

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С РАБОЧИМИ ОРГАНАМИ ВЫКОПОЧНОЙ МАШИНЫ

доктор технических наук, доцент **О.Р. Дорняк**¹

доктор технических наук, профессор **М.В. Драпалюк**¹

кандидат технических наук **И. В. Казаков**²

аспирант **Э.С. Оруджов**¹

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация

2 – ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», г. Пушкино, Российская Федерация

Выкопчная машина VM-1,3A для механизированной обработки почвы в питомниках имеет высокую производительность и обеспечивает выкопку саженцев с минимальным повреждением корневой системы. В работе предложена математическая модель, которая позволяет прогнозировать разрушение почвенного слоя в зависимости от свойств почвы и от кинематических и конструктивных параметров выкопчной машины. В математическую модель включены нестационарные уравнения движения грунта, реологическое уравнение состояния Рамберга-Осгуда, записанное для сложного напряжённого состояния, соотношения Коши для конечных деформаций, критерий разрушения почвенного слоя, начальные и граничные условия. Сформулированная нестационарная начально-краевая задача является нелинейной. В работе выполнен ее численный анализ. Проведенные расчеты показали существенно неоднородный характер полей перемещений и интенсивности напряжений. Рассмотренный режим работы выкопчной машины приводит к значительной деформации свободной поверхности, что способствует разрыхлению почвенного слоя и освобождению корневой системы саженцев. Разработанная вычислительная технология моделирования упругопластического деформирования почвенного фрагмента со свободной поверхностью может быть полезна при разработке эффективных режимов эксплуатации выкопчной машины для различных видов почв.

Ключевые слова: математическое моделирование, грунт, напряженно-деформированное состояние, выкопчная машина

MATHEMATICAL MODEL OF THE SOIL STRESS-STRAIN STATE IN THE PROCESS OF ITS INTERACTION WITH THE WORKING BODIES OF THE DIGGING MACHINE

DSc (Engineering), Associate Professor **O.R. Dornyak**¹

DSc (Engineering), Professor **M.V. Drapalyuk**¹

PhD (Engineering) **I.V. Kazakov**²

PhD student **E.S. Orudzhov**¹

1 – FSBEI HE Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation

2 – FBI All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry, Pushkino, Russian Federation

Abstract

The VM-1.3A digging machine for mechanized tillage in nurseries has high productivity and ensures the digging of seedlings with minimal damage to the root system. The paper proposed a mathematical model that allows predicting the destruction of the soil layer depending on the properties of the soil and on the kinematic and structural parameters of the digging machine. The mathematical model includes nonstationary equations of soil motion, the Ramberg-Osgood rheological equation, written for a complex stress state, the Cauchy relation for finite deformations, the criterion for the

destruction of the soil layer, and initial and boundary conditions. The formulated nonstationary initial-boundary value problem is nonlinear. In the work of its numerical analysis. The calculations performed showed a substantially non-uniform character of the displacement fields and stress intensity. The considered mode of operation of the digging machine leads to a significant deformation of the free surface, which contributes to the loosening of the soil layer and the release of the root system of seedlings. The developed computational technology for modeling elastoplastic deformation of a soil fragment with a free surface can be useful in the development of effective modes of operation of a digging machine for various types of soil.

Keywords: mathematical modeling, soil, stress-strain state, digging machine

Введение

Эффективное решение одной из главных задач лесного хозяйства – восстановление и выращивание лесов – требует совершенствования системы лесокультурных и лесохозяйственных мероприятий, направленных на интенсификацию и повышение качества производственных процессов [1, 2]. Один из важных этапов лесовосстановления связан с выращиванием саженцев лесных культур в специализированных питомниках. Для механизированной обработки почвы в питомниках имеется достаточно широкий выбор оборудования [3, 4]. Однако технология выкопки саженцев, которая решалась и часто решается с применением ручного труда, нуждается в новом оборудовании. Обеспечение выкопки саженцев с минимальным повреждением корневой системы и высокой производительностью может обеспечить выкопочно-транспортирующая машина ВМ-1,3А (ВМ) [3]. Эта машина, практически не повреждая корневую систему саженцев, сводит к минимуму ручной труд.

Разнообразие производственных условий требует определения наиболее эффективных режимных параметров ВМ для разработки верхнего слоя почвы. В данной работе предложена математическая модель, которая позволяет прогнозировать напряжённо-деформированное состояние почвенного слоя в зависимости от кинематических и конструктивных параметров выкопочно-транспортирующей машины, а также от свойств почвы. В большинстве известных публикаций, связанных с выкопочно-транспортирующими машинами различного типа, рассматривались особенности движения самих машин и их рабочих органов, при этом напряжённо-деформированное состояние грунта не исследовалось [5].

На рис. 1 представлена расчётная схема почвенного фрагмента для формирования матема-

тической модели поведения грунта при взаимодействии с рабочими органами машины – планками и билами.

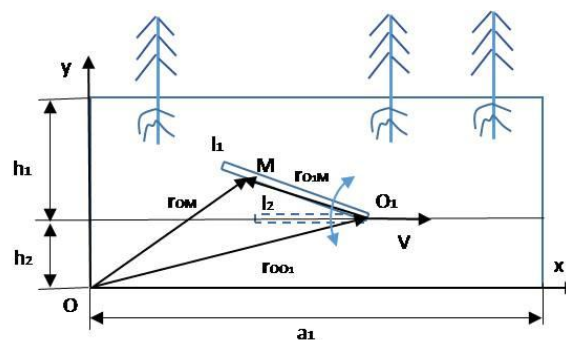


Рис. 1. Расчётная схема

Форма фрагмента представляет собой прямоугольник, выделенный из полосы, которая подрезается ножом ВМ. Высота полосы равна $h_1 + h_2$. При этом глубина погружения вала, на который крепится определенное число бил и планок, – h_1 . Отметим что величина h_1 определяется глубиной преимущественного залегания корней. Для саженцев сосны она составляет примерно 30 см.

Длина планок составляет $l_1 = 45$ см, бил – $l_2 = 30$ см. Ширина выделенного фрагмента a_1 выбрана $\sim 5l_1$. Предполагается, что вблизи боковых границ массив грунта деформирован незначительно.

Постановка задачи

Математическая модель процесса взаимодействия почвенного слоя и выкопочно-транспортирующей машины построена при следующих основных предположениях.

1. Материал грунта – несжимаемая однородная сплошная среда.
2. По реологическим свойствам материал грунта является нелинейно-упругопластическим.

3. Распределение влажности по высоте гряды считается однородным.

4. Взаимное влияние на деформирование грунта планок и бил не учитывается.

5. Процесс является изотермическим.

6. Напряженное состояние грунта можно рассматривать в рамках плоской задачи.

Уравнения математической модели записываются относительно неподвижной системы отсчета ОХУ (рис. 1).

Уравнения движения грунта имеют вид [6]

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y},$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} - \rho g. \quad (1)$$

Здесь ρ – плотность грунта; u_x, u_y – компоненты вектора перемещения частиц грунта, m ; x, y – координаты, m ; t – время, c ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; σ_{ij} ($i, j = x, y$) – компоненты тензора напряжений, Па.

Для замыкания уравнений (1) необходимо использовать реологическое уравнение, связывающее тензоры напряжений и деформаций.

Опыты деформирования образцов грунта различного типа показывают, что эти материалы демонстрируют сложное реологическое поведение в неупругой области деформирования [7]. Это связано с влиянием ряда факторов, среди которых отмечают неоднородность структуры материала, наличие в нем остаточных микронапряжений, развитие микродефектов при интенсивности напряжений, превышающих предел текучести [8].

В исследованиях, требующих учета пластического поведения грунта, часто используют реологическое уравнение Рамберга – Осгуда, которое в инвариантной форме может быть записано следующим образом:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E}, F_T(I_1, I_2, I_3) \leq 0; \\ \frac{\sigma}{E} + \frac{\varepsilon_0}{\sigma_T} \sigma \left[\sqrt{\frac{1}{2} \text{tr} \sigma^2 / \sigma_T} \right]^{n-1}, \begin{cases} F_T(I_1, I_2, I_3) > 0 \\ F(I_1, I_2, I_3) < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

В уравнении (2) тензоры подчеркнуты волнистой линией (ε – тензор деформаций, σ – тензор напряжений). I_1, I_2, I_3 – инварианты тензора напряжений. Реологические параметры модели,

которые должны определяться экспериментально: σ_T – предел текучести, Па, E – модуль упругости, Па, n и ε_0 – константы материала. Неравенство $F_T(I_1, I_2, I_3) > 0$ определяет условие текучести материала, при котором имеет место неупругое деформирование. Второе неравенство $F(I_1, I_2, I_3) > 0$ является критерием разрушения материала, при выполнении которого модель Рамберга – Осгуда не работает. Это условие записано в статическом приближении, когда влиянием динамических эффектов на неупругое поведение материала можно пренебречь.

В литературе уравнение Рамберга – Осгуда приводится, как правило, для одноосного деформированного состояния в виде [8-11]

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E}, \sigma \leq \sigma_T \\ \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_0 \left[\frac{\sigma}{\sigma_T} \right]^n, \sigma_T < \sigma < \sigma_p \end{cases} \quad (3)$$

Здесь σ_p – предел прочности материала при одноосном деформировании.

В случае конечных деформаций связь между компонентами тензора деформаций и вектора перемещений имеет вид [6]

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (4)$$

Уравнения (1), (2), (4) должны быть дополнены начальными и граничными условиями.

В предлагаемой постановке задачи граничные условия представляются двумя типами: на неподвижных элементах почвы и подвижных поверхностях контакта бил и планок с грунтом.

На границах выделенного фрагмента почвы имеют место смешанные граничные условия.

Верхняя граница свободна от внешних нагрузок:

$$\sigma \cdot n \Big|_{y=h_1+h_2} = 0. \quad (5)$$

Здесь n – вектор единичной внешней нормали.

Нижняя граница считается закрепленной на основании, которое не затрагивается рабочими органами машины. Здесь вектор перемещения равен нулю:

$$u \Big|_{y=0} = 0. \quad (6)$$

На боковых границах принято, что грунт практически неподвижен:

$$\left. \frac{r}{u} \right|_{x=0}^{x=a_1} = 0. \quad (7)$$

Рассмотрим внутренние границы изучаемого грунтового фрагмента, совпадающие с границами движущегося тела планки или билы. Данные элементы имеют известную практически постоянную угловую скорость ω . Угловая амплитуда колебаний составляет примерно 30° . Рабочие элементы выкопчной машины участвуют в составном – плоскопараллельном движении, которое является суммой поступательного движения вместе с выкопчной машиной и вращательного движения, организованного с помощью карданной передачи. Задачей математического моделирования является определение наиболее производительных и благоприятных для выкопки саженцев режимных параметров ВМ: ω – угловой скорости рабочего органа и V – линейной скорости машины по прямолинейной траектории.

Отметим, что тела планок и бил недеформируемы. В процессе взаимодействия с грунтом скорости их точек могут быть определены по известной формуле

$$\vec{v} = \vec{v}_{O_1} + [\omega, \vec{r}_{O_1M}]. \quad (8)$$

Для проекций вектора скорости частицы M грунта, связанной с поверхностью вращающегося элемента условием прилипания, получаем

$$\begin{aligned} v_{Mx} &= v_{O_1x} - \omega(y_M - y_{O_1}), \\ v_{My} &= v_{O_1y} + \omega(x_M - x_{O_1}). \end{aligned} \quad (9)$$

Полагая $v_{O_1x} = V$, $v_{O_1y} = 0$, на внутренних подвижных границах имеем следующие условия для скоростей частиц грунта:

$$\begin{aligned} v_x &= V - \omega(y - h_2); \\ v_y &= \omega(x - Vt). \end{aligned} \quad (10)$$

Работа выкопчной машины приводит к развитию в массиве грунта процессов упруго-пластической деформации и формированию зон разрушения. В качестве критерия разрушения почвенного слоя может быть принят критерий Друккера-Прагера, который успешно применяется для оценки опасных состояний различных строи-

тельных материалов, а также при изучении прочностных свойств геометриалов [7, 12]. Уравнение Друккера-Прагера имеет вид

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{J_2} - B \cdot I_1 - A, \\ A &= \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_p \sigma_c}{\sigma_p + \sigma_c}, \quad B = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sigma_p - \sigma_c}{\sigma_p + \sigma_c}, \end{aligned} \quad (11)$$

где I_1, J_2 – первый и второй инварианты тензора напряжений и девиатора тензора напряжений соответственно, МПа; σ_c и σ_p – пределы прочности материала на одноосное сжатие и растяжение, МПа. При формальном предположении $B = 0$ функция текучести Друккера-Прагера переходит в также широко применяемую функцию текучести Хубера-Мизеса:

$$F = \sqrt{J_2} - A. \quad (12)$$

Для расчета компонент девиатора тензора напряжений следует использовать соотношение

$$\tau_{ij} = \sigma_{ij} - I_1 \delta_{ij}.$$

Выражения для инвариантов I_1, J_2 с учетом предположения о плоском деформированном состоянии имеют вид

$$\begin{aligned} I_1 &= tr \sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}), \\ J_2 &= \tau_{xx}\tau_{yy} + \tau_{xx}\tau_{zz} + \tau_{zz}\tau_{yy} - \tau_{xy}^2, \\ \tau_{xx} &= \frac{1}{3}(2\sigma_{xx} - \sigma_{yy}), \quad \tau_{yy} = \frac{1}{3}(2\sigma_{yy} - \sigma_{xx}), \\ \tau_{xx} &= -\frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy}). \end{aligned} \quad (13)$$

Уравнение (11) и выражения (13) дают возможность произвести оценку целостности почвенного слоя.

В качестве начальных условий приняты условия равновесия:

$$\frac{r}{u} = 0. \quad (14)$$

Сформулированная математическая модель для описания процесса деформирования почвенного слоя [1, 2, 4-7, 10, 11, 14] является нестационарной и нелинейной, что делает ее достаточно сложной для исследования. Анализ модели можно провести с использованием численных методов.

Метод исследования и результаты

Численное исследование напряженно-деформированного состояния грунта по предложенной

математической модели выполнено с использованием платформы COMSOL Multiphysics 5.3a.

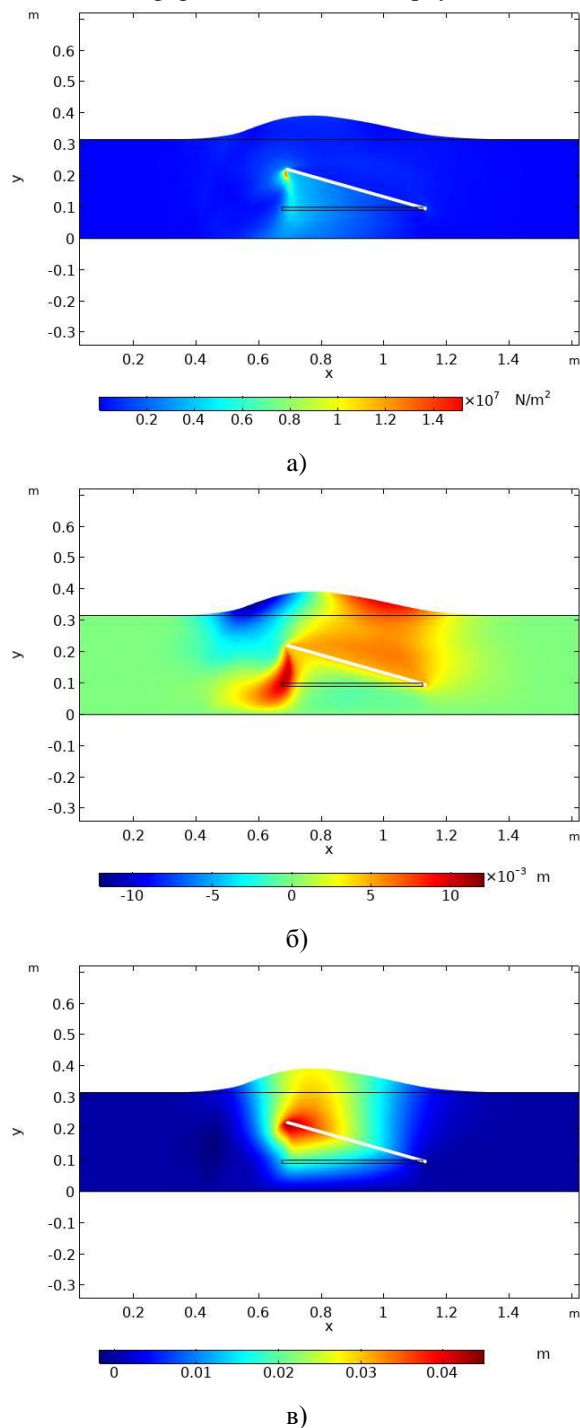


Рис. 2. Распределение в почвенном слое интенсивности напряжений $\sqrt{3J_2}$ а); перемещений u_{x-} ; б) перемещений u_{y-} ; в) при $t = 0.005$ с для значений режимных параметров выкопчной машины $\omega = 20$ с⁻¹, $V = 1$ м/с и реологических параметров грунта, указанных в тексте

Расчетная модель создана с использованием базовой части универсальной среды численного моделирования специализированного модуля «Structural mechanics».

Технологии пакета COMSOL предусматривают возможность использования подвижных сеток, что позволяет определять форму свободной поверхности почвенного слоя в любой момент времени. Кроме того, такие сетки имеют оптимальное число степеней свободы, что также положительно влияет на численную эффективность предлагаемой технологии.

На рис. 2 приводятся результаты, иллюстрирующие работу вычислительного алгоритма. Расчеты проведены для частного случая модели предельного состояния грунта, определяемого условием Мизеса. Реологические параметры грунта были выбраны, следуя данным [11, 13-14] – $\sigma_T = 6 \cdot 10^3$ Па, $E = 10^7$ Па, $\nu = 12$ и $\epsilon_0 = 0.02$. Численные расчеты показывают существенно неоднородный характер полей перемещений и интенсивности напряжений. Выбранный режим работы выкопчной машины приводит к значительной деформации свободной поверхности, что способствует разрыхлению почвенного слоя и освобождению корневой системы саженцев.

Заключение

В работе предложена математическая модель напряженно-деформированного состояния грунта при воздействии на него планки или билы рабочего органа выкопчной машины. Разработана вычислительная технология моделирования упругопластического деформирования почвенного фрагмента со свободной поверхностью, содержащего внутренние подвижные границы. Данная технология предлагает удобный инструментарий, который может быть полезен в разработке эффективных режимов эксплуатации выкопчной машины для различных видов почв.

Библиографический список

1. Бартенева, И. М. Совершенствование технологий и средств механизации лесовосстановления : моногр. / И. М. Бартенева, М. В. Драпалюк, В. И. Казаков. – М. : ФЛИНТА: Наука, 2013. – 208 с.
2. Бартенева, И. М. Современное развитие конструкций лесопосадочных машин за рубежом / И. М. Бартенева, И. В. Попов // Лесотехнический журнал. – 2014. – № 2 (14). – С. 203-216.
3. Казаков, И. В. Машины, технология и оборудование для лесных питомников : моногр. / И. В. Казаков. – Пушкино : ВНИИЛМ, 2004. – 60 с.
4. Драпалюк, М. В. Совершенствование технологических операций и рабочих органов машин для выращивания посадочного материала и лесовосстановления : дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01: защищена 30.03.2007 / М. В. Драпалюк. – Воронеж, 2006. – 415 с.
5. Дручинин, Д. Ю. Математическая модель взаимодействия рабочего органа выкопной машины с почвой и корнями растений / Д. Ю. Дручинин, О. Р. Дорняк, М. В. Драпалюк // Электронный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – 2011. – № 68 (04). – Режим доступа: <http://www.ej.kubagro.ru/2011/04/pdf/13.pdf>.
6. Седов, Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1976. – Т. 1. – 536 с.; Т. 2. – 584 с.
7. Друккер, Д. Механика грунтов и пластический анализ или предельное проектирование / Д. Друккер, В. Прагер // Механика. Новое в зарубежной науке. Вып. 2: Определяющие законы механики грунтов. – М. : Мир, 1975. – С. 166-177.
8. Когаев, В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность : справ. / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков ; под. ред. К. В. Фролова. – М. : Машиностроение, 1985. – 224 с.
9. Ramberg, W. Description of stress-strain curves by three parameters / W. Ramberg, W. R. Osgood // National Advisory Committee For Aeronautics. Technical Note. – 1943. – No. 902.
10. Салихова, Н. К. Численное моделирование технологического процесса осадки стальной заготовки / Н. К. Салихова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная математика и механика. – 2014. – № 1. – С. 39-46.
11. Котляревский, В. А. Прочность и защитные свойства специальных сооружений. Методы расчета и программные средства / В. А. Котляревский. – Магнитогорск : ООО «ВЕЛД», 2014. – 86 с.
12. Surface Topography Formation in a Region of Plate Collision : Mathematical Modeling / S. N. Korobeinikov [et al.] // *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* – 2012. – No. 53:4. – P. 577-588.
13. Ториков, В. Е. О физических параметрах суглинистой почвы / В. Е. Ториков, С. И. Старовойтов, Н. Н. Чемисов // Земледелие. – 2016. – № 8. – С. 19-21.
14. Gallo, P. Some considerations on the J-integral under elastic-plastic conditions for materials obeying a Ramberg-Osgood law / P. Gallo, F. Berto // *Физическая мезомеханика.* – 2015. – Т. 18. – № 5. – P. 27-34.

References

1. Bartenev I. M., Drapalyuk M. V., Kazakov V. I. *Sovershenstvovanie tekhnologij i sredstv mekhanizacii lesovosstanovleniya* [Improvement of technologies and means of mechanization of reforestation]: monograph. M.: FLINTA: Nauka, 2013. 208 s. (in Russian)
2. Bartenev I. M., Popov I. V. *Sovremennoe razvitie konstrukcij lesoposadochnyh mashin za rubezhom* [The modern development of structures of tree-planting machines abroad]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*. Voronezh, 2014. № 2 (14). s. 203-216 (in Russian).
3. Kazakov I. V. *Mashiny, tekhnologiya i oborudovanie dlya lesnyh pitomnikov* [Machines, technology and equipment for forest nurseries]. Pushkino, 2004 (in Russian).
4. Drapalyuk M. V. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh operacij i rabochih organov mashin dlya vyrashchivaniya posadochnogo materiala i lesovosstanovleniya* [Improvement of technological operations and working bodies of machines for growing planting material and reforestation] : dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.21.01: zashchishchena 30.03.2007. Voronezh, 2006. 415 s. (in Russian)
5. Druchinin D. Yu., Dorniyak O. R., Drapalyuk M. V. *Matematicheskaya model' vzaimodejstviya rabocheho organa vykopnoy mashiny s pochvoj i kornyami rastenij* [Mathematical model of working unit co-operation of plant

lifter with soil and plants roots]. *Elektronnyj zhurnal KubGAU*. 2011. № 68 (04). URL: <http://www.ej.kubagro.ru/2011/04/pdf/13.pdf> (in Russian).

6. Sedov L. I. *Mekhanika sploshnoj sredy* [Continuum mechanics]. M.: Nauka, 1976. T. 1. 536 s., T. 2. 584 s. (in Russian)

7. Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*. 1952. V. 10. No. 2. P. 157-165.

8. Kogaev V. P., Mahutov N. A., Gusenkov A. P. *Raschety detalej mashin i konstrukcij na prochnost' i dolgovechnost': Spravochnik* [Calculations of machine parts and structures for strength and durability: Handbook] / pod. red. K. V. Frolova. M.: Mashinostroenie, 1985. 224 s. (in Russian)

9. Ramberg W., Osgood W. R. Description of stress-strain curves by three parameters. *National Advisory Committee For Aeronautics. Technical Note*. 1943. No. 902.

10. Salihova N. K. *Chislennoe modelirovanie tekhnologicheskogo processa osadki stal'noj zagotovki* [Numerical simulation of the technological process of steel billet precipitation]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya matematika i mekhanika*. 2014. № 1. S. 39-46 (in Russian).

11. Kotlyarevskij V. A. *Prochnost' i zashchitnye svojstva special'nyh sooruzhenij. Metody rascheta i programmnye sredstva* [Strength and protective properties of special structures. Calculation methods and software]. Magnitogorsk, ООО «VELD», 2014. 86 s. (in Russian)

12. Korobeinikov S. N. et al. Surface Topography Formation in a Region of Plate Collision: Mathematical Modeling. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2012, 53:4, 577-588.

13. Torikov V. E., Starovojtov S. I., Chemisov N. N. *O fizicheskikh parametroh suglinistoj pochvy* [On the physical parameters of the loamy soil]. *Zemledelie*. 2016. № 8. S. 19-21 (in Russian).

14. Gallo P., Berto F. Some considerations on the J-integral under elastic-plastic conditions for materials obeying a Ramberg-Osgood law. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2015. Vol. 18. № 5. P. 27-34.

Сведения об авторах

Дорняк Ольга Роальдовна – заведующий кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор технических наук, доцент, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ordornyak@mail.ru.

Драпалюк Михаил Валентинович – профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», доктор технических наук, профессор, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Казаков Игорь Владимирович – заведующий отделом механизации лесохозяйственных работ и стандартизации, ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», кандидат технических наук, г. Пушкино, Российская Федерация; e-mail: inqm@yandex.ru

Оруджов Эльман Саядович – аспирант ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», г. Воронеж, Российская Федерация

Information about authors

Дорняк Ольга Роальдовна – head of the department of electrical equipment, heating engineers and hydraulics, FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», DSc in Engineering, Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: ordornyak@mail.ru.

Drapalyuk Mihail Valentinovich – Professor of Forestry Mechanization and Machine Design department, FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», DSc in Engineering, Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: mail:md@vglta.vrn.ru.

Kazakov Igor Vladimirovich – head of department of the forestry mechanization and landscape of works and standardization of FBI «All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry», PhD in Engineering, Pushkino, Russian Federation; e-mail: inqm@yandex.ru.

Orudzhov Elman Saydovich – PhD student of the FSBEI HE «VSUFT», Voronezh, Russian Federation