

## ПАРАМЕТРЫ КОЛЕБАНИЙ СТВОЛА БЕРЕЗЫ ПРИ ТРЕЛЕВКЕ

Г.А. Иванов, А.А. Котов

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

kotov@mgul.ac.ru

При продольном перемещении (трелевке) древесины с полуприподнятыми стволами последние совершают поперечные колебания вследствие неровностей дороги. Колебания влияют на нагруженность специальных лесных машин, выполняющих трелевку. Целью исследований является разработка теоретических положений с их экспериментальным подтверждением, направленных на повышение точности расчетов и прогнозирование ситуаций при выполнении рабочих операций на лесозаготовках. Рациональный выбор проектных параметров технологического оборудования лесных машин возможен в том случае, если в расчетах на прочность будут использованы теоретически и экспериментально обоснованные значения технологических сил. Эффективное использование тяговых возможностей и обеспечение управляемости движения лесных машин при выполнении технологических операций, связанных с продольными перемещениями полуприподнятого ствола, возможно только с учетом теоретических положений, объясняющих изменения технологических сил на рабочих органах технологического оборудования. Поэтому актуальными являются исследования, направленные на увеличение числа учитываемых при моделировании факторов. Динамическую систему, выполняющую рабочие операции по продольному перемещению полуприподнятого ствола, представляют как механическую колебательную, к которой приложены силовые и кинематические воздействия. Для решения задачи считают, что равновесие упругой линии ствола, находящегося в состоянии покоя, периодически нарушается внезапно прикладываемыми к упругой линии и тотчас же удаляемыми поперечно действующими силами. При колебаниях ствола прогиб его упругой линии есть функция двух переменных — координаты и времени. Для нахождения первого члена ряда, соответствующего первой основной форме колебаний, применяют метод Рэлея. При нормальных колебаниях каждая точка упругой линии ствола совершает простое гармоническое колебание с постоянными амплитудой и фазой. Получено выражение частоты основного тона колебания полуприподнятого ствола, перемещаемого за комель, с учетом его формы. Выполнены экспериментальные исследования поперечных колебаний полуприподнятых стволов березы. Определены параметры этих колебаний, в том числе частота.

**Ключевые слова:** ствол дерева, трелевка, форма колебаний, частота колебаний, эксперимент, амплитуда

**Ссылка для цитирования:** Иванов Г.А., Котов А.А. Параметры колебаний ствола березы при трелевке // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 4. С. 47–52. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-47-52

Основную часть лесозаготовительного процесса составляют рабочие операции, связанные с продольными перемещениями полуприподнятого ствола. Многообразие условий эксплуатации и видов выполняемых работ лесопромышленным оборудованием требует отдельных направлений теории лесных машин, которые связаны с понятием математической модели. Однако любая специальная лесная машина при достаточно подробном описании позволяет разработать инвариантные математические модели для различных случаев функционирования. При этом следует иметь в виду, что математическая модель строится на основании моделей процессов [1].

Рациональный выбор проектных параметров технологического оборудования лесных машин возможен лишь в том случае, если в расчетах их деталей на прочность будут использованы теоретически обоснованные значения технологических сил. Реальное увеличение производительности, эффективное использование тяговых возможностей рабочих органов машин и обеспечение управляемости движения лесных машин при выполнении переместительных и ряда технологических операций, связанных с продольными перемещениями полуприподнятого ствола, может быть реали-

зовано только с учетом теоретических положений, объясняющих изменения технологических сил на элементах рабочих органов различных типов технологического оборудования. Поэтому актуальными являются исследования и разработка теоретических положений, направленные на повышение точности расчетов и прогнозирование ситуаций при выполнении рабочих операций на лесозаготовках путем включения базовых констант, определяющих предмет труда и характер его взаимодействия с рабочими органами технологического оборудования, а также путем увеличения числа учитываемых при моделировании факторов.

Любую динамическую систему, выполняющую рабочие операции по продольному перемещению полуприподнятого ствола, можно представить как механическую колебательную, к которой приложены силовые и кинематические воздействия.

Задача по оценке колебаний полностью погруженных хлыстов вполне исчерпывающе решена в работах [2, 3]. Поэтому проведем исследование колебаний полуприподнятого ствола относительно положения равновесия в ситуации покоя, хотя известны работы, в которых рассматриваются колебания подобного вида [4–9]. Рассмотрение именно

этих колебаний обусловлено тем, что, во-первых, в работах [4, 7] представлены только экспериментальные данные по колебаниям хлыстов, во-вторых, в работах [2, 3] хлыст переменного сечения заменяется набором сосредоточенных масс, а длина поднятой части находится по эмпирическим формулам, не учитывающим форму ствола. В работе [8] хлыст переменного сечения представлен ступенчатым стержнем, состоящим из цилиндрических отрезков постоянного сечения равной длины. В работе [9] хлыст аппроксимируется конусом, а изогнутая ось представлена синусоидальной кривой, что нарушает граничные условия.

### Материалы и методика

Исследуемый предмет труда имеет всюду переменный продольный профиль, и распределение плотности вдоль оси ствола может быть переменным, например, у хвойных пород деревьев; модули упругости у разных пород также разные.

Для решения задачи, согласно [10, 11], примем, что равновесие упругой линии полуприподнятого ствола, находящегося в ситуации покоя, нарушено тем, что к упругой линии внезапно прикладываются и тотчас же удаляются поперечно действующие силы. В этом случае ствол начинает колебаться около своего положения равновесия. Обозначим через  $y$  прогиб упругой линии в сечении  $x$ , но уже в момент времени  $t$ . Таким образом, при колебаниях ствола прогиб  $y$  есть функция двух переменных — координаты  $x$  и времени  $t$ . Тогда частная производная  $\partial^2 y / \partial t^2$  будет определять в момент времени  $t$  направленное от оси  $Ox$  ускорение элемента ствола  $dx$ , расположенного на расстоянии  $x$  от начала координат. Для того чтобы элементу длины  $dx$  сообщить это ускорение, требуется приложить направленную от оси  $Ox$  силу величиной  $p = -\rho A dx \partial^2 y / \partial t^2$ , где  $\rho$  — средняя плотность древесины,  $A$  — площадь поперечного сечения ствола.

Так как при свободных колебаниях возмущающая сила отсутствует, можно получить дифференциальное уравнение динамического изгиба ствола с непрерывно распределенными массами, используя дифференциальное уравнение изогнутой оси ствола в форме

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) + \rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0. \quad (1)$$

Зависимость (1) представляет собой уравнение свободных колебаний полуприподнятого ствола. Для его решения применим к нему метод разделения переменных Фурье, полагая при этом  $y(x, t) = T(t)X(x)$ . После подстановки  $y(x, t)$  в (1) и соответствующего преобразования для функций  $T(t)$  и  $X(x)$  получаем обыкновенные дифференциальные уравнения:

$$\ddot{T} + \omega^2 T = 0; \quad (2)$$

$$(EIX''')'' - \omega^2 \rho AX = 0. \quad (3)$$

Общий интеграл уравнения (2) будет

$$T = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t). \quad (4)$$

Отсюда видно, что  $\omega$  представляет собою круговую частоту свободных колебаний полуприподнятого ствола.

Нумеруя собственные частоты в порядке возрастания так, что  $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3 < \dots$ , получим для каждой собственной частоты  $\omega_k$  из этого ряда соответствующую частную форму колебаний  $X_k(x)$ , удовлетворяющую уравнению (3) при  $\omega = \omega_k$ , а именно

$$(EIX_k''')'' - \omega_k^2 \rho AX_k = 0. \quad (5)$$

Ввиду того что жесткость упругой линии ствола и неравномерно распределенная вдоль ствола масса зависят от координаты  $x$ , ряд частот нормальных колебаний существует, но их нельзя отыскать с помощью точного интегрирования уравнения (3). Поэтому для нахождения первого члена ряда, соответствующего первой основной форме колебаний, применим метод Рэлея, согласно которому первая основная частота определяется выражением

$$\omega_1^2 = \frac{\int_0^L q(x) Y(x) dx}{\int_0^L q(x) Y(x)^2 dx}. \quad (6)$$

Здесь  $Y(x)$  — прогиб ствола дерева под действием нагрузки  $q(x)$ .

При нормальных колебаниях каждая точка упругой линии ствола совершает простое гармоническое колебание с постоянными амплитудой и фазой:

$$y = Y_n \sin(\omega_n t - \omega_n),$$

где  $Y_n$  — переменная, зависящая только от  $x$ ;  $\omega_n$  и  $\omega_n$  — постоянные величины;

$Y_n$  определяет  $n$ -ю форму нормального колебания, подчиняется тем же граничным условиям на концах, что и  $y$ , и представляет собой действительный прогиб оси ствола, когда ствол находится в одном из крайних положений колебания.

Для получения кривой прогиба используем уравнение

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI(x) \frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2} \right) = q(x). \quad (7)$$

Неравномерно распределенная при переменной вдоль ствола плотности нагрузка получена в [7], а момент инерции поперечного сечения определяется формулой  $I(x) = \pi(a(Lc - x)^\mu)^4 / 4$ , где  $a(Lc - x)^\mu$  —

радиус поперечного сечения ствола на расстоянии  $x$  от комля. Введем константу жесткости ствола  $d = E\pi a^4/4$  и новую переменную  $z = Lc - x$ , тогда жесткость ствола будет иметь вид  $EI(z) = dz^{4\mu}$ . Дополнительно понизим порядок дифференциального уравнения

$$\frac{d^2}{dz^2} y(z) = \psi(z).$$

Получим уравнение упругой линии ствола

$$y(z) = V_1 z^{2\mu} K^{-4\mu+4} + c_1 O_1 z^{-4\mu+2} + c_2 N_1 z^{-4\mu+3} + c_3 z + c_4, \quad (8)$$

где  $V_1 = \frac{d_1}{(2\mu_K - 4\mu + 4)(2\mu_K - 4\mu + 3)}$ ;

$$N_1 = \frac{1}{(4\mu - 2)(4\mu - 3)}.$$

Для поиска постоянных интегрирования  $c_1, c_2, c_3$  и  $c_4$  воспользуемся краевыми условиями. После двойного дифференцирования уравнения (8) и соответствующей подстановки краевых условий получим систему из четырех уравнений, из которой находим постоянные интегрирования:

$$c_1 = \frac{\left[ (Lc - L)^{-4\mu+3} N_1 - L(Lc - L)^{-4\mu+2} S - Lc^{-4m+3} N_1 \right] Lc^{2\mu} K^{-4\mu+4} d_1 + \left[ -(Lc - L)^{-4\mu+3} N_1 + L(Lc - L)^{-4\mu+2} S + Lc^{-4m+3} N_1 \right] Lc^{-1} + \left[ -(Lc - L)^{2\mu} K^{-4\mu+4} V_1 - \frac{L(Lc - L)^{2\mu} K^{-4\mu+3} d_1}{2\mu K^{-4\mu+3}} + Lc^{2\mu} K^{-4\mu+4} V_1 \right]}{\left[ (Lc - L)^{-4\mu+2} O_1 - L(Lc - L)^{-4\mu+1} T - Lc^{-4\mu+2} O_1 \right]}$$

$$c_2 = \frac{\left[ -(Lc - L)^{-4m+2} O_1 + L(Lc - L)^{-4m+1} T + Lc^{-4m+2} O_1 \right] Lc^{2m} K^{-4m+2} d_1 + \left[ (Lc - L)^{2\mu} K^{-4\mu+4} V_1 + \frac{L(Lc - L)^{2\mu} K^{-4\mu+3} d_1}{2\mu K^{-4\mu+3}} - Lc^{2\mu} K^{-4\mu+4} V_1 \right]}{\left[ (Lc - L)^{-4\mu+2} O_1 - L(Lc - L)^{-4\mu+1} T - Lc^{-4\mu+2} O_1 \right] Lc}$$

$$c_3 = -\frac{(Lc - L)^{2m} K^{-4m+3} d_1}{2m K^{-4m+3}} + (Lc - L)^{-4m+1} T c_1 + (Lc - L)^{-4m+2} S c_2,$$

$$c_4 = -V_1 Lc^{2\mu} K^{-4\mu+4} - Lc^{-4\mu+2} O_1 c_1 - Lc^{-4\mu+3} N_1 c_2 - c_3 Lc,$$

где  $O_1 = \frac{1}{(4\mu - 1)(4\mu - 2)}$ ;  $S = \frac{1}{(4\mu - 2)}$ ;

$$T = \frac{1}{(4\mu - 1)}.$$

Возвращаясь в уравнении (8) к исходной переменной  $x$ , получим уравнение изогнутой части ствола, которое в нашем случае определяет первую нормальную форму колебания

$$Y_1(x) = V_1 (Lc - x)^{2\mu} K^{-4\mu+4} + c_1 O_1 (Lc - x)^{-4\mu+2} + c_2 N_1 (Lc - x)^{-4\mu+3} + c_3 (Lc - x) + c_4. \quad (9)$$

Подставляя  $Y_1(x)$  из (9) в уравнение (6), находим частоту основного тона колебания полуприподнятого ствола, перемещаемого за комель.

Для определения частоты колебаний стволов березы при имитации их продольного перемещения в полуприподнятом положении выполнены

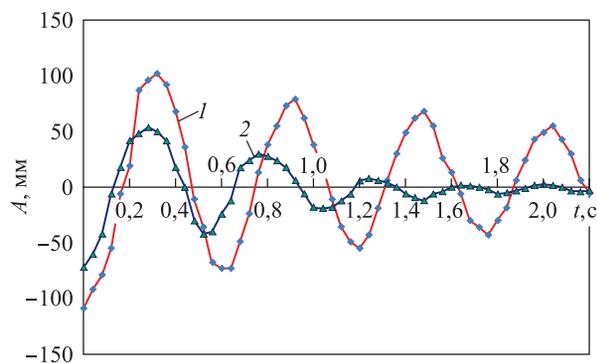
**Параметры колебаний стволов березы**  
The parameters of the oscillations

Параметры	Номер ствола березы							
	1				2			
Номер периода колебаний $n$	1	2	3	4	1	2	3	4
Период колебаний $T$ , с	—	0,60	0,60	0,56	—	0,52	0,52	0,44
Частота колебаний $f$ , Гц	—	1,67	1,67	1,79	—	1,92	1,92	2,27
Амплитуда колебаний $A$ , мм	109	73	55	43	72	42	19	12
Логарифмический декремент колебания $\delta$	—	0,401	0,283	0,246	—	0,539	0,793	0,460
Максимальная скорость (экспериментальная) $V$ , м/с	1,70	0,93	0,63	0,62	0,90	0,75	0,16	0,15
Максимальное ускорение (аппроксимированное) $a$ , м/с <sup>2</sup>	12,3	9,0	6,7	4,9	11,7	6,6	3,7	2,0

экспериментальные исследования. Для этого использованы два ствола свежесрубленной березы. Диаметр ствола в центре пролета у березы № 1 равен 60 мм, у березы № 2 — 54 мм. Стволы устанавливали комлем на опору, а вершина оставалась на земле. Затем к центру пролета ствола прикрепляли на гибкой нити груз: для березы № 1 массой 20 кг, а для березы № 2 — 10 кг. Происходил статический прогиб ствола. Величина пролета без нагрузки 4 м, высота опоры 0,8 м. Далее нить обрезали и ствол совершал затухающие поперечные колебания. Колебания записывали на видео на фоне планшета. Проводили разделение записи на кадры с временным шагом 0,04 с и их расшифровку. На основании результатов исследования построен график зависимости амплитуды колебаний точки подвеса груза от времени (рис. 1) [12]. Параметры колебаний стволов представлены в таблице.

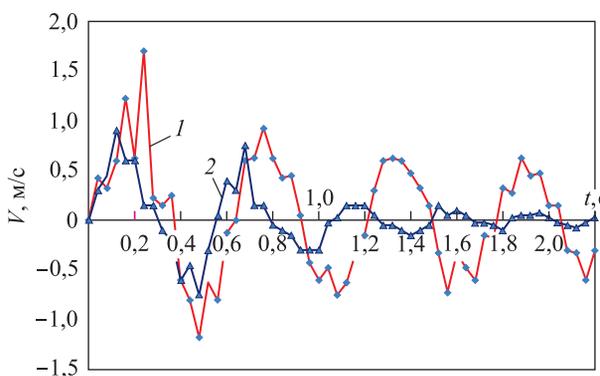
Методом графического дифференцирования построен график зависимости изменения скорости колебаний центра пролета ствола от времени (рис. 2).

После двукратного дифференцирования уравнения затухающих колебаний произвольной точки ствола [12]



**Рис. 1.** График колебаний березы (экспериментальные кривые): 1 — ствол № 1; 2 — ствол № 2

**Fig. 1.** The graph of fluctuation of birch (experimental curves): 1 — the trunk of tree no. 1; 2 — the trunk of tree no. 2

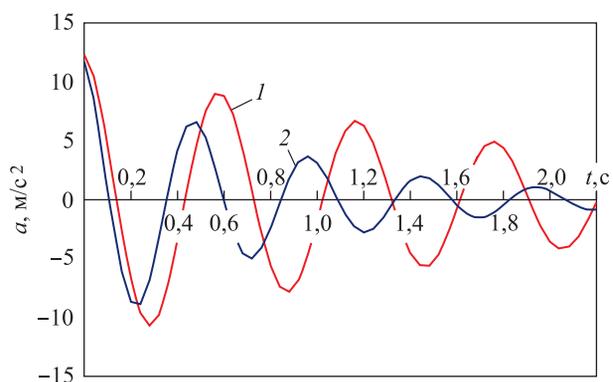


**Рис. 2.** Зависимость изменений скорости колебаний березы от времени (экспериментальные кривые): 1 — ствол № 1; 2 — ствол № 2

**Fig. 2.** Dependence of speed fluctuation changes of birch (experimental curves): 1 — the trunk of tree no. 1; 2 — the trunk of tree no. 2

$$y = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t)$$

получено выражение для определения ускорения данной точки:



**Рис. 3.** График изменения ускорения березы (аппроксимированные кривые): 1 — ствол № 1; 2 — ствол № 2

**Fig. 3.** The graph of change of acceleration of birch (approximated curves): 1 — the trunk of tree no. 1; 2 — the trunk of tree no. 2

$$y'' = a = -A_0 e^{-\delta t} (\omega^2 \cos(\omega t) - \delta^2 f^2 \cos(\omega t) - 2' f \omega \sin(\omega t)). \quad (10)$$

На основании этого уравнения построен график изменения ускорения указанной точки (рис. 3). В связи с тем, что параметры колебаний берез изменяются в процессе колебаний (в частности, уменьшается период колебаний), нами приняты их средние значения: для березы № 1:  $T = 0,59$  с,  $\delta = 0,31$ ; для березы № 2:  $T = 0,49$  с,  $\delta = 0,60$ .

### Результаты

Полученные значения круговой частоты колебаний и ускорения точек ствола позволят более точно рассчитывать технологические силы при работе специальных лесных машин и учитывать их при проектировании.

### Список литературы

[1] Иванов Г.А. Собственные колебания первой формы полуприподнятых стволов деревьев в продольном перемещении // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2002. № 2. С. 168–174.  
 [2] Гастев Б.Г., Мельников В.И. Основы динамики лесовозного подвижного состава. М.: Лесная пром-сть, 1967. 219 с.  
 [3] Жуков А.В. О выборе расчетной модели погруженных деревьев при исследовании колебаний лесных машин // Лесной журнал, 1977. Вып. 101. № 4. С. 75–80.  
 [4] Библюк Н.И., Перетятко Б.Т. Экспериментальное исследование собственных частот хлыста как предмета

транспортирования // Лесное хозяйство, лесная, бумажная и деревообрабатывающая промышленность. Вып. 3. Киев: Будівельник, 1974. С. 64–69.  
 [5] Билык Б.В., Перетятко Б.Т. К вопросу о выборе расчетной схемы пакета хлыстов при исследовании вертикальных колебаний трелевочных тракторов // Лесной журнал, 1975. № 5. С. 40–46.  
 [6] Варава В.И., Ведерников О.М. Моделирование хлыстов и их подвеса при трелевке в полупогруженном положении // Лесной журнал, 1991. № 3. С. 29–35.  
 [7] Симанович В.А. Исследование свободных колебаний деревьев при различных конструкциях подвеса // Механизация лесоразработок и транспорт леса. Вып. 14. Минск: Вышэйшая школа, 1984. С. 115–118.  
 [8] Смехов С.Н. О взаимосвязи колебаний хлыстов, перевозимых в полупогруженном (полуподвешенном) положении, и сопротивления их перемещению // Тр. ЦНИИМЭ. Вып. 106: Сб. статей Иркутского филиала ЦНИИМЭ. Химки, 1970. С. 14–26.  
 [9] Эмайкин Л.М. О параметрическом возбуждении в системе гусеничный трактор-полупогруженное дерево // Тр. ЦНИИМЭ. Вып. 101: Вопросы механизации лесозаготовок. Химки, ЦНИИМЭ, 1969. С. 52–59.  
 [10] Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.  
 [11] Саусвелл Р.В. Введение в теорию упругости. Для инженеров и физиков. М.: Иностранная литература, 1948. 674 с.  
 [12] Котов А.А. Экспериментальные исследования параметров колебаний древесных растений // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2013. № 5. С. 196–199.  
 [13] Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. М.: Наука, 1996. 368 с.  
 [14] Пановко Я.Г., Губанова И.И. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, ошибки и парадоксы. М.: Наука, 1979. 384 с.

### Сведения об авторах

**Иванов Геннадий Алексеевич** — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ivanovga@mgul.ac.ru

**Котов Алексей Александрович** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kotov@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2017 г.

# THE PARAMETERS OF THE OSCILLATIONS OF THE BIRCH TREE WHILE SKIDDING

G.A. Ivanov, A.A. Kotov

BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

kotov@mgul.ac.ru

During longitudinal movement (skidding) of wood with raised tree trunks, they make transverse vibrations due to irregularities of the road. Fluctuations affect the loading of special forest machines performing the skidding. The aim of the research is development of theoretical positions with their experimental confirmation aimed at improving the accuracy of calculations and prediction of situations in the performance of work in logging operations. Rational choice of design parameters of technological equipment forestry machines is possible only if the strength calculations will be used both theoretically and experimentally reasonable values technological forces. Efficient use of traction capabilities and control of forest machines during the execution of technological operations associated with the longitudinal displacements raised tree trunks, is possible only taking into account theoretical positions explaining the changes in technological forces in the working bodies of technological equipment. So pressing is the problem of research aimed at increasing the numbers taken into account when modeling factors. A dynamic system that performs operations on longitudinal movement of the tree trunk, imagine how the mechanical oscillation attached to it the force and kinematic effects. To solve the problem it is believed that the balance of the elastic line of the tree trunk being at rest, periodically disturbed suddenly applied to an elastic line and immediately removed transversely acting forces. When vibration of the tree trunk, the deflection of the elastic curve is a function of two variables — the coordinates and time. For finding the first member of the series corresponding to the first basic form of vibrations was used the method of Rayleigh. Under normal oscillations of each point of the elastic line of the trunk performs a simple harmonic oscillation with constant amplitude and phase. The obtained expression of the fundamental frequency of oscillation of the trunk of a tree given its form, roaming in the butt. Experimental study of transverse vibrations of raised trunks of birch. The parameters of these oscillations including the frequency are obtained.

**Keywords:** the trunk of the tree, skidding, mode shape, frequency, experiment, amplitude

**Suggested citation:** Ivanov G.A., Kotov A.A. *Parametry kolebaniy stvola berezy pri trelevke* [The parameters of the oscillations of the birch tree while skidding]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 47–52. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-4-47-52

## References

- [1] Ivanov G.A. *Sobstvennyye kolebaniya pervoy formy polupripodnyatykh stvolov derev'ev v prodol'nom peremeshchenii* [Fluctuations of the first form raised tree trunks in the longitudinal movement] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2002, no. 2, pp. 168–174.
- [2] Gastev B.G., Mel'nikov B.G. *Osnovy dinamiki lesovoznogo podvizhnogo sostava* [Bases of dynamics of hauling rolling stock]. Moscow: *Lesnaya promyshlennost'* [The forest industry], 1967, 219 p.
- [3] Zhukov A.V. *O vybere raschetnoy modeli pogruzhennykh derev'ev pri issledovanii kolebaniy lesnykh mashin* [About the choice of settlement model of the loaded trees in the study of fluctuations of forest machines] *Lesnoy zhurnal* [Forest magazine], 1977, v. 101, no. 4, pp. 75–80.
- [4] Biblyuk N.I., Peretyatko B.T. *Ekspymental'noye issledovanie sobstvennykh chastot khlysta kak predmeta transportirovaniya* [Experimental study of natural frequencies of the whip as an item of transportation] *Lesnoe khozyaystvo, lesnaya, bumazhnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Forestry, forest, paper and woodworking industry]. Kiev: *Budivelnik* [Builder], 1974, no. 3, pp. 64–69.
- [5] Bilyk B.V., Peretyatko B.T. *K voprosu o vybere raschetnoy skhemy paketa khlystov pri issledovanii vertikal'nykh kolebaniy trelevochnykh traktorov* [The question of the computation diagram of a package of whips in the study of the vertical oscillations skidder] *Lesnoy zhurnal* [Forest magazine], 1975, no. 5, pp. 40–46.
- [6] Varava V.I., Vedernikov O.M. *Modelirovaniye khlystov i ikh podvesa pri trelevke v polupogruzhennom polozhenii* [Modeling the whips and their suspension when hauling in a half-shipped position] *Lesnoy zhurnal* [Forest magazine], 1991, no. 3, pp. 29–35.
- [7] Simanovich V.A. *Issledovanie svobodnykh kolebaniy derev'ev pri razlichnykh kon-struktsiyakh podvesa* [The study of free oscillations of the trees with different designs of suspension] *Mekhanizatsiya lesorazrabotok i transport lesa* [Mechanization of logging and transport of forest], v. 14. Minsk: *Vysheyshaya shkola* [High school], 1984, pp. 115–118.
- [8] Smekhov S.N. *O vzaimosvyazi kolebaniy khlystov, perevozimykh v polupogruzhennom (polupodveshennom) polozhenii, i soprotivleniya ikh peremeshcheniyu* [On the relationship between the vibrations of the whips carried in half-sunk (polupedestalom) position and resistance move] *Trudy TsNIIME. Sbornik statey Irkutskogo filiala TsNIIME* [Works TsNIIME. Collection of articles of the Irkutsk branch TsNIIME], v. 106. Khimki: TsNIIME, 1970, pp. 14–26.
- [9] Emaykin L.M. *O parametricheskom vzbuzhdenii v sisteme gusenichnyy traktor-polupogruzhennoe derevo* [On parametric excitation in the system of the crawler tractor-half-shipped tree]. *Trudy TsNIIME. Voprosy mekhanizatsii lesozagotovok* [Works TsNIIME. The issues of mechanization of logging], v. 101. Khimki: TsNIIME, 1969, pp. 52–59.
- [10] Rabotnov Yu.N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of deformable solids]. Moscow: *Nauka publ.*, 1988, 712 p.
- [11] Sausvell R.V. *Vvedenie v teoriyu uprugosti. Dlya inzhenerov i fizikov* [Introduction to the theory of elasticity. For engineers and physicists]. Moscow: *Gosudarstvennoye izdatel'stvo inostrannoy literatury*, 1948, 674 p.
- [12] Kotov A.A. *Ekspymental'nye issledovaniya parametrov kolebaniy drevesnykh rasteniy* [An experimental study of the parameters of the oscillations of woody plants] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2013, no. 5, pp. 196–199.
- [13] Feodos'ev V.I. *Izbrannye zadachi i voprosy po soprotivleniyu materialov* [Selected problems and questions in strength of materials]. Moscow: *Nauka publ.*, Fizmatlit, 1996, 368 p.
- [14] Panovko Ya.G., Gubanova I.I. *Ustoychivost' i kolebaniya uprugikh sistem. Sovremennyye kontseptsii, oshibki i paradoksy* [Stability and oscillations of elastic systems: Modern concepts, paradoxes and errors]. Moscow: *Nauka publ.*, 1979, 384 p.

## Author's information

**Ivanov Gennadiy Alekseevich** — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. BMSTU (Mytishchi branch), ivanovga@mgul.ac.ru

**Kotov Aleksey Aleksandrovich** — Dr. Sci. (Tech.), Prof. BMSTU (Mytishchi branch), kotov@mgul.ac.ru

Received 16.06.2017