

5. Karpachev S.P., Lozovetskiy V.V., Shcherbakov Ye.N. *Modelirovaniye logisticheskikh sistem lesnykh materialopotokov* [Simulation of logistics systems of forest materialopotokov]. M. Transport: nauka, tekhnika, upravleniye. Nauchnyy informatsionnyy sbornik. RAN VINITI. 2011, № 8, pp. 16-20.
6. Karpachev S.P., Shcherbakov Ye.N., Komyakov A.N., Slinchenkov A.N. *Problemy razvitiya bioenergetiki na osnove drevesnogo syrya v Rossii* [Problems bioenergy development of wood-based raw materials in Russia]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoj Vestnik. № 4 (73). 2010, pp. 70-74.
7. Komyakov A.N., Karpachev S.P. *Primeneniye bolshegruznykh plavuchikh konteynerov dlya nuzhd bioenergetiki* [Heavy use of floating containers for bioenergy]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoj Vestnik. № 4 (73) – 2010g., pp. 104-107.
8. Karpachev S.P., Shcherbakov Ye.N., Soldatova Ye.V. *Modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov osvoiniya drevesiny na lozhe vodokhranilishch* [Modeling process of development on a bed of wood reservoirs]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoj Vestnik. № 1 – 2013g., pp. 56-61.
9. Karpachev S.P., Lozovetskiy V.V., Shcherbakov Ye.N. *Modelirovaniye logisticheskikh sistem lesnykh materialopotokov* [Simulation of logistics systems of forest materialopotokov]. M. Transport: nauka, tekhnika, upravleniye. Nauchnyy informatsionnyy sbornik. RAN VINITI. 2011, № 8, pp.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РУБИЛЬНОЙ МАШИНЫ НА МОБИЛЬНОМ ШАССИ

А.О. GERMANOVICH, асп. каф. лесных машин и технологии лесозаготовок БГТУ

18german@mail.ru

УО «Белорусский государственный технологический университет»,  
ул.Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь

*На сегодняшний день получение топливной щепы из отходов лесозаготовок при помощи мобильных рубильных машин является одним из приоритетных направлений эффективного развития лесозаготовительного предприятия. Процесс измельчения древесного сырья в топливную щепу сопровождается вибрацией, учет которой необходим при проектировании рубильной машины. Опыт эксплуатации рубильных машин показывает, что операторы имеют повышенную утомляемость, которая снижает производительность их работы. Поэтому возникает необходимость в методах оценки и способах уменьшения виброактивности.*

*Ключевые слова:* динамика, колебания, моделирование, рубильная машина, щепа.

Переработка отходов лесозаготовок при помощи мобильных рубильных машин является одной из наиболее доступных и в то же время эффективных технологий переработки древесины на топливную щепу. Однако работа мобильной рубильной машины связана с резко переменным характером воздействия технологической или полезной нагрузки, вследствие этого при измельчении древесного сырья появляются колебания, учет которых необходим при проектировании рубильной машины. Длительное воздействие вибрации вызывает негативные изменения физиологических функций человека.

В процессе измельчения древесного сырья к резцам прикладываются усилия, величины которых зависят от сопротивления резанию. Усилие, которое приложено к резцу, в процессе резания изменяется. Оно дости-

гает максимума при внедрении и падает до наименьшего значения в момент отделения щепы от древесного сырья. Такое изменение усилий резания приводит к вынужденным колебаниям рубильного агрегата. Возмущающее (момент  $M$ ) воздействие от периодически изменяющееся сил резания можно представить в виде функции, изменяющейся по гармоническому закону ( $M = M_0 \sin \omega t$ ). Исследование динамики рубильной машины на мобильном шасси невозможно без учета работы двигателя, как источника заданной мощности. Вопросы математического описания работы двигателя решались исследователями по-разному в зависимости от поставленных задач и требуемой точности приближений. Так, у И.Б. Барского, В.Я. Аниловича и Г.М. Кутькова [1] в соответствующих расчетах задавались мгновенным значением крутящего



Рис. 1. Рубильная машина на мобильном шасси

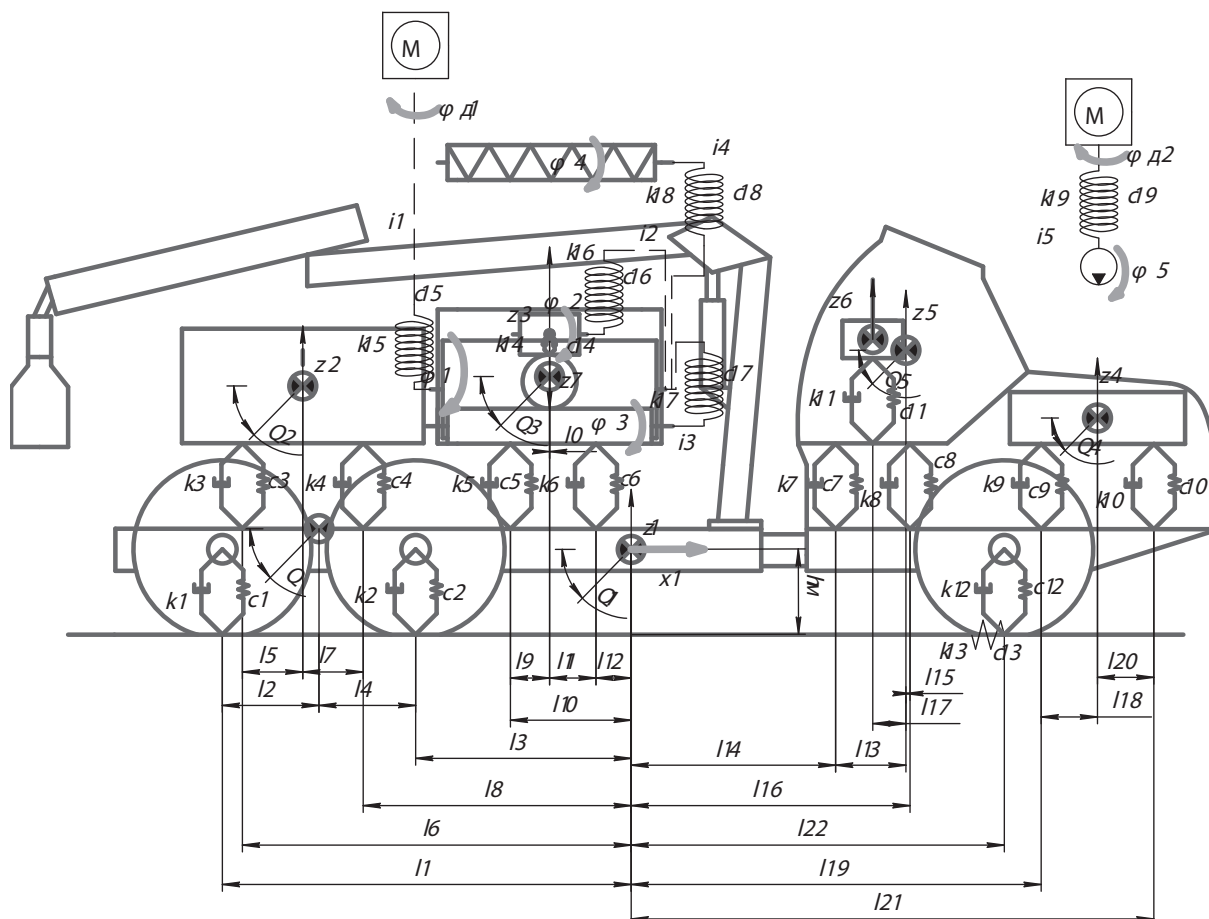


Рис. 2. Расчетная схема динамической модели работы рубильной машины на мобильном шасси с колесной формулой 6К6

момента двигателя по скоростной характеристике, в [2] – разработана модель двигателя в функции крутящего момента от положения рейки топливного насоса и частоты вращения коленчатого вала. Аналогичное матема-

тическое описание двигателя используется в работе [3]. В работе Ю.В. Хромова [4] двигатель определяется частичными скоростными характеристиками, а в [5] – частичными регуляторными. Для рассматриваемой дина-

мической системы моделирование работы двигателя в функции крутящего момента от частоты вращения производилось по регуляторной характеристике. Крутящий момент двигателя на регуляторной и корректорных ветвях характеристики в функции от частоты вращения ( $n$ ) определялся по следующим зависимостям

$$M_d = (n_x - n)M_{en} / (n_x - n), \quad (1)$$

$$M_d = M_{emax} - (n/n_n - \alpha / (1 - \alpha))^2 (M_{emax} - M_e), \quad (2)$$

где  $n_x$  – частота вращения двигателя на холостом ходу;

$M_{en}$  – номинальный крутящий момент двигателя;

$M_{emax}$  – максимальный крутящий момент двигателя;

$\alpha$  – коэффициент степени снижения частоты вращения коленчатого вала.

Негативное воздействие вибраций, возникающих в процессе работы мобильной рубильной машины, ставит перед учеными задачу создать модель, при помощи которой можно было бы проектировать новые рубильные машины с улучшенными эксплуатационными свойствами. Основной задачей динамического исследования является определение движения системы, т.е. нахождение независимых, изменяющихся по времени координат (степеней свободы), определяющих положение всех масс данной системы.

На основании исследования физической модели (опытного образца) мобильной рубильной машины (рис. 1), отражающее взаимодействие подсистем машины, таких как двигатели, привод, рубильный агрегат, а также возмущающих факторов, была составлена расчетная схема математической модели работы машины (рис. 2).

При этом распределение массы машины, привода рубильного агрегата заменены сосредоточенными, соединенными безынерционными упруго демпфирующими связями, т.е. реальная динамическая система с бесконечным числом степеней свободы заменена схемой с конечным числом степеней свободы. Основными упруго демпфирующими элементами рубильной машины на мобильном шасси являются шины, элементы привода рубильного агрегата, крепления технологичес-

кого оборудования, кабины, кресла оператора и двигателя.

Каждой дискретной массе исследуемой машины соответствует независимая, изменяющаяся во времени координата (степень свободы).

Имитационная модель указанной машины включает множество упругих и демпфирующих элементов, массы которых при наличии возмущений колеблются, что отражается на динамике работы машины, нагруженности агрегатов и узлов, а также оказывает вредное воздействие на оператора.

При построении расчетной схемы рубильной машины на мобильном шасси приняты следующие общепринятые допущения: распределенные массы машины заменены сосредоточенными, которые соединены безынерционными упругодемпфирующими связями; высокочастотные колебания шестерен, валов и других деталей привода, как со сосредоточенными, так и распределенными параметрами, не рассматриваются; упругие характеристики шин – квазилинейные, а силы неупругого сопротивления – пропорциональные скорости деформации.

Расчетная динамическая схема имеет двадцать степеней свободы, описывающих колебания в продольной вертикальной плоскости. Положение рубильной машины на мобильном шасси определяется следующими обобщенными координатами: углом поворота коленчатого вала двигателей –  $\phi d1, \phi d2$ ; углами поворота механизма привода рубильного барабана, прижимного ролика, подающего транспортера, винтового конвейера, насоса гидросистемы технологического оборудования –  $\phi 1, \phi 2, \phi 3, \phi 4, \phi 5$  соответственно; вертикальными, продольными и угловыми перемещениями центров тяжести базовой машины, двигателя привода рубильного барабана, рубильного агрегата, двигателя базой машины, кабины, кресла оператора, древесного сырья –  $z1, x1, z2, z3, z4, z5, z6, z7, Q, Q1, Q2, Q3, Q4, Q5$  соответственно.

Расчетная динамическая схема работы рубильной машины имеет обозначения:  $c1, c2, c3, c4, c5, c6, c7, c8, c9, c10, c11, c12, c14, k1, k2, k3, k4, k5, k6, k7, k8, k9, k10, k11, k12$ ,

$k_{14}$  – коэффициенты вертикальной жесткости (Н/м) и сопротивления (Н·с/м) шин, креплений двигателя привода рубильного барабана, рубильного агрегата, кабины, двигателя базой машины, кресла оператора, прижимного подающего ролика соответственно;  $c_{13}$ ,  $k_{13}$  – коэффициенты горизонтальной жесткости (Н/м) и сопротивления (Н·с/м) передних шин и почвогрунта, приведенные к точкам контакта колес машины с опорной поверхностью;  $c_{15}$ ,  $c_{16}$ ,  $c_{17}$ ,  $c_{18}$ ,  $c_{19}$ ,  $k_{15}$ ,  $k_{16}$ ,  $k_{17}$ ,  $k_{18}$ ,  $k_{19}$  – коэффициенты угловой жесткости (Н) и сопротивления (Н·с) валов привода рубильного барабана, прижимного, подающего ролика, подающего транспортера, винтового конвейера, привода гидросистемы технологического оборудования соответственно;  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ ,  $i_4$ ,  $i_5$  – передаточные числа приводов рубильного агрегата и гидросистемы технологического оборудования;  $h_m$  – вертикальная координата центра тяжести машины, м;  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$ ,  $I_6$ ,  $I_7$ ,  $I_8$ ,  $I_9$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{11}$ ,  $I_{12}$ ,  $I_{13}$ ,  $I_{14}$ ,  $I_{15}$ ,  $I_{16}$ ,  $I_{17}$ ,  $I_{18}$ ,  $I_{19}$ ,  $I_{20}$ ,  $I_{21}$  – горизонтальные координаты, м;  $M_{д1}$ ,  $M_{д2}$ ,  $M_p$  – возмущающие моменты двигателя привода рубильного агрегата, двигателя привода гидросистемы технологического оборудования, рубильного агрегата, Н·м. Для составления системы дифференциальных уравнений, входящих в состав математической модели, описывающей колебательные процессы, которые происходят с рубильной машиной на мобильном шасси во время ее работы, воспользовались уравнением Лагранжа второго рода.

Выражения, по которым определяют кинетическая, потенциальная энергии рассматриваемой рубильной машины на мобильном шасси, имеют следующий вид

$$T = \frac{1}{2} \left( \begin{aligned} &m_1 \dot{z}_1^2 + m_1 \dot{x}_1^2 + I_1 \dot{\theta}_1^2 + m_2 \dot{z}_2^2 + \\ &+ I_2 \dot{\theta}_2^2 + m_3 \dot{z}_3^2 + I_2 \dot{\theta}_2^2 + m_3 \dot{z}_3^2 + \\ &+ I_3 \dot{\theta}_3^2 + m_4 \dot{z}_4^2 + I_4 \dot{\theta}_4^2 + m_5 \dot{z}_5^2 + \\ &+ I_5 \dot{\theta}_5^2 + m_6 \dot{z}_6^2 + m_7 \dot{z}_7^2 + \\ &+ I_{д1} \dot{\varphi}_{д1}^2 + I_9 \dot{\varphi}_1^2 + I_{10} \dot{\varphi}_2^2 + \\ &+ I_{д2} \dot{\varphi}_{д2}^2 + I_{12} \dot{\varphi}_4^2 + I_{13} \dot{\varphi}_5^2 + I_{14} \dot{\varphi}_6^2 + I_{15} \dot{\varphi}_7^2 \end{aligned} \right); \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Pi = & \frac{1}{2} [c_1(z_1 + l_1\theta_1 + l_2\theta)^2 + c_3(z_2 + l_5\theta_2 - \\ & - z_1 - l_6\theta_1)^2 + c_2(z_1 + l_3\theta_1 - l_4\theta)^2 + \\ & + c_4(z_2 - l_7\theta_2 - z_1 - l_8\theta_1)^2 + c_5(z_3 + l_9\theta_3 - \\ & - z_1 - l_{10}\theta_1)^2 + c_6(z_3 - l_{11}\theta_3 - z_1 - l_{12}\theta_1)^2 + \\ & + c_7(z_5 + l_{13}\theta_5 - z_1 + l_{14}\theta_1)^2 + c_8(z_5 - \\ & - l_{15}\theta_5 - z_1 + l_{16}\theta_1)^2 + c_{11}(z_6 - z_5 - l_{17}\theta_5)^2 + \\ & + c_9(z_4 + l_{18}\theta_4 - z_1 + l_{19}\theta_1)^2 + c_{10}(z_4 - \\ & - l_{20}\theta_4 - z_1 + l_{21}\theta_1)^2 + c_{12}(z_1 - l_{22}\theta_1)^2 + \\ & + c_{13}(x_1 + h_m\theta_1)^2 + c_{14}(z_7 - z_3 - l_0\theta_3)^2 + \\ & + c_{15}(\varphi_1 - \frac{1}{i_1}\varphi_{д1})^2 + c_{16}(\varphi_2 - \frac{1}{i_2}\varphi_{д1})^2 + \\ & + c_{17}(\varphi_3 - \frac{1}{i_3}\varphi_{д1})^2 + c_{18}(\varphi_4 - \frac{1}{i_4}\varphi_{д1})^2 + \\ & + c_{19}(\varphi_5 - \frac{1}{i_5}\varphi_{д2})^2]; \end{aligned} \quad (4)$$

где  $I_{д1}$ ,  $I_{д2}$  – момент инерции вращающихся масс двигателя и ведущих частей сцепления привода рубильного агрегата и насоса гидросистемы технологического оборудования соответственно, кг·м<sup>2</sup>;

$I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$  – моменты инерции базовой машины, двигателя привода рубильного барабана, рубильного модуля, двигателя базой машины, кабины соответственно, кг·м<sup>2</sup>;

$I_9$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{11}$ ,  $I_{12}$ ,  $I_{14}$  – моменты инерции элементов привода рубильного агрегата и гидросистемы технологического оборудования, кг·м<sup>2</sup>;

$m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$ ,  $m_5$ ,  $m_6$ ,  $m_7$  – масса базовой машины, двигателя привода рубильного барабана, рубильного модуля, двигателя базой машины, кабины, кресла оператора, древесного сырья соответственно, кг.

Подставив выражения кинетической, потенциальной энергии и диссипативной функции Релея рубильной машины на мобильном шасси в уравнение Лагранжа



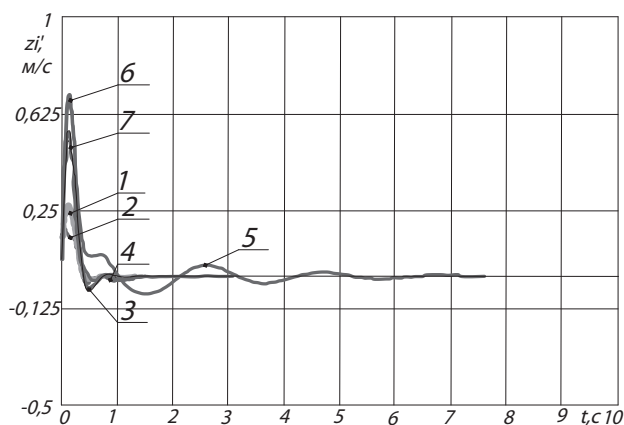


Рис. 3. Изменение скоростей перемещений центров тяжести: 1 – базовой машины; 2 – двигателя привода рубильного барабана; 3 – рубильного модуля; 4 – двигателя базовой машины; 5 – кабины; 6 – кресла оператора; 7 – древесного сырья

второго рода, получим систему дифференциальных уравнений, которая описывает колебательные процессы, происходящие с машиной в процессе измельчения древесного сырья. Решение системы дифференциальных уравнений второго порядка производилось с помощью системы программирования *MathCAD 14*.

В результате решения системы дифференциальных уравнений получены матрицы отклонений каждой степени свободы и их первые производные в зависимости от времени протекания процесса (рис. 3, 4).

Максимальные амплитуды колебаний наблюдаются в начальный период работы рубильной машины, затем, вследствие наличия упругодемпфирующих элементов, колебания затухают. Аналогичное явление наблюдается и с изменениями скоростей вертикальных перемещений центров тяжести остова, рубильного модуля, кабины и оператора.

Массово-геометрические параметры динамической системы были приняты с учетом существующих аналогов рубильных машин. Моменты инерции агрегатов машины получены расчетным путем.

Исследование динамических процессов, происходящих при работе рубильной машины на мобильном шасси с автономным

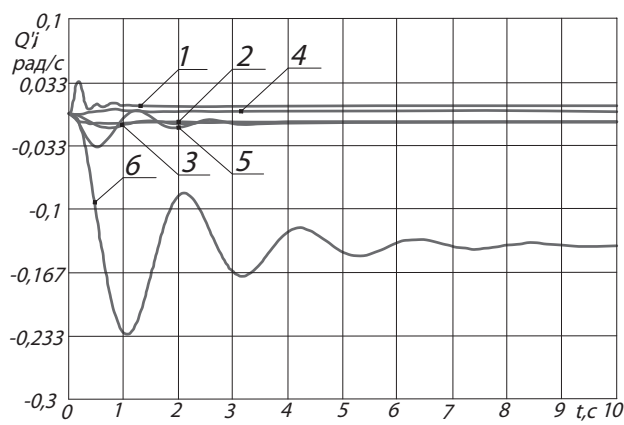


Рис. 4. Изменение скоростей угловых перемещений центров тяжести: 1 – базовой машины; 2 – двигателя привода рубильного барабана; 3 – рубильного модуля; 4 – двигателя базовой машины; 5 – кабины; 6 – балансира

двигателем, при помощи математической модели позволяет обосновать ее рациональные параметры (жесткость виброизолирующих элементов, шин, компоновка) и сделать вывод о соответствии этих параметров условиям работы. Снижение воздействий вибрации на самоходную рубильную машину приведет к повышению ее производительности, а также к уменьшению затрат на ее эксплуатацию.

### Библиографический список

1. Барский, И.Б. Динамика трактора / И.Б. Барский, В.Я. Анилович, Г.М. Кутьков // Машиностроение, 1973. – 520 с.
2. Симанович, В.А. Обоснование приемов трелевки и параметров технологического оборудования колесных тракторов кл. 30 кН с целью повышения их тягово-сцепных свойств: дисс. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / В.А. Симанович. – Минск, 1985. – 266 л.
3. Липницкий, А.В. Статистические исследования нагруженности трансмиссии колесного трактора: дисс. ... канд. техн. наук / А.В. Липницкий – Минск. – 1973. – 23 с.
4. Хромов, Ю.В. Расчетно-экспериментальное определение динамических характеристик автотракторных дизелей / Ю.В. Хромов // Автомобильная промышленность, 1965. – № 2. – С. 5–7.
5. Марков, В.А., Сиротин Е.А. Формирование частичных регуляторных характеристик дизеля / В.А. Марков, Е.А. Сиротин // Автомобильная промышленность, 2002. – № 6. – С. 7–12.

## MODELING WORK ON MOBILE CHIPPERS CHASSIS

Germanovich A.O. (BGU)

18german@mail.ru

Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlova str. 220006, Minsk, Belarus

*Today getting fuel chips from logging residues using mobile chipper is one of the priorities of the effective development of a timber company. The grinding process raw wood fuel chips accompanied by vibration, which requires consideration in the design of the chopper. Operating experience chippers shows that operators have fatigue, which reduces their productivity. Hence the need for the valuation techniques and methods for reducing the vibration activity.*

*Keywords: dynamics, vibrations, modeling, chipper, chips.*

### References

1. Barskiy I.B., Anilovich V.Ya., Kutkov G.M. *Dinamika traktora* [Dynamics of tractor]. Moscow. Mashinostroyeniye, 1973. 520 p.
2. Simanovich, V.A. *Obosnovaniye priyemov trelevki i parametrov tekhnologicheskogo oborudovaniya kolesnykh traktorov kl. 30 kN s tselyu povysheniya ikh tyagovo-stsepnnykh svoystv: Diss.... kand. tekhn. nauk: 05.21.01* [Justification logging techniques and parameters of technological equipment of wheeled tractors kl. 30 kN to increase their traction properties]. Minsk, 1985. 266 p.
3. Lipnitskiy A.V. *Statisticheskiye issledovaniya nagruzhennosti transmissii kolesnogo traktora* [Statistical studies of the transmission of loading wheel tractor]. Diss.... kand. tekhn. nauk. Minsk. 1973. pp. 23.
4. Khromov Yu.V. *Raschetno-eksperimentalnoye opredeleniye dinamicheskikh kharakteristik avtotraktornykh dizeley* [Numerical and experimental determination of the dynamic characteristics of automotive diesel engines]. Avtomobilnaya promyshlennost. Moscow, 1965. № 2. pp. 5-7.
5. Markov V.A., Sirotin Ye.A. *Formirovaniye chastichnykh regulatorynykh kharakteristik dizelya* [Formation of partial regulatory characteristics of diesel]. Avtomobilnaya promyshlennost, Moscow, 2002. № 6. pp. 7-12.

## ВАРИАНТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КАНАТНЫХ УСТАНОВОК НА ВЫБОРОЧНЫХ РУБКАХ В РАВНИННОЙ МЕСТНОСТИ

О.Н. МАТЮШКИНА, *ст. преп. каф. технологии и оборудования лесопромышленного производства МГУЛ*

matyushkina@mgul.ac.ru

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»  
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ

*Отводимые в рубку участки лесного фонда Российской Федерации постепенно приобретают вид тех или иных выборочных рубок и перемещаются на заболоченные грунты. Организация технологического процесса выборочных рубок в определенных условиях, например, в заболоченных местностях, с применением трелевочных, трелевочно-транспортных канатных установок. Предложенные технологические схемы освоения лесосек значительно увеличивают длину пасек, расстояние между магистральными волоками и позволяют не создавать технологические коридоры. Преимущества данной технологии позволят уложиться в нормативы по правилам заготовки древесины.*

*Ключевые слова: выборочные рубки, заболоченные местности.*

Общий запас древесины на корню в Центральном федеральном округе составляет 4,8 % общероссийского запаса, расчетная лесосека составляет 6 %. Лесистость округа не превышает 35 %. Округ занимает 5-е место среди федеральных округов по производству деловой древесины. Наибольшие запасы древесины приходятся на Костромскую и Тверскую области. Наибольшая лесистость

территории (более 50 %) характерна для Костромской, Тверской и Владимирской областей. Эти же области лидируют по производству деловой древесины.

Лесной фонд России, особенно Центральный федеральный округ Российской Федерации, характеризуется истощенностью и без того малолесных районов, в зоне расположения лесопромышленных предприятий и