

УДК 630*232.211
DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.106

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АГРЕГАТА ДЛЯ ПОНИЖЕНИЯ ПНЕЙ И РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ЕГО РАБОЧЕГО ОРГАНА

*С.Н. Орловский¹, канд. техн. наук, доц.
А.И. Карнаухов², канд. техн. наук, доц.*

¹Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, д. 90, г. Красноярск, Россия, 660049; e-mail: orlovskiysergey@mail.ru

²Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнёва, пр. Мира, д. 82, а/я 1075, г. Красноярск, Россия, 660049; e-mail: Sky_angel_33@mail.ru

Обоснование энергетических и динамических параметров агрегата для понижения пней является важным вопросом при выполнении лесовосстановительных работ. Также актуально определение оптимальных конструктивных параметров фрезерного рабочего органа агрегата и режимов его работы. Цели данных теоретических исследований – обоснование возможностей преодоления перегрузок при встрече рабочего органа с пнем за счет кинетической энергии вращающихся масс двигателя, трансмиссии и фрезы; определение оптимальных энергетических и динамических параметров агрегата; теоретический анализ процесса дробления пня фрезерным рабочим органом, позволяющий в дальнейшем решить задачу оптимизации конструктивных и геометрических параметров рабочего органа, а также режимов его работы по критерию минимума энергоёмкости. Программа исследований предусматривала изучение возможностей преодоления перегрузок посредством подбора оптимальных значений частоты вращения рабочего органа, мощности двигателя, момента инерции агрегата, скорости его движения по критерию допустимого коэффициента загрузки двигателя трактора, рациональных по критерию минимума энергоёмкости режимов резания и углов установки резцов. Исследования проводили теоретически на основании созданных авторами компьютерных программ Dina 2 и Freza_n, что позволило обосновать параметры агрегата и его рабочего органа на стадии проектирования. На основании полученных результатов возможно обосновать выбор базового трактора, конструкцию и компоновку тракторного лесохозяйственного агрегата для понижения пней с рабочим органом в виде фрезы фронтальной навески и определить мощностные и динамические параметры такого агрегата, что позволит увеличить производительность труда и снизить утомляемость оператора.

Ключевые слова: понижение пней, динамические параметры, резание, отбрасывание продуктов резания, оптимизация.

Для цитирования: Орловский С.Н., Карнаухов А.И. Методика расчета энергетических и динамических параметров агрегата для понижения пней и режимов резания его рабочего органа // Лесн. журн. 2017. № 4. С. 106–115. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.106

Введение

Агрегат для срезания пней представляет собой навесной механизм, компонованный с гусеничным трелевочным трактором, оборудованным системой отбора мощности и передней навеской. Особенность агрегата рассматриваемой конструкции заключается в выполнении технологического процесса срезания пней в режиме непрерывного движения, оптимизации энергетических и динамических параметров и наличии гидравлического привода его рабочего органа.

Цели исследования:

обоснование возможностей преодоления перегрузок при встрече рабочего органа с пнем за счет кинетической энергии вращающихся масс двигателя, трансмиссии и фрезы;

определение оптимальных энергетических и динамических параметров агрегата;

теоретический анализ процесса резания пня фрезерным рабочим органом и отбрасывания продуктов резания, позволяющий в дальнейшем решить задачу оптимизации конструктивных и геометрических параметров рабочего органа, а также режимов работы по критерию минимума энергоемкости.

При этом необходимо:

произвести расчет динамической системы лесохозяйственного агрегата с активным рабочим органом при детерминированных законах возмущающих сил и определить оптимальные энергетические и динамические параметры агрегата по критерию минимума энергоемкости;

рассчитать режимы срезания пней и конструкцию рабочего органа.

Материалы и методы исследования

Наиболее эффективным устройством для удаления надземной части пней является машина МУП-4. Однако существующая технология срезания пней с ее помощью на базе трактора ТДТ-55А (ЛХТ-100С) и разработанное под нее орудие имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что трансмиссия привода рабочего органа конструктивно сложна. Главный недостаток МУП-4 – цикличность работы, что не только требует осуществления большого количества операций по управлению, но и снижает производительность труда.

Наиболее перспективной является фреза с гидростатическим приводом рабочего органа и обоснованными по моменту инерции параметрами, режимами резания и геометрией резцов [2, 8].

Технология использования нового агрегата не предполагает остановку перед каждым пнем для его срезания, что значительно увеличивает площадь обработки и количество срезаемых пней, а значит, снижает стоимость обработки 1 га площади. Орудие работает следующим образом. Трактор движется на рабочей скорости, оператор по ходу движения направляет стрелу на пень. Мощность двигателя, гидравлический привод рабочего органа, запас кинетической энергии вращающихся масс и телескопическая подпружиненная стре-

ла обеспечивают безостановочное дробление пня. Крутящий момент от действия сил инерции вращающихся и поступательно движущихся масс агрегата способствует преодолению временно возросшего момента сопротивления.

Динамическая система рассматриваемого лесохозяйственного агрегата при исследовании ее взаимодействия с разрабатываемой средой приводится к жесткой одномассовой линейной динамической системе, которая описывается дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами, что позволяет рассматривать ее в виде линейной модели. Расчет переходного процесса агрегата подробно рассмотрен в работах [3, 5]. Для его выполнения автором была разработана компьютерная программа Dina 2 [6].

Результаты исследования и их обсуждение

Оптимизацию энергетических и динамических параметров лесохозяйственного агрегата проводят в следующей последовательности. На основании математической модели одномассовой динамической системы агрегата при детерминированных внешних воздействиях и значениях констант моторно-трансмиссионной установки агрегата в программе Dina 2 рассчитывают таблицы средних значений динамической реакции агрегата на вынужденные перегрузки ($K_{ср.опт}$), определяют оптимально допустимое снижение угловой скорости коленчатого вала ($\Delta\omega_{опт}$, c^{-1}) и время эффективной отдачи кинетической энергии инерционными массами агрегата ($t_{опт}$, с). Вероятные значения длительности участков перегрузки (τ_n , с), коэффициентов динамичности ($K_{д.ср}$) при выполнении технологического процесса принимают по времени прорезания пня на первой передаче с учетом сжатия стрелы на длину хода.

По результатам расчетов определяют:

степень соответствия динамических параметров агрегата динамике внешних условий (K_c) и оптимальную степень загрузки двигателя ($K_{з.опт}$);

оптимальную скорость движения при выполнении технологического процесса ($V_{опт}$, м/с);

требуемую мощность двигателя ($N_{е.р}$, кВт);

оптимальный момент инерции ($J_{опт}$, $кг \cdot м^2$) агрегата, приведенный к коленчатому валу двигателя энергетического средства.

Варьируемыми параметрами при расчетах могут быть моменты инерции, мощности двигателей, скорости движения. Их оптимальное сочетание достигается по критериям минимизации энергетических параметров агрегата при выполнении технологического процесса в заданных условиях с максимальной производительностью, что улучшает его технико-эксплуатационные параметры.

Средние значения динамической реакции полностью отражают работу сил инерции при снижении угловой скорости вала двигателя. Расчет переходного процесса агрегата выполняют на основании следующих исходных данных: угловой скорости (ω_p) коленчатого вала и крутящего

момента ($M_{e,p}$) при номинальной мощности двигателя; снижения угловой скорости ($\Delta\omega$), допустимой для данного двигателя; допустимого снижения угловой скорости (ω_M)*; приведенного к валу двигателя момента инерции агрегата (J_Σ); коэффициента приспособляемости (K_Π); интервала снижения угловой скорости (Δt); длительности анализируемого периода (τ).

Входные данные программы Dina 2 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Данные, вводимые в программу Dina 2

Исходные данные		Значения для расчета
в алгоритме	по программе	
ω_p	omp=	230,27
$M_{e,p}$	Me=	421,72
$\Delta\omega$	dom=	62,83
J_Σ	Jsigma=	4,55
K_Π	Kп=	1,12
$\Delta\tau$	dtau=	0,50
τ_{max}	taumax=	10,00
dt	dt=	0,50
$K_{д.ср.макс}$	Kdsrm=	2,40

График зависимости снижения угловой скорости коленчатого вала двигателя от длительности перегрузки показан на рис. 1.

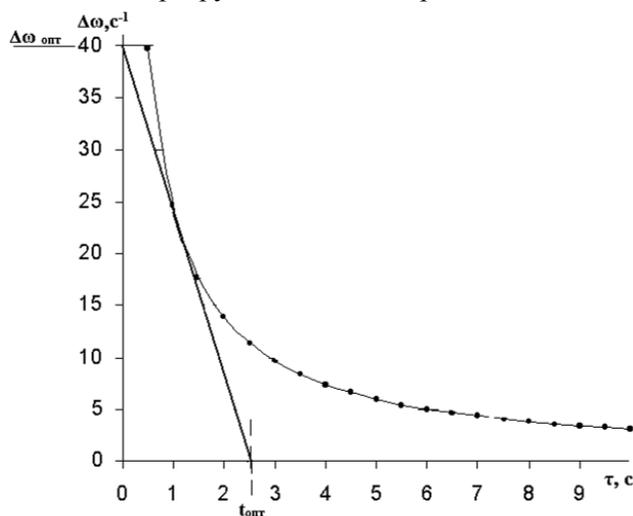


Рис. 1. Зависимость $\omega = f(\tau)$ для трактора ТЛТ-100С с двигателем Deutz BF4M 1013EC на первой передаче

* Принимается угловая скорость при максимальном значении крутящего момента.

Касательная к кривой отсекает на оси абсцисс оптимальное значение длительности перегрузки $t_{\text{опт}}$, которую может преодолевать агрегат с данными параметрами [3].

Для рассматриваемого агрегата на базе трактора ТЛТ-100С получаем степень соответствия динамических параметров агрегата динамике внешних условий $K_c = 0,94$. Целесообразная (оптимальная) степень загрузки двигателя $K_{z,\text{опт}} = 0,9$. Оптимальная скорость движения агрегата $V_{\text{опт}} = 0,79$ м/с. Рациональная мощность двигателя $N_{e,p} = 88,5$ кВт. Приведенный к коленчатому валу двигателя момент инерции агрегата $J_{\text{опт}} = 3,56$ кг·м².

В стоимостном выражении изменение момента инерции вращающихся масс дешевле, чем применение трактора с двигателем повышенной мощности. Вариантом увеличения момента инерции вращающихся масс для изменения динамических параметров агрегата в условиях эксплуатации, вызывающих неустановившийся режим работы двигателя трактора, может быть установка дополнительного груза на фрезу орудия [3].

Для расчета режимов резания пней основные параметры орудия взяты из теоретических исследований, а также из соответствующих рекомендаций, полученных экспериментальным путем при исследовании взятого за образец орудия МУП-4. Скорость резания пней фрезерным рабочим органом принята 20 м/с на основании [1, 2, 8].

Для проектируемого рабочего органа агрегата производится поиск путей снижения энергоемкости процесса. Основные параметры рабочего органа заданы в качестве исходных к проекту и приведены ниже.

Ширина основания ротора	1,15...1,20 м
Максимальный диаметр срезаемого пня	1,0...1,2 м
Угол заточки резцов:	
подрезных	56°
скальвающих	45°
Угол установки ножей от вертикальной плоскости	15°
Рабочая скорость трактора ($V_{\text{дв}}$).....	0,8 м/с
Скорость резания ($V_{\text{рез}}$)	20 м/с

Пень представляет собой волокнистую среду, для расчетов резания которой могут быть использованы математические зависимости, основывающиеся на законах теории упругости и пластичности и на теоретических предположениях С.Н. Орловского и А.И. Карнаухова [3, 4]. Их применение позволило на основе физико-математической модели разработать методику и получить уравнения для определения аналитическим методом энергоемкости резания и метания древесных включений рабочим органом агрегата.

Затраты мощности на процесс поперечного фрезерования пней (N , кВт) можно представить в виде суммы затрат мощности на резание пней ($N_{\text{рез}}$) и отбрасывание древесной щепы ($N_{\text{отб}}$) [2, 3]:

$$N = N_{\text{рез}} + N_{\text{отб}}.$$

Для рассматриваемой фрезы толщина срезаемой стружки [2, 3]

$$\delta_{\text{ср}} = 6,28 \frac{V_{\text{дв}} R_{\phi}}{V_{\text{рез}} z},$$

где R_f – радиус фрезы, м;
 z – число ножей фрезы, шт.

Для скоростей движения (0,8 и 1,5 м/с) и резания (20, 30 и 40 м/с) при количестве ножей на барабане фрезы 44 шт. толщина срезаемой стружки $\delta_{cp} = 1,7 \dots 6,8$ мм, для принятых скоростей движения и резания (соответственно 0,8 и 20 м/с) $\delta_{cp} = 3,4$ мм.

Энергию, расходуемую на резание пней (E_n , Дж/м³), определим по выражению [4]:

$$E_n = \left(78 - V_{рез} \left(0,9 - \frac{9,55z}{V_{дв} R_f} \right) \right) 10\xi,$$

где ξ – степень пнистости, принимается равной 100 %.

Затраты мощности на срезание пня

$$N = E_n \Pi,$$

где Π – производительность, м/с³.

Удельную работу на сообщение кинетической энергии отбрасываемой древесной щепе ($e_{отб}$, Дж/м³) рассчитаем по выражению [6]:

$$e_{отб} = \frac{\gamma V_{рез}^2 \eta_{отб}}{2},$$

где γ – удельный вес щепы, $\gamma = 8000$ Н/м;

$\eta_{отб}$ – коэффициент полезного действия (КПД) отбрасывания щепы.

Расчет затрат мощности на выполнение технологического процесса в зависимости от скоростей резания и движения, а также геометрических параметров резцов и рабочего органа произведен в программе Freza_n [7].

В табл. 2 представлен фрагмент результатов расчетов затрат мощности на дробление пня N_{pn} и отбрасывание продуктов резания фрезой $Notb$ по программе Freza_n в зависимости от скоростей резания V_p и движения V_d , углов установки резцов относительно плоскостей вращения α и резания β фрезы.

Таблица 2

Результаты исследования затрат мощности на дробление пня и отбрасывание продуктов резания фрезой в зависимости от скоростей резания и движения, углов установки резцов и резания

V_p	V_d	α	β	N_{pn}	$Notb$
м/с		...°		кВт	
20	0,8	15	30	57 071,40	12 465,47
20	0,8	15	40	57 071,40	12 465,47
20	0,8	15	50	57 071,40	12 465,47
20	0,8	20	30	57 071,40	12 465,47
20	0,8	20	40	57 071,40	12 465,47
20	0,8	20	50	57 071,40	12 465,47
20	0,8	30	30	57 071,40	12 465,47
20	0,8	30	40	57 071,40	12 465,47
20	0,8	30	50	57 071,40	12 465,47
20	1,6	15	30	57 266,32	24 930,93

Как следует из полученных данных, на энергоёмкость процесса основное влияние оказывают скорости резания и подачи (движения), углы заострения резцов и их наклона к плоскости резания на затраты мощности практически не влияют. Зависимость затрат мощности от скоростей резания и движения приведена на рис. 2.

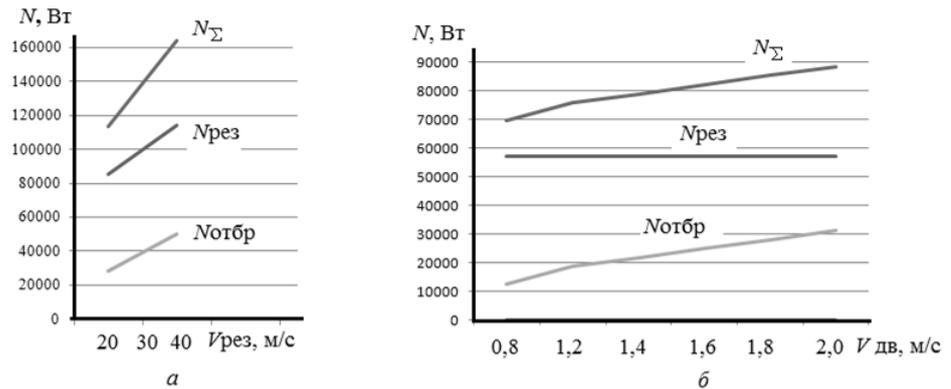


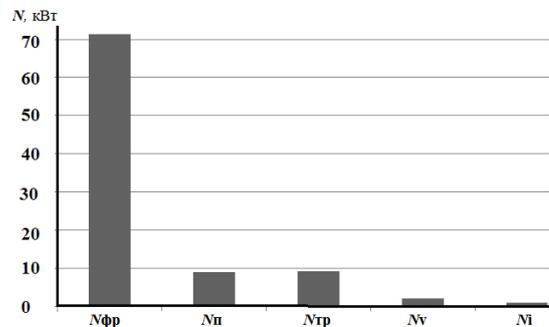
Рис. 2. Влияние скоростей резания (а) и движения (б) на затраты мощности на дробление пня и отбрасывание продуктов резания: а – при $V_{дв} = 0,8$ м/с; б – при $V_{рез} = 20$ м/с

Затраты мощности на дробление пня находятся в прямой зависимости от скорости резания, в меньшей степени – от скорости движения. Кинетическая энергия, сообщаемая отбрасываемым продуктам резания, с повышением скорости движения увеличивается незначительно, но находится в прямой зависимости от скорости резания.

Из приведенных на рис. 2, а графиков следует, что при изменении скорости резания от 20 до 30 м/с энергозатраты возрастают на 149 %, от 30 до 40 м/с – на 133 %. В то же время изменение скорости движения в пределах 0,8...2,0 м/с при скорости резания 20 м/с (рис. 2, б) вызывает увеличение затрат мощности на сообщение кинетической энергии отбрасываемым продуктам резания на 250 %.

На рис. 3 представлена диаграмма баланса мощности предлагаемого нами агрегата.

Рис. 3. Диаграмма баланса затрат мощности на срезание пней по элементам технологического процесса: $N_{фр}$ – на привод фрезы; $N_{п}$ – на передвижение агрегата; $N_{тр}$ – на потери в трансмиссии; $N_{в}$ – на буксование и повороты; N_i – на преодоление сил инерции



Коэффициент загрузки по мощности двигателя трактора для агрегата в составе ТЛТ-100С с разрабатываемым орудием составит 0,92.

Заключение

Комплекс созданных в процессе исследования программных средств позволил оценить степень соответствия динамических параметров лесохозяйственного агрегата динамике сил сопротивления; наметить пути совершенствования его конструкции в направлении повышения КПД и производительности; оптимизировать конструктивные и геометрические параметры активных рабочих органов, а также режимы резания разрабатываемой среды в процессе проектирования.

Динамические показатели агрегата для понижения пней нуждаются в улучшении за счет выбора оптимальных значений скорости, мощности двигателя и момента инерции вращающихся масс.

Повышение эффективности использования агрегата для понижения пней возможно за счет оптимизации его энергетических и динамических параметров в соответствии с динамикой сил сопротивления, выбором рациональных режимов резания и геометрии резцов.

Применение энергетических средств с оптимизированными к условиям работы параметрами позволит повысить КПД и производительность агрегатов, обеспечить рациональный коэффициент загрузки двигателей, сократить затраты энергии на выполнение лесохозяйственных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Драпалюк М.В., Батищев С.Н. Результаты теоретического исследования виброударной машины для удаления пней // Лесн. журн. 2011. № 3. С. 51–57. (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Карнаухов А.И. Лесопожарные агрегаты с торцевой фрезой. Концепция энергосбережения: моногр. для студентов, преподавателей и науч. работников техн. вузов. Красноярск: СибГТУ, 2011. 220 с.
3. Орловский С.Н. Определение энергетических и динамических параметров тракторов, режимов резания активных рабочих органов машинно-тракторных агрегатов: моногр. Красноярск: КрасГАУ, 2011. 376 с.
4. Орловский С.Н., Карнаухов А.И. Теоретические предпосылки к обоснованию параметров и режимов работы роторных рабочих органов // Лесн. журн. 2012. № 4. С. 70–76. (Изв. высш. учеб. заведений).
5. Орловский С.Н., Филимонов Э.Г. Оптимальные параметры лесопожарных агрегатов // Лесн. журн. 1994. № 1. С. 32–37. (Изв. высш. учеб. заведений).
6. Расчет динамики тракторных агрегатов (Dina 2): свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610362 / Орловский С.Н., Комиссаров С.В.; заявка № 2006613950; зарег. в Реестре программ 19.01.2007.

7. Расчет энергоемкости резания лесных почв с подстилкой торцовыми фрезами и затрат мощности на резание и выполнение технологического процесса (Fresa_n): свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007610363 / Орловский С.Н., Комиссаров С.В., Карнаухов А.И.; заявка № 2006613951; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 19.01.2007.

8. Cormmier D., Ryans M. The Use of Piling Rakes for a Logging Debris Problem // Canadian Forest Industries. 1988. No. 11. Pp. 27–32.

Поступила 23.01.17

UDC 630*232.211

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.106

Calculation Methodology of Energy and Dynamic Parameters of the Stump Lowering Device and Cutting Conditions of Its Working Member

S.N. Orlovskiy¹, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

A.I. Karnaukhov², Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

¹Krasnoyarsk State Agrarian University, pr. Mira, 90, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation; e-mail: orlovskiysergey@mail.ru

²Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev, pr. Mira, 82, Krasnoyarsk, 660049, Russian Federation; e-mail: Sky_angel_33@mail.ru

Substantiation of energy and dynamic parameters of a stump lowering device during the reforestation process is a priority. Calculation of optimum design parameters of a milling working member of the unit and its operating modes is also important. The goal of theoretical research is to justify the possibilities of overloads overcoming when the working member meets a stump due to the kinetic energy of rotating masses of the engine, transmission and cutter; determination of optimal energy and dynamic parameters of the unit; theoretical analysis of the stump crushing process by a milling working member that allows solving the problem of optimizing the design and geometric parameters of the working member, its operating modes by the minimum criterion of the energy intensity. The research program provides the study of the possibility of overload overcoming by selecting the optimum values of the rotational speed of the working member, engine power, inertia moment of the unit, speed of its movement according to the criterion of the permissible load factor of the tractor engine. Also we have studied the rational cutting conditions and the angles of cutters setting by the criterion of minimum energy intensity. The research is carried out theoretically on the basis of the computer programs Dina 2 and Freza_n created by the authors, which allow us to substantiate the parameters of the unit and its working body at the design stage. On the basis of the obtained results we can substantiate the design and structure of the tractor forestry unit for stump lowering with a working member in the

For citation: Orlovskiy S.N., Karnaukhov A.I. Calculation Methodology of Energy and Dynamic Parameters of the Stump Lowering Device and Cutting Conditions of Its Working Member. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 4, pp. 106–115. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.4.106

form of a front-mounted milling cutter and determine its power and dynamic parameters. This will increase the labor productivity and reduce operator's fatigue.

Keywords: stump lowering, dynamic parameter, cutting, throwing the cutting product off, optimization.

REFERENCES

1. Drapalyuk M.V., Batishchev S.N. Rezul'taty teoreticheskogo issledovaniya vibroudarnoy mashiny dlya udaleniya pney [Theoretical Study Results of Vibratory Impact Machine for Stump Removal]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2011, no. 3, pp. 51–57.

2. Karnaukhov A.I. *Lesopozharnye agregaty s tortsovoy frezoy. Kontsepsiya energosberezheniya: monogr. dlya studentov, prepodavateley i nauch. rabotnikov tekhn. vuzov* [Forest Fire Units with Face Milling Cutter. The Concept of Energy-Saving]. Krasnoyarsk, 2011. 220 p.

3. Orlovskiy S.N. *Opreделение энергетических и динамических параметров тракторов, режимов резания активных рабочих органов машинно-тракторных агрегатов: моногр.* [Determination of Energy and Dynamic Parameters of Tractors, Cutting Modes of Active Working Members of Machine and Tractor Units]. Krasnoyarsk, 2011. 376 p.

4. Orlovskiy S.N., Karnaukhov A.I. *Teoreticheskie predposylki k obosnovaniyu parametrov i rezhimov raboty rotornykh rabochikh organov* [Theoretical Background of Rotary Tools Parameters and Operating Modes]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2012, no. 4, pp. 70–76.

5. Orlovskiy S.N., Filimonov E.G. *Optimal'nye parametry lesopozharnykh agregatov* [Optimum Parameters of Forest Fire Units]. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 1994, no. 1, pp. 32–37.

6. Orlovskiy S.N., Komissarov S.V. *Raschet dinamiki traktornykh agregatov (Dina 2)* [Calculation of Dynamics of Tractor Units (Dina 2)]. Certificate of Official Registration of Software Application no. 2007610362, 2007.

7. Orlovskiy S.N., Komissarov S.V., Karnaukhov A.I. *Raschet energoemkosti rezaniya lesnykh pochv s podstilkoy tortsovymi frezami i zatrat moshchnosti na rezanie i vypolnenie tekhnologicheskogo protsessa (Fresa_n)* [Calculation of Energy Intensity of Forest Soil Cutting with Litter by Face Mills and Power Expenditure to Cut and Perform the Technological Process (Fresa_n)]. Certificate of Official Registration of Software Application no. 2007610363, 2007.

8. Cormmier D., Ryans M. The Use of Piling Rakes for a Logging Debries Problem. *Canadian Forest Industries*, 1988, no. 11, pp. 27–32.

Received on January 23, 2017