

УДК 625.7

DOI: 10.15393/j2.art.2018.4362

Статья

Влияние удельной мощности лесовозного автопоезда на скоростной режим и топливную экономичность

Сергей Ю. Зейц¹, Дмитрий В. Акинин^{1*}, Вячеслав А. Борисов¹, Наталья И. Казначеева¹

¹ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1; E-Mails: seits@mail.ru (С. З.); akinin.dmitrij2013@yandex.ru (Д. А.); vborisov@bmstu.ru (В. Б.); kaznacheeva@bmstu.ru (Н. К.).

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: vborisov@bmstu.ru (В. Б.);
Tel.: +7(910)4201702.

Получена: 26 декабря 2018 / Принята: 07 января 2019 / Опубликовано: 07 января 2019

Аннотация: При проектировании лесовозного автопоезда необходимо рассматривать вопрос о рациональном подборе тягача и прицепа роспуска с расчётом рейсовой нагрузки, отнесённой к мощности двигателя тягача. Проведённые в статье исследования свидетельствуют о многообразии и взаимозависимости факторов, определяющих закономерности изменения средней скорости и расхода топлива в реальных условиях. Это неизбежно приводит к выводу о том, что минимальное значение факторов расхода топлива для различных типов двигателей и автопоездов необходимо определять экспериментально.

Ключевые слова: удельная мощность; лесовозный автопоезд; топливная экономичность; скоростной режим; лесовозная дорога.

DOI: 10.15393/j2.art.2018.4362

Article

Influence of a power-weight ratio of a forest train on speed mode and fuel economy

Sergey Seits¹, Dmitry Akinin^{1*}, Vyacheslav Borisov¹, Natalia Kaznacheeva¹

¹ Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (Mytishchi branch), Russia, 141005, Moscow region, Mytishchi, ul. 1-I Institutskaya, 1; E-Mails: seits@mail.ru (S. S.); akinin.dmitrij2013@yandex.ru (D. A.); vborisov@bmstu.ru (V. B.); kaznacheeva@bmstu.ru (N. K.).

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: vborisov@bmstu.ru (V. B.); Tel.: +7(910)4201702.

Received: 26 December 2018 / Accepted: 07 January 2019 / Published: 07 January 2019

Abstract: When designing a logging truck it is necessary to rationally select a tractor and a timber drug bearing in mind the truck load related to the engine power of the tractor. The studies presented in the article demonstrate the diversity and interdependence of the factors that determine the regularities of average speed and fuel consumption variations in real conditions. This inevitably leads to the conclusion that the minimum value of fuel consumption factors for various types of engines and road trains should be determined experimentally.

Keywords: power-weight ratio; forest road train; fuel efficiency; speed mode; forest road

1. Введение

Сухопутный лесотранспорт играет важную роль не только в освоении лесосырьевой базы лесозаготовительного предприятия, но и внутрирайонных перевозок, успешно служит для выполнения лесохозяйственных, сельскохозяйственных и многих других задач и целей. К основным особенностям сухопутного лесовозного транспорта относятся: собирательный характер работы лесовозных путей; одностороннее направление перевозки лесных грузов; сезонность работы многих участков сети лесовозных дорог; временный характер работы. При проектировании лесовозного автопоезда необходимо рассматривать вопрос о рациональном подборе тягача и прицепа роспуска с расчётом рейсовой нагрузки, отнесённой к мощности двигателя тягача [5]. Объектом исследований являются лесовозные автопоезда типа МАЗ-509 и МАЗ-5434, оборудованные прицепом роспуском типа ГКБ-9362, с учётом многообразия и взаимозависимости факторов, определяющих закономерности изменения средней скорости движения лесовозных автопоездов и расхода топлива в реальных производственных условиях.

2. Материалы и методы

При проектировании лесовозного автопоезда заданного веса необходимо рассматривать вопрос об оптимальном составе автопоезда или оптимальной рейсовой нагрузки [7].

Минимальный удельный расход топлива соответствует работе двигателя с некоторой частичной нагрузкой N_e . Закономерность изменения отношения расхода топлива на тонна-километр к часовой транспортной работе выражается формулой (2).

$$\Phi_T = \frac{q}{G \cdot v} = \frac{q \cdot f}{270 \cdot N_e \cdot \eta} = \frac{0,1 q_e}{N_e} \cdot \left(\frac{f}{270 \cdot \eta}\right)^2 \text{ см}^3/\text{л. с. ч.} \cdot \text{л. с.} \quad (1)$$

Расчёты показывают, что для дизелей минимальное значение фактора расхода топлива соответствует их работе в режиме номинальной мощности.

Движение автомобиля (автопоезда), имеющего бесступенчатую трансмиссию, по горизонтальному участку дороги с постоянной скоростью и при работе двигателя в режиме номинальной (максимальной) мощности $N_{ен}$ может быть выражено зависимостью

$$270 \cdot \eta \cdot N_{ен} - G \cdot v \cdot f - \frac{K \cdot F}{13} \cdot v^2 = 0, \quad (2)$$

где $K \cdot F$ — фактор сопротивления воздуха.

Величину удельной мощности, необходимой для движения со скоростью v , можно установить по формуле

$$N'_y = \frac{N_{ен}}{G \cdot f} = \frac{1}{270 \cdot \eta} \cdot \left(v + \frac{K \cdot F}{13 \cdot G \cdot f} v^3 \right), \text{ л. с./кг}, \quad (3)$$

а теоретически максимально возможную при данной удельной мощности скорость движения — по формуле

$$v = 270 \cdot \eta \cdot \frac{N_{ен}}{G \cdot f} - \frac{K \cdot F}{13 \cdot G \cdot f} \cdot v^3, \frac{\text{км}}{\text{час}}. \quad (4)$$

Расход топлива на тонна-километр при работе двигателя в режиме номинальной мощности может быть определён путём подстановки в формулу (6) значения $N_{ен}$ из уравнения (1):

$$q = \frac{Q}{G} = \frac{0,1 \cdot q_{ен}}{G \cdot v} \cdot \left(\frac{G \cdot f \cdot v}{270 \cdot \eta} + \frac{K \cdot F}{13} \cdot \frac{v^3}{270 \cdot \eta} \right) = \frac{0,1 \cdot q_{ен}}{270 \cdot \eta} \cdot \left(f + \frac{K \cdot F}{13 \cdot G} \cdot v^2 \right), \frac{\text{л}}{100 \text{ткм}}. \quad (5)$$

Таким образом, с увеличением удельной мощности скорость движения и расход топлива на тонна-километр возрастают, при этом интенсивность роста скорости снижается, а расхода топлива увеличивается.

Удельный фактор расхода топлива определится по формуле

$$\Phi'_T = \frac{q}{v} = \frac{0,1 \cdot q_{ен}}{270 \cdot \eta} \cdot \left(\frac{f}{v} + \frac{K \cdot F}{13 \cdot G} \cdot v \right) \text{ л. час/100ткм км}. \quad (6)$$

Очевидно, что чем ниже значение фактора расхода топлива, тем рентабельнее будет эксплуатация автопоезда.

Для упрощения записи при нахождении минимума Φ'_T можно ввести следующие обозначения величин, являющихся постоянными для данного типа двигателя и автопоезда:

$$0,1 \cdot q_{ен} = A; 270 \cdot \eta = B; \frac{K \cdot F}{13 \cdot G} = C.$$

Тогда

$$\Phi'_T = \frac{A}{B} \left(\frac{f}{v} + C \cdot v \right). \quad (7)$$

Следовательно,

$$\frac{d\Phi'_T}{dv} = \frac{A}{B} \cdot \frac{f}{v^2} + C \cdot \frac{A}{B}.$$

Откуда

$$v_{(\Phi_{Tmin})} = \sqrt{\frac{f}{C}} = \sqrt{\frac{13 \cdot G \cdot f}{K \cdot F}}. \quad (8)$$

Подставив значение $v_{(\Phi_{Tmin})}$ в уравнение (10), определим удельную мощность, при которой величина фактора расхода топлива будет минимальной:

$$\left(\frac{N_{ен}}{Gf}\right) \Phi'_{Tmin} = \frac{2}{270\eta} \sqrt{\frac{13Gf}{KF}}. \quad (9)$$

Полагая, что $\frac{K \cdot F}{13 \cdot G}$ для всех грузовых автомобилей и автопоездов является величиной постоянной, можно сделать вывод о том, что приведённая удельная мощность, соответствующая минимуму фактора расхода топлива, зависит от величины коэффициента сопротивления качению, при этом

$$N_{ен} = \frac{Gf}{270\eta} \left[\sqrt{\frac{f}{C}} + \frac{C}{f} \cdot \left(\sqrt{\frac{f}{C}} \right)^3 \right] = \frac{2 \cdot G \cdot f}{270\eta} \sqrt{\frac{13 \cdot G \cdot f}{K \cdot F}}, \quad (10)$$

т. е. мощность, затрачиваемая на преодоление силы сопротивления качению, будет равна мощности, необходимой для преодоления силы сопротивления воздуха. Величину расхода топлива в этом случае получим, подставив в уравнение (11) значение $v_{\Phi'_{Tmin}}$ из уравнения (8):

$$(q)_{\Phi'_{Tmin}} = \frac{0,1 \cdot q_{ен}}{270\eta} \cdot \left[f + \frac{K \cdot F}{13 \cdot G} \left(\sqrt{\frac{13 \cdot G \cdot f}{K \cdot F}} \right)^2 \right] = \frac{0,1 \cdot q_{ен}}{270\eta} \cdot 2 \cdot f. \quad (11)$$

Если зависимость коэффициента сопротивления качению от скорости движения

$$f' = f + b \cdot v^2,$$

то получим:

$$270 \cdot \eta \cdot N_{\text{ен}} - G \cdot v \cdot (f + b \cdot v^2) - \frac{K \cdot F}{13} \cdot v^3 = 0, \quad (12)$$

$$q = \frac{0,1 \cdot q_{\text{ен}}}{270 \cdot \eta} (f + b \cdot v^2 + \frac{K \cdot F}{13 \cdot G} \cdot v^2), \quad (13)$$

$$\Phi'_T = \frac{q}{v} = \frac{0,1 \cdot q_{\text{ен}}}{270 \cdot \eta} \left(\frac{f}{v} + b \cdot v + \frac{K \cdot F}{13 \cdot G} \cdot v \right). \quad (14)$$

Дифференцируя и приравнивая первую производную к нулю, найдём:

$$(v)_{\Phi'_{Tmin}} = \sqrt{\frac{13 \cdot G \cdot f}{K \cdot F + 13 \cdot G \cdot b}}, \quad (15)$$

$$(N_{\text{ен}})_{\Phi'_{Tmin}} = \frac{1}{270 \cdot \eta} \cdot \left[G \cdot f \left(\frac{13 \cdot G \cdot f}{K \cdot F + 13 \cdot G \cdot b} \right)^{1/2} + \left(G \cdot b + \frac{K \cdot F}{13} \right) \left(\frac{13 \cdot G \cdot f}{K \cdot F + 13 \cdot G \cdot b} \right)^{3/2} \right] = \frac{2 \cdot G \cdot f}{270 \cdot \eta} \cdot (v)_{\Phi'_{Tmin}} \quad (16)$$

$$(q)_{\Phi'_{Tmin}} = \frac{0,1 \cdot q_{\text{ен}}}{270 \cdot \eta} \left[f + \frac{13 \cdot G \cdot f}{K \cdot F + 13 \cdot G \cdot b} + \frac{K \cdot F}{13 \cdot G} * \frac{13 \cdot G \cdot f}{K \cdot F + 13 \cdot G \cdot b} \right] = \frac{0,1 \cdot q_{\text{ен}}}{270 \cdot \eta} \cdot 2 \cdot f \quad (17)$$

Практически тот же баланс мощности и расхода топлива наблюдается и при изменении коэффициента сопротивления качению в зависимости от скорости [1], [2] по формуле

$$f' = f + a \cdot (v - 50).$$

Расчёты, проведённые по формулам (16), (17) при условии $\frac{K \cdot F}{13 \cdot G} = 0,00125 \text{ час}^2 / \text{км}^2$,

показывают, что при $f = 20 \text{ кг/т}$ удельная мощность, соответствующая минимуму Φ'_T , составляет 24 л. с./т , а скорость движения — 126 км/час ; при $f = 40 \text{ кг/т}$ удельная мощность и скорость движения соответственно равны 70 л. с./т и 179 км/час .

Однако в реальных условиях эксплуатации, при наличии ступенчатой трансмиссии двигатель только отдельные мгновения работает в режиме номинальной мощности, т. к. сопротивление движению, состояние покрытия и условия безопасности движения постоянно меняются. В практике вместо уравнения (4) чаще всего встречается следующее неравенство:

$$v_{cp} < 270 \cdot \eta \cdot \frac{N_{en}}{Gf} - \frac{K \cdot F}{13} \cdot v_{cp}^3. \quad (18)$$

Это объясняется многими причинами. Скорость движения обычно неравномерна. При ускоренном движении (разгоне) часть мощности, развиваемой двигателем, затрачивается на разгон вращающихся масс автопоезда [3], [4]. Энергия, затраченная на разгон вращающихся масс двигателя, в реальных условиях эксплуатации является невозвратимой потерей (за исключением динамического преодоления короткого подъема на данной передаче). Действительно, при «выбеге» автопоезда двигатель на практике отключается от трансмиссии, а если не отключается, то автопоезд замедляет движение более интенсивно, поскольку происходит торможение двигателем. Энергия, затраченная на разгон автопоезда, на практике в значительной мере поглощается при торможении. Кроме того, в зависимости от мощности, развиваемой двигателем, изменяется доля затрат энергии на привод вспомогательных механизмов (вентилятор, компрессор и др.), а также к. п. д. трансмиссии [9], [10]. Энергия, затраченная на преодоление подъема автопоездом, на спусках, требующих по условиям безопасности движения подтормаживания, компенсируется полностью. Дополнительные потери при движении по участку «подъем — спуск» вызываются и к. п. д. трансмиссии.

Поскольку средняя скорость движения при прочих равных условиях есть функция удельной мощности, то и доля затрат энергии на преодоление сопротивления воздуха также будет изменяться [5].

Мощностной баланс при эксплуатации автопоезда в реальных условиях можно представить в виде уравнений:

$$N_e = \frac{G \cdot v_{cp} \cdot \psi_{y.c.}}{270}; \quad (19)$$

$$\psi_{y.c.} = \frac{1}{\eta} \cdot (f + \psi_T + \omega),$$

где $\psi_{y.c.}$ — условный суммарный коэффициент сопротивления движению; ψ_T — коэффициент, характеризующий поглощение мощности при торможении и затраты энергии на разгон вращающихся масс двигателя; $\omega = \frac{K \cdot F}{13 \cdot G} \cdot v_{cp}^2$ — коэффициент, характеризующий долю затрат энергии на преодоление сопротивления воздуха.

В соответствии с уравнениями (13) и (17) величина расхода топлива на тонна-километр в зависимости от удельной мощности будет изменяться по формуле

$$q = \frac{0,1 \cdot q_e \cdot \psi_{y.c.}}{270} = \frac{0,1 \cdot q_e}{270 \cdot \eta} (f + \psi_T + \omega). \quad (20)$$

Эта формула будет справедлива в том случае, если удельная мощность автопоезда будет изменяться за счёт его веса или если все устанавливаемые на автопоезд определённого веса двигатели имеют одну и ту же многопараметровую характеристику удельного расхода топлива.

На рисунке 1 приведены теоретически максимально возможная скорость движения [по уравнению (3) при $\frac{K \cdot F}{13 \cdot G} = 0,00125 \text{ час}^2 / \text{км}^2$ и $\eta = 0,76$] и расход топлива [по уравнению (4) при $q_{ен} = 270 \text{ см}^3 / \text{л.с.ч.}$ и $f = 23 \text{ кг/т}$], а также их значения, экспериментально полученные при эксплуатации автопоездов на гравийной дороге (двигатель ЯМЗ-238М2).

Среднюю скорость движения автопоезда можно определить из уравнения (18) путём подстановки коэффициента использования мощности K_N :

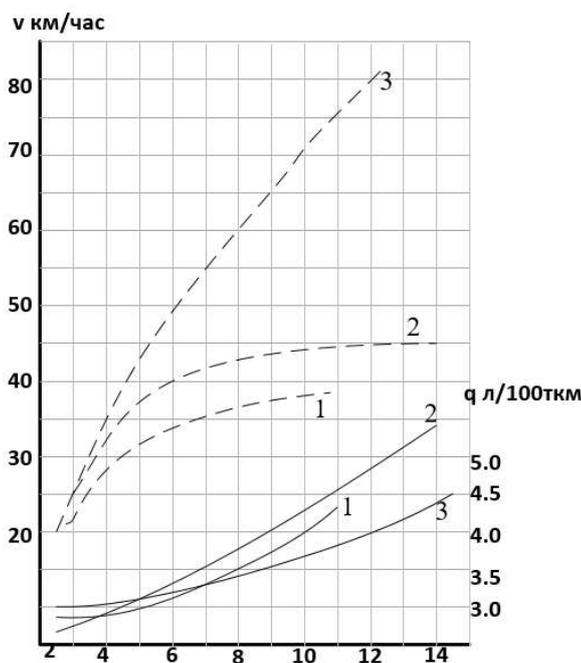


Рисунок 1. Скорость движения и расход топлива в зависимости от удельной мощности (дорога гравийная): 1 — автомобиль МАЗ-5434; 2 — автомобиль МАЗ-509; 3 — теоретически возможные при работе двигателя в режиме номинальной мощности скорость движения (---) и расход топлива (----)

$$v_{\text{ср}} = \frac{270 \cdot N_e}{G \cdot \psi_{y.c.}} = \frac{270 \cdot N_{ен} \cdot K_N \cdot \eta}{G \cdot (f + \psi_T + \omega)}, \quad (21)$$

А удельный фактор расхода топлива составит:

$$\Phi'_T = \frac{q}{v_{cp}} = \frac{0,1 \cdot q_{ен} \cdot (f + \psi_T + \omega)^2}{(270 \cdot \eta)^2 \cdot K_N} \cdot \frac{G}{N_{ен}} = 0,1 \cdot \left(\frac{f + \psi_T + \omega}{270 \cdot \eta} \right)^2 \cdot \frac{q_e}{K_N} \cdot \frac{1}{N_y}. \quad (22)$$

Закономерность изменения фактора расхода топлива в зависимости от веса автопоезда и мощности установленного двигателя может быть выражена уравнением

$$\Phi_T = \frac{q}{G \cdot v_{cp}} = 0,1 \cdot \left(\frac{f + \psi_T + \omega}{270 \cdot \eta} \right)^2 \cdot \frac{q_e}{K_N} \cdot \frac{1}{N_{ен}}. \quad (23)$$

На рисунке 2 приведены зависимости удельного фактора расхода топлива от удельной мощности. Одна из них построена по уравнению (22), а другие получены экспериментально. Как видно из графика, в реальных условиях эксплуатации удельная мощность, соответствующая минимуму Φ'_T , имеет значительно меньшую величину.

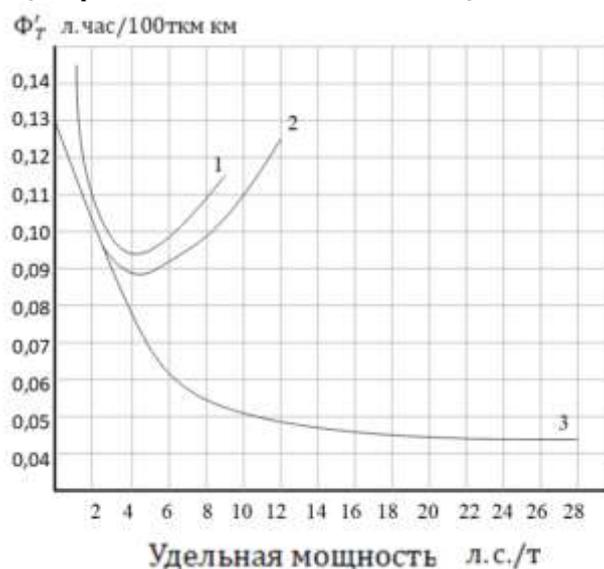


Рисунок 2. Удельный фактор расхода топлива в зависимости от удельной мощности (дорога гравийная): 1 — автомобиль МАЗ-5434; 2 — автомобиль МАЗ-509; 3 — теоретически возможная зависимость при работе двигателя в режиме номинальной мощности

Из уравнения (22) следует, что величина приведённой удельной мощности, соответствующая минимуму Φ'_T , возрастает с увеличением f , однако, как видно на рисунке 3, в реальных условиях эксплуатации этот минимум соответствует практически одному и тому же значению $\frac{N_{ен}}{G \cdot f}$ на всех типах дорог.

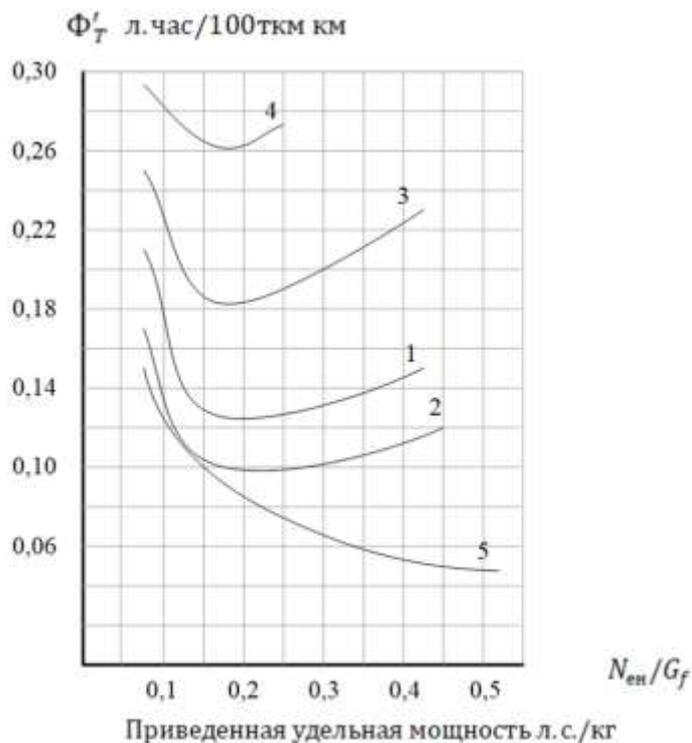


Рисунок 3. Удельный фактор расхода топлива автомобиля МАЗ-5434 в зависимости от приведённой удельной мощности: 1 — дорога смешанного типа; 2 — гравийная дорога с исправным покрытием; 3 — гравийная ухабистая дорога; 4 — грунтовая, слабо накатанная, мало ухабистая дорога; 5 — теоретически возможная зависимость Φ'_T от $\frac{N_{ен}}{G_f}$ (гравийная дорога с исправным покрытием)

Это объясняется тем, что дороги с более высоким значением f имеют более значительную неровность покрытия [3], [4]. Вследствие этого повышение удельной мощности автопоезда приводит к более интенсивному снижению коэффициента использования мощности и увеличению коэффициента ψ_T .

Список литературы

1. Резникова, Н. Е. Особенности расчёта скорости с применением ЭВМ при проектировании трассы дороги / Н. Е. Резникова, В. А. Борисов // В мире научных открытий. — 2009. — № 2. — С. 13—19.
2. Резникова, Н. Е. Применение ЭВМ для анализа основных режимов движения лесовозных автопоездов / Н. Е. Резникова, В. А. Борисов // В мире научных открытий. — 2009. — № 2. — С. 20—26.
3. Борисов, В. А. Исследование движения лесовозных автопоездов на горизонтальных кривых / В. А. Борисов // Лесной вестник. Forestry Bulletin. — 2009. — № 2. — С. 73—79.
4. Борисов, В. А. Учёт параметров движения и анализ устойчивости лесовозных автопоездов при торможении / В. А. Борисов // Лесной вестник. Forestry Bulletin. — 2009. — № 2. — С. 80—85.

5. Проектирование лесовозных и лесохозяйственных дорог : учебное пособие / В. В. Никитин, В. А. Борисов, Д. В. Акинин, М. А. Сорокин ; под ред. А. А. Камусина. — Красноярск, 2018.
6. Программа оценки динамического взаимодействия звеньев лесовозного автопоезда в режиме экстренного или служебного торможения : свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2014618419 26.06.2014 / А. А. Камусин, А. В. Скрынников, В. А. Борисов, С. В. Дорохин.
7. Некоторые вопросы зависимости грузоподъёмности лесовозных автопоездов от типа покрытия лесной дороги / В. А. Борисов, Д. В. Акинин, С. А. Чернов, Д. П. Попутчиков // International Journal of Advanced Studies in Computer Engineering. — 2018. — № 1. — С. 9—13.
8. Анализ влияния проходов лесовозного автопоезда на уплотнение песчаного слоя основания лесной автодороги с переходным типом покрытия / В. В. Никитин, Д. В. Акинин, В. А. Борисов, Н. И. Казначеева // ЛЕСА РОССИИ В XXI ВЕКЕ : сб. науч. трудов по итогам междунар. научно-технич. интернет-конференции. — 2015. — С. 126—130.
9. Некоторые критерии устойчивости автопоезда / А. А. Камусин, Д. В. Акинин, Н. И. Казначеева, В. А. Борисов // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. — 2014. — № S2. — С. 122—126.
10. Устойчивость движения прицепов лесовозных автопоездов / А. А. Камусин, Д. В. Акинин, Н. И. Казначеева, В. А. Борисов // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. — 2014. — № S2. — С. 143—145.

References

1. *Reznikova, N. E.* Osobennosti raschyota skorosti s primeneniem E`VM pri proektirovanii trassy` dorogi / N. E. Reznikova, V. A. Borisov // V mire nauchny`x otkry`tij. — 2009. — № 2. — S. 13—19.
2. *Reznikova, N. E.* Primenenie E`VM dlya analiza osnovny`x rezhimov dvizheniya lesovozny`x avtopoezdov / N. E. Reznikova, V. A. Borisov // V mire nauchny`x otkry`tij. — 2009. — № 2. — S. 20—26.
3. *Borisov, V. A.* Issledovanie dvizheniya lesovozny`x avtopoezdov na gorizonta`l`ny`x krivy`x / V. A. Borisov // Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin. — 2009. — № 2. — S. 73—79.
4. *Borisov, V. A.* Uchyot parametrov dvizheniya i analiz ustojchivosti lesovozny`x avtopoezdov pri tormozhenii / V. A. Borisov // Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin. — 2009. — № 2. — S. 80—85.
5. *Proektirovanie lesovozny`x i lesoxozyajstvenny`x dorog : uchebnoe posobie / V. V. Nikitin, V. A. Borisov, D. V. Akinin, M. A. Sorokin ; pod red. A. A. Kamusina. — Krasnoyarsk, 2018.*
6. *Programma ocenki dinamicheskogo vzaimodejstviya zven`ev lesovoznogo avtopoezda v rezhime e`kstrennogo ili sluzhebnoego tormozheniya : svidetel`stvo o registracii programmy` dlya E`VM RUS 2014618419 26.06.2014 / A. A. Kamusin, A. V. Skry`nnikov, V. A. Borisov, S. V. Doroxin.*
7. *Nekotory`e voprosy` zavisimosti gruzopod`yomnosti lesovozny`x avtopoezdov ot tipa pokry`tiya lesnoj dorogi / V. A. Borisov, D. V. Akinin, S. A. Chernov, D. P. Poputchikov // International Journal of Advanced Studies in Computer Engineering. — 2018. — № 1. — S. 9—13.*

8. Analiz vliyaniya proxodov lesovoznogo avtopoezda na uplotnenie peschanogo sloya osnovaniya lesnoj avtodorogi s perexodny`m tipom pokry`tiya / V. V. Nikitin, D. V. Akinin, V. A. Borisov, N. I. Kaznacheeva // LESA ROSSII V XXI VEKE : sb. nauch. trudov po itogam mezhdunar. nauchno-texnich. internet-konferencii. — 2015. — S. 126—130.
9. Nekotory`e kriterii ustojchivosti avtopoezda / A. A. Kamusin, D. V. Akinin, N. I. Kaznacheeva, V. A. Borisov // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoj vestnik. — 2014. — № S2. — S. 122—126.
10. Ustojchivost` dvizheniya pricepov lesovozny`x avtopoezdov / A. A. Kamusin, D. V. Akinin, N. I. Kaznacheeva, V. A. Borisov // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa — Lesnoj vestnik. — 2014. — № S2. — S. 143—145.

© Зейц С. Ю., Акинин Д. В., Борисов В. А., Казначеева Н. И., 2018