



Обоснование параметров рыхлителя почвообрабатывающей машины стратификатора

Ю. Н. Сыромятников

*Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства имени Петра Василенко*

(г. Харьков, Украина)

gara176@khntusg.info

Введение. Получение безвредных для организма человека продуктов питания требует отказа от химических средств контроля сорняков при выращивании сельскохозяйственных культур. Почвообрабатывающая машина стратификатор оптимизирует физико-механическое состояние обрабатываемого слоя почвы, при этом сорняки вычесыванием извлекаются из почвы вместе с целевой корневой системой и укладываются на поверхность, где они высушиваются под воздействием климатических факторов. Порядка 30 % от общих затрат энергии в процессе работы машины расходуется на привод ротора, поэтому она неудовлетворительно работает на плотных почвах.

Материалы и методы. Почва рассматривалась как упруго-пластическая среда. Принималась во внимание модель обобщенного закона Гука и один из вариантов теории пластического течения. Для упрощения вычислений использовались сведения из экспериментальных исследований о положении в пространстве поверхности разрушения почвы. Определялась интенсивность напряжений полипластических деформаций слоя почвы. Для численного решения задачи использовался метод Рунге.

Результаты исследования. В связи с указанными недостатками параметры рыхлителя обоснованы с учетом уменьшения крутящего момента привода ротора. В результате решения задачи методом вариационного исчисления определена геометрическая форма рыхлителя ротора. Энергетические показатели работы секции почвообрабатывающей машины оценивались крутящим моментом привода ротора рыхлительно-сепарирующего устройства. Крутящий момент привода ротора определялся для рыхлителей с ровным, выпуклым, вогнутым и обоснованным в результате проведения теоретических исследований профилем.

Обсуждение и заключение. Обоснованный профиль обеспечивает наилучшие условия для транспортирования почвы в начальный момент вхождения рыхлителя в землю и минимальные затраты энергии на его привод.

Ключевые слова: обработка почвы, ротор почвообрабатывающей машины, рыхлитель ротора, рыхлительно-сепарирующая машина, сепарирующая решетка, слой почвы, частота вращения, пожнивные остатки, угол наклона, условия движения

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сыромятников, Ю. Н. Обоснование параметров рыхлителя почвообрабатывающей машины стратификатора / Ю. Н. Сыромятников. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202102.257-273 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 2. – С. 257–273.



Substantiation of the Parameters of a Soil Tillage Machine Ripper

Yu. N. Syromyatnikov

*Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University
of Agriculture (Kharkiv, Ukraine)*

gara176@khntusg.info

Introduction. Production of safe food requires the avoidance of using chemical means to bring weeds under control in cultivating crops. Existing tillage loosening and separating machine PRSM-5 Dokuchaevskaya optimizes the physical and mechanical state of the cultivated soil layer, while the weeds are carefully removed from the soil by combing out together with the whole weed root system and laid on the surface, where they dry up under the influence of climatic factors. During the operation of the tillage machine, about 30% of the total energy consumption is spent on the rotor drive. Therefore, this machine is not working satisfactorily in firm soils.

Materials and Methods. The soil was considered as an elastic-plastic medium. The generalized Hooke's law model and a variant of the plastic flow theory were taken into account. To simplify the calculations, there was used the experimental study information on the position in space of the soil deformation surface. The intensity of stresses of polyplastic deformations of the soil layer was determined. For the numerical solution of the problem, the Ritz method was used.

Results. In connection with the indicated disadvantages, the parameters of the rotor ripper are justified taking into account the reduction in energy consumption for its drive. As a result of solving the problem by the Ritz method, the geometric shape of the rotor ripper was determined. The energy performance of the section of the tillage machine was evaluated by the torque of the rotor drive of the loosening-separating device. The rotor drive torque was determined for rippers with flat, convex, and concave profiles and for the profile substantiated during the study.

Discussion and Conclusion. The profile substantiated during the study provides the best conditions for transporting the soil at the initial moment of the rotor entry into the soil and the minimum energy consumption for its drive.

Keywords: tillage, rotor of a tillage machine, rotor ripper, loosening-separating machine, separating grate, soil layer, rotation frequency, crop residues, inclination angle, driving conditions

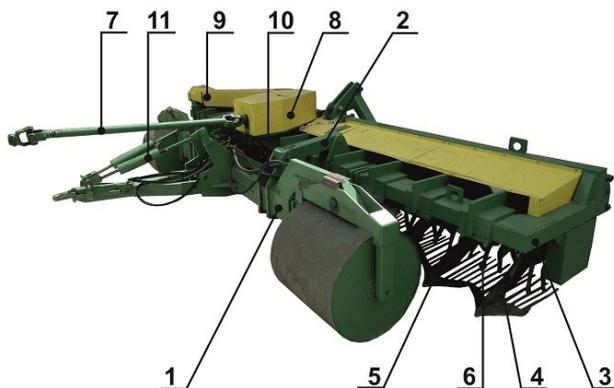
Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

For citation: Syromyatnikov Yu.N. Substantiation of the Parameters of a Soil Tillage Machine Ripper. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(2):257-273. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202102.257-273>

Введение

Механическая обработка почвы сельскохозяйственными машинами и орудиями ориентирована на улучшение условий роста и развития растений [1]. Современные мировые требования получения безвредных для организма человека продуктов питания требуют отказа от химических средств контроля за сорняками при выращивании сельскохозяйственных культур.

Почвообрабатывающая машина стратификатор (рис. 1) оптимизирует физико-механическое состояние обрабатываемого слоя почвы на глубине до 18 см [2–4], является прицепным универсальным агрегатом для выполнения предпосевной и основной поверхностной обработки почвы, при которой сорняки бережно извлекаются вычесыванием вместе с цельной корневой системой и укладываются на поверхность,



Р и с. 1. Машина почвообрабатывающая рыхлительно-сепарирующая ПРСМ-5: 1 – шасси; 2 – рычажный механизм; 3 – рама; 4 – стойка; 5 – плоскорезущая лапа с сепарирующими решетками; 6 – ротор с рыхлителями; 7 – карданная передача; 8 – зубчатая передача; 9 – цепная передача; 10 – механизм регулировки глубины обработки почвы; 11 – механизм регулировки горизонтального положения рамы [7]

Fig. 1. The PRSM-5 tilling and separating machine: 1 – the chassis; 2 – the lever mechanism; 3 – frame; 4 – the rack; 5 – ploughshare with separating gratings; 6 – rotor with rippers; 7 – cardan gear; 8 – a gear transmission; 9 – chain transmission; 10 – mechanism for adjusting the depth of tillage; 11 – mechanism for adjusting the horizontal position of the frame

где они высушиваются под воздействием климатических факторов [5–7].

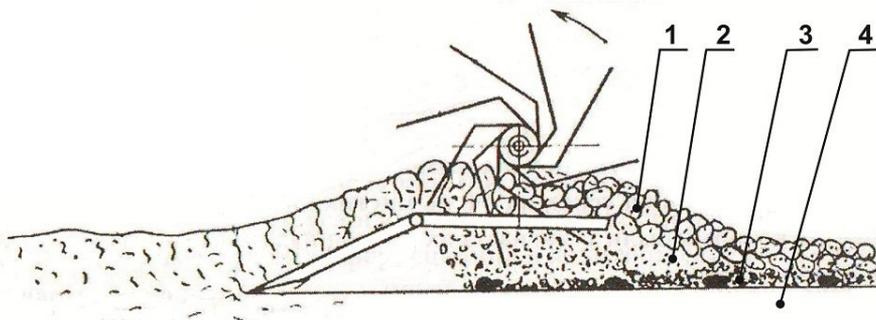
Машина (рис. 1) состоит из шасси 1, с которым посредством параллелограммного рычажного механизма 2 с возможностью перемещения по вертикали закреплена рама 3. На ней смонтированы пассивные (стойки 4 с лемехами 5) и активные (ротор с рыхлителями 6) рабочие органы таким образом, что ротор расположен над лемехами и не касается их. Лемеха снабжены сепарирующими решетками [3; 4; 7].

Исходя из условий прорастания и развития растений, конструкция оптимального обрабатываемого слоя (рис. 2) перед посевом должна состоять из четырех подслоев: надсеменного, семенного, подсеменного и подпахотного. Из надсеменного подслоя должны быть полностью исключены глыбистые отделности почвы размером более 20 мм. В семенном подслое должна быть сосредоточена наиболее ценная в агрономическом отношении структура. Плотность сложения

подсеменного подслоя не должна превышать $1,25 \text{ г/см}^3$. Подпахотный подслоя не должен иметь плотность выше $1,3 \text{ г/см}^3$ и твердость в плужной подошве более 3 МПа, что обеспечивается основной обработкой [5; 7].

Создание указанных условий обеспечивает контакт семян с почвой, быстрое прорастание и беспрепятственное развитие корней вглубь почвы [6].

При движении машины по полю лемеха поднимают слой почвы, далее при перемещении вдоль поверхностей лемеха и прутьев сепарирующей решетки происходит его крошение, при этом мелкокомковатая фракция просыпается сквозь решетку, формируя семенной подслоя. Дальнейшее формирование семенного подслоя происходит с помощью рыхлителей ротора, которые крошат и рыхлят почву, перемещая ее вдоль сепарирующей решетки. Крупнокомковатая фракция с отделностями не более 20 мм движется сходом с решетки, образуя надсеменной подслоя. Кроме этого, рыхлители ротора в процессе



Р и с. 2. Структура обрабатываемого слоя: 1 – надсеменной слой; 2 – семенной слой; 3 – подсеменной слой; 4 – подпахотный слой [7]

Fig. 2. Structure of the processed layer: 1 – the above seed layer; 2 – the seed layer; 3 – sub seed layer; 4 – sub-plow layer

взаимодействия с почвой вычесывают из нее сорные растения, не нарушая их целостности, и транспортируют их на поверхность надсеменного подслоя [7].

При взаимодействии рыхлителя ротора с почвой происходит формирование почвенного ядра, установившееся движение почвы по лемеху и сбрасывание ее с сепарирующей решетки. Наихудшие условия для движения почвы в технологическом процессе работы машины создаются в момент входа рыхлителя в почву, что является причиной образования перед ним почвенного валка. Он способствует повышению энергоемкости процесса, снижению надежности и качества работы машины [8; 9]. Около 30 % от общих затрат энергии в процессе работы машины расходуется на привод ротора, поэтому она неудовлетворительно работает на плотных почвах, а следовательно, ее использование в таких случаях становится малоэффективным [9].

В связи с указанными недостатками машины параметры рыхлителя ротора должны быть обоснованы с учетом снижения затрат энергии на его привод.

Обзор литературы

Снизить энергоемкость процесса работы ротора почвообрабатывающей машины в нашем случае возможно за

счет совершенствования геометрической формы его рабочих органов-рыхлителей [9–12].

Для получения закономерности распределения давлений почвы на поверхности рабочего органа решалась контактная задача с использованием теории сплошных сред [13; 14]. В процессе воздействия рабочего органа на почву ее пластическое движение по некоторой плоскости начинается только тогда, когда касательные напряжения на поверхности скольжения достигают критических величин. Рабочий орган, имеющий главные оси симметрии, представлялся в виде двух плоских сечений. Почва рассматривалась как линейно деформируемая среда. Затем решения двух плоскостных задач объединялись и получались зависимости распределения давлений по поверхности почвообрабатывающего рабочего органа. Общее решение уравнения контактной задачи описывается следующим образом:

$$P(x) = \frac{\sin \pi v \sin \pi v}{\pi} f'(x) - \frac{\cos \pi^2 v}{\pi} (\alpha + x)^{1/2 + \gamma} P, \quad (1)$$

где γ – коэффициент, зависящий от твердости почвы; $f'(x)$ – уравнение линии, описывающей профиль деформатора; v – скорость движения, м/с;

$$P = \int_{-\alpha}^{\alpha} P(t) dt - \text{сжимающая сила, Н.}$$

С помощью решения контактной задачи получены закономерности распределения давления на границе рабочего органа с почвой для плоского, круглого, клиновидного и эллиптического деформаторов.

Решение контактной задачи в земледельческой механике обеспечивает обоснование формы деформатора с требуемым распределением давления. Такой подход, по мнению авторов, позволяет с достаточной для практики точностью конструировать катки и колеса, обеспечивающие равномерное распределение давления в зоне их контакта с почвой.

В исследованиях по изысканию профильной линии почвообрабатывающего рабочего органа минимальной энергоемкости теоретическим путем определялось силовое воздействие почвы на рабочий орган [15; 16]. При этом процесс рассматривался как квазистационарный с постоянными скоростью движения и расстоянием от центра масс рабочего органа до плоскости микронеровностей поверхности почвы. В связи с последним полагалось, что главный вектор системы сил сопротивления динамическому напору в среднем можно считать величиной постоянной, то есть независимой от времени.

Давление почвы на поверхность рабочего органа рассматривалось как результирующее статической и динамической составляющих¹. Приведено

доказательство изотропности закона внутрипочвенного статического нормального давления, в результате чего установлено, что в каждой точке почвенного горизонта напряжение сил зависит не от ориентации площадки, а только от глубины ее расположения.

В неподвижном состоянии рабочий орган испытывает только силы внутреннего статического давления [17]. С началом движения к ним присоединяются силы динамического напора, или, как их называют авторы работы, силы импульсного давления, которые возникают в результате столкновения рабочего органа с частицами почвы. По утверждению авторов, экспериментальные исследования показали, что соударение частиц почвы с рабочими органами является практически неупругим, так как они имеют очень малый коэффициент восстановления. В таком случае при ударе нормальная составляющая скорости движения частицы почвы относительно рабочего органа равна нулю, а сохраняется только касательная составляющая [18–20]. Поэтому авторы считают, что в системе динамических сил сопротивления при соударении с рабочими органами возникают потери нормального импульса почвенных частиц к рабочей поверхности. Это подтверждает известное положение о нормальном направлении сил динамического давления к рабочей поверхности [21; 22].

Нормальное динамическое давление зависит только от глубины расположения в почве элементарной площадки и ее пространственной ориентации и не зависит от формы остальной части рабочего органа. За промежуток времени dt частицы почвы, со стороны которых элементарный участок испытывает

¹ Петунин А. Ф., Ефремова В. Н. Механика разрушения пласта почвы при многослойном крошении // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сборник статей по материалам 71-й научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2015 год / Отв. за вып. А. Г. Коцаев. Краснодар: Изд-во ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет», 2016. С. 229–230. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26257020&pf=1> (дата обращения: 20.01.2021).

импульс силы, заполняют косою цилиндр. Из этих предпосылок с помощью закона сохранения количества движения получено уравнение для определения напряженных сил суммарного нормального давления почвы на поверхность рабочего органа в точке M :

$$P(M) = P_0(M) + \rho v^2 \cos^2 \alpha(M), \quad (2)$$

где $P(M)$ – сила внутрпочвенного статического нормального давления, Н; ρ – плотность почвы, кг/м³; $\alpha(M)$ – угол, определяющий пространственную ориентацию элементарной площадки рабочего органа.

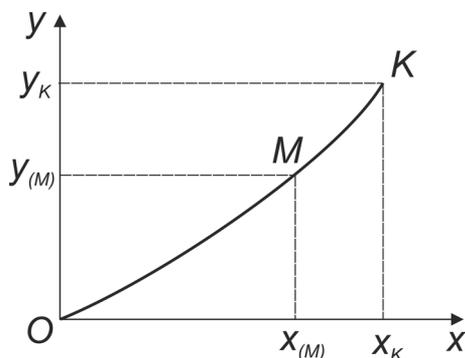
Вывод уравнения проводился без предположений о скорости, в связи с чем формула (2) справедлива не только для квазистационарного движения.

На основании уравнения (2) выведена формула для определения динамического сопротивления:

$$Q = \rho v^2 \int_{\xi} \left(1 - \frac{y(M)}{\alpha}\right) \cos^3 \alpha ds, \quad (3)$$

где $y(M)$ – координаты точки M (рис. 3).

Предполагается, что формула (3) применима для вычисления динамического сопротивления любого рабочего органа почвообрабатывающего орудия.



Р и с. 3. График динамического давления почвы на рабочий орган [13]

Fig. 3. Diagram of dynamic soil pressure on the implement

Для решения конкретной задачи по обоснованию профильной линии рабочего органа минимальной энергоемкости динамическое давление вычисляется по формуле:

$$Q = b \rho v^2 \int_0^{x_k} \left(1 - \frac{y}{a}\right) \frac{y'^3}{1 + y'^2} dx, \quad (4)$$

где b – ширина рабочего органа, м.

Следовательно, величина нормального давления почвы на элементарную площадку поверхности рабочего органа определяется квадратом скорости его движения, плотностью почвы, глубиной расположения и пространственной ориентацией площадки. Однако полученное уравнение не учитывает физико-механических свойств почвы (за исключением плотности), которые весьма существенно влияют на энергетические показатели рабочих органов почвообрабатывающих орудий. Это связано с тем, что при выводе уравнения (3) учитывалось только взаимодействие частиц почвы с рабочим органом и не было учтено взаимодействие частиц между собой. На них влияют физико-механические свойства почвы. Последнее можно объяснить сложностью процессов, происходящих в почве под воздействием рабочего органа. Их формализация в настоящее время затруднена. Кроме того, необходимо экспериментально проверить, что влияние на величину динамического давления, на элементарную площадку рабочего органа, а также на остальную его форму отсутствует. Также важно тестирование степени адекватности полученной модели в реальных условиях.

Материалы и методы

С использованием векторного и тензорного исчисления процесс нагружения почвы рассматривался как последовательность равновесных состояний и малых деформаций, компоненты тензора которых связаны

с проекциями вектора перемещения соотношениями Коши [23–25]. Решение задачи о деформациях и напряжениях в почве, возникающих в результате действия на него клина, осуществлялось с учетом физических законов взаимосвязи компонентов напряжений и деформаций [26]. Почва рассматривалась как упруго-пластическая среда, при работе с которой применялась модель обобщенного закона Гука и один из вариантов теории пластического течения [27; 28]. С целью экономии объема вычислений использовались сведения из ряда исследований [29; 30], а в процессе счета определялась интенсивность напряжений, при которых происходит отрыв, полипластические деформации поверхности, расчленения слоя грунта на глыбы [31–33]. Была построена математическая модель определения напряженно-деформируемого состояния слоя почвы под воздействием клина, обеспечивающая определение полей векторов перемещений, тензоров деформаций и напряжений. Для численного решения задачи использовался метод Рунге [34–36]. Разработан алгоритм решения поставленной задачи, позволяющий определить поля напряжений и деформаций в упругой области слоя почвы и указать границы области начала пластических деформаций.

Энергетические показатели функционирования рабочих органов почвообрабатывающей машины оценивались тяговым сопротивлением и крутящим моментом привода ротора рыхлительно-сепарирующего устройства. Общее тяговое сопротивление почвообрабатывающего рабочего органа состоит из суммы проекций горизонтальных сил (удельных сил сопротивления) на плоскость (по аналогии с составляющей силы сопротивления лемеха, выраженной В. П. Горячкиным через квадрат скорости движения лемеха в почве). Суммарная составляющая сила определялась

с помощью тензометрической аппаратуры по общеизвестным методикам с относительно небольшими затратами труда и времени. В связи с этим методом определения закономерности распределения давления почвы на поверхности рабочего органа являлась аппроксимация результатов экспериментальных исследований по отысканию суммарных сопротивлений его составных частей.

Результаты исследования

Для решения задачи по усовершенствованию геометрической формы рыхлителя полагаем, что ротор вращается с постоянной частотой, а почва представляет собой однородную среду. Элементарная площадка рабочей кромки рыхлителя (рис. 4) подвергается действию сил трения между кромкой и почвой $qfdl$ и боковой поверхности рыхлителя о почву, а также влиянию давления почвы qdl . Величина силы трения боковой поверхности рыхлителя о почву не оказывает существенного влияния на сопротивление движению рыхлителя в почве и поэтому ею можно пренебречь.

Элементарный крутящий момент ротора определяется по уравнению:

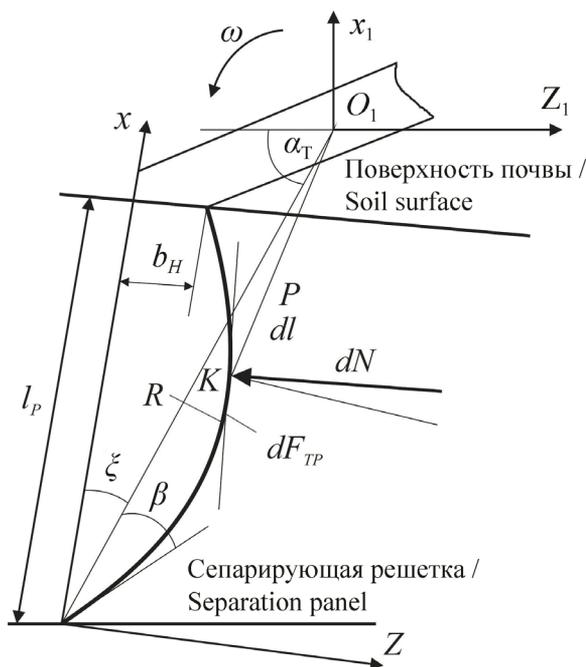
$$dM = q\rho(\sin \theta + \cos \theta)dl, \quad (5)$$

где ρ – радиус вращения элементарной площадки, м; θ – угол между нормалью к радиусу вращения элементарной площадки и направлением действия нормальной силы [9].

Закономерность изменения давления почвы на рыхлитель, в зависимости от глубины расположения в почве его элементарной площадки, определена экспериментальным путем:

$$q = kh^m, \quad (6)$$

где h – расстояние от проходящей по поверхности плоскости до элементарной площадки, м; k, m – коэффициенты,



Р и с. 4. Схема к обоснованию формы рабочей кромки рыхлителя ротора [9; 11]
 Fig. 4. The scheme to substantiate the shape of the working edge of the ripper of the rotor

зависящие от влажности и твердости почвы.

Процесс работы рыхлителя рассмотрен в подвижных осях системы координат XOZ (рис. 4). В принятой системе координат расстояние от элементарной площадки до поверхности почвы определяется по уравнению:

$$h = \frac{1}{\sqrt{1+k_1^2}} \left\{ \begin{aligned} & [k_1 \sin(\alpha_T + \alpha_1) - \cos(\alpha_T + \alpha_1)]x - \\ & - [\sin(\alpha_T + \alpha_1) + k_1 \cos(\alpha_T + \alpha_1)]z + \\ & + R(\cos \alpha_T - k_1 \sin \alpha_T) + b \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где R – радиус ротора, м; α_T – угол поворота рыхлителя в текущий момент времени; α_1 – угол между радиус-вектором носка рыхлителя и осью координат OX ; b – коэффициент, обусловленный высотой слоя почвы на решетке;

k_1 – коэффициент, обусловленный расстоянием от слоя почвы на решетке до оси вращения ротора.

С учетом того, что $dl = \sqrt{1+z_1^2} dx$, заменив косинус и синус через тангенс угла θ , на основании соотношения (5) получим уравнение для вычисления крутящего момента рыхлителя ротора:

$$M = \int_{x_h}^{x_k} \frac{q\rho(1+\operatorname{tg}\theta)\sqrt{1+z_1^2}}{1+\operatorname{tg}^2\theta} dx. \quad (8)$$

Для наиболее весомого снижения усредненного крутящего момента и уменьшения неравномерности вращения ротора необходимо добиться уменьшения максимальных значений указанного крутящего момента.

В связи с изложенным постановка задачи формулируется следующим образом. Из множества кривых,

проходящих через точки (x_h, z_h) и (x_k, z_k) , необходимо найти ту, при которой крутящий момент рыхлителя во время входа его в межпрутковое пространство сепарирующей решетки будет иметь минимальное значение. Для решения поставленной задачи воспользуемся методом Ритца. Уравнение кривой, обеспечивающей экстремальное значение функционала, имеет вид:

$$z = xz'_0 + x^2 \frac{z_k - x_k z'_0}{x_k^2} + (x - x_k)(C_1 x - C_2 x^2 + C_3 x^3), \quad (9)$$

где z'_0 – тангенс угла между осью OX и касательной к кривой в начальной его точке.

Для данного рыхлительно-сепарирующего устройства z'_0 выбирается из условий максимально возможного захвата почвы в начальный момент ее взаимодействия с рыхлителем, что позволяет снизить сгруживание почвы перед ротором [23; 25]. Из рисунка 4 видно, что $z'_0 = \text{tg}(\alpha_1 + \beta_1)$, где β – угол между радиус-вектором носка рыхлителя и касательной к кривой в этой же точке.

Подставив выражение (9) в уравнение (8), находим значение коэффициентов C_1, C_2, C_3 , с помощью которых определяется форма рыхлителя. Приравняв к нулю частные производные от полученного уравнения по C_1, C_2, C_3 , получаем систему уравнений:

$$\frac{\partial M_{0i}}{\partial C_i} = \int_{x_0}^{x_1} (1 + \text{tg}^2 \theta)^{\frac{1}{2}} \left\{ \begin{array}{l} q(1+z')^{\frac{1}{2}}(\text{tg}^2 \theta - 1) \frac{\partial \rho}{\partial C_i} + \\ \left[(1+z')^{\frac{1}{2}}(f \text{tg}^2 \theta - 1) \frac{\partial q}{\partial C_i} + \right. \\ \left. + p \left[\begin{array}{l} z'(f \text{tg}^2 \theta - 1) \times \\ \times (1+z')^{\frac{1}{2}} \frac{\partial z'}{\partial C_i} + \\ \left. + (1+z')^{\frac{1}{2}} f \frac{\partial \text{tg} \theta}{\partial C_i} \right] \right] \end{array} \right\} dx = 0, \quad (10)$$

где $i = \overline{1, 2, 3}$.

Technologies and means of agricultural mechanization

$$\frac{\partial \rho}{\partial C_i} = \frac{z' \frac{\partial z}{\partial C_i} - R \sin \alpha_1 \frac{\partial x}{\partial C_i}}{\sqrt{R^2 - 2R(z \sin \alpha_1 + x \cos \alpha_1) + z^2 + x^2}},$$

$$\frac{\partial q}{\partial C_i} = -k(n-1)h^{n-2} \frac{\sin(\alpha_T + \alpha_1) + k_1 \cos(\alpha + \alpha_1)}{\sqrt{1+k^2}} \frac{\partial \rho}{\partial C_i},$$

$$\frac{\partial \text{tg} \theta}{\partial C_i} = \left\{ \begin{array}{l} [z'(R \sin \alpha_1 - z) + R \cos \alpha_1 - x] \times \\ \times \left[(R \cos \alpha_1 - x) \frac{\partial z}{\partial C_i} + \frac{\partial z'}{\partial C_i} \right] - \\ - R z \sin \alpha_T \times \\ \times [z'(R \cos \alpha_1 - x) - R \sin \alpha_1 + z] \times \\ \times \left[\frac{\partial z}{\partial C_i} - z' \frac{\partial z'}{\partial C_i} \right] \\ \times [z'(R \sin \alpha_1 - z) + R \cos \alpha_1 - x]^2, \end{array} \right\} \times$$

$$z' = z'_0 + \frac{2x}{x_k^2} (z_k - x_k z'_0) + (x - x_k)(2x C_1 + 3x C_2 + C_3) + x^2 C_1 + x^3 C_2 + x C_3,$$

где

$$\frac{\partial z}{\partial C_1} = x^2(x - x_k); \quad \frac{\partial z}{\partial C_2} = x^3(x - x_k);$$

$$\frac{\partial z}{\partial C_3} = x(x - x_k); \quad \frac{\partial z'}{\partial C_1} = 2x(x - x_k) + x^2;$$

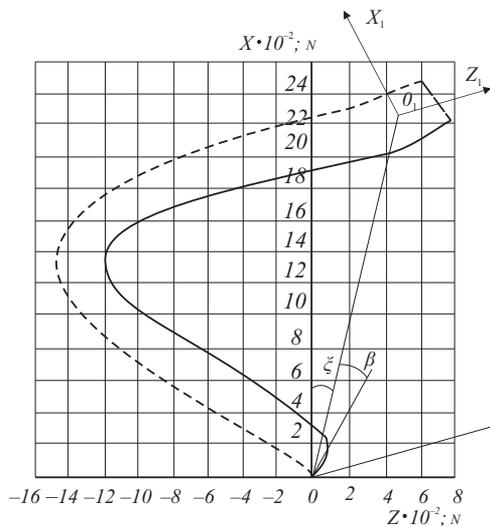
$$\frac{\partial z'}{\partial C_2} = 3x^2(x - x_k) + x^3; \quad \frac{\partial z'}{\partial C_3} = (x - x_k) + x.$$

Полученную систему уравнений (10) решали численным методом. Расчеты проводились при $R = 0,23$ м; $k = 4\,000$; $n = 1,99$ Н/м²; $k_1 = -4$; $B = -0,1$; $\alpha_T = 60^\circ$; $\alpha_1 = 12^\circ$; $f = 0,5$; $z'_0 = 0,9$; $B_h = 0,03$ м; $l_p = 0,2$ м.

В результате решения системы уравнений получены значения коэффициентов C_1, C_2, C_3 . С их учетом уравнение получает вид:

$$z = 0,8x - 32x^2 + 144x^3. \quad (11)$$

Линия, определяющая геометрическую форму рыхлителя ротора, согласно уравнению (11), показана на рисунке 5.



Р и с. 5. Форма рыхлителя ротора рыхлительно-сепарирующего устройства

F i g. 5. The shape of the ripper of the rotor of the ripping-separating device

Энергетические показатели работы секции почвообрабатывающей машины с рыхлителями ротора обоснованной формы (рис. 6) оценивались крутящим моментом привода ротора рыхлительно-сепарирующего устройства.

Крутящий момент привода ротора определялся для рыхлителей с ровным (базовым), выпуклым, вогнутым и обоснованным с учетом снижения затрат энергии в результате проведения теоретических исследований профилем. Рыхлители с различным профилем режущей кромки приведены на рисунке 7.

Проведение эксперимента осуществлялось при частоте вращения ротора $2,5 \text{ с}^{-1}$ и влажности почвы 21,5 %. Результаты эксперимента приведены в таблице. Среднеквадратичная ошибка опыта составила 0,44 Н·м, достоверность результатов 99 %.

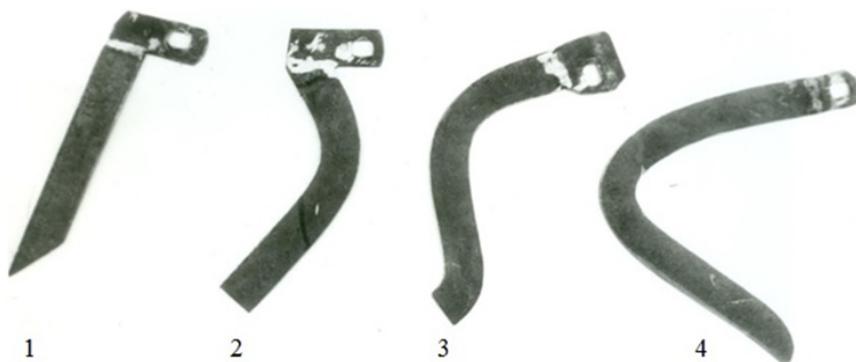
Обсуждение и заключение

Обоснованный с учетом снижения затрат энергии профиль рыхлителя ротора обеспечивает наилучшие условия



Р и с. 6. Машина почвообрабатывающая рыхлительно-сепарирующая ПРСМ-5 с рыхлителями ротора обоснованной формы

F i g. 6. The PRSM-5 tilling and separating machine with rotor rippers of reasonable shape



Р и с. 7. Рыхлители с различной формой рабочей кромки: 1 – ровная; 2 – выпуклая; 3 – вогнутая; 4 – обоснованная с учетом снижения затрат энергии

F i g. 7. The rippers with different cutting edge shapes: 1 – flat; 2 – convex; 3 – concave; 4 – justified considering the reduction of energy costs

Т а б л и ц а
T a b l e

Крутящий момент привода ротора для различных форм его рыхлителей
Rotor drive torque for different ripper shapes

№	Профиль ножа / Knife profile	Крутящий момент, Н·м / Torque, N·m	
		средний / medium	максимальный / maximum
1	Ровный / Plain	12,26	23,10
2	Выпуклый / Convex	13,02	31,46
3	Вогнутый / Concave	11,56	25,03
4	Обоснованный с учетом снижения затрат энергии / Justified in terms of reduced energy costs	8,39	20,85

для транспортирования почвы в начальный момент вхождения в почву и минимальные затраты энергии на привод. Такую форму рыхлителя ротора можно использовать для машины, обеспечивающей оптимизацию агрофизического состояния посевного слоя почвы при посеве семян пропашных культур или перед посевом, когда сорные растения находятся в начальной стадии своего развития.

В одну из задач технологического процесса машины для оптимизации пахотного слоя почвы входит вычесывание корневищ сорных растений и выбрасывание их на поверхность поля.

Для такой машины профиль рыхлителя должен быть обоснован с учетом уменьшения возможности забивания ротора пожнивными остатками и сорными растениями. При относительно небольшой частоте вращения ротора машины и достаточной длине рабочей части рыхлителя растительные остатки могут задерживаться, совершать колебательные движения или сходиться с него. Для достижения последнего угол наклона наиболее пологой касательной к профилю рыхлителя в самом неблагоприятном его положении должен обеспечить условия сползания растительных остатков.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Analytical Method of Examining the Curvilinear Motion of a Four-Wheeled Vehicle / V. Melnik, M. Dovzhik, V. Tatyanchenko [et al.]. – DOI [10.15587/1729-4061.2017.101335](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101335) // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, Issue 7. – Pp. 59–65. – URL: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/101335> (дата обращения: 20.01.2021).
2. **Сыромятников, Ю. Н.** Результаты полевых исследований роторной почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины с экспериментальными рабочими органами / Ю. Н. Сыромятников // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 5. – С. 184–192. – URL: <https://clck.ru/U4WZj> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
3. **Нанка, А. В.** Влияние частоты вращения ротора почвообрабатывающей машины на качественные показатели ее работы / А. В. Нанка, Ю. Н. Сыромятников // Агротехника и энергообеспечение. – 2018. – № 2. – С. 101–115. – URL: <https://clck.ru/U4WkU> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
4. **Пашенко, В. Ф.** Грунтообробна установка з використанням гнучкого робочого органу для контролю росту бур'янів / В. Ф. Пашенко, Ю. М. Сыромятников, Н. С. Храмов. – DOI [10.32717/0131-0062-2018-64-33-43](https://doi.org/10.32717/0131-0062-2018-64-33-43) // Овочівництво і баштанництво. – 2018. – № 64. – С. 33–43. – URL: <https://vegetables-journal.com/index.php/journal/article/view/23> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
5. **Сыромятников, Ю. М.** Вдосконалення робочих органів для підривання та підйому ґрунту розрихлювально-сепаруючою машиною / Ю. М. Сыромятников // Інженерія природокористування. – 2017. – № 2. – С. 74–77. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2017_2_15 (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
6. **Храмов, Н. С.** Качественные показатели работы экспериментальной почвообрабатывающей установки с применением гибкого рабочего органа // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 6. – С. 177–186. – URL: <https://clck.ru/U4Xmn> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
7. **Syromyatnikov, Yu. N.** Qualitative Performance Indicators of a Ripping-and-Separating Machine for Soil Cultivation / Yu. N. Syromyatnikov. – DOI [10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44](https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44) // Agricultural Machinery and Technologies. – 2018. – Vol. 12, Issue 3. – Pp. 38–44. – URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/view/250> (дата обращения: 20.01.2021).
8. **Николаев, В. А.** Анализ взаимодействия правого ножа агрегата непрерывного действия с грунтом / В. А. Николаев, Д. И. Трошин. – DOI [10.26518/2071-7296-2020-17-4-452-463](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-452-463) // Вестник СибАДИ. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 452–463. – URL: <https://vestnik.sibadi.org/jour/article/view/1116> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
9. **Пашенко, В. Ф.** Транспортирующая способность ротора почвообрабатывающей рыхлительно-сепарирующей машины / В. Ф. Пашенко, Ю. Н. Сыромятников // Тракторы и сельхозмашины. – 2019. – № 2. – С. 67–74. – URL: https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selhoz mashiny_No2_2019_dlya_sajta.pdf (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
10. Study of the Process of Grain Pre-Threshing by Working Bodies of a Combine Harvester Header / V. Sheychenko, I. Dudnikov, A. Kuzmych [et al.]. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 6, no. 1. – Pp. 19–27. – URL: <http://lib.udau.edu.ua/handle/123456789/7198> (дата обращения: 20.01.2021).
11. **Суханова, М. В.** Интеллектуальная система управления динамическими процессами смешивания в машинах для обработки семян с высокоэластичными рабочими органами / М. В. Суханова, А. В. Суханов, С. А. Войнаш. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202003.340-354](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.340-354) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 340–354. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/92-20-3/788-10-15507-0236-2910-030-202002-1> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.
12. **Старовойтов, С. И.** Конструктивные особенности рабочих органов для уплотнения и выравнивания поверхности почвы / С. И. Старовойтов, Б. Х. Ахалая, А. В. Миронова // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 4. – С. 51–56. – URL: https://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2020/01/ВИЭСХ_4_2019.pdf (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.

Issue 25–26. – Pp. 4331–4341. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768309003291?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2021).

27. **Бондарь, В. С.** Вариант теории термопластичности / В. С. Бондарь, В. В. Даншин, А. А. Кондратенко. – DOI 10.15593/perm.mech/2015.2.02 // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 2. – С. 21–35. – URL: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.2.02> (дата обращения: 20.01.2021). – Рез. англ.

28. A Review of Basic Soil Constitutive Models for Geotechnical Application / K. S. Ti, B. B. K. Huat, J. Noorzaei [et al.] // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2009. – Vol. 14. – Pp. 1–18. – URL: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1366069](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1366069) (дата обращения: 20.01.2021).

29. Research of Surface-Plane and Space-Deep Interaction of Needle with Soil / V. Sheichenko, I. Dudnikov, V. Shevchuk, A. Kuzmych // Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources. – 2019. – Vol. 65, Issue 1. – Pp. 13–16. – URL: <https://stumejournals.com/journals/am/2019/1/13> (дата обращения: 20.01.2021).

30. Modeling the Technological Process of Tillage / S. G. Mudarisov, I. I. Gabitov, Y. P. Lobachevsky [et al.]. – DOI 10.1016/j.still.2018.12.004 // Soil and Tillage Research. – 2019. – Vol. 190. – Pp. 70–77. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198718311760?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2021).

31. Influence of Rheological Properties of a Soil Layer Adjacent to the Working Body Cutting Element on the Mechanism of Soil Cultivation / V. Aulin, O. Lyashuk, A. Tykhyi [et al.] // Acta Technologica Agriculturae. – 2018. – Vol. 21, Issue 4. – Pp. 153–159. – URL: <https://clck.ru/U7SUu> (дата обращения: 20.01.2021).

32. **Babitsky, L. F.** Bionic Modelling of the Working Bodies of Machines For Surface Tillage / L. F. Babitsky, I. V. Sobolevsky, V. A. Kuklin. – DOI 10.1088/1755-1315/488/1/012041 // IOP Conference Series. – 2020. – Vol. 488, Issue 1. – 10 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/488/1/012041/meta> (дата обращения: 20.01.2021).

33. **Капов, S. N.** Model of Soil Environment as Object of Mechanical Tillage / S. N. Капов, М. А. Адуов, S. А. Nukusheva. – DOI 10.7537/marslsj1112s14.30 // Life Science Journal. – 2014. – Vol. 11. – Pp. 156–161. – URL: http://www.lifesciencesite.com/ljsj/life1112s/030_26240life1112s14_156_161.pdf (дата обращения: 20.01.2021).

34. **Weinan, E.** The Deep Ritz Method: A Deep Learning-Based Numerical Algorithm for Solving Variational Problems / E. Weinan, B. Yu. – DOI 10.1007/s40304-018-0127-z // Communications in Mathematics and Statistics. – 2018. – Vol. 6, Issue 1. – Pp. 1–12. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40304-018-0127-z> (дата обращения: 20.01.2021).

35. Vibration Analysis of the Coupled Doubly-Curved Revolution Shell Structures by Using Jacobi-Ritz Method / Q. Wang, K. Choe, D. Shi, K. Sin. – DOI 10.1016/j.ijmecsci.2017.12.002 // International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Vol. 135. – Pp. 517–531. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002074031731055X?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2021).

36. **Berthelot, J.-M.** Damping Analysis of Laminated Beams and Plates Using the Ritz Method / J.-M. Berthelot. – DOI 10.1016/j.compstruct.2005.04.031 // Composite Structures. – 2006. – Vol. 74, Issue 2. – Pp. 186–201. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822305001005?via%3Dihub> (дата обращения: 20.01.2021).

Поступила 23.01.2021; одобрена после рецензирования 15.02.2021; принята к публикации 01.03.2021

Об авторе:

Сыромятников Юрий Николаевич, старший преподаватель кафедры технических систем и технологий животноводства имени Б. П. Шабельника Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко (61002, Украина, г. Харьков, ул. Алчевских, д. 44), кандидат технических наук, Researcher ID: AAC-7369-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9502-626X>, gara176@khntusg.info

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Melnik V., Dovzhik M., Tatyanchenko B., et al. Analytical Method of Examining the Curvilinear Motion of a Four-Wheeled Vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017; 3(7):59-65. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.101335>
2. Syromyatnikov Yu.N. The Results of Field Tests of a Rotary Tillage Ripping-Separating Machine with Experimental Working Parts. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2018; (5):184-192. Available at: <https://clck.ru/U4WZj> (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
3. Nanka A.V., Syromyatnikov Yu.N. The Influence of the Rotation Frequency of the Rotor of a Tillage Machine on the Quality of Its Work. *Agrotehnika i energoobespechenie* = Agronomy and Energy Supply. 2018; (2):101-115. Available at: <https://clck.ru/U4WkU> (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Pashchenko V.F., Syromyatnikov Yu.N., Khramov N.S. Soil-Cultivating Setting a Flexible Working Organ to Control of Weeds Growth. *Ovochivnitsvo i bashtannitsvo* = Vegetable and Melon Growing. 2018; (64):33-43. (In Ukr., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.32717/0131-0062-2018-64-33-43>
5. Syromyatnikov Yu.N. Improvement of Working Bodies for Cutting and Rising the Soil of a Rope-Separation Machine. *Inzheneriya prirodokoristuvannya* = Engineering of Nature Management. 2017; (2):74-77. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Iprk_2017_2_15 (accessed 20.01.2021). (In Ukr., abstract in Eng.)
6. Khramov N.S. Qualitative Indices of the Operation of Experimental Tillage Implement with a Flexible Working Body. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2018; (6):177-186. Available at: <https://clck.ru/U4Xmn> (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Syromyatnikov Yu.N. Qualitative Performance Indicators of a Ripping-and-Separating Machine for Soil Cultivation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018; 12(3):38-44. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-12-3-38-44>
8. Nikolayev V.A., Troshin D.I. Continuous Action Right Knife Unit with Ground Interaction Analysis. *Vestnik SibADI* = The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020; 17(4):452-463. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-4-452-463>
9. Pashchenko V.F., Syromyatnikov Yu.N. The Transporting Ability of the Rotor of the Soil-Cultivating Loosening and Separating Vehicle. *Traktory i selkhoz mashiny* = Tractors and Agricultural Machinery. 2019; (2):67-74. Available at: https://old.mospolytech.ru/storage/f033ab37c30201f73f142449d037028d/files/Traktory_i_selkhoz_mashiny_No2_2019_dlya_sajta.pdf (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Sheychenko V., Dudnikov I., Kuzmych A., et al. Study of the Process of Grain Pre-Threshing by Working Bodies of a Combine Harvester Header. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017; 6(1):19-27. Available at: <http://lib.udau.edu.ua/handle/123456789/7198> (accessed 20.01.2021). (In Eng.)
11. Sukhanova M.V., Sukhanov A.V., Voinash S.A. Intelligent Control Systems for Dynamic Mixing Processes in Seed Processing Machines with Highly Elastic Working Bodies. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):340-354. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.340-354>
12. Starovoytov S.I., Akhalaya B.Kh., Mironova A.V. Design Features of Working Tools for Soil Surface Compaction and Leveling. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK* = VIESH Institute' Herald. 2019; (4):51-56. Available at: https://vestnik.viesh.ru/wp-content/uploads/2020/01/ВНЭСХ_4_2019.pdf (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
13. Kushnarev A.S. [Soil Mechanics: Challenges and Status of Work]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva* = Mechanization and Electrification of Agriculture. 1987; (3):9-13. (In Russ.)
14. Kushnarov A., Shustik L., Marinin S. [Theoretical Investigation of the Interaction of the Propulsion Unit with the Ground]. *Tekhniko-tehnologichni aspekti rozvitku ta viprobuvannya novoi tekhniki i tekhnologiy dlya silskogo gospodarstva Ukraini* = Technical and Technological Aspects of Development

and Testing of New Machinery and Technologies for Agriculture of Ukraine. 2014; 18(1):200-207. Available at: <https://clck.ru/U8G4p> (accessed 20.01.2021). (In Ukr., abstract in Eng.)

15. Mudarisov S.G., Rahimov Z.S., Yamaletdinov M.M., Farchutdinov I.M. Assessment of Technological Process of Soil Treatment on the Basis of Continuum Dynamics Equations. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2010; (1):63-65. Available at: <https://clck.ru/U7MXP> (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

16. Kornienko S., Pashenko V., Melnik V., et al. Developing the Method of Constructing Mathematical Models of Soil Condition under the Action of a Wedge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5(7):34-43. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79912>

17. Radjai F., Wolf D.E. Features of Static Pressure in Dense Granular Media. *Granular Matter*. 1998; 1:3-8. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/PL00010907>

18. Lapshin V.V., Yurin Ye.A. Nonlinear Elastoplastic Model of Collinear Impact. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana* = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. 2016; (1):90-99. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2016-1-90-99>

19. Permyakova V.V. Basic Model Representations of Mechanical Impact. *Innovatsii v grazhdanskoj aviatsii* = Innovations in Civil Aviation. 2018; 3(2):77-86. Available at: http://www.mstuca.ru/upload/Innovatsii_blok_3.2.pdf (accessed 20.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

20. Listrova K.S., Manjosov V.K. Modelling of the Longitudinal Impact Springy Rod as Mechanical System with Final Number of the Degree of the Liberty. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika* = Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics. 2011; 11(2):96-102. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.18500/1816-9791-2011-11-2-96-102>

21. Pan J.L., Selby A.R. Simulation of Dynamic Compaction of Loose Granular Soils. *Advances in Engineering Software*. 2002; 33(7-10):631-640. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(02\)00067-4](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(02)00067-4)

22. Okur D.V., Ansal A. Stiffness Degradation of Natural Fine Grained Soils during Cyclic Loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2007; 27(9):843-854. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.01.005>

23. Peth S., Nellesen J., Fischer G., Horna R. Non-Invasive 3D Analysis of Local Soil Deformation under Mechanical and Hydraulic Stresses by μ CT and Digital Image Correlation. *Soil and Tillage Research*. 2010; 111(1):3-18. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.02.007>

24. Hashiguchi K., Tsutsumi S. Shear Band Formation Analysis in Soils by the Subloading Surface Model with Tangential Stress Rate Effect. *International Journal of Plasticity*. 2003; 19(10):1651-1677. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(02\)00113-4](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(02)00113-4)

25. Sciammarella C.A., Lamberti L., Sciammarella F.M. Verification of Continuum Mechanics Predictions with Experimental Mechanics. *Materials*. 2020; 13(1):77. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13010077>

26. Li X., Yu H.S., Li X.S. Macro-Micro Relations in Granular Mechanics. *International Journal of Solids and Structures*. 2009; 46(25-26):4331-4341. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.08.018>

27. Bondar V.S., Danshin V.V., Kondratenko A.A. Version of the Theory of Thermoplasticity. *Vestnik PNIPU. Mekhanika* = PNRPU Mechanics Bulletin. 2015; (2):21-35. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2015.2.02>

28. Ti K.S., Huat B.B.K., Noorzaei J., et al. A Review of Basic Soil Constitutive Models for Geotechnical Application. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2009; 14:1-18. Available at: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1366069](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1366069) (accessed 20.01.2021). (In Eng.)

29. Sheichenko V., Dudnikov I., Shevchuk V., Kuzmych A. Research of Surface-Plane and Space-Deep Interaction of Needle with Soil. *Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources*. 2019; 65(1):13-16. Available at: <https://stumejournals.com/journals/am/2019/1/13> (accessed 20.01.2021). (In Eng.)

30. Mudarisov S.G., Gabitov I.I., Lobachevsky Y.P., et al. Modeling the Technological Process of Tillage. *Soil and Tillage Research*. 2019; 190:70-77. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.12.004>
31. Aulin V., Lyashuk O., Tykhyi A., et al. Influence of Rheological Properties of a Soil Layer Adjacent to the Working Body Cutting Element on the Mechanism of Soil Cultivation. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018; 21(4):153-159. Available at: <https://clck.ru/U7SUu> (accessed 20.01.2021). (In Eng.)
32. Babitsky L.F., Sobolevsky I.V., Kuklin V.A. Bionic Modelling of the Working Bodies of Machines for Surface Tillage. *IOP Conference Series*. 2020; 488(1). 10 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012041>
33. Kapov S.N., Aduov M.A., Nukusheva S.A. Model of Soil Environment as Object of Mechanical Tillage. *Life Science Journal*. 2014; 11:156-161. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.7537/marslsj1112s14.30>
34. Weinan E., Yu B. The Deep Ritz Method: A Deep Learning-Based Numerical Algorithm for Solving Variational Problems. *Communications in Mathematics and Statistics*. 2018; 6(1):1-12. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s40304-018-0127-z>
35. Wang Q., Choe K., Shi D., Sin K. Vibration Analysis of the Coupled Doubly-Curved Revolution Shell Structures by Using Jacobi-Ritz Method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2018; 135:517-531. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.002>
36. Berthelot J.-M. Damping Analysis of Laminated Beams and Plates Using the Ritz Method. *Composite Structures*. 2006; 74(2):186-201. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.04.031>

Received 23.01.2021; approved after reviewing 15.02.2021; accepted for publication 01.03.2021

About the author:

Yuriy N. Syromyatnikov, Senior Lecturer in the Shabelnik Chair of Technical Systems and Livestock Technology, Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture (44 Alchevskikh St., Kharkiv 61002, Ukraine), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: AAC-7369-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9502-626X>, gara176@khntusg.info

The author has read and approved the final manuscript.