

УДК 630.37

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-31-37

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ ПО ДЛИНЕ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГУСЕНИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН С ПОЛУЖЕСТКОЙ ПОДВЕСКОЙ

В.А. Борисов, Д.В. Акинин, В.В. Кирей

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

Исследования лесозаготовительной практики в России показывают, что лесной фонд невозможно разрабатывать машинами с колесным движителем из-за их низкой проходимости на слабых почвах в условиях пересеченной местности. В связи с этим с 2005 по 2017 г. наблюдается активный поиск путей улучшения работы лесозаготовительных машин на базе гусеничных тракторов. Рассмотрены основные режимы работы и нормальные реакции грунта вдоль опорной поверхности гусеничного движителя на примере трактора с полужесткой подвеской «Онежец-420». Получены уравнения, позволяющие определять глубину колеи и скорость движения трактора в зависимости от физическо-механических свойств почвы.

Ключевые слова: лесные грузы, транспортировка, гусеничный трактор, глубина колеи, эксплуатационные факторы, скорость движения

Ссылка для цитирования: Борисов В.А., Акинин Д.В., Кирей В.В. Распределение нормальных реакций по длине опорной поверхности гусеничных движителей лесозаготовительных машин с полужесткой подвеской // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 31–37. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-31-37

При эксплуатации лесозаготовительных машин на базе тракторов с полужесткой подвеской («Онежец-420») наибольший износ наблюдается у первого и четвертого опорных катков. Малый износ остальных катков свидетельствует о меньшем участии их в работе. На рис. 1. представлены эпюры распределения нормальных реакций по длине опорной поверхности гусеничного движителя чокерного трелевочного трактора «Онежец-420».

Объект исследования

Анализ эпюр холостого и груженого хода свидетельствует о том, что почва под первым катком из-за небольшой нагрузки уплотняется не полностью, уплотнение происходит в основном под четвертым опорным катком. Это приводит к увеличению дифферента трактора. При таком дифференте участие второго катка в передаче нагрузки на почву незначительно и практически

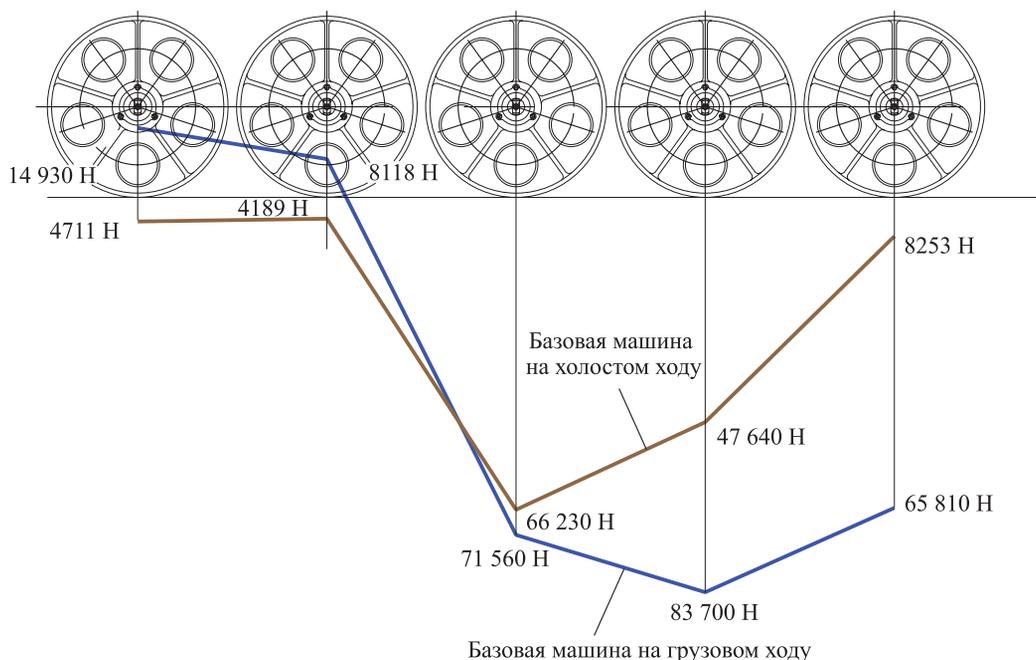


Рис. 1. Эпюры распределения нормальных реакций по длине опорной поверхности гусеничного движителя
Fig. 1. Diagrams of the distribution of normal reactions along the length of the support surface of the caterpillar drive

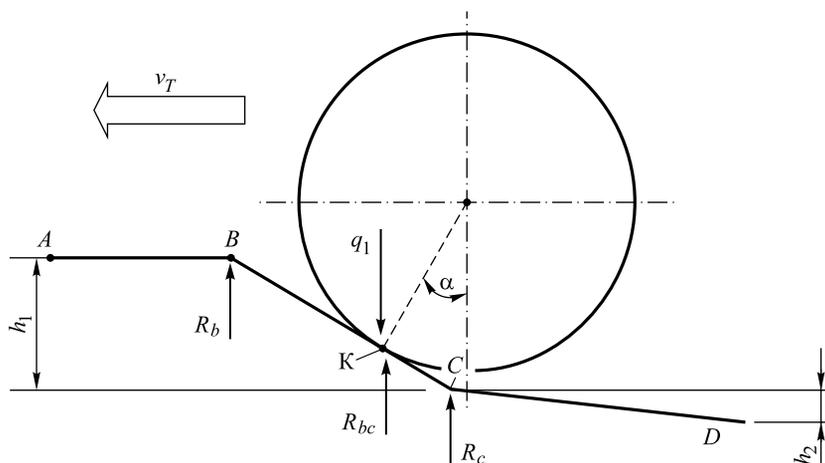


Рис. 2. Взаимодействие первого опорного катка со звеньями гусеницы
Fig. 2. The interaction of the first skidding roller with the links of the caterpillar

вся нагрузка приходится на среднюю и заднюю каретки трактора. Такое распределение нагрузки вызывает не только переуплотнение почвы, но и увеличение глубины колеи.

От величины и характера распределения нормальных реакций почвы по длине опорной поверхности гусеничного движителя зависят многие показатели трелевочной машины, в том числе и такие важные, как сцепление и тяговые качества, а также равномерность нагруженности деталей и узлов его ходовой части.

Наиболее динамичным процессом укладки гусеничных звеньев в почву является укладка их под первым опорным катком. На рис. 2. рассмотрена схема всплывания катка при образовании колеи.

Гусеничная цепь принимается звенчатой. Звенья, встречающиеся с первым опорным катком, идут под углом к поверхности почвы, вследствие чего при движении трактора первый опорный каток постоянно стремится подняться вверх по наклонной поверхности встреченного звена. В то же время под действием нагрузки со стороны опорного катка встречные звенья вдавливаются в почву. Нагрузка q_1 от опорного катка трактора передается через точку К касания звену BC. Но так как звено BC шарнирами B и C связано со смежными звеньями AB и CD, смежные звенья также участвуют в передаче нагрузки q_1 почвы. Поэтому реакция почвы воспринимается тремя зонами — AB, BC и CD.

Во время движения трактора звеном BC совершается сложное движение. При подходе опорного катка к звену BC звено CD не полностью уложено в почву. Шарнир C находится выше уложенного в почве шарнира D. В момент касания опорного катка звена BC расстояние СК минимальное. Поэтому сопротивление деформации почвы на участке ABK больше сопротивления почвы на

участке KCD и шарнир C звеньев вынужден, деформируя почву, опускаться вниз. По мере увеличения СК (расстояние между шарниром C и точкой К касания катка к звену BC) наступает момент, когда шарниры B и C движутся вертикально с одинаковой скоростью. Ввиду того что звено BC находится под углом к поверхности движения, опорный каток, касаясь звена в точке К, находится выше дна колеи под ним. Будем считать, что высота всплывания первого катка — величина постоянная. В таком случае сумма действующих на звено BC сил от вертикальных реакций почвы на участке ABCD будет равна вертикальной нагрузке на звено BC от опорного катка в точке К.

Результаты и обсуждение

Вертикальная сила R_b от звена AB приложена к шарниру B, а вертикальная сила R_c от звена CDR_c приложена в шарнире C. Кроме R_b и R_c , на звено BC действуют вертикальные реакции почвы. Динамическое уравнивание рассматриваемой системы наступит, когда сумма сил R_b , R_c и вертикальных реакций почвы R_{bc} на звено BC будет равна вертикальной нагрузке q_1 , приложенной в точке касания К опорного катка к звену BC. Тогда

$$R_b + R_c + R_{bc} = q_1, \text{ или } R_b + R_c + R_{bc} - q_1 = 0.$$

Поскольку глубина колеи под первым опорным катком незначительна, для определения сил R_{bc} , R_b , R_c согласно гипотезе Винклера — Бернштейна, можно воспользоваться прямолинейной зависимостью сопротивления почвы смятию от глубины погружения звена в почву [1, 2]:

$$q = ch,$$

где c — коэффициент объемного сжатия почвы;
 h — глубина погружения штампа.

Тогда общее сопротивление почвы на звено в зависимости от глубины погружения в почву

в случае погружения звена, расположенного параллельно поверхности движения, при $v \approx 0$ будет выражаться следующим образом:

$$q_c = cbl_0h, \quad (1)$$

где b — ширина гусеничного трака;
 l_0 — длина гусеничного звена.

Однако при движении трактора звенья погружаются в почву под углом к поверхности движения, следовательно, будем рассматривать сопротивление почвы смятию на единицу длины гусеничного звена. Это значение получим, разделив левую и правую часть уравнения (1) на l_0 :

$$q_l = cbh_l,$$

где h_l — глубина погружения единицы длины гусеничного звена.

С увеличением скорости погружения штампа в почву сопротивление почвы при одной и той же глубине увеличивается [3–7]. Погружение гусеничного звена под влиянием скорости выразим с помощью критерия Фруда как

$$\Delta h = \frac{v^2}{g},$$

где Δh — изменение глубины погружения штампа под влиянием скорости движения его в почву;

v — скорость погружения звена в почву;

g — ускорение свободного падения.

Глубина погружения h под действием нагрузки q_c со стороны опорного катка при $v \approx 0$ с учетом влияния скорости можно определить следующим образом:

$$h = h_l + \Delta h.$$

Тогда

$$q_c = cbl_0(h_l + \Delta h)$$

и

$$q_l = cb(h_l + \Delta h). \quad (2)$$

Для определения динамической глубины колеи под первым опорным катком и высоты всплывания катка относительно дна колеи рассмотрим силы R_{bc} , R_b , R_c . Силу R_b находим из уравнения моментов от реакции почвы на звено AB и силы R_b относительно точки A :

$$\sum M_A = \int_0^{l_0} q_l x dx - R_b l_0 = 0, \quad (3)$$

где x — расстояние от точки A до рассматриваемой единичной длины на гусеничное звено.

Подставив значение q_l из уравнения (2) в уравнение (3), получим:

$$R_b = \frac{cbl_0v_b^2}{4g}, \quad (4)$$

где v_b — вертикальная скорость шарнира B .

Из уравнения моментов относительно точки D определим R_c :

$$\sum M_D = \int_0^{l_0} q_l x dx - R_c l_0 = 0, \quad (5)$$

$$R_c = \frac{cbl_0}{2} \left(h_l - \frac{v_c^2}{2g} \right),$$

где v_c — вертикальная скорость шарнира C .

Заметим, что

$$v_c = v_b - v_m \operatorname{tg} \alpha,$$

где v_m — скорость поступательного движения трактора;

α — угол наклона звена к поверхности движения.

Вертикальная реакция почвы на звено BC определяется как

$$R_{bc} = \int_0^{l_0} cb \left(h_l + \frac{v^2}{g} \right) dl = \int_0^{l_0 \cos \alpha} cb \left(x \operatorname{tg} \alpha + \frac{v_{c(b)}^2}{g} \right) \frac{dx}{\cos \alpha},$$

откуда

$$R_{bc} = \frac{l_0 c b \sin \alpha}{2} + \frac{c b v_c^2 l_0}{g}. \quad (6)$$

С учетом уравнений (4)–(6)

$$q_1 = \frac{cbl_0v_b^2}{4g} + \frac{cbl_0}{2} \left(h_l + \frac{v_c^2}{2g} \right) + \frac{cbl_0^2 \sin \alpha}{2} + \frac{cbl_0v_c^2}{g}. \quad (7)$$

После преобразования и решения уравнения (7) относительно h_l и учитывая $v_b = v_c = v_T \operatorname{tg} \alpha$, получим:

$$h_l = \frac{q_1}{cbl_0} - \frac{3v_{c(b)}^2}{2g},$$

или

$$h_l = \frac{q_1}{cbl_0} - \frac{3v_T^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{2g},$$

где v_T — скорость движения трактора;

α — угол наклона звена BC к поверхности

$$\text{движения, } \alpha = \arcsin \frac{h_l}{l_0}.$$

Следует учесть, что угол α с повышением скорости движения трактора уменьшается из-за уменьшения глубины колеи. Этот фактор приводит к тому, что с повышением скорости трактора темп погружения гусеничных звеньев в поверх-

ность движения увеличивается до определенного предела, а не до бесконечности [8–12].

Для определения высоты всплывания h_2 первого опорного катка относительно дна колеи под ним составим уравнение моментов сил, действующих на звено BC относительно точки K касания катка к звену:

$$\begin{aligned} \Sigma M_K = R_c (l_0 - l_1) \cos \alpha + \int_0^{(l_0 - l_1) \cos \alpha} qx \frac{dx}{\cos \alpha} - \\ - R_b l_1 \cos \alpha - \int_0^{l_1 \cos \alpha} qx \frac{dx}{\cos \alpha} = 0, \end{aligned}$$

где R_c — сила от реакции почвы на звено CD , действующая в шарнире C ;

l_0 — длина гусеничного звена;

l_1 — длина отрезка BK ;

α — угол наклона звена к поверхности почвы в момент уравнивания сил относительно точки K ;

x — расстояние по горизонтали от точки до единичной длины звена;

R_b — сила от реакции почвы на звено AB , действующая в шарнире B .

Так как система координат принимается с началом в точке K , для

$$\int_0^{(l_0 - l_1) \cos \alpha} qx \frac{dx}{\cos \alpha} \quad (8)$$

имеем

$$h = l_1 \sin \alpha + x \operatorname{tg} \alpha, \quad (9)$$

а для

$$\int_0^{l_1 \cos \alpha} qx \frac{dx}{\cos \alpha} \quad (10)$$

имеем

$$h = l_1 \sin \alpha - x \operatorname{tg} \alpha.$$

При вычислении (8) находим

$$q = cb \left(h + \frac{v_c^2}{g} \right),$$

где h — динамическая глубина погружения единицы длины гусеничного звена на расстояние x от точки K по горизонтали.

Подставив найденное q и значение h из уравнений (2) и (9) в выражение (8), получим:

$$\begin{aligned} \int_0^{(l_0 - l_1) \cos \alpha} qx \frac{dx}{\cos \alpha} = \\ = \frac{cb}{\cos \alpha} \int_0^{(l_0 - l_1) \cos \alpha} x \left(l_1 \sin \alpha + x \operatorname{tg} \alpha + \frac{v_c^2}{g} \right) dx \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \times \frac{cbl_1 \sin \alpha (l_0 - l_1)^2 \cos^2 \alpha}{\cos \alpha} + \\ + \frac{cbl_1 \operatorname{tg} \alpha (l_0 - l_1)^3 \cos^3 \alpha}{\cos \alpha} + \\ + \frac{cbv_c^2 (l_0 - l_1)^2 \cos^2 \alpha}{g \cos \alpha}. \end{aligned}$$

Для вычисления (10) подставим значения q и h в уравнение (2), тогда:

$$\int_0^{l_1 \cos \alpha} qx \frac{dx}{\cos \alpha} = \int_0^{l_1 \cos \alpha} cbx \left(l_1 \sin \alpha - x \operatorname{tg} \alpha + \frac{v_c^2}{g} \right) \frac{dx}{\cos \alpha} \times$$

$$\times \frac{cbl_1 \sin \alpha l_1^2 \cos^2 \alpha}{\cos \alpha} - \frac{cb \operatorname{tg} \alpha l_1^3 \cos^3 \alpha}{\cos \alpha} + \frac{cbv_c^2 l_1^2 \cos^2 \alpha}{g \cos \alpha}.$$

Таким образом,

$$\frac{cbl_0}{2} \left(h + \frac{v_c^2}{2g} \right) (l_0 - l_1) \cos \alpha + \frac{cbl_1 (l_0 - l_1)^2 \cos^2 \alpha}{2 \cos \alpha} +$$

$$+ \frac{cb \operatorname{tg} \alpha (l_0 - l_1)^3 \cos^3 \alpha}{3 \cos \alpha} + \frac{cbv_c^2 (l_0 - l_1)^2 \cos^2 \alpha}{2g \cos \alpha} -$$

$$- \frac{cbl_0 v_b^2 l_1 \cos \alpha}{4g} - \frac{cbl_1^3 \sin \alpha \cos^2 \alpha}{2 \cos \alpha} +$$

$$+ \frac{cb \operatorname{tg} \alpha l_1^3 \cos^3 \alpha}{3 \cos \alpha} - \frac{cbv_c^2 l_1^2 \cos^2 \alpha}{2g \cos \alpha} = 0. \quad (11)$$

Введем следующие обозначения:

$$\frac{cbl_0 \cos \alpha}{2} \left(h + \frac{v_c^2}{2g} \right) = A;$$

$$\frac{cb \sin \alpha \cos^2 \alpha}{2 \cos \alpha} = B;$$

$$\frac{cb \operatorname{tg} \alpha \cos^3 \alpha}{3 \cos \alpha} = C;$$

$$\frac{cbv_c^2 \cos^2 \alpha}{2g \cos \alpha} = D;$$

$$\frac{cbv_b^2 \cos \alpha}{4g} = E.$$

Тогда уравнение (11) можно записать в таком виде:

$$\begin{aligned} A(l_0 - l_1) + Bl_1(l_0 - l_1)^2 + C(l_0 - l_1)^3 + \\ + D(l_0 - l_1)^2 - El_1 + Bl_1^3 + Cl_1^3 - Dl_1^2 = 0 \end{aligned}$$

или

$$l_1^2 (3Cl_0 - 2Bl_0) + l_1 (Bl_0^2 - A - 2Dl_0 - E) + Al_0 + Cl_0^3 + Dl_0^2 = 0. \quad (12)$$

Подставив в уравнение (12) значения A, B, C, D, E , после соответствующих преобразований получим:

$$-l_1 cbl_0 \left(h_i + \frac{3v_c^2}{g} \right) + cbl_0^2 \cos \alpha \left(\frac{5h_i}{6} + \frac{v_c^2}{2g} \right) = 0. \quad (13)$$

Отсюда

$$l_1 = \frac{l_0 \left(\frac{5h_i}{6} + \frac{v_c^2}{2g} \right)}{h_i + \frac{3v_c^2}{2g}}. \quad (14)$$

Высота n всплывания катка может быть определена по формуле

$$h_n = h_i - l_1 \sin \alpha - r(1 - \cos \alpha),$$

где r — радиус опорного катка.

Подставляя значение l_1 из уравнения (14), находим

$$h_n = h_i - \frac{l_0 \sin \alpha \left(\frac{5h_i}{6} + \frac{v_c^2}{2g} \right)}{h_i + \frac{3v_c^2}{g}} - r(1 - \cos \alpha). \quad (15)$$

С учетом того, что $\sin \alpha = \frac{h_i}{l_0}$, а $V_c = v_T \operatorname{tg} \alpha$,

уравнение (15) примет следующий вид:

$$h_n = h_i - \frac{h_i \left(\frac{5h_i}{6} + \frac{v_T^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{2g} \right)}{h_i + \frac{3v_T^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{2g}} - r(1 - \cos \alpha).$$

Выводы

Таким образом, полученные уравнения позволяют определить глубину колеи под первым катком и высоту его всплывания в зависимости от физико-механических свойств почвы, нагрузки на первом опорном катке, скорости движения трактора, конструктивных параметров гусеничного звена и радиуса опорного катка.

Сведения об авторах

Борисов Вячеслав Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры промышленного транспорта и строительства (ЛТ-8) МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), vborisov@rambler.ru

Акинин Дмитрий Вячеславович — канд. техн. наук, доцент, доцент секции колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), akinin@mgul.ac.ru

Кирей Владимир Владимирович — канд. экон. наук, доцент секции кафедры «Предпринимательство и внешнеэкономическая деятельность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kirey-v@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.10.2017 г.

Список литературы

- [1] Акинин Д.В., Борисов В.А., Казначеева Н.И., Жиганов Н.Н., Авшарян Т.М. Анализ сцепления шин и гусениц лесозаготовительных машин с поверхностью качения // Наука сегодня: задачи и пути их решения: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. Вологда, 25 мая 2016 г. Вологда: Маркер, 2016. С. 11–13.
- [2] Акинин Д.В., Казначеева Н.И., Борисов В.А. Определение вертикальных деформаций сжатия, возникающих при повторных проходах лесовозного автотранспорта по дороге с переходным типом покрытия // Новейшие достижения в науке и образовании: отечественный и зарубежный опыт: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. Смоленск, 31 октября 2015 г. Смоленск: Новаленко, 2015. С. 19–22.
- [3] Акинин Д.В., Казначеева Н.И., Борисов В.А. Лесные машины и почвенная часть лесной экосистемы // Наука третьего тысячелетия: Сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Самара, 3 ноября 2015 г. Уфа: Омега сайнс, 2015. С. 23–31.
- [4] Акинин Д.В., Казначеева Н.И., Борисов В.А. Способы снижения динамических нагрузок, действующих на гусеничную лесозаготовительную машину // Проблемы и перспективы технических наук: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 8 мая 2015 г. Уфа: Аэтерна, 2015. С. 3–12.
- [5] Акинин Д.В., Борисов В.А., Казначеева Н.И. Глубина колеи и число опорных катков гусеничной лесозаготовительной машины // Наука сегодня: проблемы и перспективы развития: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. Вологда, 25 ноября 2015 г. Вологда: Маркер, 2015. С. 5–8.
- [6] Акинин Д.В., Казначеева Н.И., Борисов В.А. Анализ взаимодействия лесных машин с почвенной экосистемой // Сборники конф. НИЦ «Социосфера». Praha: Vědecko vydavatelské centrum «Sociosféra-CZ», 2015. № 48. С. 66–70.
- [7] Борисов В.А., Казначеева Н.И., Акинин Д.В. Глубина колеи и потеря подвижности в результате буксования гусеничной лесозаготовительной машины // Национальная ассоциация ученых, 2015. № 10–1 (16). С. 11–14.
- [8] Камусин А.А., Казначеева Н.И., Борисов В.А., Акинин Д.В. Исследование гидропривода технологического оборудования лесозаготовительных машин // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2014. № 2-S. С. 119–121.
- [9] Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е., Наказной О.А., Наумов В.Н., Котиев Г.О., Беляков В.В., Зезюлин Д.В. Влияние распределения давлений движителей гусеничных лесозаготовительных машин ЛЗ-4 и ЛЗ-5 на колееобразование // Лесотехнический журнал, 2016. Т. 6. № 3 (23). С. 167–176.
- [10] Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е., Котиев Г.О., Наказной О.А. К определению буксования гусеничной лесозаготовительной машины // Лесотехнический журнал, 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 201–207.
- [11] Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е., Крылов В.М., Кондратюк Д.В. К обоснованию удельного давления гусеничного лесопромышленного трактора // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2012. № 8 (91). С. 48–50.
- [12] Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Редкозубов А.В., Беляков В.В. Моделирование движения гусеничных машин по лесным дорогам // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. № 1. С. 171–176.

DISTRIBUTION OF NORMAL REACTIONS ALONG THE LENGTH OF THE SUPPORT SURFACE OF CATERPILLAR PROPELLERS OF FORESTRY MACHINES WITH SEMI-RIGID SUSPENSION

V.A. Borisov, D.V. Akinin, V.V. Kirey

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

vborisov@rambler.ru

Studies of logging practices in Russia show that with the forest fund applying machines with wheeled drive makes it impossible to use them due to low passability on weak soils in conditions of rough terrain. In this regard, in recent years there has been an active search for ways to improve the operation of logging machines based on caterpillar tractors. The main operation modes are presented and the normal soil reactions along reference surface of the caterpillar drive are received, which are considered using the example of the tractor with semi-rigid suspension Onezhets-420. Based on the results of the study, equations are obtained that allow to determine the depth of the ruts and the speed of the tractor depending on the physical and mechanical properties of the soil.

Keywords: forestry, transportation, caterpillar tractor, gauge depth, operational factors, speed of movement

Suggested citation: Borisov V.A., Akinin D.V., Kirey V.V. *Raspredelenie normal'nykh reaktsiy po dline opornoj poverkhnosti gusenichnykh dvizhiteley lesozagotovitel'nykh mashin s poluzhestkoy podveskoy* [Distribution of normal reactions along the length of the support surface of caterpillar propellers of forestry machines with semi-rigid suspension]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 31–37.
DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-31-37

References

- [1] Akinin D.V., Borisov V.A., Kaznacheeva N.I., Zhiganov N.N., Avsharyan T.M. *Analiz stsepleniya shin i gusenits lesozagotovitel'nykh mashin s poverkhnost'yu kacheniya* [Analysis of the adhesion of tires and caterpillars of logging machines to the rolling surface] *Nauka segodnya: zadachi i puti ikh resheniya. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Vologda, 25 maya 2016 g. [Science today: problems and ways to solve them. Materials of the international scientific-practical conference. Vologda, May 25, 2016]. Vologda: Marker, 2016, pp. 11–13.
- [2] Akinin D.V., Kaznacheeva N.I., Borisov V.A. *Opreделение vertikal'nykh deformatsiy szhatiya voznikayushchikh pri povtornykh prokhodakh lesovoznogo avtotransporta po doroge s perekhodnym tipom pokrytiya* [Determination of vertical compression deformations arising from repeated passes of timber transport vehicles along the road with a transitional type of coverage] *Noveyshie dostizheniya v nauke i obrazovanii: otechestvennyy i zarubezhnyy opyt. Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Smolensk, 31 oktyabrya 2015 g. [The latest achievements in science and education: domestic and foreign experience. Collection of proceedings on the materials of the International Scientific and Practical Conference. Smolensk, October 31, 2015]. Smolensk: Novalenso, 2015, pp. 19–22.
- [3] Akinin D.V., Kaznacheeva N.I., Borisov V.A. *Lesnye mashiny i pochvennaya chast' lesnoy ekosistemy* [Forest machines and the soil part of the forest ecosystem] *Nauka tret'ego tysyacheletiya. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Samara, 03 noyabrya 2015 g. [Science of the third millennium. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. Samara, November 3, 2015]. Ufa: OMEGA SAINS, 2015, pp. 23–31.
- [4] Akinin D.V., Kaznacheeva N.I., Borisov V.A. *Sposoby snizheniya dinamicheskikh nagruzok, deystvuyushchikh na gusenichnyuyu lesozagotovitel'nyuyu mashinu* [Methods of reducing dynamic loads acting on a caterpillar logging machine] *Problemy i perspektivy tekhnicheskikh nauk. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Ufa, 08 maya 2015 g. [Problems and prospects of technical sciences. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. Ufa, May 8, 2015]. Ufa: Aethera, 2015, pp. 3–12.
- [5] Akinin D.V., Borisov V.A., Kaznacheeva N.I. *Glubina kolei i chislo opornykh katkov gusenichnoy lesozagotovitel'noy mashiny* [Depth of track and the number of track rollers of a tracked forest machine] *Nauka segodnya: problemy i perspektivy razvitiya. Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Vologda, 25 noyabrya 2015 g. [Science today: problems and development prospects. Collection of scientific papers on the materials of the international scientific and practical conference. Vologda, November 25, 2015]. Vologda: Marker, 2015, pp. 5–8.
- [6] Akinin D.V., Kaznacheeva N.I., Borisov V.A. *Analiz vzaimodeystviya lesnykh mashin s pochvennoy ekosistemoy* [Analysis of the interaction of forest machines with the soil ecosystem] *Sborniki konferentsiy NITs Sotsiosfera. Vedecko vydavatel'skoe centrum «Sociosféra-CZ» Praha, 2015* [Proceedings of the SIC Sotsiosfera. Vedecko vydavatel'skoe centrum «Sociosféra-CZ» Praha, 2015]. Prague: Vedecko vydavatel'skoe centrum Sociosfera-CZ s.r.o., 2015, no. 48, pp. 66–70.
- [7] Borisov V.A., Kaznacheeva N.I., Akinin D.V. *Glubina kolei i poterya podvishnosti v rezul'tate buksovaniya gusenichnoy lesozagotovitel'noy mashiny* [Depth of track and loss of mobility as a result of skidding of the caterpillar forest machine] *Natsional'naya Assotsiatsiya Uchenykh* [National Association of Scientists], 2015, no. 10–1 (16), pp. 11–14.
- [8] Kamusin A.A., Kaznacheeva N.I., Borisov V.A., Akinin D.V. *Issledovanie gidroprivoda tekhnologicheskogo oborudovaniya lesozagotovitel'nykh mashin* [Research of hydraulic drive of technological equipment of forest machines] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2014, no. 2-S, pp. 119–121.
- [9] Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Nakaznoy O.A., Naumov V.N., Kotiev G.O., Belyakov V.V., Zezyulin D.V. *Vliyaniye raspredeleniya davleniy dvizhiteley gusenichnykh lesozagotovitel'nykh mashin LZ-4 i LZ-5 na koleeobrazovaniya* [Influence of the distribution of pressures of caterpillar forestry machines LZ-4 and LZ-5 for track formation] *Lesotekhnicheskyy zhurnal*, 2016, v. 6, no. 3 (23), pp. 167–176.

- [10] Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Kotiev G.O., Nakaznoy O.A. *K opredeleniyu buksovaniya gusenichnoy lesozagotovitel'noy mashiny* [To the definition of skidding of a caterpillar forest machine] *Lesotekhnichesky zhurnal*, 2016, v. 6, no. 4 (24), pp. 201–207.
- [11] Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Krylov V.M., Kondratyuk D.V. *K obosnovaniyu udel'nogo davleniya gusenichnogo lesopromyshlennogo traktora* [To substantiate the specific pressure of a caterpillar forestry tractor] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2012, no. 8 (91), pp. 48–50.
- [12] Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Makarov V.S., Zezyulin D.V., Redkozubov A.V., Belyakov V.V. *Modelirovanie dvizheniya gusenichnykh mashin po lesnym dorogam* [Modeling the movement of caterpillar machines along forest roads] *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the NSTU. R.E. Alekseeva], 2016, no. 1, pp. 171–176.

Authors' information

Borisov Vyacheslav Alekseevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Industrial Transport and Construction of BMSTU (Mytishchi branch), vborisov@rambler.ru

Akinin Dmitriy Vyacheslavovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Industrial Transport and Construction of BMSTU (Mytishchi branch), akinin@mail.ru

Kirey Vladimir Vladimirovich — Cand. Sci. (Economic), Associate Professor of the Department of Entrepreneurship and Foreign Economic Activity of BMSTU (Mytishchi branch), kirey-v@mail.ru

Received 02.10.2017