

Оригинальное исследование

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-634059>

EDN: XFKZAJ



Модель заглубления зуба рыхлителя на примере движения прямого штампа

И.П. Трояновская

Южно-Уральский государственный аграрный университет, Троицк, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Цель промышленного рыхления заключается в разрушении единого почвенного пласта и его применении на твёрдых (мёрзлых или скальных) грунтах. Принципиальное отличие промышленного рыхления от сельскохозяйственного заключается в наличии принудительного заглубления. Процесс заглубления рыхлителя в грунт очень важен, и во многом определяет эффективность работы всего агрегата. В процессе принудительного заглубления рыхлитель осуществляет совместное движение в горизонтальном и вертикальном направлении. В настоящий момент имеется множество экспериментальных данных процесса заглубления рабочего орудия, однако отсутствует адекватная математическая модель.

Цель исследования — разработка математической модели заглубления рыхлителя в грунт на примере движения прямого штампа.

Материалы и методы. На начальном этапе погружения штампа в грунт принята линейная зависимость между вертикальной деформацией и усилием. В статье решалась обратная задача динамики. Было найдено уравнение траектории движения рабочего орудия в грунте по известному вертикальному усилию и горизонтальному перемещению трактора.

Результаты. Разработана математическая модель движения прямого штампа под действием вертикальной силы при горизонтальном перемещении трактора. Процесс погружения штампа в грунт описан двумя моделями. При горизонтальном перемещении в пределах ширины штампа движение описывается линейным уравнением с разделяющимися переменными. В случае, когда горизонтальное перемещение больше ширины штампа, движение описывается дифференциальным уравнением с запаздывающим аргументом.

Заключение. Безразмерные переменные позволили привести уравнение траектории рабочего инструмента к единому виду независимо от размеров штампа и типа грунта. Предложенная модель может быть положена в основу описания взаимодействия процесса заглубления любого рабочего орудиями в грунт.

Ключевые слова: промышленное рыхление; траектория движения рабочего орудия в грунте; уравнение с разделяющимися переменными; уравнение с запаздывающим аргументом; безразмерные коэффициенты.

Как цитировать:

Трояновская И.П. Модель заглубления зуба рыхлителя на примере движения прямого штампа // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 2. С. 150–156. DOI: 10.17816/0321-4443-634059 EDN: XFKZAJ

Original Study Article

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-634059>

EDN: XFKZAJ

Model of the Ripper Tooth Deepening Based on the Example of the Motion of a Straight Stamp

Irina P. Troyanovskaya

South Ural State Agrarian University, Troitsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The purpose of industrial loosening is to destroy a single ground layer and it is used on hard (frozen or rocky) grounds. The fundamental difference between industrial loosening and agricultural loosening is the presence of forced deepening. The process of deepening the ripper into the ground is very important, and largely determines the efficiency of operation of the entire unit. During the process of forced deepening, the ripper performs a combined motion in the horizontal and vertical directions. Currently, there is a lot of experimental data on the process of deepening the working tool, but there is no adequate mathematical model.

AIM: Development of a mathematical model for deepening a ripper into the ground using the example of the motion of a straight stamp.

METHODS: At the initial stage of deepening the stamp into the ground, a linear dependence between vertical deformation and force is assumed. The inverse problem of dynamics was solved in the paper. The equation for the motion path of a working tool in the ground was found based on the known vertical force and horizontal motion of the tractor.

RESULTS: A mathematical model of the motion of a straight stamp under the vertical force during horizontal motion of the tractor has been developed. The two models describe the process of deepening a stamp in the ground. For the horizontal motion within the width of the stamp, the motion is described by a linear equation with separable variables. In case of the horizontal motion greater than the width of the stamp, the motion is described by a differential equation with a retarded argument.

CONCLUSION: Dimensionless variables made it possible to reduce the equation of the working tool path to a single form, regardless of the size of the stamp and the type of ground. The developed mathematical model can be used as a basis for describing the process of deepening any working tool into the ground.

Keywords: industrial loosening; motion path of the working tool in the ground; equation with separable variables; equation with retarded argument; dimensionless coefficients.

To cite this article:

Troyanovskaya IP. Model of the Ripper Tooth Deepening Based on the Example of the Motion of a Straight Stamp. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(2):150–156. DOI: 10.17816/0321-4443-634059 EDN: XFKZAJ

Submitted: 05.07.2024

Accepted: 18.04.2025

Published online: 08.05.2025

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время рыхление грунта получило широкое применение в различных областях народного хозяйства.

1. В сельском хозяйстве рыхление является заключительной операцией мелкой обработки почвы, предназначенной для увеличения ее пористости. Рыхление увеличивает доступ воздуха в глубокие слои почвы, что усиливает разложение органических остатков и накопление питательных веществ в доступной для растений форме. Поверхностный рыхлый слой почвы препятствует капиллярному поднятию влаги и излишнему её испарению. Попутно при рыхлении почвы уничтожаются всходы сорняков. В агропромышленном комплексе для рыхления используют культиваторы [1–2], бороны [3–4], сепараторные машины [5–6] и другие рыхлительные орудия [7].
2. При строительстве различных объектов технологический цикл разработки грунта часто включает в себя процесс рыхления, целью которого является разрушения единого пласта и увеличение объема грунта для дальнейшей его разработки. Процесс промышленного рыхления наиболее актуален при разработке мерзлых и скальных пород, характеризующихся повышенной твердостью. Для этих целей чаще всего используются бульдозерно-рыхлительные агрегаты на базе гусеничных тракторов. Специальные ножи и зубья рыхлительного оборудования способны проникать глубоко в грунт и эффективно его рыхлять [8].
3. В горнодобывающей отрасли рыхление является одним из способов подготовки горных пород к выемке полезных ископаемых. В зависимости от типа горной породы используется механический, термический, гидравлический или взрывной способ рыхления. Механический способ рыхления представляется самым безопасным и наиболее широко распространён при открытых горных работах. Для механического рыхления используются фрезерные комбайны [9–10].

В агропромышленном комплексе процесс рыхления почвы достаточно хорошо изучен [11–12]. Однако, он принципиально отличается от процесса промышленного рыхления отсутствием принудительного заглубления [13]. Для промышленного рыхления процесс заглубления рабочего органа во многом определяет эффективность работы всего машинно-тракторного агрегата.

В настоящий момент существуют математические модели взрывного рыхления [14], газодинамического рыхления [15], рыхления с помощью сжатого воздуха [16], но отсутствуют модели механического рыхления. Между тем, по механическому способу промышленного рыхления накоплен большой объём экспериментальных данных, обработка которого производится посредством получения различных эмпирических зависимостей [17–18].

Существующие попытки математического моделирования работы рыхлителя, как правило, рассматривают вертикальное и горизонтальное его движение раздельно. Это является не вполне правильным, так как в случае принудительного заглубления, рыхлитель осуществляет совместное движение в горизонтальном и вертикальном направлении. Свойства грунта, при этом зависят от его деформации, определяемой твердостью [19].

Цель исследования — разработка математической модели заглубления рыхлителя в грунт на примере движения прямого штампа.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Движение рабочего орудия в грунте определяется кинематическими и силовыми зависимостями. Рассмотрение процесса принудительного заглубления зуба рыхлителя в грунт было проведено путём решения второй задачи динамики точки. По известному вертикальному усилию и горизонтальному перемещению трактора определялась траектория его движения. Модель движения зуба рыхлителя в грунте рассмотрена на примере прямого штампа.

Начальное погружение зуба рыхлителя на твердых грунтах составляет всего 10–50 мм. Это позволило нам принять допущение о линейной зависимости между деформацией и усилием в вертикальном направлении [20–21]. Тогда связь между удельным давлением q и вертикальной деформацией грунта h имеет вид:

$$q = ch, \quad (1)$$

где c — коэффициент пропорциональности.

Процесс заглубления зуба рыхлителя на глубину h исследовался на примере прямого штампа с шириной b (рис. 1). Вертикальное движение штампа осуществляется под действием усилия P . Одновременно штамп

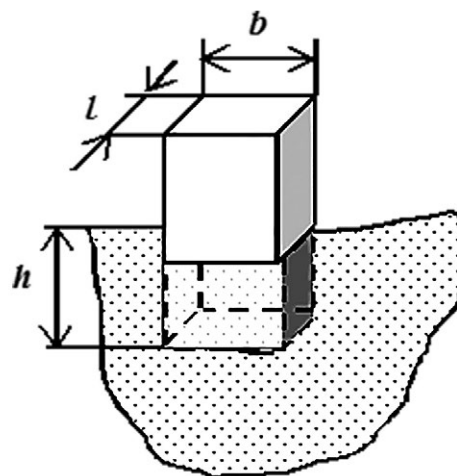


Рис. 1. Схема вертикального погружения прямого штампа в грунт.
Fig. 1. Diagram of vertical deepening of a straight stamp into the ground.

осуществляет движение в горизонтальном направлении за счет движения трактора. Разделять эти два движения неверно, так как они взаимно влияют друг на друга. Поэтому необходимо описать совокупное движение штампа под действием вертикального усилия при заданном горизонтальном движении.

Под действием только одной вертикальной силы P штамп заглубляется на глубину h_0 (рис. 2). Линейное удельное давление под опорной площадкой штампа составляет $q_1 = P/b$.

Добавим теперь к вертикальному заглублению горизонтальное (вдоль оси x) перемещение штампа. Обозначим элементарное горизонтальное перемещение dx . Тогда условие равновесия приобретает вид:

$$q_1 dx = bdq_1 \quad \text{или} \quad hdx = bdh. \quad (2)$$

Вертикальная деформация грунта опорной площадкой штампа существенно зависит от его горизонтального перемещения. Например, пока горизонтальное перемещение меньше ширины штампа $0 \leq x \leq b$ вертикальная деформация равна вертикальному перемещению $h = y$. Однако, как только горизонтальное перемещение станет больше ширины штампа $b < x$, это равенство нарушается. Поэтому, для исследования движения штампа рассмотрим эти этапы подробнее.

ЭТАП ПЕРВЫЙ $0 \leq x \leq b$ (ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ НЕ ПРЕВЫШАЕТ ШИРИНУ ШТАМПА)

Поскольку $h = y$, то дифференциальное уравнение (2) можно записать в виде:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y}{b} \quad (3)$$

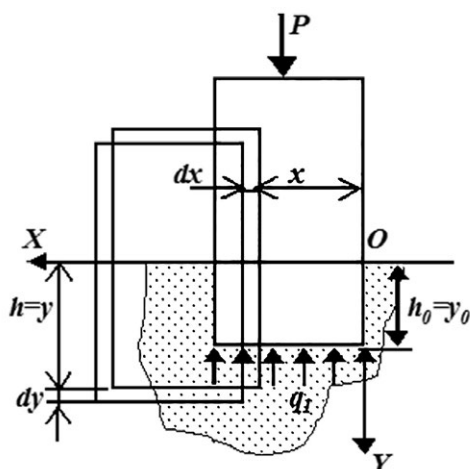


Рис. 2. Схема горизонтального перемещения прямого штампа в грунте при действии вертикальной силы (в пределах ширины штампа).

Fig. 2. Diagram of horizontal motion of a straight stamp in the ground under the vertical force (within the width of the stamp).

Уравнение (3) относится к классу линейных дифференциальных уравнений с разделяющимися переменными, и его общее решение имеет вид [22]:

$$y(x) = Ce^{x/b}, \quad (4)$$

где C — постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий: $x_{(t=0)} = 0$; $y_{(t=0)} = y_0$.

Подставляя начальные условия, находим значение постоянной интегрирования $C = y_0$. Тогда уравнение движения на первом этапе (4) приобретает вид:

$$y(x) = y_0 e^{x/b}. \quad (5)$$

ЭТАП ВТОРОЙ $b < x$ (ГОРИЗОНТАЛЬНОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ БОЛЬШЕ ШИРИНЫ ШТАМПА)

На втором этапе (рис. 3) величина вертикальной деформации грунта под задней кромкой штампа равна

$$h(x) = y(x) - y(x-b) \quad (6)$$

и дифференциальное уравнение (3) приобретает вид

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y(x) - y(x-b)}{b}. \quad (7)$$

Уравнение (7) относится к классу линейных дифференциальных уравнений с отклоняющимся (запаздывающим) аргументом, где начальная функция определяется на предыдущем участке $0 \leq x \leq b$ уравнением (5).

Решение уравнения (7) определяется методом шагов, идея которого заключается в сведении данного уравнения с запаздывающим аргументом к обыкновенному дифференциальному уравнению без запаздывания [23]. Для этого в уравнение (7) необходимо подставить

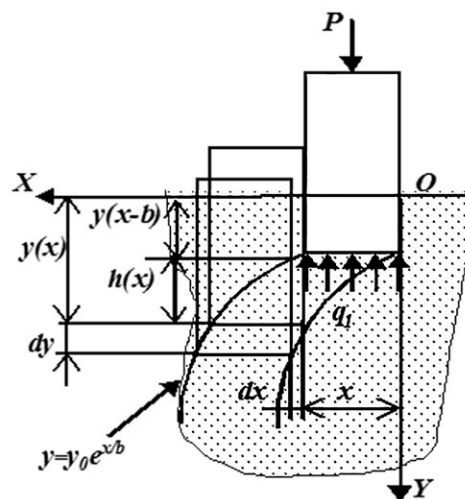


Рис. 3. Схема горизонтального перемещения прямого штампа в грунте при действии вертикальной силы (за пределами ширины штампа).

Fig. 3. Diagram of horizontal motion of a straight stamp in the ground under the vertical force (beyond the width of the stamp).

значение начальной функции, полученной на предыдущем участке согласно уравнению (5):

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y(x) - y_0 e^{(x-b)/b}}{b}. \quad (8)$$

Уравнение (8) представляет собой обыкновенное линейное дифференциальное уравнение первого порядка, общее решение которого имеет вид [22]:

$$y(x) = -\frac{y_0 x}{b} e^{(x-b)/b} + C e^{x/b}. \quad (9)$$

С учётом начальных условий $x_{(t=0)} = b$ $y_{(t=0)} = y_0 e$ уравнение траектории движения (9) приобретает следующий вид:

$$y(x) = y_0 e^{(x-b)/b} \left(e + 1 - \frac{x}{b} \right). \quad (10)$$

Это решение должно использоваться в качестве начальной функции на следующем шаге второго этапа. Такой же алгоритм предусматривается для всех последующих шагов (решение на предыдущем этапе используется в качестве начальной функции следующего этапа).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для получения результатов математической модели (5) и (10) воспользуемся численным методом. Для этого мы использовали математический пакет *Mathcad*, позволяющий решать дифференциальные уравнения методом Рундгера.

Мы получили аналитический вид уравнений траекторий движения зуба рыхлителя на первом этапе (5) и первом шаге второго этапа (10). На следующем шаге горизонтальное перемещение (аргумент) лежит в пределах $b \leq x \leq 2b$. Значение функции заглубления изменяется в пределах:

$$y_0 e \leq y(x) \leq y_0 e(e-1). \quad (11)$$

Численный метод позволяет для использования в качестве начальной функцией следующего этапа решение, полученное на предыдущем шаге, записать в виде аппроксимирующей функции. Мы для этих целей использовали систему *Excel*. Аппроксимирующие функции записывались в виде полинома второго порядка. При этом ошибка составляла за пределами третьего знака после запятой. Внешний вид аппроксимирующей функции на втором шаге второго этапа имел вид:

$$y(x) = y_0 \left[0,149 \left(\frac{x}{b} \right)^2 + 1,5209 \left(\frac{x}{b} \right) + 1,0416 \right]. \quad (12)$$

Согласно уравнению (8), производная dy/dx на втором этапе меньше своего значения на первом этапе. Это

соотношение сохраняется и для всех последующих шагов. Следовательно, погрешность аппроксимирующего полинома по отношению к точному решению не возрастает. Преимущество предлагаемого нами метода заключается в том, что аппроксимирующую функцию на каждом последующем шаге можно записать в виде полинома, не увеличивая его степень.

Общий вид аппроксимирующих полиномов на последующих шагах второго этапа:

$$\begin{aligned} 2b \leq x \leq 3b \\ y(x) = y_0 \left[0,0175 \left(\frac{x}{b} \right)^2 + 1,9101 \left(\frac{x}{b} \right) + 0,7795 \right]; \\ 3b \leq x \leq 4b \\ y(x) = y_0 \left[8 \cdot 10^{-12} \left(\frac{x}{b} \right)^2 + 2 \left(\frac{x}{b} \right) + 0,666 \right]; \\ 4b < x \quad y(x) = y_0 \left[2 \left(\frac{x}{b} \right) + 0,666 \right]. \end{aligned}$$

Вид аппроксимирующих полиномов показывает, что функция $y(x) = y_0(2x/b + 0,666)$ является асимптотой для всех траекторий $y(x)$ движения штампа. Кроме того, при достаточно больших горизонтальных смещениях x прослеживается линейная зависимость вертикального перемещения от горизонтального.

ОБСУЖДЕНИЕ

Видно, что функция вертикального перемещения $y(x)$ зависит от двух параметров: начального погружения y_0 и ширины штампа b . Ширина штампа b является геометрической характеристикой самого штампа и напрямую определяет размер шага заглубления. В пределах одного шага, максимальная величина заглубления имеет одно и то же значение (рис. 4, а). Величина начального заглубления y_0 является характеристикой грунта и зависит (1) от вертикального усилия P . Таким образом, глубина погружения штампа $y(x)$ пропорционально величине начального заглубления y_0 (рис. 4, б).

Для обобщения введём относительные переменные $\xi = x/b$ и $\eta = y/y_0$, позволяющие свести обе зависимости (см. рис. 4) к одной общей зависимости (рис. 5). Полученная зависимость описывает траекторию заглубления штампа в произвольный грунт независимо от геометрических параметров штампа и может быть использована при проектировании рабочих орудий рыхлителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель движения прямого штампа под действием вертикальной силы

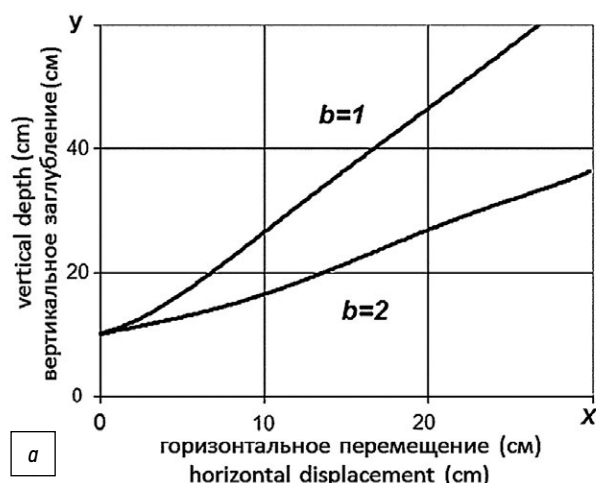


Рис. 4. Траектория $y(x)$ движения штампа при разной а) — ширине b и б) — начальном погружении y_0 .

Fig. 4. The motion path $y(x)$ of the stamp for different a: widths b and b: initial depths y_0 .



Рис. 5. Траектория движения штампа $y(x)$ для разных грунтов и размеров штампа.

Fig. 5. Motion path of the stamp $y(x)$ for various soils and stamp sizes.

при горизонтальном перемещении, которая может быть положена в основу описания взаимодействия процесса заглубления рабочего орудия в грунт.

Процесс погружения прямого штампа в грунт под действием вертикального усилия и при заданном горизонтальном перемещении описывается разными моделями на разных этапах:

- на первом этапе $b \geq x$ модель движения описывается линейным уравнением с разделяющимися переменными;
- на втором этапе $b \leq x$ модель движения описывается линейным дифференциальным уравнением с западающим аргументом.

Решение уравнений движения удобно выполнять численным пошаговым методом, аппроксимируя их полиномом не выше второго порядка.

Введение безразмерных переменных позволяет свести уравнение траектории движения штампа к единому виду, не зависимо от его размеров и типа грунта.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад автора. Автор одобрил рукопись (версию для публикации), а также согласился нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Автор заявляет об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы автор не использовал ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution: Thereby, the author made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agrees to be accountable for all aspects of the work.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The author has no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or non-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: In creating this work, the author did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement: Editor's policy in terms of collective use of data is not applicable to this paper, any new data are neither collected nor created.

Generative AI: Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review: The paper was submitted to the journal in a proactive way and was reviewed according to the standard procedure. Two external reviewers, a member of the editorial board and the scientific editor of the journal took part in the review.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Gorobey VP. Technical solutions for loosening and cultivation of vineyards between rows. *Automated design in mechanical engineering*. 2024;16:26–29. doi: 10.26160/2309-8864-2024-16-26-29 (In Russ.) EDN: RAOAAC
2. Blednykh VV, Svechnikov PG, Troyanovskaya IP. Tractor plough with repeated cutting angle on working elements. *Procedia Engineering*. 2017;1577–1582. doi: 10.1016/j.proeng.2017.10.680 EDN: ZRGKGF
3. Khudiyarov BYu, Rustamova SR, Toilyev Sh, et al. Features of tooth harrow designs for surface tillage. *Young scientist*. 2023;12:19–22. (In Russ.) EDN: MQYHIU
4. Tarasenko BF, Kuzmin VV, Partko SA, et al. Harrow with turning disc section. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(1):10–20. doi: 10.15507/2658-4123.033.202301.010-020 EDN: DWOGKV
5. Syromyatnikov Y, Troyanovskaya I, Voinash S, et al. Productivity of tillage loosening and separating machines in an aggregate with tractors of various capacities. *Journal of Terramechanics*. 2021;98:1–6. doi: 10.1016/j.jterra.2021.09.002 EDN: SLTSPE
6. Syromyatnikov Yu, Voinash S, Tikhonov E, et al. Selection of parameters of the disc working bodies of the ripping-separating machine for soil treatment. *Journal of Terramechanics*. 2023;108:1–5. doi: 10.1016/j.jterra.2023.03.005 EDN: DOOGFD
7. Romanyuk N, Ednach V., Nukeshev S, et al. Improvement of the design of the plow-subsoiler-fertilizer to increase soil fertility. *Journal of Terramechanics*. 2023;106:89–93. doi: 10.1016/j.jterra.2023.01.001 EDN: FPCXMG
8. Troyanovskaya I, Grebenshchikova O, Zhitenko I. Process of soil destruction: experimental results. *Matec Web of Conferences*. 2019;00041. doi: 10.1051/mateconf/201929800041 EDN: KQKTYO
9. Cheban AYU. Application of milling combines in construction and mining of construction materials. *Bulletin of the Pacific State University*. 2012;(3):105–108. (In Russ.) EDN: PEVIKB
10. Balabyshko AM, Braitsev AV, Limansky AV. Usage of milling combines for selective excavation of potassium layers. *Gornyi Zhurnal*. 2007;(11):44–45. (In Russ.) EDN: HHBOYB
11. Blednykh VV, Svechnikov PG, Troyanovskaya IP. Calculation model of technological process of soil crumbling by means of tillage working organ. *Tractors and agricultural machinery*. 2016;(3):22–26. (In Russ.) EDN: VPWKTH
12. Blednykh VV, Svechnikov PG, Troyanovskaya IP. Analytical model of the technological process of soil pulverization and tillage tools. *Procedia Engineering*. 2015;69–74. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.010 EDN: VVLXBH
13. Troyanovskaya IP, Raznoshinskaya AV, Kozminykh VA, et al. Experimental tests of industrial-scale ripping of soil. *Gornyi Zhurnal*. 2021;(5):87–90. doi: 10.17580/gzh.2021.05.11 (In Russ.) EDN: YSEKUQ
14. Iovenko VV, Chebrovskiy AA, Solodovnik EV, et al. Physical modeling of the process of explosive loosening of rock materials. *Engineering Bulletin of the Don*. 2021;(7):446–453. (In Russ.) EDN: DPSCWI
15. Maksimov SV, Ivkin VS, Porohin AS. Modelling of processes of interaction between the working part of a gas-dynamic ripper and strong or frozen ground. *Bulletin of Ulyanovsk State Technical University*. 2006;(3):64–67. (In Russ.) EDN: RCKZRX
16. Yalaletdinov DA, Rahimov IR, Kulikova AP, et al. Simulation of soil loosening processes with compressed air. *Chelyabinsk physical and mathematical journal*. 2024;9(1):160–168. (In Russ.) doi: 10.47475/2500-0101-2024-9-1-160-168 EDN: LVCIVQ
17. Naradovy DI, Troyanovskaya IP. Experimental results of the loosening process. *Modern transport technologies: tasks, problems, solutions*. 2018:176–181. (In Russ.) EDN: YHFORN
18. Mitsyn GP, Pozin BM, Naradovy DI, et al. Some regularities of the process of loosening soil tractor rippers (experimental results). *Problems of design, construction and operation of highways*. 2001. P. 226–229. (In Russ.) EDN: ULCGEV
19. GOST 12248.4-2020 Soils. *Determination of deformability characteristics using the compression method*. Moscow: Standardinform. 2020. (In Russ.)
20. Shishlov SA, Shishlov AN, Shishlov DS. Theoretical prerequisites for calculating soil resistance to the action of a deformer. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2024;(18):130–135. doi: 10.22450/1999-6837-2024-18-4-130-135 (In Russ.) EDN: UVRPGT
21. Kyatov NH. Method for determining the module of soil deformation according to the results of stamping tests. *News of the North Caucasus State Academy*. 2023;(4):8–12. (In Russ.) EDN: QMIJEJ
22. Zaitsev VF, Polyanin AD. *Handbook of ordinary differential equations*. Moscow: Fizmatlit; 2001. (In Russ.) EDN: RBBGHR
23. Velmisov PA, Macenko PK, Tamarova YuA. Investigation of an equation with a deviating argument. *Mathematical modeling, numerical methods and program packages*. 2024:32–34. (In Russ.) EDN: BASQNN

ОБ АВТОРЕ

Трояновская Ирина Павловна,

Почетный машиностроитель РФ, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Тракторы, сельскохозяйственные машины и земледелие»;

адрес: Россия; 457103, Троицк, ул. Гагарина, д. 13;

ORCID: 0000-0003-2763-0515;

eLibrary SPIN: 8733-7935;

e-mail: tripav63@mail.ru

AUTHOR'S INFO

Irina P. Troyanovskaya,

Honorary Mechanical Engineer of the Russian Federation, Dr. Sci. (Engineering), Professor,

Professor of the Tractors, Agricultural Machinery and Arable Farming Department;

address: 13 Gagarina st, Troitsk, Russia, 457103;

ORCID: 0000-0003-2763-0515;

eLibrary SPIN: 8733-7935;

e-mail: tripav63@mail.ru