Научная статья
УДК 630*383
DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-106-120

Математическое обоснование сопротивления движению автотранспорта в зависимости от состояния конструкции покрытия лесовозных дорог

В.С. Прокопец*[1]*, канд. техн. наук; *ResearcherID: ABZ-9286-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6066-2562*
В.Г. Козлов*[2]*, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: G-9613-2017, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2571-8687*
А.В. Скрыпников*[1]✉*, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: AAE-8824-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1073-9151*
Н.Г. Пономарева*[3]*, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: A-5693-2019, ORCID https://orcid.org/0000-0001-6210-5631*
Д.М. Левушкин*[4]*, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: AAS-4522-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-6371*
Ю.А. Боровлев*[1]*, соискатель; *ResearcherID: HCH-1952-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3702-6194*

[1]Воронежский государственный университет инженерных технологий, просп. Революции, д. 19, г. Воронеж, Россия, 394036; volodayprokopec@yandex.ru, skrypnikovvsafe@mail.ru✉, borovlevyury@ya.ru
[2]Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I, ул. Мичурина, д. 1, г. Воронеж, Россия, 394087; vya-kozlov@yandex.ru
[3]Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; n.ponomareva@narfu.ru
[4]Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; levushkin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 13.01.22 / Одобрена после рецензирования 19.04.22 / Принята к печати 21.04.22

Аннотация. Применение существующих в настоящее время методов и критериев оценки технико-эксплуатационных характеристик и состояния лесовозных автомобильных дорог требует больших затрат времени, хотя и позволяет с достаточной точностью описать состояние отдельных элементов дороги, наметить пути устранения выявленных неисправностей и определить объемы работ по их устранению. Отличительной особенностью лесозаготовительного производства является одновременная эксплуатация разветвленной сети лесовозных автомобильных дорог различных категорий с эксплуатационными характеристиками, меняющимися в зависимости от погодных условий, передислокации мест рубок, интенсивности движения и других факторов. Поэтому существующие способы обоснования зависимостей составляющих сопротивление движения от прочности дорожной конструкции оказываются малопригодными для оперативной оценки технико-эксплуатационного состояния дорог при планировании ремонтных работ. Цель исследования – совершенствование методологических основ тягово-эксплуатационных расчетов для лесотранспорта в зависимости от состояния конструкции покрытия лесовозных автомобильных дорог. Установлено, что при

расчете сопротивления качению необходимо учитывать его составляющую, обусловленную деформацией конструкции. На величину этой составляющей влияет модуль упругости дорожной конструкции. Зависимость, полученная для составляющей сопротивления качению за счет деформации дорожной конструкции покрытия лесовозных дорог, позволяет повысить точность тягово-эксплуатационных расчетов на стадии проектирования лесовозной автомобильной дороги и может быть использована в целевой функции при сравнении вариантов (при вариантном проектировании). Знание математической зависимости составляющей сопротивления движению от прочности дорожной конструкции дает возможность использовать сопротивление движению в качестве косвенной характеристики прочности дорожной конструкции, а также в качестве комплексного качественного показателя состояния проезжей части дороги.
Ключевые слова: сопротивление движению, сопротивление качению, прочность дорожной одежды, элемент дороги, нагрузка дорожной конструкции, лесовозные дороги, тягово-эксплуатационные расчеты для лесотранспорта

Для цитирования: Прокопец В.С., Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Пономарева Н.Г., Левушкин Д.М., Боровлев Ю.А. Математическое обоснование сопротивления движению автотранспорта в зависимости от состояния конструкции покрытия лесовозных дорог // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 106−120. https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-106-120

Original article

Mathematical Justification of Vehicular Traffic Resistance in Relation to Structural Surface Conditions of Hauling Roads

Vladimir S. Prokopets[1], *Candidate of Engineering; ResearcherID: ABZ-9286-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6066-2562*
Vaycheslav G. Kozlov[2], *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: G-9613-2017, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2571-8687*
Alexey V. Skrypnikov[1]✉, *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: AAE-8824-2019, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1073-9151*
Natalia G. Ponomareva[3], *Candidate of Engineering, Assoc.Prof.; ResearcherID: A-5693-2019, ORCID https://orcid.org/0000-0001-6210-5631*
Dmitry M. Levushkin[4], *Candidate of Engineering, Assoc.Prof.; ResearcherID: AAS-4522-2021, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4787-6371*
Yuriy A. Borovlev[1], *External PhD Student; ResearcherID: HCH-1952-2022, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3702-6194*

[1]Voronezh State University of Engineering Technologies, prosp. Revolyutsii, 19, Voronezh, 394036, Russian Federation; volodayprokopec@yandex.ru, skrypnikovvsafe@mail.ru✉, borovlevyury@ya.ru
[2]Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, ul. Michurina, 1, Voronezh, 394087, Russian Federation; vya-kozlov@yandex.ru
[3]Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberzhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; n.ponomareva@narfu.ru
[4]Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University (National Research University), ul. Pervaya Institutskaya, 1, Mytishchi, 141005, Russian Federation; levushkin@mgul.ac.ru

Received on January 13, 2022 / Approved after reviewing on April 19, 2022 / Accepted on April 21, 2022

Abstract. The currently available methods for evaluating technical-operational characteristics and conditions of hauling roads are time-consuming. Although, they provide a sufficiently accurate description of the conditions of certain road components. Furthermore, they give the possibilities to identify ways for elimination of the constructional defects and determine the work extent to correct them. A peculiarity of forestry production is the simultaneous exploitation of a branching transport network with different types of subsidiary hauling roads, which depends on weather conditions, change of logging locations, traffic intensity, and other factors. Therefore, the available methods, which clarify the relationships between the traffic resistance and strength of the road construction, are poorly usable for rapid estimation of the technical and operational conditions in renovation planning. The purpose of the study is to improve the methodological fundamentals of traction-operational calculations for timber transportation according to the constructional state of the hauling roads. It has been determined that the calculation of the rolling resistance must include the factor of structural deformation. It is influenced by the modulus of elasticity for the surface structural materials. The resulting relationship makes it possible to increase the accuracy of traction-operational calculations at the project phase of the hauling road building. It can be included into the target function for comparing alternatives in the case of optional project planning. The mathematical aspect in the evaluation of the traffic resistance gives an opportunity to use this parameter as an indirect characteristic of the constructional strength of a road, as well as it can be a comprehensive qualitative indicator of the condition of a pavement.
Keywords: trafic resistance, rolling resistance, strength of pavement, road component, load of road structure, hauling roads, traction-operational calculations for timber transportation

For citation: Prokopets V.S., Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Ponomareva N.G., Levushkin D.M., Borovlev Yu.A. Mathematical Justification of Vehicular Traffic Resistance in Relation to Structural Surface Conditions of Hauling Roads. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 106−120. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-106-120

Введение

Отличительной особенностью лесозаготовительного производства является одновременное использование разветвленной сети дорог различных категорий с эксплуатационными характеристиками, меняющимися в зависимости от погодных условий, передислокации мест рубок, интенсивности движения и других факторов. Поэтому разработанные в настоящее время методы и критерии оценки технико-эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог, хотя и позволяют с достаточной точностью охарактеризовать состояние отдельных элементов дороги, наметить пути устранения выявленных неисправностей и определить объемы работ по их устранению, оказываются малопригодными для оперативной оценки состояния лесовозных дорог, являясь затратными по времени. Таким образом, исследования, направленные на разработку критериев и методов оперативной оценки состояния эксплуатируемых лесовозных дорог с целью планирования работ по их ремонту и текущему содержанию актуальны.

Вопросам влияния различных факторов на состояние транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог, в том числе сопротивлению качению, посвящены работы Кулона Ж.А., Горячкина В.П., Пинегина С.В., Бирули А.К., Говорущенко Н.Я., Курьянова В.К., Кондрашовой Е.В., Скрыпникова А.В. [2, 5, 6]. Изучением гистерезисных потерь в шинах занимались многие отечественные и зарубежные исследователи: Шелухин А.С., Омельянова А.Е., Вирабова Р.В., Петрушова В.А. и др. [1, 3, 14 и др.]; полученные зависимости описывают сопротивление качению в ведомом режиме с учетом проскальзывания в контакте. Уравнения, приведенные в работах Курьянова В.К., Сушкова С.И., Бурмистровой О.Н., достоверно отражают процессы, протекающие в дорожной конструкции, но малопригодны для практических расчетов. Коэффициенты, входящие в эти уравнения, должны быть константами грунта, т. е. величинами, не зависящими от размеров пятна контакта, нормальной нагрузки, скорости движения машины, а на самом деле такими не являются. Кроме того, отсутствует методика определения названных коэффициентов [4, 11, 13, 15].

Цель работы – совершенствование методологических основ тягово-эксплуатационных расчетов для лесотранспорта.

Установление зависимости сопротивления движению от прочности дорожной одежды, кроме повышения точности тягово-эксплуатационных расчетов, позволит использовать сопротивление движению в качестве косвенной характеристики прочности дорожной одежды.

Объекты и методы исследования

Рассмотрим дорожную конструкцию, загруженную равномерно распределенной по площади круга нагрузкой. Согласно теореме Клайперона, потенциальная энергия упругого тела, накапливаемая под действием внешних сил в единице объема, определяется выражением

$$d\Pi = \frac{1}{2} p\ell\omega d\rho, \tag{1}$$

где p – давление в центре элементарной площадки, МПа; ℓ – расстояние от центра загружения до центра элементарной площадки, м; ω – перемещение в центре элементарной площадки, м; $d\rho$ – радиус элементарной площадки, м.

Возьмем случай загрузки упругого полупространства нагрузкой, равномерно распределенной по площади круга радиусом R. Составим выражение для перемещения точки C, находящейся на поверхности ($Z = 0$), но в пределах загруженного круга ($\ell \le R$) (рис. 1). Проведем через точку C секущую MC и в бесконечной близости другую M_1C и рассмотрим прогиб точки C от нагрузки, расположенной на элементарной площадке шириной dS. Площадь элементарной площадки:

$$dF = Sd\varphi dS,$$

где S – расстояние от точки C до начала площадки, м; $d\varphi$ – угол между секущими MC и M_1C, …°.

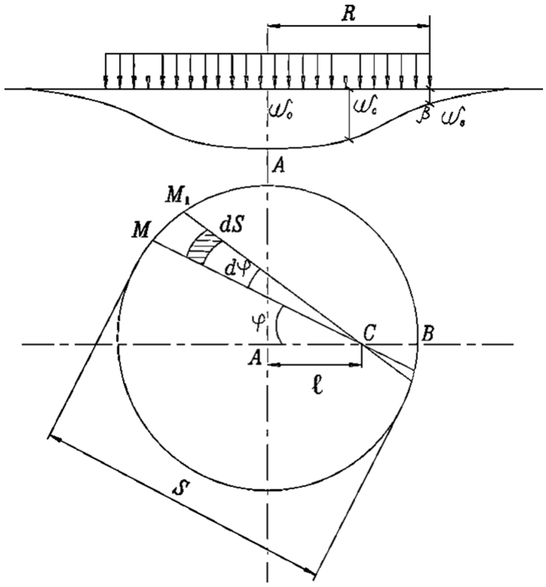

Рис. 1. Расчетная схема нагрузки дорожной конструкции

Fig 1. Computational scheme for the load applied on road structure

Нагрузка на площадку

$$dp = pdF = pSd\varphi dS.$$

От такой нагрузки точка C опускается на величину

$$d\omega = \frac{1-\mu^2}{\pi E}\, pdSd\varphi,$$

где μ – коэффициент трения; E – модуль упругости, МПа.

Полное перемещение точки C от всей нагрузки находится через интеграл:

$$\omega = \frac{1-\mu^2}{\pi E}\, p\int dS \int d\varphi.$$

Из рис. 1 видно, что интеграл, взятый по всей длине секущей, составит:

$$\int dS = \bar{S} = 2\sqrt{R^2 - \ell^2\sin^2\varphi\, d\varphi},$$

где R – радиус загруженной площадки, м; ℓ – расстояние от центра загруженной площадки до точки C, м.

Полное перемещение точки C

$$\omega_C = 4p\frac{\left(1-\mu^2\right)}{\pi E}\int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{R^2 - \ell^2\sin^2\varphi\, d\varphi}. \qquad (2)$$

Перемещение в центре загруженной площадки при $\ell = 0$:

$$\omega_0 = \frac{2\left(1-\mu^2\right)}{E}\, pR.$$

Перемещение на краю загруженной площадки при $\ell = R$:

$$\omega_R = \frac{4\left(1-\mu^2\right)}{E}\, pR = \frac{2}{\pi}\,\omega_0.$$

Выражение (2) представляет собой уравнение перемещения точки, лежащей в пределах загруженного круга. Перемещения могут быть вычислены с помощью таблиц эллиптических интегралов.

Для упрощения решения аппроксимируем кривую AB кривой второго порядка:

$$\omega = a\ell^2 + b\ell + c,$$

где a, b, c – коэффициенты корреляции.

Для вычисления коэффициентов корреляции составим систему уравнений, исходя из граничных условий:

$$\begin{cases} \omega = a\ell^2 + b\ell + c = \omega_0, \ \ \ell = 0; \\ \dfrac{d\omega}{d\ell} = 2a\ell + b = 0, \ \ell = 0; \\ \omega = a\ell^2 + b\ell + c = \dfrac{2}{\pi}\omega_0, \ \ell = R. \end{cases}$$

Решая систему уравнений, получим:

$$\begin{cases} a = \left(\dfrac{2}{\pi} - 1\right)\dfrac{\omega_0}{R^2}; \\ b = 0; \\ c = \omega_0. \end{cases}$$

Подставим коэффициенты в общее уравнение кривой:

$$\omega = \left[1 + \left(\frac{2}{\pi} - 1\right)\frac{\ell^2}{R^2}\right]\omega_0, \text{ при } \ell \le R.$$

Уравнение кривой подставим в выражение (2) и проинтегрируем:

$$\Pi_1 = \frac{1}{2}\int_0^R p\omega 2\pi\ell d\ell \approx 1{,}2853 p\omega_0 R^2.$$

Данное выражение определяет полную энергию деформации, накапливаемую цилиндром с радиусом основания, равным R. Однако под действием распределенной нагрузки деформации распространяются и за пределы загруженной площадки. Согласно [4, 10, 11], эти деформации могут быть определены следующим образом:

$$\omega = \frac{\left(1 - \mu^2\right)pR^2}{\pi E\ell}, \text{ при } \ell > R,$$

где p – давление, МПа; R – радиус загруженной площадки, м; ℓ – расстояние от центра загружения до рассматриваемой точки, м.

Подставим это выражение в выражение (1) и проинтегрируем:

$$\Pi_2 = \frac{1}{2}\int_R^\infty \ell\omega 2\pi\ell d\ell.$$

После интегрирования и с учетом того, что на расстоянии от центра загружения, равном 3 диаметрам штампа, деформации равны нулю, получим:

$$\Pi_2 = \frac{p^2\pi R^2\left(1 - \mu^2\right)}{E}\ell\,\Big|_R^{6R} = \frac{5p^2\pi R^3}{E}\left(1 - \mu^2\right).$$

Полная энергия, накапливаемая в полупространстве,

$$\Pi_0 = \Pi_1 + \Pi_2 = 18{,}2786 \cdot \frac{p^2 R^3\left(1 - \mu^2\right)}{E}. \tag{3}$$

Часть энергии, накапливаемой в упругом полупространстве, восстанавливается после снятия нагрузки, поэтому для нахождения фактических затрат энергии в выражение (3) необходимо ввести коэффициент $k_э < 1$, зависящий от внутреннего трения в материале конструкции и учитывающий вязкие деформации:

$$\Pi_ф = 18{,}2786 \cdot \frac{p^2 R^3 \left(1-\mu^2\right)}{E} k_э.$$

Данное выражение определяет долю энергии деформации, рассеиваемую в дорожной конструкции после снятия нагрузки.

Для нахождения работы, которую совершает колесо на участке дороги, разобьем загруженную площадку на элементарные участки шириной dl и рассчитаем работу, выполняемую колесом на деформацию этой полоски (рис. 2, 3).

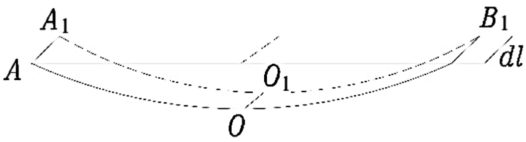

Рис. 2. Расчетная схема для вычисления коэффициента сопротивления движению
Fig. 2. Calculation scheme for estimation of the traffic resistance coefficient

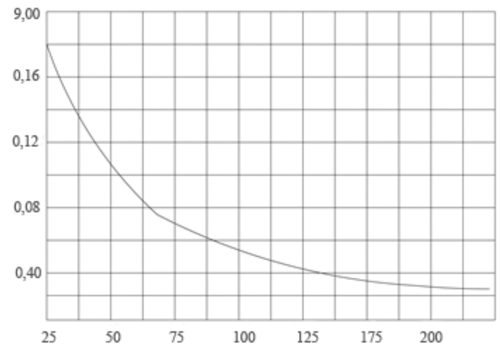

Рис. 3. Зависимость составляющей сопротивления движению, обусловленной прочностью дорожной конструкции, от модуля упругости, МПа
Fig. 3. Dependence between the traffic resistance and the strength of road construction, MPa

Эта работа определяется:

$$dA = \frac{1}{2} p dV, \tag{4}$$

где dV – объем элементарной полоски, м^3.

Объем dV находится из выражения

$$dV = \int_{-R}^{R} \omega_{\ell<R} d\ell dl + 2\int_{R}^{6R} \omega_{\ell>R} d\ell dl.$$

После интегрирования и упрощения получим:

$$dV = \frac{pR^2}{E}\left(1-\mu^2\right)\left[2\left(\ln 6R - \ln R\right) + 1{,}9702\right] dl.$$

Подставляем это выражение в выражение (4) и интегрируем его с учетом коэффициента $k_э$:

$$A_ф = \frac{1}{2}\int_0^l \frac{p^2 R^2 k_э}{E}\left(1-\mu^2\right)\left[2\left(\ln 6R - \ln R\right) + 1{,}9702\right] dl.$$

Данное неравенство определяет работу, которую совершает колесо автопоезда на участке дороги длиной dl. Разделив результат вычисления по этому выражению на величину нагрузки на колесо и на пройденный путь, получим коэффициент сопротивления движению за счет деформации дорожной конструкции:

$$f_g = \frac{A_ф}{\ell G_k} = 5{,}537 \cdot \frac{p^2 R^2 k_э}{E G_k}\left(\ell - \mu^2\right),$$

где G_k – вертикальная нагрузка на покрытие, Н.

С учетом того, что

$$p = \frac{G_k}{\pi R^2}$$

получим:

$$f_g = 5{,}5537 \cdot \frac{G_k k_э}{\pi^2 R^2 E}\left(1 - \mu^2\right).$$

Коэффициент $k_э$ зависит от свойств материала дорожной конструкции, показывая, какая часть энергии упругой деформации поглощается материалом конструкции после снятия нагрузки.

В реальных условиях наблюдаются необратимые потери энергии в грунтах при снятии нагрузки вследствие затрат энергии: 1) на преодоление сил внутреннего неупругого сопротивления; 2) на рассеивание энергии за счет геометрического расхождения колебательных процессов, вызванных воздействием подвижной нагрузки; 3) на необратимые (пластические) деформации изменения объема и сдвига грунта.

В дорожной конструкции вследствие ее работы в стадии упруго-вязких деформаций преобладают потери энергии 2 первых видов, которые не приводят к образованию в грунте существенных необратимых деформаций и могут быть охарактеризованы различными моделями сплошной неидеально-упругой среды. Одной из моделей наиболее точно и просто описывающих упруго-вязкие деформации может служить модель, состоящая из последовательно-соединенных упругого и упруго-вязкого элементов, так называемая модель типичного тела (рис. 4).

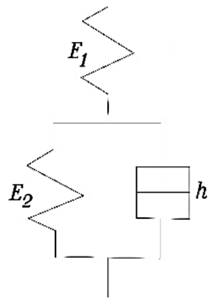

Рис. 4. Расчетная модель дорожной конструкции: E_1 – динамический модуль упругости, МПа; E_2 – статический модуль упругости, МПа

Fig. 4. Computational model for road structure: E_1 – dynamic modulus of elasticity, MPa; E_2 – static modulus of elasticity, MPa

Результаты исследования и их обсуждение

Существуют и другие, более сложные модели, состоящие из большого количества простейших элементов. Однако эти модели не получили практического применения для решения задач о рассеивании энергии при колебаниях систем с внутренним трением ввиду сложности и существенной зависимости расчетных потерь энергии от скорости нагружения и разгружения, что находится в противоречии с данными исследований [1, 3, 9].

При мгновенном сжатии среды, свойства которой соответствуют модели, представленной на рис. 4, среду можно рассматривать как линейно-деформируемое тело, подчиняющееся закону Гука:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1},$$

где ε_1 – перемещение границы среды; σ_1 – напряжение на поверхности среды, Н.

Если нагрузка сохраняет свое действие при $t \to \infty$ (t – время), тогда полная деформация определится выражением

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \sigma\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right) = \frac{\sigma}{E_{\text{ст}}},$$

где $E_{\text{ст}}$ – статический модуль упругости, МПа.

Для рассматриваемой модели среды справедливы системы уравнений:

$$\begin{cases} \sigma_h + \sigma_{y_2} = \sigma; \\ \sigma_{y_1} = \sigma \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} \varepsilon_h = \varepsilon y_2; \\ \varepsilon_{y_1} + \varepsilon_{y_2} = \varepsilon. \end{cases}$$

В них напряжения и деформации простейших элементов определяются зависимостями:

$$\sigma + n\frac{d\sigma}{dt} = E_{\text{ст}}\varepsilon + nE_g\frac{d\sigma}{dt} \ \text{и} \ E_{\text{ст}} = \frac{E_1 E_2}{E_1 + E_2},$$

где n – число простейших элементов; $E_g = E_1$.

Последнее уравнение полностью определяет поведение среды в случае одноосного деформированного состояния. В данное уравнение входят 3 постоянные величины: статический и динамический модули упругости и коэффициент неупругого сопротивления h, – которые для каждой реальной среды должны устанавливаться экспериментально.

В обобщенной среде существуют 2 предельных значения деформаций: наименьшая при $\frac{d\varepsilon}{dt} \to \infty$ (короткий импульс) и наибольшая при $\frac{d\varepsilon}{dt} \to 0$ (статическое нагружение).

Для такого рода сред существуют 2 предельные диаграммы сжатия: динамическая и статическая. В интервале между этими диаграммами есть семейство кривых сжатия, соответствующих различным скоростям деформации: $0 \le \frac{d\varepsilon}{dt} \le \infty$.

Для тел, свойства которых характеризуются моделями, подобными представленной на рис. 4, площадь петли гистерезиса, а следовательно, и потери энергии за один цикл нагружения не зависят от скорости нагружения и разгружения, а зависят только от амплитуды деформации [6, 13–20]. Точную формулу петли гистерезиса в экспериментах сложно установить, так как расстояния между ветвями весьма малы. В то же время площадь петли гистерезиса довольно надежно может быть определена по формуле

$$\Delta\Pi = \alpha A^{n+1},$$

где α – амплитуда деформации; A, n – постоянные для данного материала величины, характеризующие его свойства.

Численное определение потерь энергии по данной формуле затруднено в связи с тем, что входящие в нее константы в каждом отдельном случае требуется устанавливать экспериментально. По выражению можно рассчитать потери энергии за один цикл нагружения или за один период колебаний конструкции. Так как в начале и в конце рассматриваемого периода кинетическая энергия конструкции равна нулю, то изменения полной энергии системы определяются изменением потенциальной энергии П. При вычислении этого изменения необходимо учесть разницу между наибольшими отклонениями, которые условно называются амплитудами.

Потенциальная энергия в начале периода равна:

$$\Pi_i = \frac{cA_i^2}{2};$$

в конце периода –

$$\Pi_{i+1} = \frac{cA_{i+1}^2}{2};$$

изменение потенциальной энергии –

$$\Delta\Pi = \frac{c}{2}\left(A_i^2 - A_{i+1}^2\right),$$

где c – характеристика жесткости дорожной конструкции; A_i, A_{i+1} – амплитуда колебаний в начале и в конце рассматриваемого периода соответственно.

Для систем с вязким трением убывание амплитуд колебаний проходит по экспериментальному закону (рис. 5):

$$A = A_0 \mathrm{e}^{-\Pi_z t}\left(\sin\omega t + \varphi_0\right), \tag{5}$$

где Π_z – коэффициент затухания колебаний.

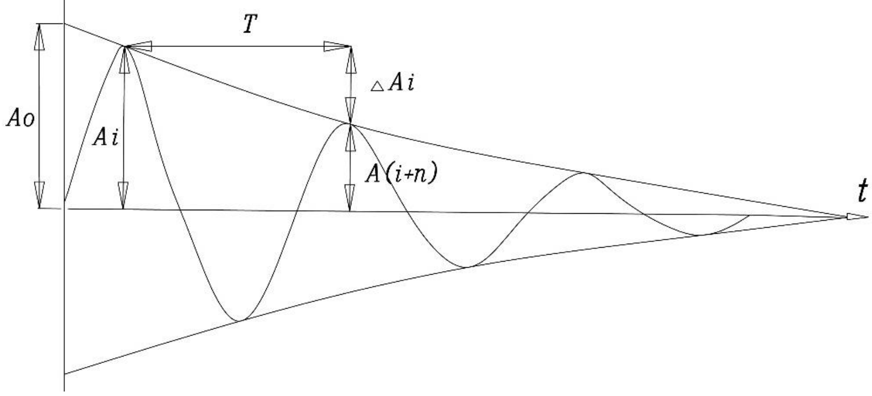

Рис. 5. Затухание колебаний для систем, обладающих внутренним неупругим сопротивлением (T – период колебаний, с)
Fig. 5. Damping of oscillations for systems with internal inelastic resistance (T – oscillation period, s)

Огибающие кривой процесса в данном случае определяются функциями

$$\text{У} = \pm\text{У}_0 \mathrm{e}^{-\Pi_z t}.$$

Отношение амплитуд колебаний в начале и конце периода, согласно формуле (5), является постоянной величиной для данного колебательного процесса (рис. 5):

$$\frac{A_i}{A_{i+1}} = \mathrm{e}^{\Pi_z T}.$$

С учетом этого количество энергии рассеиваемой за один цикл или за один период колебаний

$$\Delta\Pi = \frac{cA_{i+1}^2}{2}(1 - \mathrm{e}^{-2\Pi_z T}).$$

Отношение потерь энергии за один цикл или один период нагружения к потенциальной энергии системы в начале периода определяет коэффициент рассеивания энергии

$$k_э = \frac{\Delta\Pi}{\Pi_i} = 1 - \mathrm{e}^{-2\Pi_z T}. \tag{6}$$

Коэффициент затухания n_z связан с коэффициентом вязкого сопротивления h и модулем затухания Φ_z соотношением

$$n_z = \frac{h}{2m} = \frac{\Phi_z \omega^z}{2}, \tag{7}$$

где m – колебательная масса конструкции, кг; ω – круговая частота собственных колебаний, с$^{-1}$.

Модуль затухания Φ_z, входящий в это выражение, является для данного материала постоянной величиной, характеризующей его демпфирующие свойства.

Согласно исследованиям отечественных ученых [7, 8, 12], модуль затухания зависит от влажности материала, плотности и условий залегания, типа материала. Коэффициенты затухания для разных грунтов следующие:

Крупные и средней крупности пески……………………………….....0,005/0,007
Мелкие и мелкие пылеватые пески……………………………………0,007/0,010
Твердые мореные супеси и суглинки …………………………………0,005/0,006
Глинистые плотные грунты……………………………………………0,004/0,006
Рыхлые супеси……………………………………………………………0,006/0,008
Слабые и в насыпи суглинки и глины………………………………………..0,011
Водонасыщенные и влажные глинистые грунты……………………………0,005

Колебательная масса дорожной конструкции зависит от плотности материала конструкции и радиуса штампа и может быть определена по формуле

$$m_{гр} = 0,4\rho\pi R^3, \tag{8}$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3; R – радиус подошвы штампа, м.

Полная масса, участвующая в колебаниях, складывается из массы грунта и массы штампа с грузом:

$$m = m_{гр} + m_{шт}. \tag{9}$$

Круговая частота собственных колебаний системы «дорожная конструкция – штамп с грузом» определится по формуле

$$\omega_z = \sqrt{\frac{C_z F}{m}}, \tag{10}$$

где C_z – упругое равномерное сжатие, Н/м^3; F – площадь подошвы штампа, м^2.

Упругое равномерное сжатие связано со статическим модулем упругости и площадью штампа следующим соотношением:

$$C_z = 0{,}885 \cdot \frac{E}{\left(1-\mu^2\right)} \frac{1}{\sqrt{F}}. \qquad (11)$$

Период колебаний дорожной конструкции определится по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{C_z F}{m}}. \qquad (12)$$

Подставив выражения (8)–(11) в выражение (7), получим:

$$\Pi_z = \frac{\Phi_z \cdot 0{,}885 E \sqrt{F}}{\left(1-\mu^2\right) m}. \qquad (13)$$

По данной формуле может быть вычислено значение коэффициента затухания колебаний Π_z, входящего в выражение (6), для определения коэффициента рассеивания энергии.

Неизвестным в данном случае является период колебаний дорожной конструкции. Согласно исследованиям отечественных ученых [2, 5, 6], он изменяется от 0,022 до 0,059 с в зависимости от условий проведения опыта. Данные, полученные для песков и глинистых грунтов в условиях естественного залегания, приведены в таблице.

Значения амплитуды колебаний, коэффициента затухания и декремента затухания

The values for oscillation amplitude, damping coefficient and damping degeneracy

Грунт	Двойная амплитуда A_i, мкм	Декремент затухания	Коэффициент затухания $n_z = \Delta/T$	Темп затухания A_i / A_{i+1}
Песок	11–405	1,583–1,758	39,0	4,98–5,80
Глина	20–205	0,330	10,7	1,39

Анализ выражения (13) и предположения о зависимости коэффициента рассеивания энергии только от амплитуды деформации и независимости коэффициента от скорости нагружения позволяют установить, что основными факторами, определяющими величину вязкого сопротивления среды, а следовательно, и коэффициент рассеивания энергии, являются деформативные свойства дорожной конструкции и плотность материала покрытия.

Основными факторами, влияющими на деформативные свойства дорожной конструкции и плотность материала покрытия, становятся влажность материала и толщина дорожного покрытия.

Можно сделать вывод о возможности использования коэффициента рассеивания энергии в качестве характеристики прочностных свойств дорожной конструкции. Несмотря на простоту расчета коэффициента рассеивания энергии по зависимостям (7)–(13), его точное значение трудно определить теоретически.

Приведенные в литературе данные о значениях коэффициента затухания колебаний, модуля затухания и периода колебаний свидетельствуют, что эти показатели во многом обуславливаются видом материала покрытия, типом покрытия (жесткое, полужесткое, нежесткое), влажностью и плотностью материалов и модулем упругости дорожной конструкции.

В результате исследований установлена функциональная связь между частотой колебаний дорожной конструкции и ее модулем упругости, что позволяет сделать заключение о существовании подобной связи между модулем упругости и коэффициентом затухания колебаний. Для установления функциональной зависимости между модулем упругости и коэффициентом затухания колебаний необходимо провести дополнительные исследования по изучению характера этих зависимостей.

Выводы

1. При расчете сопротивления качению необходимо учитывать его составляющую, обусловленную деформацией конструкции. Величина этой составляющей зависит от модуля упругости дорожной конструкции.

2. Получена зависимость составляющей сопротивления качению, обусловленной деформацией дорожной конструкции. Эта зависимость позволяет повысить точность тягово-эксплуатационных расчетов для лесотранспорта на стадии проектирования лесовозной автомобильной дороги и может быть использована в целевой функции при вариантном проектировании.

3. Представлены коэффициенты рассеивания энергии, требующие уточнения в зависимости от модуля упругости дорожной конструкции.

4. Разработана и уточнена математическая зависимость составляющей сопротивления движению от прочности дорожной конструкции, позволяющая использовать сопротивление движению как косвенную характеристику прочности дорожной конструкции, а также как комплексный качественный показатель состояния проезжей части дороги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Автомобильные дороги: безопасность, экологические проблемы, экономика (российско-германский опыт) / под ред. В.Н. Луканина, К.-Х. Ленца. М.: Логос, 2002. 607 с.

Highways: Safety, Environmental Challenges, Economics (Russian-German Experience). Ed. by V.N. Lukanina, K.-X. Lentsa. Moscow, Logos Publ., 2002, 607 p. (In Russ.).

2. *Бируля А.К.* Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1966. 326 с.

Birulya A.K. *Operation of Roads*. Moscow, Transport Publ., 1966. 326 p. (In Russ.).

3. *Буслаев А.П., Кузьмин Д.М.* К вопросу об интеллектуальных системах в дорожном движении // Наука и техника в дорожной отрасли. 2006. № 2. С. 33–40.

Buslayev A.P., Kuzmin D.M. On the Issue of Intelligent Systems in Highway Traffic. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli* = Advanced Science and Technology for Highways, 2006, no. 2. pp. 33–40.

4. *Васильев А.П., Дингес Э.В., Коганзон М.С. и др.* Справочная энциклопедия дорожника. Т. 2: Ремонт и содержание автомобильных дорог / под ред. А.П. Васильева. М.: Информавтодор, 2004. 507 с.

Vasilyev A.P., Dinges E.V., Koganzon M.S. et al. *Reference Encyclopedia for Road-Worker. Vol. 2: Renovation and Maintenance of Highways*. Ed. by A.P. Vasilyev. Moscow, Informavtodor Publ., 2004. 507 p. (In Russ.).

5. *Дрю Д.Р.* Теория транспортных потоков и управление ими. М.: Транспорт, 1972. 424 с.

Dryu D.R. *Theory of Traffic Flows and Their Management*. Moscow, Transport Publ., 1972. 424 p. (In Russ.).

6. *Иванов В.Н., Ерохов В.Н.* Влияние параметров автомобильных дорог на расход топлива // Автомобильные дороги. 2014. № 8. С. 10–13.

Ivanov V.N., Erokhov V.N. Road Parameters Influence on Fuel Consumption. *Avtomobil'nyye dorogi*, 2014. no. 8. pp. 10–13. (In Russ.).

7. *Калужский Я.А., Бегма И.В., Кисляков В.М., Филиппов В.В.* Применение теории массового обслуживания в проектировании автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1969. 136 с.

Kaluzhskiy Ya.A., Begma I.V., Kislyakov V.M., Filippov V.V. *Application of Public Service Theory to Road's Projecting*. Moscow, Transport Publ., 1969. 136 p. (In Russ.).

8. *Кондрашова Е.В., Скворцова Т.В.* Совершенствование организации дорожного движения в транспортных системах лесного комплекса // Системы управления и информационные технологии. 2008. № 3-2(33). С. 272–275.

Kondrashova E.V., Skvortsova T.V. Improvement of Road Traffic Organization in the Forest Complex Transport Systems. *Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii* = Automation and Remote Control, 2008, no. 3-2(33), pp. 272–275. (In Russ.).

9. *Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б.* Технические средства организации дорожного движения. М.: Академкнига, 2005. 279 с.

Kremenets Yu.A., Pecherskiy M.P., Afanasyev M.B. *Technical Equipment for Road Traffic Administration*. Moscow, Akademkniga Publ., 2005. 279 p. (In Russ.).

10. *Луканин В.Н.*, *Буслаев А.П.*, *Яшина М.В.* Автотранспортные потоки и окружающая среда. М.: Инфра-М, 2001. 646 с.

Lukanin V.N., Buslayev A.P., Yashina M.V. Traffic Flows and Environment. Moscow, Infra-M Publ., 2001. 646 p. (In Russ.).

11. *Мытько Л.Р.* Оценка транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильных дорог. Минск: Вуз-Юнити, 2001. 199 с.

Mytko L.R. *Evaluation of Transport-Operational Characteristics of Highways*. Minsk, Vuz-Yuniti Publ., 2001. 199 p. (In Russ.).

12. *Сильянов В.В., Ситников Ю.М.* Расчет скоростей движения при проектировании автомобильных дорог // Тр. МАДИ. 1974. Вып. 72. С. 47–66.

Silyanov V.V., Sitnikov Yu.M. Calculation of Driving Speed in Road Design. *Sbornik nauchnykh trudov of MADI*, 1974, vol. 72, pp. 47–66. (In Russ.).

13. *Скворцов А.В.*, *Поспелов П.И.*, *Котов А.А.* Геоинформатика в дорожной отрасли. М.: МАДИ (ГТУ), 2005. 250 с.

Skvortsov A.V., Pospelov P.I., Kotov A.A. *Geoinformatics in the Transport Sector*. Moscow, MADI (GTU) Publ., 2005. 250 p. (In Russ.).

14. *Хомяк Я.В.* Проектирование сетей автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1983. 207 с.

Khomyak Ya.V. *Designing Road Networks*. Moscow, Transport Publ., 1983. 207 p. (In Russ.).

15. *Эльвик Р., Мюсен А.Б., Ваа Т.* Справочник по безопасности дорожного движения: пер. с норв. / под ред. В.В. Сильянова. М.: МАДИ (ГТУ), 2001. 754 с.

Elvik R., Myusen A.B., Vaa T. *Handbook of Road Safety*. Moscow, MADI (GTU) Publ., 2001. 754 p. (In Russ.).

16. Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Teterevleva E.V., Burmistrov V.A., Mikheevskaya M.A., Chemshikova Y.M. Algorithm for Determining the Curvature of the Project Line of a Truck Haul Road and the Rate of Change in Its Curvature. *Civil Engineering and Architecture*, 2021, vol. 9, no. 5, pp. 1582–1589. https://doi.org/10.13189/cea.2021.090528

17. Borovlev A.O., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Zelikov V.A., Pilyushina G.A., Burmistrov V.A., Kazachek M.N. Intelligent Design System for Logging Truck Roads. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2021, vol. 69, no. 8, pp. 89–95. https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I8P211

18. Nikitin V.V., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Bryukhovetsky A.N., Manukovsky A.Y., Vysotskaya I.A., Sapelkin R.S. A Linear Model of the Forest Transport Network and an Algorithm for Assessing the Influence of the Density of Points and the Length of Links in Developing Multi-Forested Areas. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 2021, vol. 69, no. 12, pp. 175–178. https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V69I12P220

19. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Samtsov V.V., Nikitin V.V., Denisenko V.V., Boltnev D.E. Theoretical Background of Road Landscape Zoning. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 659, no. 1, art. 012011. https://doi.org/10.1088/1755-1315/659/1/012011

20. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Levushkin D.M., Nikitin V.V., Mogutnov R.V., Sokol P.A. Feasibility Study of Geometrical Parameters of Wood Transportation Roads Including Prediction of Optimum Terms of Construction and Retrofitting Sequence. *Civil Engineering and Architecture*, 2021, vol. 9, no. 6, pp. 2077–2083. https://doi.org/10.13189/cea.2021.090635

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article