

## Методика вычисления транспортно-эксплуатационных затрат на содержание лесовозной автомобильной дороги

С.Ю. Саблин<sup>1a</sup>, А.В. Скрыпников<sup>1b</sup>, И.А. Высоцкая<sup>1c</sup>, Д.Е. Болтнев<sup>1d</sup>, В.В. Никитин<sup>2e</sup>, А.Ю. Жук<sup>3f</sup>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия

<sup>2</sup> Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, ул. 1-я Институтская, 1, Мытищи, Россия

<sup>3</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>a</sup> sablinSYu@mail.ru, <sup>b</sup> skrypnikovvsafe@mail.ru, <sup>c</sup> i.a.trishina@gmail.com, <sup>d</sup> boltnevDE@mail.ru, <sup>e</sup> nikitinvv@bmstu.ru, <sup>f</sup> zhuk30@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6521-9570>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5284-8116>,

<sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1808-245X>

Статья поступила 11.01.2021, принята 29.01.2021

*В статье нашли отражение результаты исследований, связанных с вычислением транспортно-эксплуатационных затрат на содержание лесовозных автомобильных дорог. Повышение эффективности дорожно-строительного производства связано с усовершенствованием методик расчетов издержек на строительство и содержание лесовозных автомобильных дорог. Применение новых эффективных решений требует строго математического обоснования и анализа ряда технических и экономических критериев. Увеличение транспортно-эксплуатационных затрат по мере роста интенсивности движения на лесовозных автомобильных дорогах является аддитивным процессом, поэтому важным параметром в расчетных формулах выступает скорость движения автомобилей, по которой можно оценивать степень влияния параметров лесовозной автомобильной дороги на экономические показатели ее работы. Скорость используется как средство для связи параметров дороги и дорожных условий со стоимостными показателями целевой функции. Оптимальная скорость определяется размером капитальных вложений, задающих технический уровень дороги, и транспортно-эксплуатационными затратами. Формализация связей различных параметров лесовозной автомобильной дороги позволяет в будущих исследованиях учесть влияние параметров дороги и автомобильного потока на элементы целевой функции, отражающие транспортно-эксплуатационные расходы. С использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований получены расчетные формулы, выражающие транспортно-эксплуатационные затраты в зависимости от скорости движения автомобиля, распределения продольных уклонов, ширины проезжей части, интенсивности движения и состава автомобильного потока. Их анализ позволил сделать следующий вывод: ежегодный прирост интенсивности движения оказывает существенное влияние на размер транспортных затрат, с одной стороны, из-за простого увеличения количества проходящих автомобилей, и с другой — из-за снижения скорости движения, при этом чем больше интенсивность движения, тем существеннее влияние продольного профиля на транспортно-эксплуатационные затраты.*

**Ключевые слова:** лесовозные автомобильные дороги; транспортно-эксплуатационные затраты; геометрические элементы.

## Methodology for calculating transport and operating costs for the maintenance of a timber road

S.Yu. Sablin<sup>1a</sup>, A.V. Skrypnikov<sup>1b</sup>, I.A. Vysotskaya<sup>1c</sup>, D.E. Boltnev<sup>1d</sup>, V.V. Nikitin<sup>2e</sup>, A.Yu. Zhuk<sup>3f</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies; 19, Revolution Ave., Voronezh, Russia

<sup>2</sup> Mytishchi Branch of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman; 1, 1st Institutskaya St., Mytishchi, Russia

<sup>3</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup> sablinSYu@mail.ru, <sup>b</sup> skrypnikovvsafe@mail.ru, <sup>c</sup> i.a.trishina@gmail.com, <sup>d</sup> boltnevDE@mail.ru, <sup>e</sup> nikitinvv@bmstu.ru, <sup>f</sup> zhuk30@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6521-9570>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5284-8116>,

<sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1808-245X>

Received 11.01.2021, accepted 29.01.2021

*The article reflects the results of research related to the calculation of transport and operating costs for the maintenance of timber highways. The increase in the efficiency of road construction production is associated with the improvement of methods for calculating the costs of the construction and maintenance of timber highways. The use of new effective solutions requires a strictly mathematical*

*justification and analysis of a number of technical and economic criteria. An increase in transport and operating costs with an increase in traffic intensity on timber highways is an additive process, therefore, an important parameter in the calculation formulas is the speed of vehicles, which can be used to assess the degree of influence of the parameters of a timber road on the economic indicators of its operation. Speed is used as a means of linking road parameters and road conditions to the value of the objective function. The optimal speed is determined by the size of capital investments that set the technical level of the road and transport and operating costs. Formalization of relationships between various parameters of a timber road allows taking into account the effect of road parameters and road traffic on the elements of the objective function reflecting transport and operating costs in the future studies. Using the results of theoretical and experimental studies, calculation formulas have been obtained that express transport and operating costs depending on the vehicle speed, distribution of longitudinal slopes, width of the carriageway, traffic intensity and composition of the traffic flow. Their analysis led to the following conclusion: the annual increase in traffic intensity has a significant impact on the size of transport costs, on the one hand, due to a simple increase in the number of passing cars, and on the other, due to a decrease in traffic speed, while the greater the traffic intensity, the more significant is the effect of the longitudinal profile on transport and operating costs.*

**Keywords:** timber highways; transport and operating costs; geometric elements.

**Введение.** Состояние лесовозных дорог и их расположение относительно лесных ресурсов является одним из важных экономических факторов, способствующих развитию предприятий лесного хозяйства. Важнейшим показателем, определяющим транспортно-эксплуатационные расходы автомобильного транспорта, связанные с перевозкой грузов, является скорость движения автомобильного потока [1–5], которая из-за воздействия на автомобиль множества независимых друг от друга факторов является случайной величиной и распределена по определенным законам во времени и в пространстве.

*Целью работы* является определение транспортно-эксплуатационных затрат на содержание лесовозной автомобильной дороги, исходя из того, что изменение величины расходов, связанных с перевозками напрямую зависит от скорости движения.

**Обоснование технико-экономических расчетов транспортно-эксплуатационных затрат на содержание лесовозной автомобильной дороги с учетом оптимальной скорости автомобиля.** В основе технико-экономических расчетов, как правило, лежит некоторая оптимальная скорость автомобиля, т. е. скорость, обеспечивающая в определенных условиях минимальные транспортно-эксплуатационные затраты при общем стремлении к их сокращению.

Проведенный анализ литературы показал, что имеют место различные толкования понятия «оптимальная скорость» и, как следствие этого, различные методики ее определения, в результате чего получаются отличные друг от друга величины при идентичных условиях.

В работах [6; 7], на основе экономических и динамических расчетов приводятся исследования скоростей, обеспечивающих минимальные транспортные затраты. Параметры дороги при новом строительстве и реконструкции назначены с таким расчетом, чтобы при некоторой перспективной интенсивности движения независимо от типа рельефа местности были обеспечены оптимальные скорости транспорта.

Адекватность расчетных зависимостей оптимальных скоростей подтвердилась в результате сравнения теоретически полученных скоростей с действительными, экспериментально измеренными на дорогах. Расчеты подтвердили эффективность любых капитальных вложений, связанных с обеспечением оптимальных скоростей движения.

Подобный подход к принятию решения об обеспечении оптимальной скорости движения допустим толь-

ко в условиях сформировавшейся лесовозной транспортной сети и при высокой интенсивности движения автомобилей с незначительным ежегодным приростом.

Другое содержание термина «оптимальная скорость» встречается в работах [8; 9], где оптимальной считается скорость, которая обеспечивает минимум затрат на движение автомобиля при определенных дорожных сопротивлениях (сопротивлениях качению и продольных уклонов).

**Методика расчета и обоснование транспортно-эксплуатационных затрат на содержание лесовозной автомобильной дороги.** Сравнение оптимальных скоростей, полученных теоретически, со средними скоростями этих же автомобилей [10; 11] показало, что средние скорости свободного движения близки к оптимальным. Действительно, в свободном потоке каждый водитель имеет свободу выбора режима движения и реализует наиболее оптимальный режим в соответствии со своим опытом и динамическими качествами автомобиля.

Следовательно, использование оптимальной скорости для обоснования транспортно-эксплуатационных затрат на содержание лесовозной автомобильной дороги и ее параметров не дает оптимального решения, так как, несмотря на то, что ей соответствуют минимальные транспортные затраты, эта скорость зависит от продольных уклонов, типа и состояния покрытия и должна обосновываться на основе минимума суммарных приведенных затрат. Если максимальная скорость обеспечивается увеличением ширины проезжей части, то могут быть такие расчетные случаи, когда капитальные затраты не оправдываются повышением скорости до оптимальной. Это может иметь место при малых темпах ежегодного прироста интенсивности движения.

Из вышесказанного следует вывод о том, что при технико-экономических обоснованиях геометрических параметров [12–17] дорог в условиях высоких темпов увеличения интенсивности движения нельзя ориентироваться на достижение какой-либо величины оптимальной скорости движения. Скорость может использоваться только как средство для связи параметров дороги и дорожных условий со стоимостными показателями целевой функции.

Оптимальная скорость определяется в первую очередь размером капитальных вложений, задающих технический уровень дороги, и транспортно-эксплуатационными затратами.

На основании исследования зависимости себестоимости перевозок от скорости движения получена расчетная формула [18]:

$$S = \frac{4.332 + 0.011V}{V}, \quad (1)$$

где  $S$  — себестоимость перевозок,  $p./авт. км$ ;  $V$  — средняя скорость движения автомобиля.

Ежегодные транспортные затраты в общем виде выражаются следующей формулой [20]:

$$\mathcal{E} = f[N_0 f(t): S: V_t], \quad (2)$$

где  $N_0$  — интенсивность движения в исходный год,  $авт./сут.$ ;  $V_t$  — средняя техническая скорость движения в год  $t$ ,  $км/ч$ ;  $S$  — себестоимость перевозок,  $p./авт. ч$ .

На основании формул (1) и (2) транспортно-эксплуатационные затраты выразятся для технического состояния, характеризуемого шириной проезжей части 7–7,5 м следующей формулой:

$$\mathcal{E}_1 = 0.365N\alpha \left\{ \frac{4.332 + 0.011 \left[ \frac{65.9 + 0.1056p}{\tau(\bar{t}, \sigma_i)} - 0.0278N\beta \right]}{\frac{65.9 + 0.1056p}{\tau(\bar{t}, \sigma_i)} - 0.0278N\beta} S_n(\bar{t}b) \right\}, \quad (3)$$

где  $N$  — интенсивность движения,  $авт./сут.$ ;  $\alpha$  — длина участка трассы,  $км$ ;  $p$  — удельное количество легковых автомобилей в потоке;  $S_n$  — ущерб от дорожно-транспортных происшествий, определяемый в соответствии с [9], для среднего значения продольных уклонов  $\bar{t}$  и ширины проезжей части  $b$ ,  $p./авт. км$ ;  $\sigma_i$  — среднее квадратическое отклонение уклонов;  $\tau = \frac{V_i=0}{V_i\sigma_i}$ , где  $V_i = 0$  — скорость автомобиля на горизонтальном участке,  $V_i\sigma_i$  — средняя скорость на участке с распределением продольных уклонов, характеризующимися  $\bar{t}$  и  $\sigma_i$ .

$\beta$  — коэффициент перевода суточной интенсивности движения в часовую.

Введем в расчет коэффициент, отражающий долю интенсивности движения, приходящуюся на двухполосную часть дороги. Следовательно:

$$\mathcal{E}_2 = 0.365N\alpha \left\{ \frac{4.332 + 0.011\bar{V}(N_n, \tau, p, \beta)}{\bar{V}(N_n, \tau, p, \beta)} + S_n(\bar{t}b) \right\} + [(1 - n) \left\{ \frac{4.332 + 0.011\bar{V}(N_{(1-n)}, \tau, p, \beta)}{\bar{V}(N_{(1-n)}, \tau, p, \beta)} + S_n(\bar{t}b) \right\}]. \quad (4)$$

#### Литература

1. Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Микова Е.Ю., Ломакин Д.В. Автоматизированные уровни управления лесовозной автомобильно-дорожной системой // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 1. С. 27–31.
2. Чернышова Е.В., Скрыпников А.В., Самцов В.В., Абасов М.А. Лесовозные автомобильные дороги в транспортной сети лесопромышленного предприятия // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2019. № 2 (368). С. 95–101.
3. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. V. 25. № 3. P. 678–694.
4. Умаров М.М., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Микова Е.Ю. Применение цифровых моделей местности для

Для определения транспортно-эксплуатационных затрат при однополосной проезжей части возможно использование следующей формулы, выражающей зависимость скорости от интенсивности движения и характеристик участка:

$$\bar{V} = \tau_1 \tau_2 \tau_3 V_0 - \alpha N, \quad (5)$$

где  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  — коэффициенты, отражающие влияние продольного уклона, состава потока и ширины проезжей части на скорость автомобильного потока;  $V_0$  — скорость свободного движения автомобиля,  $км/ч$ ;  $N$  — интенсивность движения,  $авт/ч$ .

С учетом (3) и (5) транспортные затраты выразятся:

$$\mathcal{E}_3 = 0.365N\alpha \left\{ \frac{4.332 + 0.011 \left( \frac{0.6\tau_2 V_0}{\tau} - \alpha N\beta \right)}{0.6\tau_2 \frac{V_0}{\tau} - \alpha N\beta} + S_n(\bar{t}b) \right\}. \quad (6)$$

Придав значение коэффициенту  $\tau_3 = 0,7$ , получим аналогичное выражение транспортных затрат для двухполосной дороги с шириной проезжей части 6 м.

Ежегодный прирост интенсивности движения оказывает существенное влияние на размер транспортных затрат, с одной стороны, из-за простого увеличения количества проходящих автомобилей и с другой — из-за снижения скорости движения. Поэтому в выражениях (3) – (6) для учета фактора ежегодного увеличения интенсивности движения  $N$  следует заменять на  $N_0\lambda$ , где  $N_0$  — начальная интенсивность,  $авт./сут.$ ;  $\lambda$  — функция ежегодного прироста, вид которой принимается в соответствии с [20] в зависимости от особенностей расчетного случая. При этом, чем больше интенсивность движения, тем существеннее влияние продольного профиля на транспортно-эксплуатационные затраты.

**Выводы.** Развитие и транспортной инфраструктуры напрямую способствует расширению лесопромышленного комплекса. С использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований в работе получены расчетные формулы, выражающие транспортно-эксплуатационные затраты в зависимости от скорости движения автомобиля, распределения продольных уклонов, ширины проезжей части, интенсивности движения и состава автомобильного потока.

трассирования лесных автомобильных дорог // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2018. № 2 (362). С. 58–69.

5. Рябова О.В., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Тихомиров П.В. Изучение географической среды для целей дорожного проектирования // Науч. журнал строительства и архитектуры. 2020. № 1 (57). С. 84–95.
6. Skrypnikov A.V., Dorokhin S., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12. № 2. P. 511–515.
7. Орлов А.О., Мацнев М.В., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Могутов Р.В. Обзор методов оптимизации состава машин при строительстве автомобильных дорог // Бюллетень транспортной информации. 2019. № 5 (287). С. 14–17.
8. Кероглу Л.А. Исследование пропускной способности автомобильных дорог. М.: Автотрансиздат, 1963. 66 с.

9. Беляев А.Н., Тришина Т.В., Брюховецкий А.Н., Высоцкая И.А. К согласованию кинематических характеристик поворота колёсной машины // Вестн. Воронежского гос. аграрного ун-та. 2020. Т. 13. № 3 (66). С. 12–18.
10. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Chernyshova E.V. Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. V. 726. P. 654–667.
11. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Samcov V.V., Levushkin D.M., Nikitin A.A., Zaikin A.N. Mathematical models to determine the influence of road parameters and conditions on vehicular speed // Journal of Physics: Conference Series. The proceedings International Conference «Information Technologies in Business and Industry». 2019. P. 32–41.
12. Буданов А.В., Чертов Е.Д., Скрыпников А.В., Котов Г.И. Математические методы моделирования поиска принципов действия технических систем // Вестн. Воронежского гос. ун-та инженерных технологий. 2016. № 3 (69). С. 110–115.
13. Исаченко А.Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 366 с.
14. Быстрянец Е.В. Исследование технологии экспертной оценки качества информационного обеспечения автомобильного транспорта // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 9. С. 429–432.
15. Belyaev A.N., Kozlov V.G., Vysotskaya I.A., Trishina T.V. Computation of vehicle motion path upon entering turn // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. V. 9. № 1. P. 4527–4531.
16. Оптнер С. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. М.: Советское радио, 1969. 216 с.
17. Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12. № 2. P. 511–515.
18. Борисов В.А., Камусин А.А., Скрыпников А.В., Дорохин С.В. Программа оценки и прогнозирования эксплуатационных свойств асфальтобетона при устройстве дорожных покрытий лесовозных автомобильных дорог: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2014618507 26.06.2014.
19. Литвинов А.С. Управляемость и устойчивость автомобиля. М.: Машиностроение, 1971. 416 с.
20. Бурмистров Д.В. Рабочая гипотеза ритмичного строительства лесовозных автомобильных дорог и ее экономико-математическое развитие // Лесной вестн. Forestry Bulletin. 2018. Т. 22. № 5. С. 69–76.
4. Umarov M.M., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Mikova E.YU. Application of digital terrain models for tracing forest highways // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2018. № 2 (362). P. 58–69.
5. Ryabova O.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Tihomirov P.V. The study of the geographical environment for the purposes of road design // Russian Journal of Building Construction and Architecture. 2020. № 1 (57). P. 84–95.
6. Skrypnikov A.V., Dorokhin S., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12. № 2. P. 511–515.
7. Orlov A.O., Macnev M.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Mogutnov R.V. Review of methods for optimizing the composition of cars in the construction of highways // The Bulletin of Transport Information (BTI). 2019. № 5 (287). P. 14–17.
8. Keroglu L.A. Study of road capacity. М.: Avtotransizdat, 1963. 66 p.
9. Belyaev A.N., Trishina T.V., Bryuhoveckij A.N., Vysockaya I.A. To coordinate the kinematic characteristics of the rotation of a wheeled vehicle // Vestnik of Voronezh state agrarian university. Vestnik VSAU. 2020. V. 13. № 3 (66). P. 12–18.
10. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Chernyshova E.V. Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. V. 726. P. 654–667.
11. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Samcov V.V., Levushkin D.M., Nikitin A.A., Zaikin A.N. Mathematical models to determine the influence of road parameters and conditions on vehicular speed // Journal of Physics: Conference Series. The proceedings International Conference «Information Technologies in Business and Industry». 2019. P. 32–41.
12. Budanov A.V., Chertov E.D., Skrypnikov A.V., Kotov G.I. Mathematical methods of modeling the search for the principles of operation of technical systems // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2016. № 3 (69). P. 110–115.
13. Isachenko A.G. Landscape studies and physical and geographical zoning. М.: Vysshaya shkola, 1991. 366 p.
14. Bystryancev E.V. Research of the technology of expert assessment of the quality of information support for road transport // Automation and modern technology. 2017. V. 71. № 9. P. 429–432.
15. Belyaev A.N., Kozlov V.G., Vysotskaya I.A., Trishina T.V. Computation of vehicle motion path upon entering turn // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2019. V. 9. № 1. P. 4527–4531.
16. Optner S. System analysis for solving business and industrial problems. М.: Sovetskoe radio, 1969. 216 p.
17. Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical model of statistical identification of car transport informational provision // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 12. № 2. P. 511–515.
18. Borisov V.A., Kamusin A.A., Skrypnikov A.V., Dorohin S.V. Program for assessing and predicting the performance properties of asphalt concrete in the construction of pavements for timber haul roads. Certificate of registration of the computer program RUS 2014618507 06/26/2014.
19. Litvinov A.S. Handling and stability of the car. М.: Mashinostroenie, 1971. 416 p.
20. Burmistrov D.V. Working hypothesis of rhythmic construction of logging roads and its economic and mathematical development // Lesnoj vestn. Forestry Bulletin. 2018. V. 22. № 5. P. 69–76.

#### References

1. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Mikova E.YU., Lomakin D.V. Automated levels of management of the timber haul road system // Automation and modern technology. 2019. V. 73. № 1. P. 27–31.
2. Chernyshova E.V., Skrypnikov A.V., Samcov V.V., Abasov M.A. Timber highways in the transport network of a timber industry enterprise // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2019. № 2 (368). P. 95–101.
3. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // Journal of the Balkan Tribological Association. 2019. V. 25. № 3. P. 678–694.