



УДК 634.0.332.1.002.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.126

ОЦЕНКА ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА СТРУНОЙ

Д.Г. Мясищев¹, д-р техн. наук, проф.

Д.Б. Яхяев¹, асп.

В.С. Морозов², д-р техн. наук, проф.

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: d.myasishchev@narfu.ru, dilmurad-92@mail.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 22, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: v.morozov@narfu.ru

Необходимость интенсификации множества процессов возникает в отраслях сельского и лесного хозяйства, для этого создается новое оборудование и инновационные технологические схемы. В России наблюдается кризис в области разработки лесохозяйственной техники, снижается количество основных ее видов, увеличивается доля импорта машин и оборудования. Разработка технических решений для измельчения напочвенного покрова (листьев) должна быть направлена, с одной стороны, на сокращение затрат труда, с другой – на развитие техники и технологии измельчения, способствующее снижению энергоемкости этого процесса. В данной статье рассматриваются теоретическая составляющая процесса измельчения подвижной струной, а также энергобаланс процесса и оптимизация энергии, затраченной на эту процедуру, путем увеличения энергии поперечных колебаний струны через выбор оптимальной частоты вращения ротора. Для приведенного конкретного примера в качестве струн-измельчителей использован комплект гитарных струн поскольку технология их изготовления предполагает наличие соответствующих вибраций от внешнего возмущающего воздействия. В нашем случае воздействие обеспечивается периодическим взаимодействием струны с обрабатываемым предметом труда. Следует отметить, что постановка исследования является основой для углубленного рассмотрения процесса разрушения напочвенного покрова с учетом обеспечения резонансного колебания струн в зависимости от их конструктивных параметров и кинематики рабочего органа. В случае усовершенствования данную конструкцию рекомендуется использовать в лесопарковых зонах и на городских придорожных территориях.

Ключевые слова: измельчение напочвенного покрова, угол измельчения, подвижная струна, натяжение струны, условное удлинение струны, энергобаланс.

Введение

В настоящее время промышленность выпускает большое количество разнообразного оборудования стационарного и мобильного типов для измельчения напочвенного покрова. В измельчительных установках, которые нашли практическое применение, в основном реализован механический принцип

Для цитирования: Мясищев Д.Г., Яхяев Д.Б., Морозов В.С. Оценка процесса измельчения напочвенного покрова струной // Лесн. журн. 2018. № 5. С. 126–134. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.126

разрушения. Актуальность данного исследования основывается на широком спектре технологического применения разрабатываемой конструкции в лесном, сельском хозяйстве, а также в жилищно-коммунальной сфере, с учетом заложенных положительных эффектов.

В данной статье предлагается и рассматривается способ измельчения напочвенного покрова струнами, натянутыми между двумя точками на барабане-роторе, который в свою очередь совершает вращательные движения. В отличие от «классических» мульчеров, процесс измельчения напочвенного покрова вибрирующей струной, по нашему мнению, приведет к уменьшению как коэффициента трения струны о листья, так и сопротивления измельчению. Кроме того, обеспечивается возможность создания резонансного измельчения, что имеет положительную перспективу. С точки зрения компоновки и маневренности предлагаемого агрегата наиболее подходящей базой для него является шасси мини-трактора (мотоблока) [1, 3–7, 12].

Новизна исследования заключается в оптимизации энергозатрат за счет использования энергии поперечных колебаний струны.

Цель исследования – разработка методологической основы, обеспечивающей создание рабочего органа самоходного измельчителя напочвенного покрова при условии минимальных энергозатрат на вращение ротора в процессе работы для улучшения агротехнического состояния поверхности почвы и ее механических свойств [2, 8, 9, 13] (рис. 1).

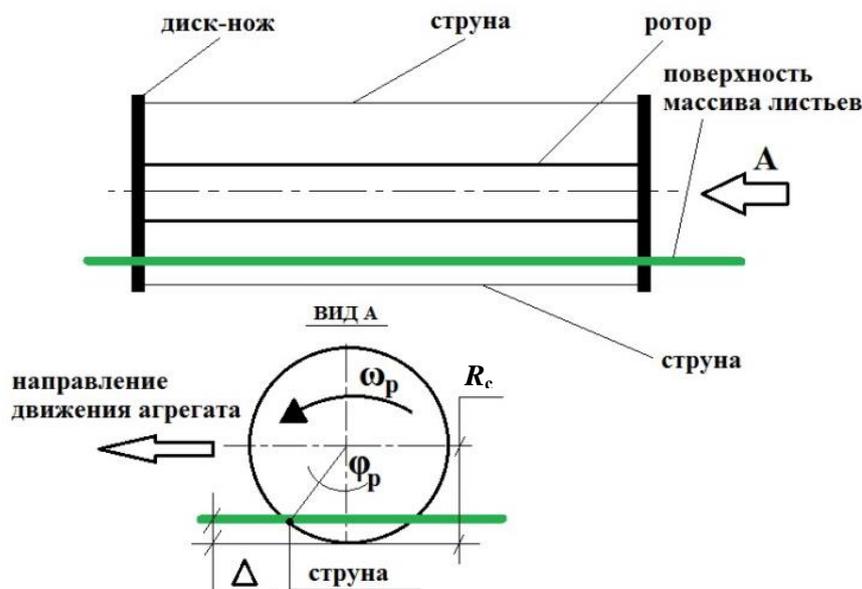


Рис. 1. Принципиальная схема компоновки ротора со струнным измельчителем (струны изображены условно): R_c – радиус установки струны на ротор, м; φ_p – угол измельчения (поворота ротора, в течение которого струна режет (рассекает) объем опавших листьев), рад; ω_p – угловая скорость вращения ротора, рад/с

Fig. 1. The layout diagram of a rotor with a string grinder (the strings are conventionally designed): R_c – radius of string installation on the rotor, m; φ_p – angle of grinding (turning of rotor when the string grinds (cuts) the fallen leaves), rad; ω_p – rotational speed of the rotor, rad/s

Объекты и методы исследования

Для достижения поставленной цели использованы положения динамики системы твердых тел, математического моделирования и методы решения задач оптимизационного исследования. Основным рабочим допущением при моделировании является то, что влиянием центробежных сил на поперечные колебания струн пренебрегаем.

Основная функция в математической модели – энергобаланс измельчения напочвенного покрова подвижной струной:

$$\frac{MV^2}{2} + Q_c = \mathcal{E}_{\text{рез}}, \quad (1)$$

где M – масса струны, кг;

V – линейная скорость струны, м/с;

Q_c – энергия поперечных колебаний струны, Дж;

$\mathcal{E}_{\text{рез}}$ – энергия, затраченная на измельчение напочвенного покрова по продольному сечению струны, Дж.

Таким образом, сумма кинетической энергии и энергии поперечных колебаний струны равна энергии, которая затрачена на рассечение (резку) листьев [11].

Массу струны вычисляем по следующей формуле:

$$M = ml, \quad (2)$$

где m – масса струны на единицу длины без растяжения, кг/м;

l – длина струны без растяжения, м (в нашем случае $l = 0,21$ м).

Массу струны на единицу длины без растяжения можно определить экспериментально делением массы конкретной струны на среднюю длину измеряемого фрагмента. Идеализируя ситуацию, зная плотность и диаметр струн и учитывая, что струны будут изготовлены из углеродистой стали 45, получаем:

$$m = \left(\rho \frac{\pi d^2}{4}\right), \quad (3)$$

где ρ – плотность материала струны, кг/м³ (в нашем случае $\rho = 7820$ кг/м³);

d – диаметр струны, м.

В экспериментах использованы следующие исходные диаметры струны, м: 1 – 0,00023; 2 – 0,00036; 3 – 0,00056; 4 – 0,00079; 5 – 0,00102; 6 – 0,00116.

Энергия, затраченная на измельчение напочвенного покрова по продольному сечению струны, определяется как

$$\mathcal{E}_{\text{рез}} = \varphi_p R_c K_p dl, \quad (4)$$

где $R_c = 0,25$ м;

K_p – среднее удельное сопротивление измельчению опавших листьев, Па (в нашем случае $K_p = 6\,000$ Па) [2].

Воспользуемся теоремой Пифагора и оценим угол измельчения (поворота ротора):

$$\varphi_p = \arccos\left(\frac{R_c - \Delta}{R_c}\right), \quad (5)$$

где Δ – заглубление струны при вертикальном положении радиуса R_c (см. рис. 1), м (в нашем случае $\Delta = 0,03$ м).

Линейную скорость струны (направление которой приведено на рис. 1) и угловую скорость найдем из следующих зависимостей:

$$V = \omega_p R_c; \quad (6)$$

$$\omega_p = \frac{\pi n}{30}, \quad (7)$$

где n – частота вращения ротора измельчителя, об/мин (рассматриваемая частота вращения 500...3000 об/мин).

Следующая неизвестная в энергобалансе измельчения – энергия поперечных колебаний струны, вызванных внешним возмущением:

$$Q_{\text{стр}} = \frac{1}{4} (b')^2 M \sum C^2 n_1^2, \quad (8)$$

где b' – скорость волны при поперечных колебаниях струны, м/с [10, 11].

$\sum C^2 n_1^2$ – множитель интегрирования дифференциального уравнения полной энергии поперечных колебаний струны.

Все рассуждения базируются на предположении, что струна непременно должна совершать поперечные колебания, поэтому ее диаметр должен быть адекватен данному явлению. В поле нашего зрения, прежде всего, попали струны музыкальных инструментов (гитар). Проволока, например алюминиевая или медная, даже минимальных диаметров однозначно не удовлетворяет требованиям исследования.

Для промежуточных расчетов воспользуемся известной формулой:

$$b' = \sqrt{\frac{T_0 l'}{m l}}, \quad (9)$$

где T_0 – усилие натяжения струны на роторе, Н;

l' – условное удлинение струны при усилении T_0 , м [10, 11].

Вычислим условное удлинение струны при определенном увеличении ее натяжения на роторе:

$$l' = l + \frac{T_0 l}{EA_c}, \quad (10)$$

где E – модуль упругости материала струны, примем $E = 200$ ГПа;

A_c – площадь поперечного сечения струны, м²,

$$A_c = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (11)$$

Определим для конкретной струны максимальное значение $T_{0_{\text{max}}}$, Н:

$$T_{0_{\text{max}}} = A_c [\sigma_c], \quad (12)$$

где $[\sigma_c]$ – предел прочности при растяжении материала струны, Па.

Производительность измельчения (Π_c , м³), одной струной:

$$\Pi_c = \phi_p R_c d l. \quad (13)$$

Суммарная энергия ($\mathcal{E}_{\text{сум}}$, Дж) системы «струна–ротор–предмет труда» в процессе измельчения оценивается следующим уравнением:

$$\mathcal{E}_{\text{сум}} = N \left(\frac{T_0^2 l}{EA_c} + \mathcal{E}_{\text{рез}} \right) + \frac{m_n R_c^2 \omega_p^2}{8}, \quad (14)$$

где N – число струн между двумя дисками-ножами, шт.;

m_n – удвоенная масса диска-ножа ротора, кг (в нашем случае $m_n = 0,7$ кг).

Удельные энергозатраты (e_y , Дж/м²) функционирующей струны на единицу производительности измельчения:

$$e_y = \frac{\mathcal{E}_{\text{сум}}}{\Pi_c} \quad (15)$$

Возможна постановка следующей задачи оптимизационного исследования:

1. Задан набор из 6 гитарных струн (сталь 45) диаметром d и одинаковой длины l .

2. Заданы диапазон возможных значений частоты вращения ротора $n = 500 \dots 3000$ об/мин и угловая скорость ротора ω_p .

3. Известны конструктивные и технологические параметры функционирования измельчителя R_c , K_p , Δ .

4. Заданы диапазон и шаг варьирования T_0 : от $T_{0\text{min}}$ до $T_{0\text{max}}$ при условии, что $T_{0\text{min}} = 0,5T_{0\text{max}}$.

Требуется определить такую совокупность параметров d , ω_p и T_0 , при которой обеспечивается:

$$\begin{aligned} \min e_y, \\ d \in D, \\ \omega_p \in \Omega, \\ T_0 \in T, \end{aligned}$$

где D , Ω и T – области решений.

Результаты исследования и их обсуждение

Принимая в качестве предварительной оценки в расчетах $n = 1500$ об/мин, получаем следующие значения показателей (табл. 1).

Таблица 1

Значения основных показателей при $n = 1500$ об/мин

d , м	$\mathcal{E}_{\text{рез}}$	$\frac{MV^2}{2}$	$Q_{\text{стр}}$	Π_c , м ³	$\mathcal{E}_{\text{сум}}$, Дж		e_y , Дж/м ³	
	Дж				при $T_{0\text{max}}$	при $T_{0\text{min}}$	при $T_{0\text{max}}$	при $T_{0\text{min}}$
0,00023	0,035	0,052	-0,016	0,000005	269,6	269,6	45119665	4511769
0,00036	0,056	0,128	-0,072	0,000009	269,6	269,6	28831052	2882796
0,00056	0,087	0,311	-0,224	0,000014	269,7	269,7	18540143	1853534
0,00079	0,123	0,619	-0,496	0,000020	269,9	269,7	13148615	1314184
0,00102	0,159	1,033	-0,874	0,000026	270,0	269,8	10189745	1018100
0,00116	0,180	1,336	-1,155	0,000030	270,1	269,8	8963677	8953741

По результатам, представленным в табл. 1, можно сделать следующие выводы:

1. Суммарная энергия системы и удельные энергозатраты струны на единицу производительности измельчения в меньшей степени зависят от усилия натяжения струны.

2. Главная переменная в данном оптимизационном исследовании – частота вращения ротора.

3. При выбранной частоте вращения значение энергии поперечных колебаний струн оказалось отрицательным, т. е. при таких высоких частотах вращения затраты энергии на измельчение напочвенного покрова по продольному сечению струн приходится на их работу, энергия поперечных колебаний струн в этом не участвует.

Решение задачи требует корректировки исходных данных. Авторы пришли к выводу априорным путем, что необходимо перевести энергию поперечных колебаний струны в диапазон положительных значений, что уменьшит удельные энергозатраты струны на единицу производительности измельчения. Расчетами установлено, что оптимальным является значение частоты вращения ротора $n = 550$ об/мин. Скорректированные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения основных показателей работы измельчителя при $n = 550$ об/мин

d , м	$\mathcal{E}_{рез}$	$\frac{MV^2}{2}$	$Q_{стр}$	P_c , м ³	$\mathcal{E}_{сум}$, Дж		e_y , Дж/м ³	
					при T_{0max}	при T_{0min}	при T_{0max}	при T_{0min}
0,00023	0,035	0,007	0,028	0,000005	36,2	36,2	6073555	6071585
0,00036	0,056	0,017	0,038	0,000009	36,3	36,3	3884926	3881843
0,00056	0,087	0,041	0,045	0,000014	36,4	36,3	2503347	2498551
0,00079	0,123	0,083	0,039	0,000020	36,5	36,4	1780760	1773994
0,00102	0,159	0,138	0,020	0,000026	36,7	36,4	1385230	1376493
0,00116	0,180	0,179	0,001	0,000030	36,8	36,5	1221775	1211840

На основании данных табл. 2 получена графическая интерпретация зависимости $e_y = f(d)$ (рис. 2).

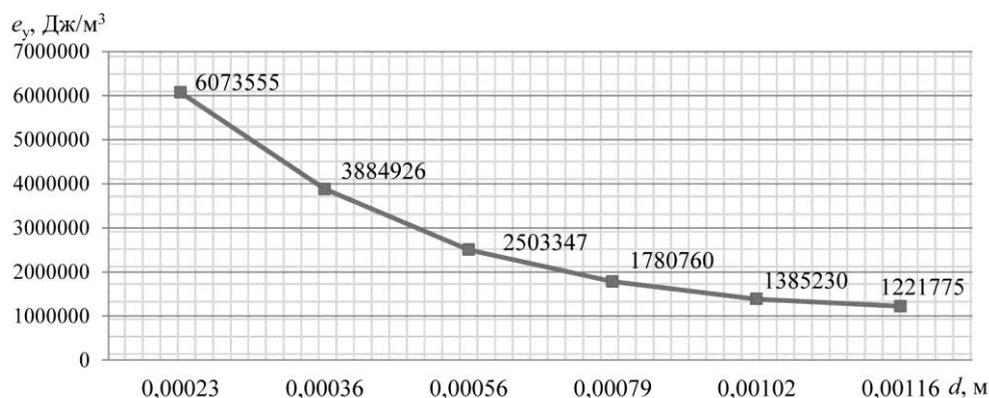


Рис. 2. Зависимость удельных энергозатрат функционирования струн от их диаметра

Fig. 2. The dependence of specific energy consumption of strings operation from strings diameter

Анализ табл. 2 и рис. 2 показал, что для создаваемой конструкции рабочего органа измельчителя напочвенного покрова целесообразно выбрать струну 6 диаметром 0,00116 м (см. с. 128).

Заключение

Поставленная задача оптимизационного исследования решена. Экспериментально было установлено оптимальное значение частоты вращения ротора, которое составило 550 об/мин. При этом значение удельных энергозатрат струны на единицу производительности измельчения минимально у струны 6 диаметром 0,00116 м при минимальном ее натяжении на роторе.

В настоящее время осуществляется изготовление действующего макетного образца агрегата для измельчения напочвенного покрова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков В.В., Зикунев Е.П., Ивлев М.Е., Ткашелашивили Н.Н. Мини-тракторы / под ред. В.В. Буркова. Л.: Машиностроение, 1987. 272 с.
2. Коришун В.Н. Нагрузки роторных рабочих органов с шарнирно-прикрепленными измельчающими элементами // Повышение технического уровня и качества машин для лесозаготовок и лесного хозяйства. Л.: ЛТА, 1985. С. 43–47.
3. Марчик Т.П., Ефремов А.Л. Почвоведение с основами растениеводства: учеб. пособие. Гродно: ГрГУ, 2006.
4. Мясищев Д.Г. Механизация лесохозяйственных работ агрегатами на основе специализированного мотоблока: моногр. СПб.: СПбГЛТА, 2005. 206 с.
5. Мясищев Д.Г. Мотоблоки в лесном комплексе: состояние, тенденции, перспективы: учеб. пособие. Архангельск: АГТУ, 2008. 129 с.
6. Мясищев Д.Г. Моделирование и оптимизация параметров компонентов лесных машин: учеб. пособие. Архангельск: САФУ, 2014. С. 104.
7. Мясищев Д.Г. Статистическая динамика машин и оборудования лесного комплекса (в примерах): учеб. пособие. Архангельск: САФУ, 2017. 115 с.
8. Трегубов О.В., Кочергина М.В., Фурменкова Е.С., Припольцева А.С. Видовое разнообразие и состояние насаждений лесопарковой зоны в северном микрорайоне городского округа город // Лесн. журн. 2014. № 3. С. 61–63. (Изв. высш. учеб. заведений).
9. Яхьяев Д.Б., Мясищев Д.Г. Обоснование совершенствования технологий для содержания городских придорожных территорий // Изв. СПбЛТА. 2017. Вып. 221. С. 229–237.
10. Lagrange J.L. Analytical Mechanics / trans. by V.N. Vagliente, A. Boissonnade. Dordrecht, Netherlands: Springer, 1997. 594 p. (In Fr.)
11. Routh E.D. An Elementary Treatise on the Dynamics of a System of Rigid Bodies: With Numerous Examples. 3rd ed. London: Macmillan, 1877. 564 p.
12. Shirmeshan A. Design of Vacuum Section of a Leaf Collector Machine // Annals of Faculty Engineering Hunedoara. 2012. Vol. 10, iss. 3. Pp. 225–228. Режим доступа: <http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2012/ANNALS-2012-3-36.pdf> (дата обращения 01.11.2012).
13. Spinelli R., Cavallo E., Eliasson L., Facello A. Comparing the Efficiency of Drum and Disc Chippers // Silva Fennica. 2013. Vol. 47, no. 2, article id 930. Pp. 1–11. Режим доступа: <https://www.silvafennica.fi/pdf/article930.pdf> (дата обращения 18.06.2013).

Поступила 15.03.18

UDC 634.0.332.1.002.5

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.126

Estimation of Grinding the Ground Cover by a String*D.G. Myasishchev¹, Doctor of Engineering Sciences, Professor**D.B. Yahyayev¹, Postgraduate Student**V.S. Morozov², Doctor of Engineering Sciences, Professor*

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: d.myasishchev@narfu.ru, dilmurad-92@mail.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 22, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: v.morozov@narfu.ru

The necessity of intensification of a set of processes in the branches of agriculture and forestry requires the creation of new equipment and innovative technological schemes. There is a crisis in the sphere of construction of forestry equipment in Russia. Machinery park is decreasing. The import ratio is increasing. In the sphere of grinding the ground cover (leaves) the development of technical solutions is aimed at reducing labor costs from one hand and development of grinding equipment and technologies which promotes reducing energy intensity of grinding process from the other. The theoretical component of leaf grinding by a flexible string, the power balance of the process and the expanded energy optimization by increasing of transverse oscillation energy with optimal rotor speed are considered in the article. We used a set of guitar strings as string-choppers in our experiment. It was taken into account that the manufacturing technology of a string assumes the presence of corresponding vibrations from an external perturbation influence. In our case this effect is provided by the periodic interaction between the string and the material being treated. It bears mentioning that the research statement is the basis for advanced consideration of the ground cover destruction process with the provision of strings resonance oscillations depending on their design parameters and kinematics of the working tool. In the framework of further development it is recommended to use it in forest park and urban roadside areas.

Keywords: grinding the ground cover, angle of grinding, flexible string, string tension, relative string elongation, energy balance.

REFERENCES

1. Burkov V.V., Zikunov E.P., Ivlev M.E., Tkashelashvili N.N. *Mini-traktory* [Mini Tractors]. Ed. By V.V. Burkov, Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1987. 272 p. (In Russ.)
2. Korshuchn V.N. Nagruzki rotornykh rabochikh organov s sharnirno-prikreplennymi izmel'chayushchimi elementami [Loadings of Rotary Tools with Hinged Grinding Elements]. *Povysheniye tekhnicheskogo urovnya i kachestva mashin dlya lesozagotovok i lesnogo khozyaystva* [Improving the Technical Level and Quality of Vehicles for Logging and Forestry]. Leningrad, LTA Publ., 1985, pp. 43–47.
3. Marchik T.P., Efremov A.L. *Pochvovedeniye s osnovami rasteniyevodstva: ucheb. posobiye* [Soil Science with the Basics of Horticulture: Educational Textbook]. Grodno, GrGU Publ., 2006. (In Russ.)

For citation: Myasishchev D.G., Yahyayev D.B., Morozov V.S. Estimation of Grinding the Ground Cover by a String. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2018, no. 5, pp. 126–134. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.5.126

4. Myasishchev D.G. *Mekhanizatsiya lesokhozyaystvennykh работ agregatami na osnove spetsializirovannogo motobloka*: monogr. [Mechanization of Forestry Works by Aggregates Based on a Specialized Two-Wheel Tractor. Monography]. Saint Petersburg, SPbGLTA Publ., 2005. 206 p. (In Russ.)

5. Myasishchev D.G. *Motobloki v lesnom komplekse: sostoyaniye, tendentsii, perspektivy*: ucheb. posobiye [Two-Wheel Tractors in the Forest Complex: Status, Trends, Prospects. Educational Textbook]. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2008. 129 p. (In Russ.)

6. Myasishchev D.G. *Modelirovaniye i optimizatsiya parametrov komponentov lesnykh mashin*: ucheb. posobiye [Modeling and Optimization of Parameters of Forest Machine Components. Educational Textbook]. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2014, p. 104. (In Russ.)

7. Myasishchev D.G. *Statisticheskaya dinamika mashin i oborudovaniya lesnogo kompleksa (v primerakh)*: ucheb. posobiye [Statistical Dynamics of the Forest Complex Machines and Equipment (with Examples). Educational Textbook]. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2017. 115 p. (In Russ.)

8. Tregubov O.V., Kochergina M.V., Furmenkova E.S., Pripol'tseva A. S. Vidovoye raznoobraziye i sostoyaniye nasazhdeniy lesoparkovoy zony v severnom mikrorayone gorodskogo okruga gorod [Species Diversity and Condition of Plantations of the Forest Park Zone in the Northern Community of the City District]. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2014, no. 3, pp. 61–63.

9. Yahyayev D.B., Myasishchev D.G. Obosnovaniye sovershenstvovaniya tekhnologiy dlya sodержaniya gorodskikh pridorozhnykh territoriy [Objectivation of Improvement the Technologies for Maintenance of Urban Roadside Areas]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy], 2017, no. 221, pp. 229–237.

10. Lagrange J.L. *Analytical Mechanics*. Trans. by V.N. Vagliente, A. Boissonnade, Dordrecht, Netherlands, Springer, 1997. 594 p. (In Fr.)

11. Routh E.D. *An Elementary Treatise on the Dynamics of a System of Rigid Bodies: With Numerous Examples*. 3rd ed. London, Macmillan, 1877. 564 p.

12. Shirmeshan A. Design of Vacuum Section of a Leaf Collector Machine. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara*, 2012, vol. 10, iss. 3, pp. 225–228. Available at: <http://annals.fih.upt.ro/pdf-full/2012/ANNALS-2012-3-36.pdf> (accessed 01.11.2012).

13. Spinelli R., Cavallo E., Eliasson L., Facello A. Comparing the Efficiency of Drum and Disc Chippers. *Silva Fennica*, 2013, vol. 47, no. 2, article id 930, pp. 1–11. Available at: <https://www.silvafennica.fi/pdf/article930.pdf> (accessed 18.06.2013).

Received on March 15, 2018
