

## ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА

УДК 630\*:658.011.54

*Д. Ю. Дручинин, О. Р. Дорняк, М. В. Драпалюк*

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЫКОПКИ САЖЕНЦЕВ С КОМОМ ПОЧВЫ

*Разработана математическая модель рабочего процесса машины для выкопки саженцев с комом почвы. На основе математического моделирования проведены теоретические исследования процесса выкопки саженцев с комом почвы. Представлены результаты компьютерных экспериментов, позволяющие оценить силовые показатели исследуемого процесса.*

**Ключевые слова:** *выкопчная машина; саженцы с комом почвы; теоретические исследования; математическая модель; выкопка саженцев.*

**Введение.** В настоящее время в лесокультурном производстве, лесовосстановительных работах и при озеленении территорий все большее применение получают крупномерные саженцы, которые пересаживаются с комом почвы. Данный вид посадочного материала имеет ряд преимуществ по сравнению с обычными видами сеянцев и саженцев [1–3]. Ранее авторами для механизации процесса выкопки и пересадки крупномерных саженцев с комом почвы были изучены имеющиеся исследования в данном вопросе, предложена конструкция специального агрегата – выкопчной машины, а также разработана математическая модель взаимодействия рабочего органа выкопчной машины с почвой и корнями саженцев [4–8].

Математическая модель взаимодействия рабочего органа с почвой и корнями саженцев позволяет провести теоретические исследования процесса выкопки саженцев с комом почвы и в дальнейшем определить оптимальные проектные параметры рабочего органа выкопчной машины.

**Целью** исследования является изучение процесса выкопки саженцев с комом почвы на основе составленной математической модели исследуемого процесса путем проведения компьютерных экспериментов.

**Результаты исследования.** В основе модели лежит дифференциальное уравнение движения основного элемента выкопчной машины – ее рабочего органа в виде двуплечего рычага вокруг неподвижной оси  $OY$  (1)

$$I_{oy}\ddot{\varphi} = M_{oy}(\vec{P}_{гц}) + M_{oy}(\vec{G}_p) - \tilde{M}_{oy}(P_{comp}), \quad (1)$$

где  $I_{oy}$  – момент инерции рычага относительно оси  $OY$ , кг·м<sup>2</sup>;  $\varphi$  – угол поворота, град.;  $\vec{P}_{гц}$  – сила давления, создаваемая в гидроцилиндрах, Па;  $\vec{G}_p$  – сила тяжести рычага, Н;  $\tilde{M}_{oy}(P_{comp})$  – суммарный момент сил сопротивления движению рабочего органа относительно оси  $OY$ , Н·м.

В расширенном виде уравнение (1) имеет вид

$$\begin{aligned}
 I_{Oy} \ddot{\varphi} = & ((O\tilde{B}\cos(\varphi + \varphi_{\tilde{B}})) \cdot (P_{2y} \cos \varphi_{2y}) - (O\tilde{B}\sin(\varphi + \varphi_{\tilde{B}})) \cdot (P_{2y} \sin \varphi_{2y})) + (m_p \cdot g \cdot O\tilde{C}\cos(\varphi + \varphi_{\tilde{C}})) - \\
 & - 2 \sum_{i=1}^n (fG_{П2} \cdot \pi \cdot |O_3 M_i|^2 \cdot \frac{\Delta\alpha_{Пi}}{2\pi} |OC_i|) - 4 \sum_{i=1}^n z_i d_k \sigma_p \delta_p l_p \cdot (-\delta_p \operatorname{ctg} \beta) \cdot l_p \cos \alpha_1 \sin \alpha_p - \\
 & - \delta_p \cos \alpha_p (l_p \sin \alpha_1) - x_i d_k \sigma_p \delta_p l_p \cdot (-\delta_p \sin \alpha) (l_p \sin \alpha_1) + ((l_p \cos \alpha_1 \cos \alpha_p) \delta_p \operatorname{ctg} \beta) - \\
 & - \sum_{i=1}^n (f + f') \cdot \sigma_k \cdot (\delta_k + 2\delta'_k) \cdot \rho_i \cdot \Delta\alpha_{Пi} \cdot \sin(\varphi + \alpha_{Пi} + \frac{\Delta\alpha_{Пi}}{2} + \frac{\pi}{2}).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Для решения данного дифференциального уравнения была составлена программа «Моделирование движения рабочего органа для выкопки саженцев с комом почвы» на языке программирования «Matlab» и произведены расчеты на ЭВМ [9]. Компьютерный эксперимент с моделью заключается в имитации процесса выкопки саженца с комом почвы выкопчной машиной. Рабочий орган движется по полуокружности с постоянной скоростью в почве, армированной корнями растений. При этом часть элементов лезвий осуществляют срез корня саженца, а другая часть участвует в процессе резания почвы. При этом фиксируются зависимости суммарного значения момента всех внешних сил, действующих на рабочий орган машины относительно оси  $OY$   $M_{Oy}$  и других моментов, создаваемых различными силами.

Суммарное значение момента внешних сил  $M_{Oy}$ , действующих на рабочий ор-

ган, относительно оси  $OY$  находилось по следующей формуле

$$M_{Oy} = M_{д.с.} - M_{с.с.}, \tag{3}$$

где  $M_{д.с.}$  – момент движущих сил, Н·м;  $M_{с.с.}$  – момент сил сопротивления рабочему процессу, Н·м.

На рис. 1 представлена схема математического моделирования взаимодействия рабочего органа выкопчной машины с почвой и корнями саженцев. Машина содержит раму с несущими брусками 1 и устройством крепления к трактору 2, вертикальные стойки 3 с закрепленным на них рабочим органом в виде двух треугольников 4, полуковша 5 в задней его части, двух гидроцилиндров 6. Рабочий орган выполнен в виде двух треугольников, направленных острыми углами в сторону выкапываемого саженца, в задней части которого оборудован полуковш. Два гидроцилиндра поворачивают рабочий орган по полуокружности, тем самым вырезая саженец с комом почвы.

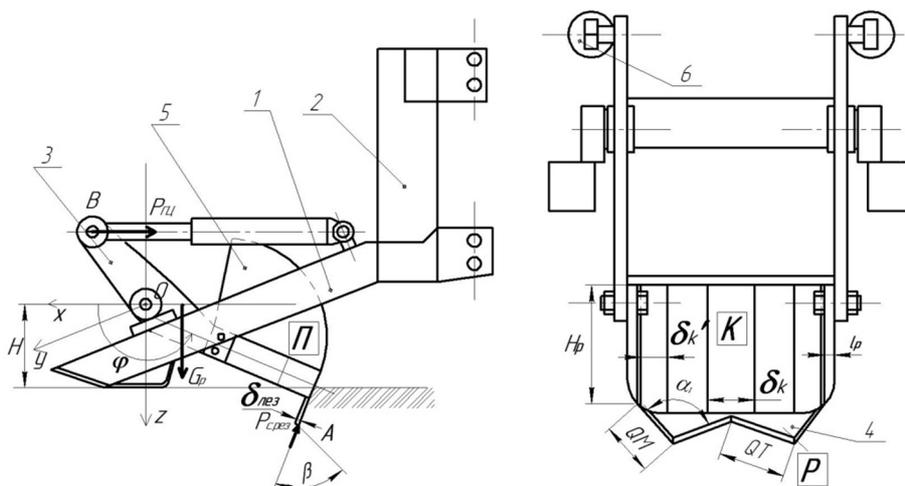


Рис. 1. Расчетная схема математического моделирования взаимодействия рабочего органа выкопчной машины с почвой и корнями саженцев

Все параметры исследуемого процесса можно разделить на следующие группы:

- параметры рабочего органа выкопной машины: начальный угол вхождения в почву  $\varphi_0$ ; момент инерции рабочего органа относительно оси  $OY$   $I_{oy}$ ; расстояние от оси вращения рабочего органа до поверхности  $H$ ; толщина вертикальных стоек рабочего органа  $l_{II}$ ; высота профиля рабочего органа  $H_p$ ; толщина боковых стенок полуковша  $\delta_{II}$ ; угол бокового сектора полуковша  $\alpha_{II}$ ; ширина центральной полосы полуковша  $\delta_K$ ; ширина боковых полос полуковша  $\delta_K'$ ; длина дуги боковых стенок полуковша  $L_K$ ; ширина полуковша  $S_{II}$ ; толщина лезвия ножей рабочего органа  $\delta_{лез}$ ; параметр лезвия  $QM$ ; параметр лезвия  $QT$ ; углы при вершине лезвий  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ; угол заточки лезвия ножей рабочего органа  $\beta$ ;

- параметры корней саженцев: количество корней в зонах А, В и С; диаметр корней в зонах А, В, и С -  $d$ ; удельное сопротивление резанию корня  $\sigma_{Ркор}$ ;

- параметры почвы: удельное сопротивление пуансона в грунт  $\sigma_{II}$ ; удельное сопротивление движению полуковша  $\sigma_K$ ; удельное сопротивление резанию грунта лезвиями  $\sigma_{Рер}$ ; плотность почвы  $\rho$ ; коэффициент трения стали о грунт  $f$ .

Технологические параметры: давление в гидроцилиндрах выкопной машины  $P_{гц}$ .

Каждый из параметров  $F_i$  по очереди изменяли в некотором интервале  $[F_{i \min}, F_{i \max}]$  с некоторым шагом  $\Delta F_i$ , в то время как остальные параметры оставались неизменными и имели так называемые «базовые» значения [10]. Для каждого получаемого набора параметров проводили отдельный компьютерный эксперимент. Каждый из параметров варьировали не менее чем по пяти уровням, чтобы четко определить вид получающейся зависимости [11]. Данный подход позволил получить зависимости от отдельных пара-

метров выходных характеристик, в первую очередь  $M_{oy}(F_i)$ . На этапе систематических исследований выполнено 13 серий компьютерных экспериментов. В рамках каждой серии проведено от трех до шести экспериментов. Для удобства изложения все серии компьютерных экспериментов сгруппированы ниже так, чтобы установить, каково влияние на выходные характеристики:

- параметров рабочего органа выкопной машины (изменению подвергали факторы  $H$ ,  $l_{II}$ ,  $H_p$ ,  $\delta_{II}$ ,  $\delta_K$ ,  $\delta_K'$ ,  $\delta_{лез}$ , параметр лезвия  $QM$ , параметр лезвия  $QT$ ;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ,  $\beta$ );

- параметров корней саженцев (количество корней в зонах А, В и С; диаметр корней в зонах А, В, и С -  $d$ ;  $\sigma_{Ркор}$  в зависимости от породы саженца);

- параметров почвы ( $\sigma_{Рер}$ ).

Расстояние от оси вращения рабочего органа до поверхности почвы  $H$  – одна из важных характеристик рабочего органа выкопной машины, влияющая на конструкцию и габариты исследуемого агрегата, поэтому в первой серии компьютерных экспериментов изучили влияние данного параметра на момент всех сил относительно оси  $OY$ . При этом  $H$  варьировали на уровнях 0,5...0,7 м.

В процессе исследований обнаружено, что с увеличением расстояния от оси вращения рабочего органа до поверхности почвы суммарный момент всех внешних сил относительно оси  $OY$  уменьшается (рис. 2).

С увеличением высоты профиля рабочего органа линейно увеличивается и суммарный момент всех внешних сил относительно оси  $OY$  (рис. 3). Это можно объяснить увеличением длины «рычага» рабочего органа.

С увеличением ширины центральной полосы полуковша наблюдается увеличение моментов сил сопротивлений рабочему процессу (рис. 4), поэтому суммарное значение момента всех внешних сил относительно оси  $OY$  линейно уменьшается.

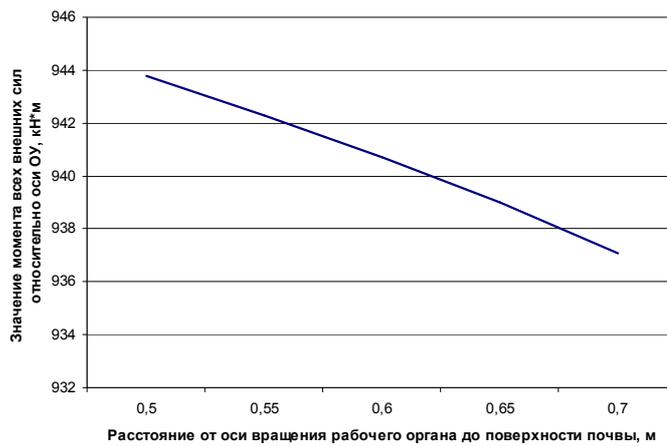


Рис. 2. Зависимость суммарного момента всех внешних сил относительно оси OY от расстояния от оси вращения рабочего органа выкопчной машины при выкопке саженца с комом почвы

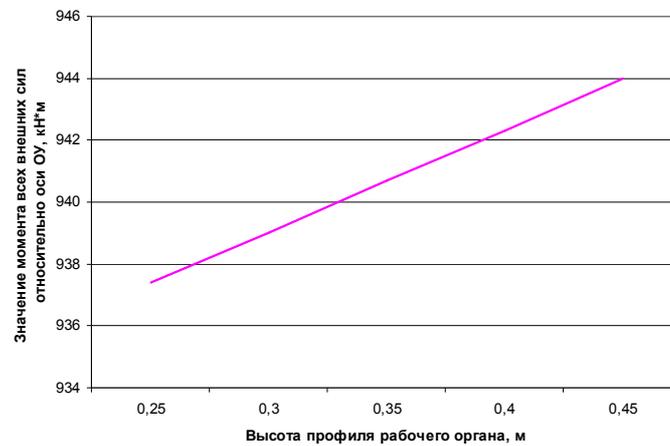


Рис. 3. Зависимость суммарного момента всех внешних сил относительно оси OY от высоты профиля рабочего органа при выкопке саженца с комом почвы

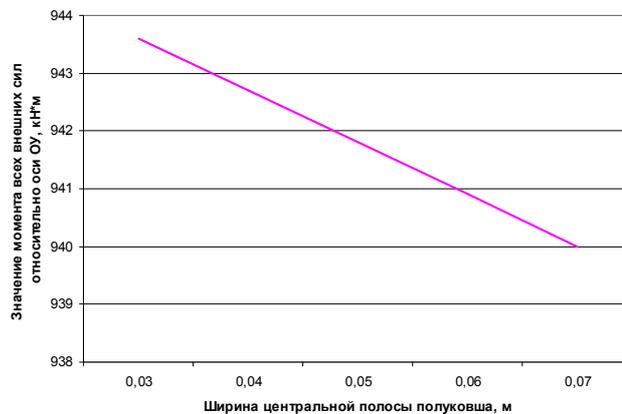


Рис. 4. Зависимость суммарного момента всех внешних сил относительно оси OY от ширины центральной полосы полуковша рабочего органа при выкопке саженца с комом почвы

Судя по зависимости, представленной на рис. 5, суммарное значение момента всех внешних сил, действующих на рабочий орган выкопчной машины, относительно оси  $OY$  уменьшается как при увеличении центральной полосы полуковша рабочего органа, так и при увеличении ширины боковых полос полуковша. Эффект по уменьшению суммарного момента выражен более ярко, так как боковых полос полуковша в конструкции рабочего органа выкопчной машины две.

Также была проведена серия экспериментов по определению влияния на процесс выкопки саженцев с комом почвы выкопчной машиной толщины лезвия ножей. С увеличением толщины лезвия ножей рабочего органа наблюдается рез-

кое увеличение усилия и работы резания, и, как следствие, моментов сил сопротивлений рабочему процессу (рис. 6), поэтому суммарный момент всех внешних сил относительно оси  $OY$  резко уменьшается.

Максимальные значения суммарного момента всех внешних сил относительно оси  $OY$  наблюдаются при угле заточки лезвия ножей –  $30...40^\circ$  (рис. 7). В дальнейшем из-за увеличения угла заточки лезвий значение суммарного момента внешних сил, действующих на рабочий орган выкопчной машины, уменьшается из-за увеличения сопротивлений резания почвы и перерезания корней саженцев и, следовательно, моментов от данных сил сопротивления процессу выкопки саженцев с комом почвы.

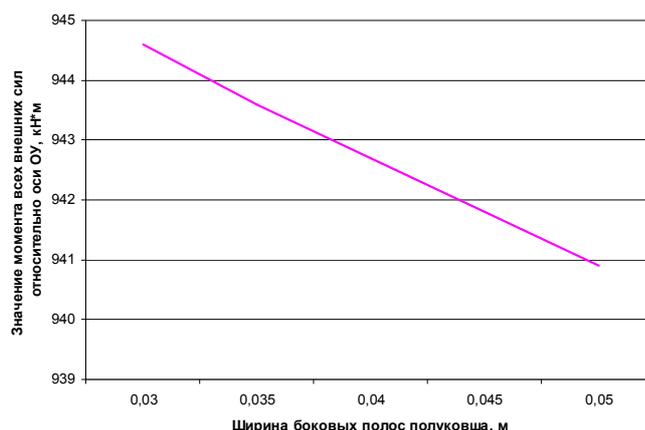


Рис. 5. Зависимость суммарного момента всех внешних сил относительно оси  $OY$  от ширины боковых полос полуковша рабочего органа при выкопке саженца с комом почвы

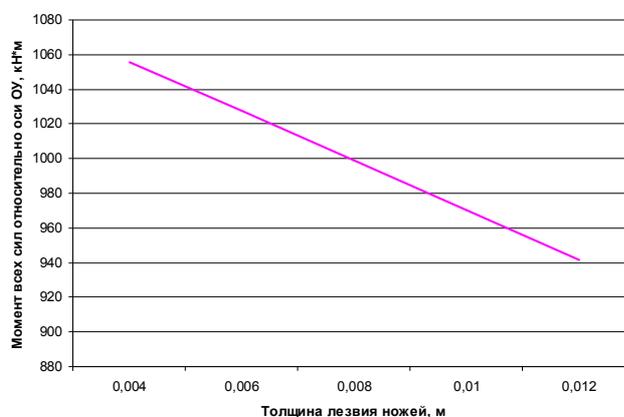


Рис. 6. Зависимость суммарного момента всех внешних сил относительно оси  $OY$  от толщины лезвия ножей рабочего органа при выкопке саженца с комом почвы

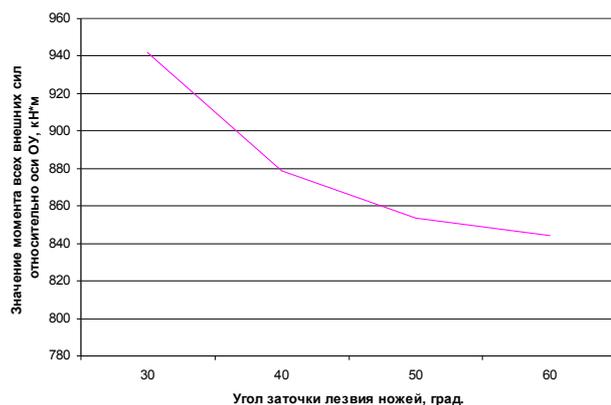


Рис. 7. Зависимость суммарного момента всех внешних сил относительно оси ОУ от угла заточки лезвия ножей при выкопке саженца с комом почвы

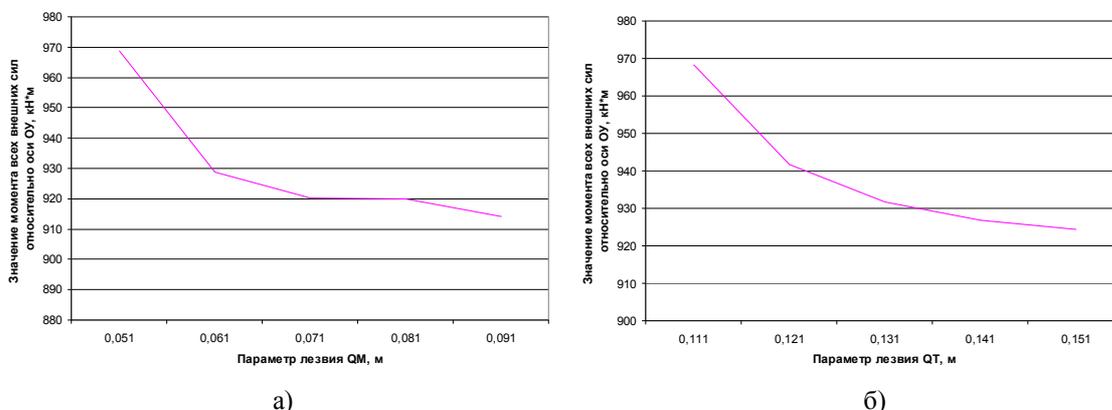


Рис. 8. Зависимость суммарного момента всех внешних сил относительно оси ОУ от длины режущей кромки лезвия QM (а) и QT (б) при выкопке саженца с комом почвы

С увеличением длины режущей кромки лезвия QM и QT ножей рабочего органа наблюдается уменьшение значения суммарного момента всех внешних сил относительно оси ОУ (рис. 8). Это объясняется увеличением поверхности ножа и, как следствие, повышением величины трения о перерезаемый материал.

**Выводы.** Таким образом, проведенные теоретических экспериментов с использованием

ЭВМ на основе составленной математической модели позволило исследовать процесс выкопки саженцев с комом почвы выкопчной машиной. Приведенные результаты позволяют оценить силовые показатели исследуемого процесса и в дальнейшем определить оптимальные проектные параметры рабочего органа выкопчной машины.

#### Список литературы

1. Дручинин, Д. Ю. Механизация перспективного способа выкопки крупномерных саженцев с комом почвы / Д. Ю. Дручинин // Вестник КрасГАУ. – 2011. – № 6. – С. 132-135.
2. Лунева, З. С. Выращивание саженцев декоративных деревьев и кустарников: уч. пособие / З. С. Лунева, Е. А. Судакова, В. А. Попов. – М.: Стройиздат, 1965. – 171 с.

#### References

1. Druchinin D. Yu. Mekhanizatsiya perspektivnogo sposoba vykopki krupnomernykh sazhentsev s komom pochvy [Mechanization of a perspective plant lifting method for planting large-sized saplings with soil clod]. Vestnik KrasGAU. 2011. No 6. P. 132-135.
2. Luneva Z. S. Sudakova E. A, Popov V. A. Vy-rashchivanie sazhentsev dekorativnykh derev'ev i kustarnikov: uch. poso-bie [Growing saplings of decorative trees and bushes: training manual]. Moscow: Stroyizdat, 1965. 171 p.

3. *Пентелькин, С. К.* Технология выращивания посадочного материала в питомниках / С.К. Пентелькин // Лесное хозяйство. – 2000. – № 5. – С. 44-46.
4. *Грушанский, О. А.* Исследование технологии и основных параметров рабочего органа машины для посадки крупномерных деревьев с комом земли: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / О. А. Грушанский. – Киев, 1994. – 30 с.
5. *Климов, Г.Б.* Машины и орудия для выкопки и уборки посадочного материала / Г.Б. Климов. – М.: Лесная промышленность, 1978. – 35 с.
6. *Резник, Н. Е.* Теория резания лезвием и основы расчёта режущих аппаратов: монография / Н. Е. Резник. – М.: Машиностроение, 1975. – 311 с.
7. Патент на полезную модель 99277 РФ, МПК А01С11/00. Выкопачная машина / М. В. Драпалюк, Д. Ю. Дручинин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ВГЛТА». – № 2010111038; заявл. 23.03.2010; опубл. 20.11.2010.
8. *Дручинин, Д. Ю.* Математическая модель взаимодействия рабочего органа выкопачной машины с почвой и корнями растений / Д. Ю. Дручинин, О. Р. Дорняк, М. В. Драпалюк // Электронный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2011. – № 68 (04). – Шифр информрегистра: 0421100012/0113. – Режим доступа: <http://www.ej.kubagro.ru/2011/04/pdf/13.pdf>
9. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012614121 РФ. Моделирование движения рабочего органа для выкопки саженцев с комом почвы / Д.Ю. Дручинин, О.Р. Дорняк, М.В. Драпалюк; правообладатель ФГБОУ ВПО «Воронеж. гос. лесотехн. акад.». – № 2012611734; заявл. 12.03.2012 г. ; зарег. 04.05.2012 г.
10. *Советов, Б. Я.* Моделирование систем: учеб. пособие / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 1998. – 319 с.
11. Моделирование сельскохозяйственных агрегатов и их систем управления: учеб. для вузов / под ред. А. Б. Лурье. – Л.: Колос. Ленингр. отделение, 1979. – 312 с.
3. *Pentel'kin S. K.* Tekhnologiya vyrashchivaniya posadochnogo materiala v pitomnikakh [Method of cultivation of a planting material in reserves]. Lesnoe khozyaystvo. 2000. No 5. P. 44-46.
4. *Grushanskiy O. A.* Issledovanie tekhnologii i osnovnykh parametrov rabocheho organa mashiny dlya posadki krupnomernykh derev'ev s komom zemli [Research into technology and key parameters of working body of the vehicle used for planting large-sized trees using seedling digging machine]. Summary of thesis. ... Candidate of Technical Sciences.: 05.20.01. Kiev, 1994. 30 p.
5. *Klimov G.B.* Mashiny i orudiya dlya vykopki i uborki posadochnogo materiala [Machines and Instruments for Digging out and Gathering of Planting Material]. Moscow, Lesnaya promyshlennost, 1978. 35 p.
6. *Reznik N. E.* Teoriya rezaniya lezviem i osnovny rascheta rezhushchikh apparatov: monografiya [Theory of cutting by an edge and basic calculation of cutting devices: monograph]. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 311 p.
7. *Drapalyuk M. V., Druchinin D. Yu.*, МПК А01С11/00. Vykopachnaya mashina [Plant lifter]. Patent RF, no 2010111038; 2010.
8. *Druchinin D. Yu., Dorniyak O. R., Drapalyuk M. V.* Matematicheskaya model' vzaimodeystviya rabocheho organa vykopachnoy mashiny s pochvoy i korniyami rasteniy [Mathematical model of interaction of plant lifter working tool with the soil and roots of plants]. Elektronnyy zhurnal KubGAU [Elektronnyy resurs]. Krasnodar: KubGAU, 2011. No 68 (04). – Shifr informregistra [Information registry code]: 0421100012/0113. Rezhim dostupa: <http://www.ej.kubagro.ru/2011/04/pdf/13.pdf>
9. *Druchinin D. Yu., Dorniyak O.R., Drapalyuk M.V.* Modelirovanie dvizheniya rabocheho organa dlya vykopki sazhentsev s komom pochvy [Modeling of movement of working tool for lifting saplings with soil clode]. Svidetel'stvo o gos. registratsii programmy dlya EVM RF, no 2012614121, 2012.
10. *Sovetov B. Ya., Yakovlev S. A.* Modelirovanie sistem: ucheb.posobie [Systems modelling: training manual]. Moscow: Vysshaya shkola, 1998. 319 p.
11. Modelirovanie sel'skokhozyaystvennykh agregatov i ikh sistem upravleniya: ucheb.dlya vu-zov [Modeling of agricultural units and their control systems: training manual for higher education institutions]. Under the editorship of. A.B. Lurye. L. : Kolos. Leningr. otdelenie. 1979. 312 p.

Статья поступила в редакцию 19.10.12.

*ДРУЧИНИН Денис Юрьевич* – ассистент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия» (Российская Федерация, Воронеж). Область научных интересов – технические науки, лесное хозяйство. Автор 15 публикаций.

E-mail: druchinin.denis@rambler.ru

*ДОРНЯК Ольга Ровальдовна* – доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой сопротивления материалов и теоретической механики, ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия» (Российская Федерация, Воронеж). Область научных интересов – технические науки, лесное хозяйство. Автор более 130 научных и учебно-методических работ.

E-mail: olga@dorn.vrn.ru

*ДРАПАЛЮК Михаил Валентинович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия» (Российская Федерация, Воронеж). Область научных интересов – технические науки, лесное хозяйство. Автор более 120 научных и учебно-методических работ.

E-mail: michael1@yandex.ru

*DRUCHININ Denis Yuryevich* – Assistant at the Chair of Forestry Mechanization and Forest Vehicles Design, FGBOU VPO «Voronezh State Timber Engineering Academy» (Russian Federation, Voronezh). Scientific interests – technical sciences, forestry. Author of 15 publications.

E-mail: druchinin.denis@rambler.ru

*DORNYAK Olga Roaldovna* – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Chair of Material Resistance and Theoretical Mechanics, FGBOU VPO «Voronezh State Timber Engineering Academy» (Russian Federation, Voronezh). Scientific interests – technical sciences, forestry. Author of more than 130 scientific and educational works.

E-mail: olga@dorn.vrn.ru

*DRAPALYUK Mikhail Valentinovich* – Doctor of Engineering, Professor, Head of Chair of Forestry Mechanization and Forest Vehicles Design, FGBOU VPO «Voronezh State Timber Engineering Academy» (Russian Federation, Voronezh). Scientific interests – technical sciences, forestry. Author of more than 120 scientific and educational works.

E-mail: michael1@yandex.ru

***D. Y. Druchinin, O. R. Dornyak, M. V. Drapalyuk***

## **THEORETICAL RESEARCH OF PLANTLETS LIFTING PROCESS WITH SOIL CLOD**

***Key words:*** *plant lifter; soil clod; theoretical research; mathematic model; plantlets lifting.*

*At present heavy plantlets, replaced with soil clod, are more extensively used in silvicultural treatment, reforestation work and gardening of territories. Earlier the authors suggested the design of the special machine - plant lifter, and developed the mathematic model of interaction of the plant lifter tool with the soil and plantlet roots for mechanization of lifting process and replanting of heavy plantlets with soil clod.*

*The aim of this research is study of plantlets lifting process with soil clod on the basis of developed mathematic model of the studied process through computer experiments.*

*The basis for the model is the developed by the authors difference equation of the basic element of the plant lifter – its operating tool in the form of a double-arm lever around a stationary shaft.*

*To solve this difference equation, the program “Modeling of movement of operating tool for lifting plantlets with soil clod” in Matlab programming language was developed and necessary calculations were made.*

*Computer experiment with the model consisted in simulation of lifting process of plantlets with soil clod by the plant lifter. The operating tool moves in semicircle at a constant speed in the soil, strengthened with plant roots. Thus a few blade components cut the plantlet root, others are involved in the soil cutting process. So, dependence of the total value of moment on all external forces, applied on the operating tool of the machine about the OYMoy axis and other moments, produced by other forces, are fixed.*

*Conducting theoretical experiments of the mathematic model enabled to study lifting process of plantlets with soil clod by the plant lifter. The results obtained enable to calculate force values of the studied process and subsequently define optimal design parameters of the operating tool of the plant lifter.*