D.Z. [Universal Tools for Non-Moldboard Tillage]. *Traktory i sel'skokhozyaistvennyye mashiny*. 2004;(5):10–11. (In Russ.) EDN: UUHCHX
7. Mazitov N.K., Sakhapov R.L., Lobachevski Y.P., et al. Results of Long-Term Comparative Tests of New Equipment for Soil Cultivation and Sowing. *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2016;30(8):91–93. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/itogi-mnogoletnih-sravnitelnyh-ispytaniy-i-vnedreniya-novoy-tehniki-dlya-obrabotki-pochvy-i-poseva/viewer> (accessed 30.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Dzhaborov N.I., Dobrinov A.V., et al. [Working Body for Loosening the Soil]. Patent 2,453,087 Russian Federation. 2012 June 20. (In Russ.)
9. Blednykh V.V., Svechnikov P.G. [Soil Crumbling by the Body of a Moldboard Plow]. *Bulletin of the Chelyabinsk State Agroengineering Academy*. 2013; 65:68–73. (In Russ.) EDN: RSCPQV

10. Maslov G.G. Design Features of the New Chisel Combined and Calculation Needs of the Engine Power at His Work. *Nauchnyi zhurnal KubGAU*. 2015;(109):195–207. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2015/05/pdf/13.pdf> (accessed 30.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
11. Shovkoplyas A.V. [Theoretical Substantiation of the Form of the Working Body]. *Innovatsii v sel'skom khozyaistve*. 2015;(4):90–96. (In Russ.) EDN: **VJKDIN**
12. Blednykh V.V., Svechnikov P.G., Troyanovskaya I.P. Calculation Model of Technological Process of Soil Crumbling by Means of Tillage Working Organs. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016;83(3):22–26. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66132>
13. Bartenev I.M. [Impact Destruction and Active Turnover of the Soil Layer during Plowing]. *Forestry Engineering Journal*. 2013;(9):98–110. Available at: http://lestehjournal.ru/sites/default/files/journal_pdf/098-110.pdf (accessed 23.12.2022). (In Russ.)
14. Jabborov N., Safarov M., Mirakilov J. Basis of Parameters of the Working Organ of Combined Machine Km-2.4 for Soil Cultivating. *Doklady Tadzhijskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*. 2011;(1):48–52. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **RPCIQB**
15. Shovkoplyas A.V. Justification of Design and Technological Parameters of an Energy-Efficient Soil Cutter Knife. *Nauchnyi vestnik GOU LNR "Luganskii natsional'nyi agrarnyi universitet"*. 2020;3(8):22–26. Available at: <http://lnau.su/wp-content/uploads/2020/12/vestnik-gou-lnr-lnau-№8-tom-3-2020.pdf> (accessed 23.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
16. Yarullin F.F., Ibyatov R.I., Yakhin S.M., Gaynutdinov R.K. Results of Field Studies of Soil-Tillage Tools with Ellipsoid Disks. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2019;14(2):123–127. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.12737/article_5d3e17361cada0.88786874
17. Bozhko I.V., Parkhomenko G.G., Gromakov A.V., Kambulov S.I., Rykov V.B. Development of a Combined Working Body for Layer-By-Layer Non-moldboard Tillage. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016;83(8):3–6. Available at: <https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/66172/pdf> (accessed 23.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
18. Sanzharovskaya M.I. [What is Better to Crumble a Lump of Soil]. *Engineering and Technical Support of the APK*. 2009;(1):236. (In Russ.) EDN: **JXBSTJ**
19. Starovoytov S.I., Starovoytova N.P., Chemisov N.N. About Crumbling of the Loamy Soil. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2014;(3):30–34. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **SIWANX**
20. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Golubev V.V. Studies on Compressive and Tensile Strength of the Sod-Podzolic Soil. *Agricultural Engineering*. 2020;(3):27–33. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-3-27-33>
21. Shchirov V.N., Parhomenko G.G. Designing of the of Working Bodies for Loosening Soil Using the Deformation Tensile. *Agricultural Bulletin of Stavropol Region*. 2016;(3):57–62. Available at: <http://www.vapk26.ru/journals/23.pdf> (accessed 23.12.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
22. Bartenev I.M. The Choice of the Type of Deformation and the Type of Deformer Processing Dry Solids. 2019;8(3):162–170. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.12737/article_5b97a15e471834.37136442
23. Dzhabborov N., Dobrinov A., Sergeev A. Vibration Parameters and Indicators of a Dynamic Tillage Tool. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;937:032048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/3/032048>
24. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V., et al. [Working Body for Loosening the Soil]. Patent 2,755,317 Russian Federation. 2021 September 15. 7 p. (In Russ.)
25. Dzhabborov N.I., Dobrinov A.V., Sergeev A.V. The Basics for Choosing Energy-Efficient Working Tools of Tillage Machines. *Nexo Revista Cientifica*. 2022;35(02):498–516. <https://doi.org/10.5377/nexo.v35i02.14626>
26. Dyakov V.P. Dependence of Soil Resistance on the Rate of Compression. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve*. 2011;(2):9–11. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: **WNRQBP**

Submitted 09.01.2023; revised 06.03.2023; accepted 16.03.2023

*About the authors:*

Nozim I. Dzhabborov, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Leading Researcher, Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8910-2625>, Researcher ID: A-7780-2019, nozimjon-59@mail.ru

Aleksandr V. Dobrinov, Cand.Sci. (Engr.), Associate Professor, Senior Researcher, Department of Agroecology in Crop Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3242-1235>, Researcher ID: AAC-9655-2020, a.v.dobrinov@yandex.ru

Anatoliy P. Saveluev, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Professor of the Chair of Life Safety, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0361-0827>, Researcher ID: GPF-8674-2022, tbsap52@mail.ru

Author contribution:

N. I. Jabborov – scientific guidance; formulation of the concept of solution; problem statement; research; analysis of research results.

A. V. Dobrinov – developing the structure of the article; analyzing literature data; data processing; developing and improving the solution.

A. P. Saveluev – determination of the research methodology; critical analysis of the research results; drawing up the conclusions; finalizing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.