

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Ю.А. Боровлев¹, Д.Г. Козлов^{2✉}, А.В. Скрыпников³,
А.С. Сергеев⁴, А.А. Яровенко³

¹ФГКВОУ ВПО «Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил» «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54 а

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1

³ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», 394036, Россия, г. Воронеж, пр-т Революции, д. 19

⁴ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29

dimvsau@mail.ru

Приведены материалы комплексного исследования параметров уплотнения грунта при строительстве лесных дорог на основе корреляционных данных между движителями агрегата и уплотняемым слоем, дающие возможность определять деформацию этих систем в качестве основы для управления процессом уплотнения при формировании дорожного полотна. Статья представляет собой комплексное исследование по контролю параметров уплотнения грунта при строительстве лесных дорог. Основное внимание в статье уделено корреляция между пневматическими шинами и уплотненным слоем почвы, который вызывает деформации обоих материалов. Степень этих деформаций, обеспечивается как механическими, так и физическими силами, действующими на объекты, чтобы определить деформации, а также природу и интенсивность физических и механических свойств материала, взаимодействующих тел. Выполнены анализ двух схем деформации пневматических шин, составляющих основу управления уплотнением и анализ процесса уплотнения почвы пневматическими шинами как при постоянном, так и при переменном давлении воздуха в шине и деформации шины и слоя почвы, изменяющегося при каждом прохождении шины. Доказан логарифмический характер зависимости деформации уплотненного слоя и насыпного веса почвенного каркаса от количества пневматических проходов. Получены аналитические зависимости, описывающие процесс взаимодействия двух тел, находящихся в контакте, что может применяться для мониторинга уплотнения грунтов. Предложен способ измерения радиальной деформации пневматической шины, в котором предусмотрено дополнительное определение механических характеристик с использованием ускоренных методов. Предложенный подход создает новые возможности для автоматизации мониторинга уплотнения почвы, что существенно улучшает качество земляных работ и может способствовать совершенствованию методов контроля и эффективности строительства лесных дорог.

Ключевые слова: уплотненный слой, плотность грунта, деформация почвы, сопротивление качению, прочностные характеристики грунтов

Ссылка для цитирования: Боровлев Ю.А., Козлов Д.Г., Скрыпников А.В., Сергеев А.С., Яровенко А.А. Контроль параметров процесса уплотнения грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 4. С. 139–155.
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-139-155

Успешность лесной отрасли тесно связана с развитостью системы лесовозных путей, поскольку ею определяются возможности доставки древесины конечному потребителю. Анализ характеристик лесных дорог, включая их тип, качество и текущее состояние, позволяет лесным хозяйствам прогнозировать их дальнейшую эксплуатацию в целях планирования объемов вырубki и роста прибыльности.

Наличие детальной информации о состоянии лесовозных путей позволяет оптимизировать логистику, сократить время и затраты на транспортировку древесины. Своевременное выявление участков, требующих ремонта или реконструкции, предотвращает возникновение аварийных ситуаций и обеспечивает бесперебойную работу лесозаготовительной техники. Кроме того, развитая сеть лесных дорог способствует более эффективному управлению лесными ресурсами в целом, обеспечивает доступ к отдаленным участкам леса для проведе-

ния лесовосстановительных работ, санитарных рубок и других мероприятий по уходу за лесом.

Инвестиции в развитие и поддержание лесовозных путей — это вклад в устойчивое развитие лесной отрасли. Качественная инфраструктура не только повышает рентабельность лесозаготовок, но и способствует сохранению экологического баланса лесных территорий.

Таким образом, комплексный подход к планированию и эксплуатации лесных дорог, основанный на анализе их характеристик и прогнозировании будущих потребностей, является ключевым фактором успешного функционирования лесного хозяйства [1–8].

Основой любой лесовозной автомобильной дороги служит земляное полотно. Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что эксплуатационные характеристики как дорожного покрытия, так и всей дорожной конструкции напрямую зависят от комплекса свойств, определяющих устойчивость, надежность и срок службы этого основания.

Долговечность и прочность лесовозной дороги определяются качеством земляного полотна, что подтверждает множество научных работ. Выступая в роли несущей конструкции, полотно обеспечивает стабильность дорожной одежды и всей инженерной системы в целом.

Ключевым фактором обеспечения требуемых характеристик земляного полотна является его правильное проектирование и возведение. Необходимо учитывать геологические и гидрологические условия местности, тип грунтов, глубину залегания грунтовых вод и другие параметры. Ошибки, допущенные на этапе проектирования, могут привести к деформациям, просадкам и разрушению дорожного полотна в процессе эксплуатации.

Особое внимание следует уделять уплотнению грунта при строительстве земляного полотна. Недостаточное уплотнение приводит к снижению несущей способности и увеличению деформаций под воздействием нагрузок от лесовозного транспорта. Использование современных технологий и оборудования для уплотнения грунта позволяет значительно повысить качество земляного полотна и продлить срок его службы.

Для повышения устойчивости земляного полотна на сложных участках трассы применяют различные методы укрепления грунтов, в частности использование геосинтетических материалов, химическое закрепление грунтов, армирование и др. Выбор метода укрепления зависит от конкретных условий и требований к дорожной конструкции.

Регулярный мониторинг состояния земляного полотна и своевременное проведение ре-

монтных работ позволяют поддерживать его эксплуатационные характеристики на должном уровне. Необходимо контролировать уровень грунтовых вод, наличие деформаций и трещин, а также состояние дренажной системы. Предотвращение развития дефектов на ранних стадиях позволяет избежать дорогостоящих ремонтов и обеспечить безопасную эксплуатацию лесовозной дороги [9–14].

Сегодня существует несколько методик, предназначенных для оценки состояния лесовозных дорог в процессе эксплуатации. Каждый из этих методов предполагает анализ широкого спектра параметров и использует различные подходы к определению состояния дорожного покрытия. Они также учитывают особенности подготовки основания для укладки дорожной одежды.

Вместе с тем каждый метод имеет свои сильные и слабые стороны. Это разнообразие усложняет процесс работы и может оказывать влияние на точность и надежность оценки. Вследствие этого выбор оптимальной методики становится непростой задачей, требующей тщательного анализа и учета конкретных условий эксплуатации.

В связи с этим возникает необходимость в разработке унифицированной методики, которая бы аккумулировала лучшие результаты из практики существующих подходов. Такая методика должна быть гибкой, адаптируемой к различным условиям эксплуатации и обеспечивающей высокую степень достоверности результатов. Важно, чтобы она учитывала не только текущее состояние дорожного покрытия, но и прогнозировала его изменения в будущем, что позволит своевременно планировать ремонтные работы и избежать серьезных повреждений.

В процессе разработки унифицированной методики необходимо учитывать экономическую целесообразность ее применения. Затраты на проведение оценки не должны превышать выгоду от своевременного выявления дефектов и планирования ремонтных работ. Также важно, чтобы методика была простой в использовании и не требовала привлечения высококвалифицированных специалистов.

Ключевым аспектом при выборе или разработке методики является учет специфики лесовозных дорог, подвергающихся интенсивным нагрузкам от тяжелой техники и воздействию неблагоприятных климатических факторов, поэтому методика должна предусматривать устойчивость к этим воздействиям и обеспечивать надежную оценку состояния дорожного покрытия в течение всего срока эксплуатации.

В конечном итоге выбор оптимальной методики оценки состояния лесовозных дорог — это сложный и емкий процесс, требующий глубокого анализа известных к настоящему времени подходов, учета конкретных условий эксплуатации и экономической целесообразности применения. Только таким образом можно обеспечить эффективное управление состоянием дорожной сети и минимизировать затраты на ее содержание [15–25].

Цель работы

Цель работы — проведение анализа параметров уплотнения грунта при строительстве лесных дорог, в зависимости от изменения давления воздуха в шине, которое влияет непосредственно на процесс уплотнения грунта и является основополагающим фактором контроля эффективности строительных процессов.

Материалы и методы

Анализ расчетных схем взаимодействия пневматических колес с поверхностью качения, приведенный ранее [6, 10], позволил составить классификацию расчетных схем и показать область их применения. Наиболее распространена расчетная схема пневматик — как безмоментная оболочка, поэтому она принята для дальнейших исследований [26–29].

Пневматическое колесо представляется как безмоментная оболочка. После рассмотрения системы сил, действующих на участок оболочки в зоне контакта с грунтом, было составлено общее уравнение деформирования (рис. 1) в виде

$$-\frac{N}{R^2} \cdot \frac{d^2\omega}{d\varphi^2} + K\omega + P_b - q = 0, \quad (1)$$

- где N — растягивающее усилие в оболочке;
- R — радиус оболочки; ω — радиальная деформация оболочки;
- φ — угол от вертикальной оси, проходящей через центр оболочки, до элементарного объема;
- P_b — давление воздуха в шине;
- K — коэффициент жесткости оболочки;
- q — реакция опорной поверхности.

Силу q , с которой поверхность дороги воздействует на колесо, можно описать по-разному. Применяемые ранее формулы, описывающие эту силу, предполагали, что колесо и поверхность взаимодействуют статически, т. е. если бы колесо было неподвижным или медленно двигалось. Однако для пневматических колес на высокой скорости оно неприменимо.

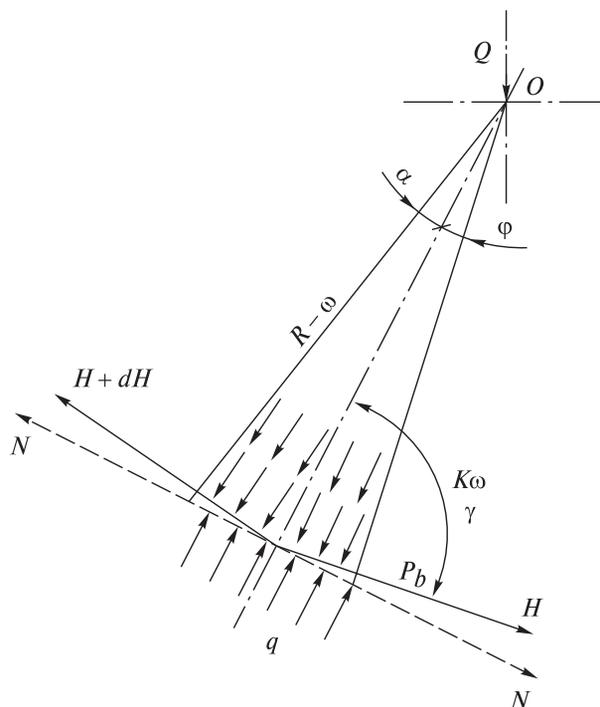


Рис. 1. Схема сил, действующих на участок оболочки: O — центр оболочки; Q — равнодействующая сила распределенной нагрузки; H — толщина слоя; N — растягивающее усилие в оболочке; K — коэффициент жесткости оболочки; q — реакция опорной поверхности; R — радиус оболочки; P_b — давление воздуха в шине; ω — радиальная деформация оболочки; φ — угол от вертикальной оси, проходящей через центр оболочки, до элементарного объема

Fig. 1. Scheme of forces acting on the shell section: O — center of the shell; Q — resultant force of the distributed load; H — thickness of the layer; N — tensile force in the shell; K — stiffness coefficient of the shell; q — reaction of the support surface; R — radius of the shell; P_b — air pressure in the tire; ω — radial deformation of the shell; φ — angle from the vertical axis passing through the center of the shell, up to an elementary volume

С увеличением скорости движения сила, действующая на колесо от дороги, возрастает, поэтому в формулу для расчета реакции опорной поверхности следует добавить такую величину, как скорость деформации поверхности и шины при движении. Другими словами, динамическое взаимодействие колеса с дорогой на скорости существенно отличается от статического и требует более сложной модели, включающей в себя скорость движения.

Реакцию опорной поверхности описывает выражение

$$q = E \frac{h}{H} + \eta \frac{1}{H} \cdot \frac{dh}{dt}, \quad (2)$$

где E — модуль деформации поверхности качения;

h — деформация при проходе колеса;

H — толщина слоя;

η — коэффициент вязкости;

$\frac{dh}{dt}$ — скорость деформирования.

Введение значения реакции опорной поверхности в уравнении (1) позволяет более глубоко анализировать взаимодействие грунтов с нагрузками, принимая во внимание как скорость деформирования, так и толщину слоя. В зависимости (2) первый член представляет собой структурное сопротивление, второй — вязкое. Таким образом, зависимость (2) в целом иллюстрирует динамику взаимодействия нагрузки с грунтовым слоем. Следовательно, в уравнение (1) вместо q можно подставить выражение из зависимости (2).

Величина h определяется исходя из геометрических соображений (рис. 2).

На основании рис. 2 величину h можно определить из выражения

$$h = R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - \omega. \quad (3)$$

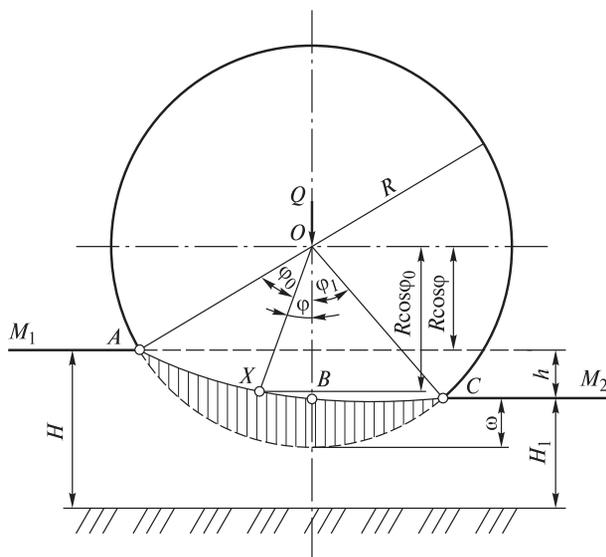


Рис. 2. Геометрическое представление определения величины h : h — величина деформации при проходе колеса; ω — радиальная деформация оболочки; H — толщина слоя до деформации; H_1 — толщина слоя после деформации; R — радиус оболочки; A, X, B, C — характерные точки дуги контакта; φ — угол от вертикальной оси, проходящей через центр оболочки, до элементарного объема

Fig. 2. Geometric representation of the value h determination: h — amount of deformation during the passage of the wheel; ω — radial deformation of the shell; H — thickness of the layer before deformation; H_1 — thickness of the layer after deformation; R — radius of the shell; A, X, B, C are the characteristic points of the contact arc; φ — angle from the vertical axis passing through the center of the shell to the elementary volume

После дифференцирования величины деформации h по времени t , получаем

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} &= -R \sin \varphi \frac{d\varphi}{dt} - \frac{d\omega}{dt} = \\ &= -R \sin \varphi \frac{d\varphi}{dt} - \frac{d\omega}{dt} \cdot \frac{d\varphi}{dt}. \end{aligned} \quad (4)$$

Зная, что $\frac{d\varphi}{dt}$ — это угловая скорость, которую можно выразить через линейную $\frac{v}{R} = \frac{d\varphi}{dt}$, запишем окончательное значение для скорости деформирования $\frac{dh}{dt}$

$$\frac{dh}{dt} = -v \sin \varphi - \frac{v}{R} \frac{d\omega}{d\varphi}. \quad (5)$$

Подставив далее значения деформации h и скорости деформирования $\frac{dh}{dt}$ в уравнение (2), получаем выражение для реакции q с использованием параметров поверхности качения и параметров пневматического колеса.

$$\begin{aligned} q &= \frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - \omega) + \\ &+ \frac{\eta}{H} \left(-v \sin \varphi - \frac{v}{R} \frac{d\omega}{d\varphi} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Значение реакции q опорной поверхности подставляем в уравнение (1) и получаем

$$\begin{aligned} &-\frac{N}{R^2} \cdot \frac{d^2\omega}{d\varphi^2} + K\omega + P_b - \\ &-\frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - \omega) + \\ &+ \frac{\eta}{H} \left(-v \sin \varphi - \frac{v}{R} \frac{d\omega}{d\varphi} \right) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Преобразуя выражение (7), получаем

$$\begin{aligned} &\frac{d^2\omega}{d\varphi^2} - \frac{\eta R v}{HN} \cdot \frac{d\omega}{d\varphi} - \frac{R^2}{N} \left(K + \frac{E}{H} \right) \omega = \\ &= \frac{\eta R^2}{HN} v \cdot \sin \varphi \frac{ER^2}{HN} \cdot \cos \varphi + \frac{R^2}{N} \left(P_b + \frac{E}{H} \cos \varphi_0 \right). \end{aligned} \quad (8)$$

После замены коэффициентов уравнение (8) принимает вид

$$\frac{d^2\omega}{d\varphi^2} - \alpha \frac{d\omega}{d\varphi} - \beta \omega = \gamma \sin \varphi - v \cos \varphi + \lambda, \quad (9)$$

где коэффициенты $\alpha, \beta, \gamma, v, \lambda$ являются сложными функциями от параметров поверхности качения и пневматического колеса, они определяются по уравнениям:

$$\alpha = \frac{\eta R v}{HN}; \beta = \frac{R^2}{N} \left(K + \frac{E}{H} \right); \gamma = \frac{\eta R^2 v}{HN};$$

$$v = \frac{ER^2}{HN}; \lambda = \frac{R^2}{N} \left(P_b + \frac{E}{H} \cos \varphi_0 \right). \quad (10)$$

Решая уравнение (6), получаем выражение для определения радиальной деформации оболочки ω в крайних точках области деформирования основания

$$\omega = C_1 e^{m_1 \varphi} + C_2 e^{m_2 \varphi} + \omega^*, \quad (11)$$

где e — экспонента;

$m_{1,2}$ — области деформирования основания

$$m_{1,2} = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{a}{2} \right)^2 + \beta}. \quad (12)$$

Частное решение ω^* имеет вид

$$\omega^* = a \sin \varphi + b \cos \varphi + c. \quad (13)$$

Подставляя в уравнение (9) значения ω , $\frac{d\omega}{d\varphi}$, $\frac{d^2\omega}{d\varphi^2}$, получаем

$$-a \sin \varphi - b \cos \varphi - \alpha a \cos \varphi +$$

$$+\beta d \sin \varphi - \beta a \sin \varphi - \beta b \cos \varphi - \beta c = \quad (14)$$

$$= \gamma \sin \varphi - v \cos \varphi + \lambda.$$

Находим a, b, c из условия равенства коэффициентов при тригонометрических функциях и свободном члене

$$\left. \begin{aligned} -a + bd - \beta a &= \gamma \\ -b - ad - \beta b &= -v \\ -\beta c &= \lambda \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Решая систему уравнений, находим коэффициенты a, b, c :
для общего случая:

$$a = \frac{vd - \gamma(1 + \beta)}{a^2 + (1 + \beta)^2}; \quad (16)$$

$$b = \frac{v(1 + \beta) + \gamma d}{a^2 + (1 + \beta)^2}; \quad (17)$$

$$c = -\frac{\lambda}{\beta}; \quad (18)$$

для общего случая при $V = 0, \eta = 0$:

$$a = 0; b = \frac{v}{1 + \beta}; c = -\frac{\lambda}{\beta}. \quad (19)$$

Решение уравнения (8) имеет вид

$$\omega = C_1 e^{m_1 \varphi} + C_2 e^{m_2 \varphi} + a \sin \varphi + b \cos \varphi + c. \quad (20)$$

где C_1 и C_2 — константы.

Граничные условия, необходимые для определения констант, находим в характерных точках дуги контакты A и B (см. рис. 2).

Первое граничное условие. В точке B первая производная равна 0:

$$\frac{d\omega}{d\varphi} = 0 \text{ при } \varphi = 0. \quad (21)$$

Продифференцировав уравнение (20), получаем

$$\frac{d\omega}{d\varphi} = C_1 e^{m_1 \varphi} + C_2 e^{m_2 \varphi} + a \cos \varphi + b \sin \varphi; \quad (22)$$

при $\varphi = 0$ имеем

$$C_1 m_1 + C_2 m_2 + a = 0. \quad (23)$$

Второе граничное условие. В точке A при $\varphi = \varphi_0, \omega = \omega_0$. В ряде случаев в точке $A \omega = \omega_0 = 0$, что особенно характерно для первых проходов.

Тогда, подставив в уравнение (20) значение $\omega = \omega_0$ при $\varphi = \varphi_0$, получаем

$$\omega_0 = C_1 e^{m_1 \varphi_0} + C_2 e^{m_2 \varphi_0} +$$

$$+ a \sin \varphi_0 + b \cos \varphi_0 + c. \quad (24)$$

Решая совместно системы уравнений (23) и (24), находим значения констант C_1 и C_2 для граничных условий:

$$C_1 = \frac{am_2 \sin \varphi_0 + bm_2 \cos \varphi_0 + cm_2 - \omega_0 m_2 - ae^{m_2 \varphi_0}}{m_1 e^{m_2 \varphi_0} - m_2 e^{m_2 \varphi_0}}; \quad (25)$$

$$C_2 = \frac{am_1 \sin \varphi_0 + bm_1 \cos \varphi_0 + cm_1 - \omega_0 m_1 - ae^{m_1 \varphi_0}}{m_2 e^{m_1 \varphi_0} - m_1 e^{m_2 \varphi_0}}. \quad (26)$$

Для случая $\omega_0 = 0$:

$$C_1 = \frac{am_2 \sin \varphi_0 + bm_2 \cos \varphi_0 + cm_2 - ae^{m_2 \varphi_0}}{m_1 e^{m_2 \varphi_0} - m_2 e^{m_1 \varphi_0}}; \quad (27)$$

$$C_2 = \frac{am_1 \sin \varphi_0 + bm_1 \cos \varphi_0 + cm_1 - ae^{m_1 \varphi_0}}{m_2 e^{m_1 \varphi_0} - m_1 e^{m_2 \varphi_0}}. \quad (28)$$

В окончательном варианте уравнение (20) принимает вид

$$\omega = \left(\frac{am_2 \sin \varphi_0 + bm_2 \cos \varphi_0 + cm_2 - ae^{m_2 \varphi_0}}{m_1 e^{m_2 \varphi_0} - m_2 e^{m_1 \varphi_0}} \right) e^{m_1 \varphi} +$$

$$+ \left(\frac{am_1 \sin \varphi_0 + bm_1 \cos \varphi_0 + cm_1 - ae^{m_1 \varphi_0}}{m_2 e^{m_1 \varphi_0} - m_1 e^{m_2 \varphi_0}} \right) e^{m_2 \varphi} +$$

$$+ a \sin \varphi + b \cos \varphi + c. \quad (29)$$

Коэффициенты a, b, c , соответственно, зависят от параметров пневматического колеса и имеют следующий вид:

для общего случая:

$$a = \frac{R^2 \eta v (ER^2 - (HN + R^2 (KH + E)))}{\eta^2 R v^2 + (HN + R^2 (KH + E))^2}; \quad (30)$$

$$b = \frac{R^3 (E (HN + R^2 (KH + E)) + \eta^2 v^2)}{\eta^2 R^2 v^2 + (HN + R^2 (KH + E))^2}; \quad (31)$$

$$c = -\frac{P_b H + ER \cos \varphi_0}{KH + E}; \quad (32)$$

для случая $v = 0, \eta = 0$:

$$a' = 0; \quad (33)$$

$$b' = \frac{R^3 E}{HN + R^2 (KH + E)}; \quad (34)$$

$$c' = -\frac{P_b H + ER \cos \varphi_0}{KH + E}. \quad (35)$$

Коэффициенты a, b зависят от вязких свойств уплотняемого грунта и скорости передвижения, в то время как коэффициент c зависит от давления воздуха в шине P_b .

Для случая, когда коэффициент вязкости $\eta = 0$, закон деформирования пневматического колеса принимает вид

$$\omega = \left(\frac{b' m_2 \cos \varphi_0 + c' m_2}{m_1' e^{m_2 \varphi_0} - m_2 e^{m_1 \varphi_0}} \right) e^{m_1 \varphi} + \left(\frac{b' m_1 \cos \varphi_0 + c' m_1}{m_2 e^{m_1 \varphi_0} - m_1 e^{m_2 \varphi_0}} \right) e^{m_2 \varphi} + b' \cos \varphi + c'. \quad (36)$$

Изменение радиальной деформации пневматического колеса при каждом обороте описывает косинусоидальная кривая. Формулы (29) и (36) позволяют вычислить значение этой деформации в любой точке зоны контакта колеса с поверхностью, учитывая при этом характеристики обоих контактирующих тел. В отличие от ранее предложенных моделей эти формулы учитывают такие важные факторы, как вязкость материала, скорость деформации и толщина слоя, подвергающегося сжатию, что обеспечивает большую точность и реалистичность.

Описанная модель демонстрирует большую точность и комплексность подхода к расчету деформации пневматического колеса по сравнению с существующими моделями вследствие учета ключевых физических параметров, влияющих на процесс деформации.

Из всех значений радиальной деформации оболочки ω наибольший интерес вызывает ω_{\max} , которое вводится в расчеты.

Максимальное значение радиальной деформации пневматического колеса ω_{\max} можно получить, если $\varphi = 0$:

для общего случая из уравнения (29):

$$\omega_{\max} = \frac{a m_2 \sin \varphi_0 + b m_2 \cos \varphi_0 + c m_2 - a e^{m_2 \varphi_0}}{m_1 e^{m_2 \varphi_0} - m_2 e^{m_1 \varphi_0}} + \frac{a m_1 \sin \varphi_0 + b m_1 \cos \varphi_0 + c m_1 - a e^{m_1 \varphi_0}}{m_2 e^{m_1 \varphi_0} - m_1 e^{m_2 \varphi_0}} + b + c; \quad (37)$$

для случая $\eta = 0$ из уравнения (36):

$$\omega_{\max} = \frac{b' m_2 \cos \varphi_0 + c' m_2}{m_1 e^{m_2 \varphi_0} - m_2 e^{m_1 \varphi_0}} + \frac{b' m_1 \cos \varphi_0 + c' m_1}{m_2 e^{m_1 \varphi_0} - m_1 e^{m_2 \varphi_0}} + b' + c'. \quad (38)$$

Полученные уравнения (29) и (36) в дальнейшем находят применение для решения двух задач:

1) определение потребной силы тяги и коэффициента сопротивления качению;

2) определение потребного количества проходов при уплотнении грунта и контроля уплотнения.

Поскольку большинство пневматических колес как у скрепера, так и у катка являются ведомыми, то решение может быть получено для ведомого колеса. В случае необходимости решения задачи для ведущих колес следует учитывать значение крутящего момента, приложенного к колесу. Однако, как отмечают исследователи, его действие изменяет плотность не более чем на 10 %, поэтому существенного изменения величины ω не произойдет.

При решении первой задачи потребная сила тяги и коэффициент сопротивления качению определяются следующим образом. На элементарную дугу контакта (рис. 3) $ds = R d\varphi$ действует реакция опоры q по выражению (2), после подстановки в которое значений h и $\frac{dh}{dt}$ оно будет иметь вид уравнения (6), в которое вместо ω и $\frac{d\omega}{d\varphi}$ подставляются значения из уравнения (20) и его производной:

$$q = \frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - \omega) + \frac{\eta}{H} \left(-v \sin \varphi - \frac{v}{R} \frac{d\omega}{d\varphi} \right) = \frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - C_1 e^{m_1 \varphi} - C_2 e^{m_2 \varphi} - a \sin \varphi - b \cos \varphi - c) + \frac{\eta}{H} \left(-v \sin \varphi - \frac{v}{R} C_1 m_1 e^{m_1 \varphi} - \frac{v}{R} C_2 m_2 e^{m_2 \varphi} - \frac{v}{R} a \cos \varphi + \frac{v}{R} b \sin \varphi \right). \quad (39)$$

Исходя из рис. 3, имеем:

$$q' = q \cos \varphi; \quad (40)$$

$$q'' = q \sin \varphi. \quad (41)$$

Для нахождения силы тяги F и равнодействующей силы распределенной нагрузки Q необходимо воспользоваться уравнениями, выведенными из условия равновесия пневматического колеса в любой отрезок времени:

$$F = \sum_{\cup AB} q''; \quad Q = \sum_{\cup AB} q' + \sum_{\cup BC} q'. \quad (42)$$

Проинтегрируем выражение с учетом значений (42), находим силу тяги F :

$$F = B \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} q \sin \varphi \cdot R d\varphi = BR \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} q \sin \varphi \cdot d\varphi =$$

$$= BR \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} \left[\frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - C_1 e^{m_1 \varphi} - C_2 e^{m_2 \varphi} - a \sin \varphi - b \cos \varphi - c) + \right. \quad (43)$$

$$\left. + \frac{\eta}{H} (-v \sin \varphi - \frac{v}{R} m_1 C_1 e^{m_1 \varphi} - \frac{v}{R} m_2 C_2 e^{m_2 \varphi} - \frac{v}{R} a \cos \varphi + \frac{v}{R} b \sin \varphi) \right] \sin \varphi \cdot d\varphi;$$

$$F = BR^2 \frac{E}{H} \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi - BR \frac{E}{H} C_1 \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} e^{m_1 \varphi} \sin \varphi \cdot d\varphi -$$

$$- BR^2 \frac{E}{H} \cos \varphi_0 \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} \sin \varphi \cdot d\varphi - BR C_2 \frac{E}{H} \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} e^{m_2 \varphi} \sin \varphi \cdot d\varphi - \quad (44)$$

$$- BR a \frac{E}{H} m_2 C_2 \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} e^{m_2 \varphi} \sin \varphi \cdot d\varphi - \frac{\eta}{H} v B a \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi +$$

$$+ B b v \frac{\eta}{H} \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} \sin^2 \varphi \cdot d\varphi.$$

После приведения подобных членов получаем:

$$F = \left(BR^2 \frac{E}{H} - BR b \frac{E}{H} - v B a \frac{\eta}{H} \right) \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} \cos \varphi \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi - \left(BR^2 \frac{E}{H} \cos \varphi_0 + \right.$$

$$+ BR \frac{E}{H} C_1 \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} \sin \varphi \cdot d\varphi - \left(BR \frac{E}{H} C_1 + B \eta \frac{v}{H} m_1 C_1 \right) \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} e^{m_1 \varphi} \sin \varphi \cdot d\varphi - \quad (45)$$

$$\left. - \left(BR C_2 \frac{E}{H} + \frac{\eta}{H} B v m_2 C_2 \right) \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} e^{m_2 \varphi} \sin \varphi \cdot d\varphi - \left(BR a \frac{E}{H} + \frac{\eta}{H} B R v - \right.$$

$$\left. - B b \frac{\eta}{H} v \right) \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} \sin^2 \varphi \cdot d\varphi.$$

Проведем тождественные преобразования выражения (45) и получим его в виде

$$F = \Delta_1 \int_{\varphi_0}^0 \frac{\sin^2 \varphi}{2} + \Delta_2 \int_{\varphi_0}^0 \cos \varphi - \Delta_3 \int_{\varphi_0}^0 \frac{e^{m_1 \varphi}}{m_1^2 + 1} (m_1 \sin \varphi - \cos \varphi) - \quad (46)$$

$$- \Delta_4 \int_{\varphi_0}^0 \frac{e^{m_2 \varphi}}{m_2^2 + 1} (m_2 \sin \varphi - \cos \varphi) - \Delta_5 \int_{\varphi_0}^0 \left(\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin 2\varphi}{4} \right),$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$ соответственно равны:

$$\Delta_1 = \left(BR^2 \frac{E}{H} - BR b \frac{E}{H} - v B a \frac{\eta}{H} \right); \quad (47)$$

$$\Delta_2 = \left(BR^2 \frac{E}{H} \cos \varphi_0 + BR \frac{E}{H} C_1 \right); \quad (48)$$

$$\Delta_3 = \left(BR \frac{E}{H} C_1 + B \eta \frac{v}{H} m_1 C_1 \right); \quad (49)$$

$$\Delta_4 = \left(BR C_2 \frac{E}{H} + \frac{\eta}{H} B v m_2 C_2 \right); \quad (50)$$

$$\Delta_5 = \left(BR a \frac{E}{H} + \frac{\eta}{H} B R v - B b \frac{\eta}{H} v \right), \quad (51)$$

где B — ширина пневматической шины.

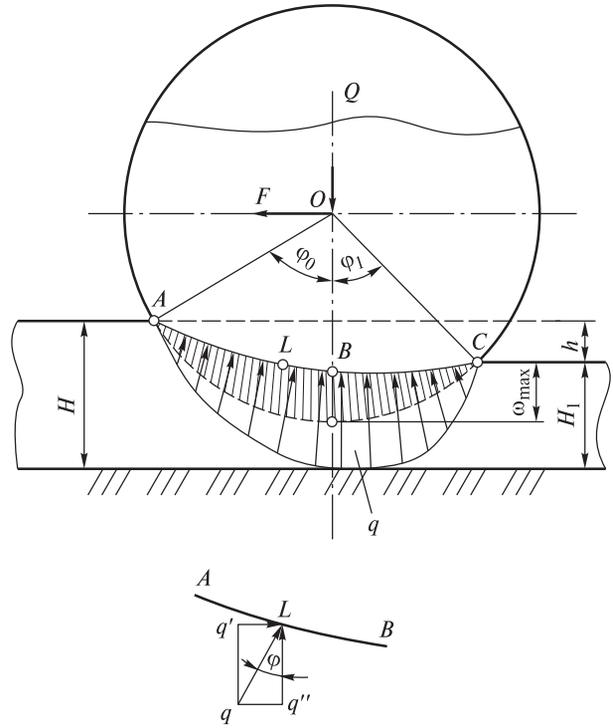


Рис. 3. Элементарная дуга контакта
Fig. 3. Elementary arc of contact

После подстановки пределов интегрирования получаем

$$F = \Delta_1 \frac{\sin^2 \varphi_0}{2} + \Delta_2 (\cos \varphi_0 - 1) -$$

$$- \sum_{n=1}^2 \Delta_{n+2} \left[\frac{e^{m_n \varphi_0}}{m_n^2 + 1} (m_n \sin \varphi_0 - \cos \varphi_0) + \frac{1}{m_n^2 + 1} \right] - \quad (52)$$

$$- \Delta_5 \left(\frac{\varphi_0}{2} - \frac{\sin 2\varphi_0}{4} \right).$$

Для определения равнодействующей силы распределенной нагрузки Q воспользуемся уравнением (42), переходя в пределе к интегрированию

$$Q = B \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} q \cos \varphi \cdot R d\varphi + B \int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi_1} q R \cdot d\varphi. \quad (53)$$

Вместо q подставляем его значение, выраженное через величину сжатия пневматического колеса (42):

$$Q = BR \int_{\varphi_0=0}^{\varphi=0} \left[\frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - C_1 e^{m_1 \varphi} - C_2 e^{m_2 \varphi} - a \sin \varphi - \right.$$

$$- b \cos \varphi - c) + \frac{\eta}{H} \left(-v \sin \varphi - \frac{v}{R} m_1 C_1 e^{m_1 \varphi} - \frac{v}{R} m_2 C_2 e^{m_2 \varphi} - \frac{v}{R} a \cos \varphi + \right.$$

$$+ \frac{v}{R} b \sin \varphi) \left. \right] \cos \varphi \cdot d\varphi + BR \int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi_1} \left[\frac{E}{H} (R \cos \varphi - R \cos \varphi_0 - C_1 e^{m_1 \varphi} - C_2 e^{m_2 \varphi} - \right.$$

$$\left. - a \sin \varphi - b \cos \varphi + \frac{v}{R} b \sin \varphi) \right] d\varphi. \quad (54)$$

После приведения подобных членов и подстановки коэффициентов $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, \Delta_5$ получаем:

$$\begin{aligned}
 Q = & \Delta_1 \left(\int_{\varphi_0}^0 \cos^2 \varphi \cdot d\varphi + \int_0^{\varphi_1} \cos \varphi \cdot d\varphi \right) - \\
 & - \Delta_2 \left(\int_{\varphi_0}^0 \cos \varphi \cdot d\varphi + \int_0^{\varphi_1} d\varphi \right) - \\
 & - \Delta_3 \left(\int_{\varphi_0}^0 e^{m_1 \varphi} \cos \varphi \cdot d\varphi + \int_0^{\varphi_1} e^{m_1 \varphi} d\varphi \right) - \\
 & - \Delta_4 \left(\int_{\varphi_0}^0 e^{m_2 \varphi} \cos \varphi \cdot d\varphi + \int_0^{\varphi_1} e^{m_2 \varphi} d\varphi \right) - \\
 & - \Delta_5 \left(\int_{\varphi_0}^0 \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi + \int_0^{\varphi_1} \sin \varphi \cdot d\varphi \right);
 \end{aligned}
 \tag{55}$$

$$\begin{aligned}
 Q = & \Delta_1 \left(\int_{\varphi_0}^0 \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\sin 2\varphi}{4} \right) + \int_{\varphi_0=0}^{\varphi_1} \sin \varphi \right) - \Delta_2 \left(\int_{\varphi_0}^0 \sin \varphi + \int_0^{\varphi_1} \varphi \right) - \\
 & - \Delta_3 \left(\int_{\varphi_0}^0 \left(\frac{e^{m_1 \varphi}}{m_1^2 + 1} (m_1 \cos \varphi + \sin \varphi) \right) + \int_{\varphi_0=0}^{\varphi_1} \frac{1}{m_1} e^{m_1 \varphi} \right) - \\
 & - \Delta_4 \left(\int_{\varphi_0}^0 \left(\frac{e^{m_2 \varphi}}{m_2^2 + 1} (m_2 \cos \varphi + \sin \varphi) \right) + \int_{\varphi_0=0}^{\varphi_1} \frac{1}{m_2} e^{m_2 \varphi} \right) - \\
 & - \Delta_5 \left(\int_{\varphi_0}^0 \frac{\sin^2 \varphi}{2} + \int_0^{\varphi_1} (-\cos \varphi) \right).
 \end{aligned}
 \tag{56}$$

После подстановки пределов имеем:

$$\begin{aligned}
 Q = & \Delta_1 \left(\frac{\varphi_0}{2} + \frac{\sin 2\varphi_0}{4} - \sin \varphi_1 \right) - \Delta_2 (\sin \varphi_0 - \varphi_1) - \\
 & - \Delta_3 \left(\left(\frac{e^{m_1 \varphi_0}}{m_1^2 + 1} (m_1 \cos \varphi_0 + \sin \varphi_0) - \frac{m_1}{m_1^2 + 1} \right) + \frac{1}{m_1} - \frac{e^{m_1 \varphi_1}}{m_1} \right) - \\
 & - \Delta_4 \left(\frac{e^{m_2 \varphi_0}}{m_2^2 + 1} (m_2 \cos \varphi_0 + \sin \varphi_0) - \frac{m_2}{m_2^2 + 1} + \frac{1}{m_2} - \frac{e^{m_2 \varphi_1}}{m_2} \right) - \\
 & - \Delta_5 \left(\frac{\sin^2 \varphi_0}{2} - 1 + \cos \varphi_1 \right).
 \end{aligned}
 \tag{57}$$

Как видно из уравнений (52) и (57), необходимая сила тяги F и равнодействующая сила распределенной нагрузки Q зависят от параметров качения, а также от характеристик пневматического колеса, что позволяет решить поставленную задачу, учитывающую скорость перемещения пневматической шины и вязкостные свойства почвогрунта.

Соотношение между углами φ_0 и φ_1 может быть найдено следующим образом (рис. 4): при первом проходе $\frac{\varphi_1}{\varphi_0} = 0$; поскольку $\varphi_1 = 0$; при последнем проходе $\frac{\varphi_1}{\varphi_0} = 1$; поскольку $\varphi_1 = \varphi_0$.

Тогда

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_0} = a'' + b'' \lg n; \quad a'' = 0; \quad b'' = \frac{1}{\lg n}. \tag{58}$$

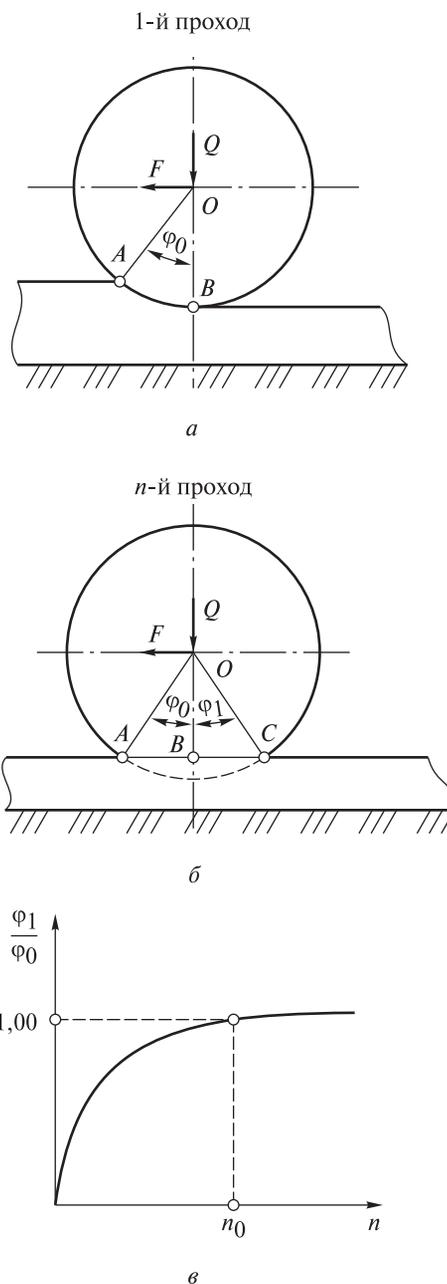


Рис. 4. Зависимость силы тяги F и равнодействующей силы распределенной нагрузки Q от параметров пневматического колеса и параметров качения: а — первый проход; б — n-й проход; в — зависимость соотношения углов φ_0 и φ_1 от количества проходов
 Fig. 4. Dependence of draft force F and the resultant force of the distributed load Q on the parameters of the pneumatic wheel and rolling parameters: а — first pass; б — n-pass; в — dependence of the ratio of angles φ_0 and φ_1 on the number of passes

По значениям F и Q (52) и (55) можно найти коэффициент сопротивления качению

$$f = \frac{F}{Q}. \tag{59}$$

Отметим, что чем больше вязкое сопротивление грунта и скорость передвижения машин, тем должно быть больше значение силы тяги для передвижения машины по грунту.

При взаимодействии пневматического колеса с уплотняемым слоем происходят деформации как пневматического колеса, так и уплотняемого слоя. Величина деформаций пневматического колеса и уплотняемого слоя зависит от физико-механических свойств контактирующих тел. Поскольку в настоящее время имеются два основных типа пневматических колес с постоянным и переменным давлением воздуха в шине, то схемы процесса деформирования системы «колесо — грунт» будут существенно различны. Ниже представлены две схемы деформирования пневматических колес, которые положены в основу контроля уплотнения (рис. 5).

Схема деформирования пневматического колеса с фиксированным давлением предполагает относительно постоянную площадь контакта шины с почвой. При возрастании нагрузки увеличивается глубина вдавливания колеса в грунт, что приводит к увеличению сопротивления качению и снижению тяговых характеристик. Уплотнение почвы происходит преимущественно в вертикальном направлении под воздействием статического давления.

В отличие от этого схема деформирования колеса с изменяемым давлением позволяет адаптировать площадь контакта шины с почвой в зависимости от условий движения. При снижении давления увеличивается площадь контакта, что уменьшает удельное давление на грунт и снижает его уплотнение. Это особенно важно при работе на рыхлых и влажных почвах, где требуется минимальное воздействие на структуру грунта.

Контроль уплотнения почвы с использованием пневматических колес подразумевает оптимизацию давления в шинах и выбор геометрических параметров колеса (ширины, диаметра). Современные системы управления позволяют автоматически регулировать давление в шинах в зависимости от нагрузки и типа почвы, обеспечивая минимальное воздействие на грунт при сохранении тяговых характеристик.

Исследования в области снижения уплотнения почвы при взаимодействии с пневматическими колесами направлены на разработку новых конструкций шин и систем управления, позволяющих минимизировать негативное воздействие на агроэкосистему.

При уплотнении грунта пневматическими колесами с постоянным давлением воздуха в шине (см. рис. 5) первый проход характеризуется максимальной деформацией уплотняемого слоя

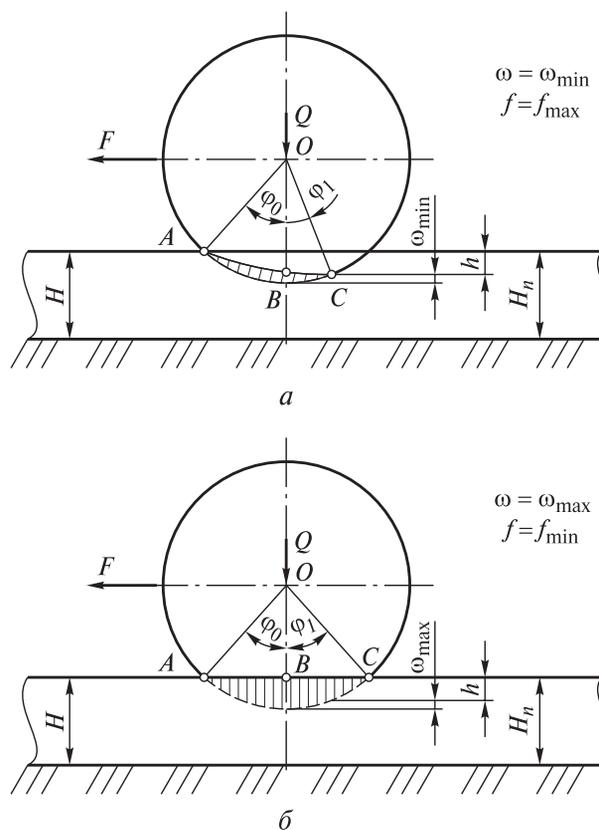


Рис. 5. Схемы деформирования пневматических колес: а — первый проход пневматической шины; б — последний проход пневматической шины

Fig. 5. Schemes of pneumatic wheel deformation: a — first pass of pneumatic tyre; б — last pass of pneu

и минимальной деформацией пневматического колеса. Считается, что колеса с высоким давлением воздуха в шине при первых проходах работают как жесткие вальцы, не деформируясь. Коэффициент сопротивления качению при первом проходе максимальный, а скорость передвижения самая малая. Последующие проходы пневматического колеса по одному и тому же месту характеризуются увеличением деформаций пневматического колеса и уменьшением деформаций поверхности качения.

Теоретические разработки А.К. Бируля [36] подчеркивают логарифмический характер зависимости величины деформаций уплотняемого слоя и объемного веса скелета грунта от количества проходов пневматического колеса. Следует отметить, что коэффициент сопротивления качению также уменьшается от прохода к проходу по логарифмической зависимости. Исследования Н.А. Калужского [37], положили в основу контроля уплотнения грунтов и щебеночных слоев жесткобарабанными катками именно это явление.

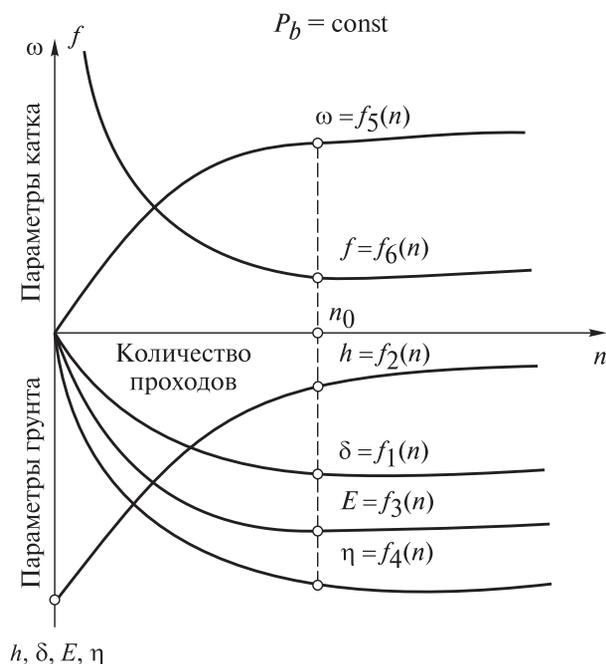


Рис. 6. Графическое представление процесса уплотнения грунта и деформирования пневматического колеса
Fig. 6. Graphical representation of soil compaction and pneumatic deformation

Последний проход пневматического колеса совершается по уплотненному грунтовому слою, модуль деформации которого увеличился по сравнению с первым проходом в 10...15 раз. При последнем проходе деформация пневматического колеса максимальная, в то же время деформация уплотняемого слоя будет минимальной и упругой по отношению к уплотнителю. Практически последний проход характеризуется наличием только упругих деформаций грунтового слоя. Плотность грунта достигает максимального значения для данного типа пневматического колеса и нагрузки. Коэффициент сопротивления качению стабилизируется и остается постоянным для всех последующих проходов. В общем, процесс уплотнения грунта и деформирования пневматического колеса может быть представлен в виде графика (рис. 6).

На графике (см. рис. 6) указан качественный характер изменения значений деформаций грунта h , объемного веса скелета грунта δ , прочностных показателей E , η , коэффициента сопротивления качению f , а также максимальной деформации пневматического колеса ω , в функции от количества проходов n пневматического колеса.

Работа пневматической шины с изменяемым давлением и деформируемым грунтом отличается от описанной ранее (рис. 7). При использовании регулируемого давления пер-

вичный проход колеса по нестабильному грунту выполняется при наименьшем возможном давлении в шине. В этом случае деформация пневматического колеса будет максимальной. Увеличение деформации пневматического колеса уменьшает сдвиги грунта и способствует лучшей проходимости машин. Деформации уплотняемого слоя меньше, чем в первом случае. Коэффициент сопротивления качению также уменьшается по сравнению с первым случаем. При этом первый проход может быть проведен на повышенных передачах с большей скоростью.

Далее при последующих проходах проводится постепенное увеличение давления воздуха в пневматическом колесе, что приводит к уменьшению площади отпечатка и, соответственно, увеличению среднего контактного давления. Такое явление способствует росту плотности уплотняемого слоя и уменьшению остаточных деформаций.

Последний проход характеризуется максимальным давлением воздуха в шине и определенным значением деформаций пневматического колеса, соответствующим радиальной деформации оболочки ω_n .

Как правило, коэффициент сопротивления качению такой же, как и при первом проходе, поскольку изменением давления воздуха в шине добиваются постоянства силы тяги. В целом процесс уплотнения грунта можно представить в виде графика (рис. 8), где приведены качественные изменения параметров ω , f , δ , h , E , η в зависимости от количества проходов пневматического колеса по одному следу.

Можно сделать вывод, о том, что для контроля уплотнения грунтов могут быть использованы различные зависимости, характеризующие процесс взаимодействия двух контактирующих тел: для пневматических колес с давлением воздуха в шине $P_b = \text{const}$:

$$\delta = f_1(n); h = f_2(n); E = f_3(n);$$

$$\eta = f_4(n); \omega = f_5(n); f = f_6(n).$$

для пневматических колес с давлением воздуха в шине $P_b \neq \text{const}$:

$$\delta = f'_1(n); h = f'_2(n); E = f'_3(n);$$

$$\eta = f'_4(n); \omega = f'_5(n); f = \text{const}.$$

В настоящее время наибольшее распространение получила зависимость типа $\delta = f(n)$, которая подробно изучена теоретически и экспериментально. Отметим, что для измерения объемного веса скелета грунта используются различные приборы как точечного, так и непрерывного контроля.

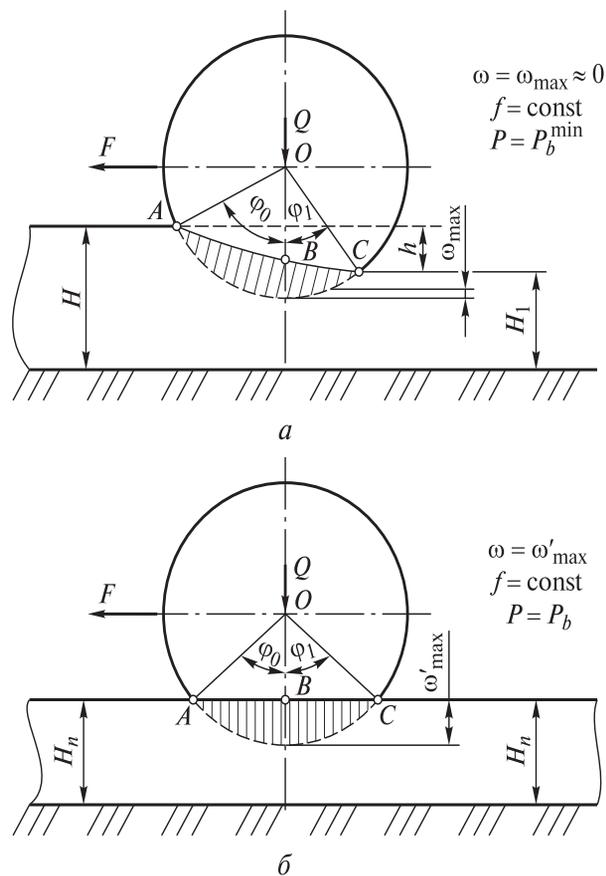


Рис. 7. Взаимодействие пневматического колеса с регулируемым давлением воздуха в шине и уплотняемым грунтовым слоем: а — первый проход пневматической шины; б — последний проход пневматической шины

Fig. 7. Interaction of pneus with regulated air pressure in the tyre and compacted soil layer: а — first pass of the pneus; б — last pass of the pneus

Наибольшее распространение получил прибор Н.П. Ковалева, который используется в большинстве дорожных организаций.

Наибольшее распространение зависимости $h = f(n)$ выявлено при изучении проходимости машин по грунтовым поверхностям. Что касается зависимости $f = f(n)$, то ее с успехом можно применить только для машин с пневматическими колесами первого типа, когда $P_b = \text{const}$, а также для жесткобаранных колес. В свое время Я.А. Калужский [37] сконструировал прибор, который устанавливался на катке и служил контрольным прибором по укатке грунтов. Однако для катков с регулируемым давлением воздуха в шине эту зависимость нельзя применить поскольку $f = f(n) = \text{const}$, вследствие чего можно достичь лучшего использования мощности двигателя.

Для контроля уплотнения грунтов может быть использована зависимость $E(\eta) = f(n)$,

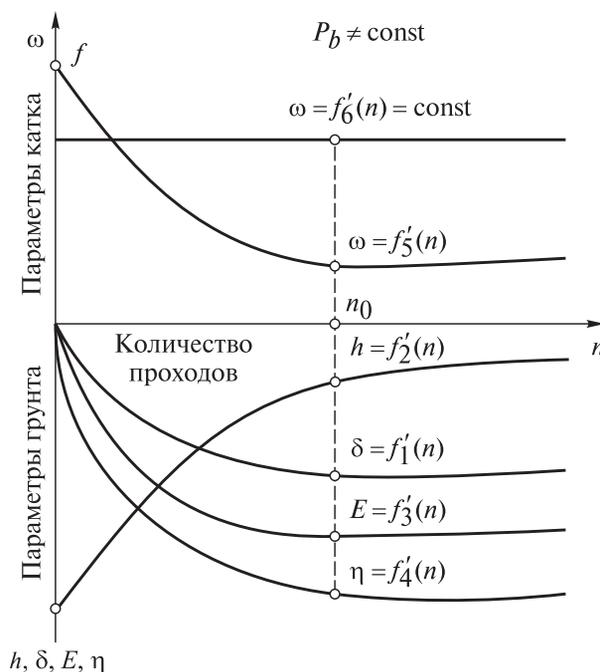


Рис. 8. Качественные изменения параметров $\omega, f, \delta, h, E, \eta$ в зависимости от количества проходов пневматического колеса по одному следу

Fig. 8. Qualitative changes of parameters $\omega, f, \delta, h, E, \eta$ depending on the number of passes of the pneus on one trail

для чего необходимо применять приборы, измеряющие прочностные характеристики грунтов в процессе уплотнения. В качестве таких приборов могут применяться пенетрометры, а также приборы динамического нагружения, которые позволяют в сравнительно короткие сроки получить необходимые данные. Одним из главных требований к приборам, определяющим прочностные характеристики грунта в процессе уплотнения, должна быть повышенная точность и скорость определения.

Что касается зависимости $\omega = f(n)$, то и она может быть использована как для случая $P_b = \text{const}$, так и для случая $P_b \neq \text{const}$ при контроле уплотнения грунтов. При этом расчет необходимого числа проходов сводится к определению ω_{max}^n в точке В после каждого прохода и сравнению его с ω_{max}^y (максимальная деформация пневматического колеса на уплотненной поверхности). Процесс уплотнения грунта будет закончен тогда, когда $\omega_{\text{max}}^n = \omega_{\text{max}}^y$, т. е. максимальная деформация пневматического колеса при n -м проходе будет равна максимальной деформации пневматического колеса на уплотненной поверхности при определенном давлении воздуха в шине и определенной нагрузке.

Для расчетов используются уравнения (37), (38) по определению ω_{max}

$$\omega_{\max} = f(\Pi_k, \Pi_r), \quad (60)$$

где Π_k — параметры пневматического колеса;
 Π_r — параметры уплотняемого слоя.

Поскольку параметры уплотняемого слоя изменяются от прохода к проходу по зависимости, близкой к логарифмической, то и максимальная деформация пневматической шины будет изменяться от прохода к проходу по логарифмической зависимости.

В связи с этим в общем виде зависимость ω от n может быть выражена уравнением

$$\omega = \omega_1 + A \lg(n+1), \quad (61)$$

где n — число проходов;

A — коэффициент, показывающий ход изменения деформаций пневматического колеса, зависящий от свойств грунта и нагрузки на колесо;

ω_1 — максимальная деформация при первом проходе.

Выводы

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о многообразии форм и методов контроля уплотнения грунтов, причем контроль может быть осуществлен как со стороны изучения свойств грунта, так и со стороны изучения свойств пневматического колеса в процессе уплотнения грунтов.

В качестве методов контроля предлагается использовать замер радиальной деформации пневматического колеса с дополнительным определением механических характеристик ускоренными способами. Данный подход ведет к процессу автоматизации контроля уплотнения грунтов, а также к повышению качества земляного полотна.

Основанный на измерении радиальной деформации пневматического колеса метод контроля позволяет оперативно оценивать степень уплотнения грунта в режиме реального времени, что дает возможность корректировать технологические параметры уплотняющей техники непосредственно в процессе работы, оптимизируя энергозатраты и сокращая сроки строительства. Использование ускоренных методов определения механических характеристик грунта, таких как динамическое зондирование или пенетрационные испытания, в сочетании с данными о деформации пневматического колеса, обеспечивает комплексную оценку качества уплотнения. Полученные результаты можно использовать для создания предиктивных моделей, позволяющих прогно-

зировать поведение земляного полотна в процессе эксплуатации. Внедрение автоматизированной системы контроля уплотнения грунтов на основе предложенного метода позволит снизить влияние человеческого фактора, повысить точность и достоверность измерений, а также обеспечить оперативный доступ к информации о текущем состоянии земляного полотна. Перспективы дальнейших исследований в данном направлении связаны с разработкой интеллектуальных систем управления уплотняющей техникой, способных автоматически адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать оптимальное качество уплотнения грунтов.

Список литературы

- [1] Хомяк Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1983. 207 с.
- [2] Чернышова Е.В. Методы формирования цифровой модели местности при трассировании лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии, 2017. № 3(35). С. 143–148.
- [3] Мокрушин Н.Ю., Чудинов С.А. Совершенствование технологии укрепления грунтов для строительства дорожных одежд лесовозных автомобильных дорог // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе, 2023. Т. 1. С. 300–303.
- [4] Zavrazhnov A.I., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Mikheev N.V. Designing mathematical models of geometric and technical parameters for modern road-building machines versus the main parameter of the system // Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology Proceedings of the Int. Symp. «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85-th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019), 2019, pp. 823–827.
- [5] Berestnev O., Soliterman Y., Goman A. Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines – One of the Key Problems of Engineering Science // Int. Symp. On History of Machines and Mechanisms Proceedings, 2000, pp. 325–332.
- [6] Козлов В.Г. Методы, модели и алгоритмы проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом влияния климата и погоды на условия движения: дис. ... д-ра техн. наук. 05.21.01 Технологии и машины лесозаготовок и лесного хозяйства. Архангельск, 2017. 406 с.
- [7] Бондарев А.Б., Козлов Д.Г. Обследование эксплуатационного состояния лесовозных автомобильных дорог // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 06–07 июня 2022 г. Воронеж: Изд-во Воронежского ГАУ, 2022. С. 196–200.
- [8] Курьянов В.К., Makeev В.Н. Технология и организация строительства лесовозных автомобильных дорог. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1995. 166 с.
- [9] Чудинов С.А., Катнова А.А., Чупров Е.Е. Современные добавки для стабилизации грунтов при

- строительстве лесовозных автомобильных дорог // Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых: Сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Омск, 06–07 февраля 2020 г. Омск: Изд-во Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета, 2020. С. 174–177.
- [10] Камусин А.А., Левушкин Д.М. Повышение прочности дорожных покрытий лесовозных автомобильных дорог // ИзВУЗ Лесной журнал, 2012. № 5 (329). С. 72–77.
- [11] Курдюков Д.П., Курдюков Р.П., Шамарин Н.И., Мануковский А.Ю. Расчет сопротивления грунтов основания при устройстве малых искусственных сооружений // Энергоресурсосберегающие и экологически безопасные технологии лесопромышленного комплекса: Материалы Междунар. науч. конф. ученых и студентов, Воронеж, 26 сентября 2024 г. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, 2024. С. 89–94.
- [12] Чудинов С.А., Карабутова И.А. Нейронечеткая сеть для расчета стоимости строительства лесовозной автомобильной дороги из фиброцементогрунта // Системы. Методы. Технологии, 2024. № 1(61). С. 154–162.
- [13] Сиденко В.М. Стандартизация и контроль качества в дорожном строительстве. Киев: Высшая школа, 1985. 256 с.
- [14] Коломинова М.В. Исследование удельных затрат энергии отдельных видов машин для строительства лесовозных дорог // Системы. Методы. Технологии, 2018. № 2(38). С. 105–110.
- [15] Вырко Н.П. Строительство и эксплуатация лесовозных дорог: учебник. Минск: Изд-во Белорусского государственного технологического университета, 2005. 445 с.
- [16] Кручинин И.Н., Бурмистров И.Н. Требования к транспортно-эксплуатационному состоянию зимних лесовозных автомобильных дорог // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе, 2017. Т. 1. С. 209–212.
- [17] Мохирев А.П., Медведев С.О., Смолина О.Н. Факторы, влияющие на пропускную способность лесовозных дорог // Лесотехнический журнал, 2019. Т. 9. № 3 (35). С. 103–113.
- [18] Чудинов С.А. Совершенствование технологии укрепления грунтов в строительстве автомобильных дорог лесного комплекса. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного лесотехнического университета, 2022. 164 с.
- [19] Леонович И.И., Вырко Н.П., Мартынихин В.Д., Матвейко А.П., Абрамович К.Б., Гайдук А.И., Давыдулин Г.Г., Лыщик П.А., Корин Г.С., Чупраков А.М. Дороги и транспорт лесной промышленности. Минск: Вышэйша шк., 1979. 415 с.
- [20] Высоцкая И.А. Обоснование информационно-интеллектуальной поддержки принципов действия технических систем // Моделирование систем и процессов, 2024. Т. 17. № 1. С. 19–26.
- [21] Елшамы М.М.М., Тиратуриян А.Н., Углова Е.В. Управление жизненным циклом автомобильных дорог на этапе эксплуатации на основе алгоритмов искусственных нейронных сетей // Инженерный вестник Дона, 2022. № 8(92). С. 282–292.
- [22] Гаан Ю.В. Совершенствование технологии строительства лесовозных дорог из мерзлокомковатых глинистых грунтов: дис. ... канд. техн. наук. 05.21.01 Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства. Красноярск, 2006. 166 с.
- [23] Медведев И.Н., Воротников Д.А. Перспективы применения конструкционного материала на основе малоценной древесины мягких лиственных пород для мостов на лесовозных автомобильных дорогах // Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., Воронеж, 17 июня 2021 г. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, 2021. С. 240–244.
- [24] Гарус И.А., Огар П.М., Рунова Е.М. Анализ условий эксплуатации и обоснование транспортных схем в условиях строительства лесовозных автомобильных дорог // Системы. Методы. Технологии, 2020, № 3(47). С. 81–87.
- [25] Гарус И.А., Огар П.М., Рунова Е.М. Теоретическое обоснование оценки транспортно-эксплуатационных качеств лесовозной автомобильной дороги по показателю маршрутной скорости движения // Системы. Методы. Технологии, 2020, № 3(47). С. 88–94.
- [26] Козлов Д.Г. К вопросу о выборе шин и балластировании трактора при выполнении технологических операций // Вестник Воронежского государственного аграрного университета, 2015, № 3(46). С. 119–125.
- [27] Чудинов С.А. Исследование набора прочности фиброцементогрунта в дорожной одежде лесовозной автомобильной дороги // Resources and Technology, 2024, Т. 21, № 2. С. 1–14.
- [28] Majstorovic A., Jajac N. Maintenance Management Model for Nonurban Road Network // Infrastructures, 2022, no. 6 (7), p. 80.
- [29] Порин В.О., Чудинов С.А., Филимошкин Д.В. Применение многокомпонентной добавки для укрепления грунтов в дорожных одеждах лесовозных автомобильных дорог // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: Материалы XV Междунар. науч.-техн. конф., Екатеринбург, 08 февраля 2024 г. Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного лесотехнического университета, 2024. С. 399–404.
- [30] Сушков С.И., Бурмистрова О.Н., Михеевская М.А. Методика динамического расчета насыпи лесовозных автомобильных дорог // Лесотехнический журнал, 2013. № 4(12). С. 89–93.
- [31] Бурмистрова О.Н., Бургонутдинов А.М., Пильник Ю.Н. Механизм образования морозобойных трещин на автомобильных дорогах, эксплуатируемых в умеренно-континентальном климате // Лесотехнический журнал, 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 133–138.
- [32] Бургонутдинов А.М., Колобова А.А. Применение нефтесодержащих отходов и нефтезагрязненных грунтов для устройства парогидроизолирующих прослоек в земляном полотне лесовозной автомобильной дороги // Теория и практика современной науки, 2022. № 3(81). С. 60–66.
- [33] Enhancing forest machine efficiency: review // Australia. Forestand Wood, 2010, 48 p.

- [34] Manukovskii A.Yu., Grigorev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Lapshina M.L., Makarova J.A., Chetverikova I.V., Yakovlev K.A., Afonichev D.N., Kunickaya O.A. Increasing the logging Road Efficiency By Reducing The Intensity Of Rutting: Mathematical Modeling J. of Mechanical Engineering Research & Developments, 2018, v. 41(2), pp. 35–41.
- [35] Макарова Ю.А., Мануковский А.Ю. Использование геосинтетических материалов для защиты откосов земляного полотна лесовозной автомобильной дороги в условиях подтоплений // ИзВУЗ Лесной журнал, 2017. № 3(357). С. 114–122.
- [36] Бируля А.К. Эксплуатация автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1966. 326 с.
- [37] Калужский Н.А. Повышение эффективности технологии производства глинозема и попутных продуктов: сб. науч. тр. ВНИПИ алюминиевой, магниевой и электродной промышленности / под ред. Н.А. Калужского. Л.: ВАМИ, 1984. 136 с.

Сведения об авторах

Боровлев Юрий Алексеевич — канд. техн. наук, доцент, ФГКВБОУ ВПО «Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил» «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» Министерства обороны Российской Федерации, borov.borov.ar@yandex.ru

Козлов Дмитрий Геннадиевич — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», dimvsau@mail.ru

Скрыпников Алексей Васильевич — д-р техн. наук, декан факультета «Управление и информатика в технологических системах», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», skrypnikovvsafe@mail.ru

Сергеев Александр Сергеевич — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», pnpri_sk@mail.ru

Яровенко Александр Андреевич — ассистент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», skrypnikovvsafe@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2025.

Одобрено после рецензирования 25.03.2025.

Принята к публикации 29.05.2025.

PARAMETERS CONTROL OF ROADBED SOIL COMPACTION PROCESS ON TRUCK HAUL ROADS

Yu.A. Borovlev¹, D.G. Kozlov^{2✉}, A.V. Skrypnikov³,
A.S. Sergeev⁴, A.A. Yarovenko³

¹Military Air Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, 54 a, Starykh Bolshevikov st., 394064, Voronezh, Russia

²Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, 1, Michurina st., 394087, Voronezh, Russia

³Voronezh State University of Engineering Technologies, 19, Revolyutsii av., 394036, Voronezh, Russia

⁴Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Prospekt, 614990, Perm, Russia

dimvsau@mail.ru

The article is a comprehensive study on the control of soil compaction parameters during the construction of truck haul roads. The focus is on the interaction between the pneu and the compacted soil layer, which leads to deformations of both objects. The degree of these deformations depends on the physical and mechanical properties of the interacting bodies. Two schemes of deformation of pneus, which form the basis of sealing control, are considered in detail and analyzed. The analysis of the soil compaction process with pneus at both constant and variable tire air pressure, as well as how the deformation of the tire and the soil layer change with each passing tire. As a result, the logarithmic nature of the dependence of the deformation of the compacted layer and the bulk weight of the soil framework on the number of pneumatic passages was proved. The analysis showed that analytical dependencies were obtained characterizing the process of interaction between two contacting bodies, which can be used to control soil compaction. A method for measuring radial deformation of a pneumatic tire with additional determination of mechanical characteristics by accelerated methods is proposed. The proposed method opens the way to automation of soil compaction control and significantly improves the quality of excavation work. Thus, the results of the study can contribute to improving control methods and increasing the efficiency of construction processes related to soil compaction in forest road projects.

Keywords: compacted layer, soil density, soil deformation, rolling resistance, strength characteristics of soils

Suggested citation: Borovlev Yu.A., Kozlov D.G., Skrypnikov A.V., Sergeev A.S., Yarovenko A.A. *Kontrol' parametrov protsessa uplotneniya gruntov zemlyanogo polotna lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Parameters control of roadbed soil compaction process on truck haul roads]. *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2025. Т. 29. № 4. С. 139–155. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-4-139-155

References

- [1] Khomyak Ya.V. *Proektirovanie setey avtomobil'nykh dorog* [Design of highway networks]. Moscow: Transport, 1983, 207 p.
- [2] Chernyshova E.V. *Metody formirovaniya tsifrovoy modeli mestnosti pri trassirovanii lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Methods for the formation of a digital terrain model when tracing logging roads]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2017, no. 3(35), pp. 143–148.
- [3] Mokrushin N.Yu., Chudinov S.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii ukrepleniya gruntov dlya stroitel'stva dorozhnykh odezhd lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Improving the technology of soil strengthening for the construction of road surfaces of logging roads]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and scientific research in the transport complex], 2023. Т. 1. pp. 300–303.
- [4] Zavrazhnov A.I., Belyaev A.N., Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Mikheev N.V. Development of mathematical models of geometric and technical parameters of modern road construction machines depending on the main parameter of the system // *Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology Proceedings of the Int. The symposium. «Engineering and Earth Sciences: Applied and fundamental research»*, dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019), 2019, pp. 823–827.
- [5] Berestnev O., Soliterman Y., Goman A. Development of Scientific Bases of Forecasting and Reliability Increase of Mechanisms and Machines — One of the Key Problems of Engineering Science. *Int. Symp. on History of Machines and Mechanisms Proceedings*, 2000, pp. 325–332.
- [6] Kozlov V.G. *Metody, modeli i algoritmy proektirovaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog s uchetom vliyaniya klimata i pogody na usloviya dvizheniya* [Methods, models and algorithms for designing logging roads, taking into account the influence of climate and weather on traffic conditions]. *Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01*. Arkhangelsk, 2017, 406 p.
- [7] Bondarev A.B., Kozlov D.G. *Obsledovanie ekspluatatsionnogo sostoyaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Survey of the operational state of logging roads]. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy efficiency and energy saving in modern production and society: Proceedings of the international scientific and practical conference], Voronezh, June 06–07, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022, pp. 196–200.
- [8] Kuryanov V.K., Makeev V.N. *Tekhnologiya i organizatsiya stroitel'stva lesovoznykh avtomobilnykh dorog* [Technology and organization of construction of logging roads]. Voronezh: VGU, 1995. 166 p.

- [9] Chudinov S.A., Katnova A.A., Chuprov E.E. *Sovremennyye dobavki dlya stabilizatsii gruntov pri stroitel'stve lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Modern additives for soil stabilization during construction of logging roads] *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya molodykh uchenykh: Sbornik materialov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Energy efficiency and energy saving in modern production and society: materials of the international scientific and practical conference], Omsk, 06–07 fevralya 2020 g. Omsk: Sibirskiy gosudarstvennyy avtomobil'no-dorozhnyy universitet, 2020, pp. 174–177.
- [10] Kamusin A.A., Levushkin D.M. *Povyshenie prochnosti dorozhnykh pokrytiy lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Increasing the strength of road surfaces of logging roads]. *Russian Forestry J.*, 2012, no. 5 (329), pp. 72–77.
- [11] Kurdyukov D.P., Kurdyukov R.P., Shamarin N.I., Manukovskiy A.Yu. *Raschet soprotivleniya gruntov osnovaniya pri ustroystve malykh iskusstvennykh sooruzheniy* [Calculation of resistance of foundation soils in the construction of small artificial structures]. *Energoresursoberegayushchie i ekologicheski bezopasnye tekhnologii lesopromyshlennogo kompleksa: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii uchenykh i studentov* [Energy-saving and environmentally friendly technologies of the forest industry complex: materials of the international scientific conference of scientists and students]. Voronezh, 26 sentyabrya 2024 g. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet im. G.F. Morozova, 2024, pp. 89–94.
- [12] Chudinov S.A., Karabutova I.A. *Neyronechetkaya set' dlya rascheta stoimosti stroitel'stva lesovoznoy avtomobil'noy dorogi iz fibrotsementogrunta* [Neural fuzzy network for calculating the cost of building a timber road from fiber cement soil]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2024, no. 1(61). pp. 154–162.
- [13] Sidenko V.M. *Standartizatsiya i kontrol' kachestva v dorozhnom stroitel'stve* [Standardization and quality control in road construction]. Kyiv: Higher School, 1985, 256 p.
- [14] Kolominova M.V. *Issledovanie udel'nykh zatrat energii otdel'nykh vidov mashin dlya stroitel'stva lesovoznykh dorog* [Study of specific energy costs of individual types of machines for the construction of logging roads]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2018, no. 2 (38), pp. 105–110.
- [15] Vyrko N.P. *Stroitel'stvo i ekspluatatsiya lesovoznykh dorog* [Construction and operation of logging roads]. Minsk: Belorusskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskii universitet, 2005, 445 p.
- [16] Kruchinin I.N., Burmistrov I.N. *Trebovaniya k transportno-ekspluatatsionnomu sostoyaniyu zimnikh lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Requirements for the transport and operational condition of winter logging roads]. *Modernizatsiya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse* [Modernization and scientific research in the transport complex], 2017, v. 1, pp. 209–212.
- [17] Mokhiev A.P., Medvedev S.O., Smolina O.N. *Faktory, vliyayushchie na propusknyuyu sposobnost' lesovoznykh dorog* [Factors Affecting the Capacity of Timber Roads]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering J.], 2019, v. 9, no. 3 (35), pp. 103–113.
- [18] Chudinov S.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii ukrepleniya gruntov v stroitel'stve avtomobil'nykh dorog lesnogo kompleksa* [Improving the technology of soil stabilization in the construction of forestry roads]. Ekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet, 2022, 164 p.
- [19] Leonovich I.I., Vyrko N.P., Martynikhin V.D., Matveyko A.P., Abramovich K.B., Gayduk A.I., Davydulin G.G., Lyshchik P.A., Korin G.S., Chuprakov A.M. *Dorogi i transport lesnoy promyshlennosti* [Roads and transport of the forest industry]. Minsk: Vysheysya shkola, 1979, 415 p.
- [20] Vysotskaya I.A. *Obosnovanie informatsionno-intellektual'noy podderzhki printsipov deystviya tekhnicheskikh sistem* [Justification of information and intellectual support of the operating principles of technical systems] *Modelirovanie sistem i protsessov* [Modeling of systems and processes], 2024. T. 17, № 1. pp. 19–26.
- [21] Elshami M.M.M., Tiraturyan A.N., Uglova E.V. *Upravlenie zhiznennym tsiklom avtomobil'nykh dorog na etape ekspluatatsii na osnove algoritmov iskusstvennykh neyronnykh setey* [Life Cycle Management of Highways at the Operational Stage Based on Artificial Neural Network Algorithms]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2022, no. 8 (92), pp. 282–292.
- [22] Gaan Yu.V. *Sovershenstvovanie tekhnologii stroitel'stva lesovoznykh dorog iz merzlokomkovatykh glinistykh gruntov* [Improving the technology of construction of logging roads from frozen-lumpy clay soils]. *Dis. Cand. Sci. (Tech.)* 05.21.01. Krasnoyarsk, 2006, 166 p.
- [23] Medvedev I.N., Vorotnikov D.A. *Perspektivy primeneniya konstruktivnogo materiala na osnove malotsennoy drevesiny myagkikh listvennykh porod dlya mostov na lesovoznykh avtomobil'nykh dorogakh* [Prospects for the use of structural material based on low-value softwood for bridges on logging roads]. *Sovremennyye mashiny, oborudovanie i IT-resheniya lesopromyshlennogo kompleksa: teoriya i praktika: materialy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern machines, equipment and IT solutions for the forest industry complex: theory and practice: materials of the All-Russian scientific and practical conference], Voronezh, 17 iyunya 2021 g. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet im. G.F. Morozova, 2021, pp. 240–244.
- [24] Garus I.A., Ogar P.M., Runova E.M. *Analiz usloviy ekspluatatsii i obosnovanie transportnykh skhem v usloviyakh stroitel'stva lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Analysis of operating conditions and substantiation of transport schemes in the conditions of construction of logging roads]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2020, no. 3(47), pp. 81–87.
- [25] Garus I.A., Ogar P.M., Runova E.M. *Teoreticheskoe obosnovanie otsenki transportno-ekspluatatsionnykh kachestv lesovoznoy avtomobil'noy dorogi po pokazatelyu marshrutnoy skorosti dvizheniya* [Theoretical substantiation of the assessment of the transport and operational qualities of a logging road based on the route speed indicator]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2020, no. 3(47), pp. 88–94.
- [26] Kozlov D.G. *On the issue of choosing tires and ballasting a tractor when performing technological operations* [On the issue of choosing tires and ballasting a tractor when performing technological operations]. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University* [Bulletin of the Voronezh State Agrarian University], 2015, no. 3(46), pp. 119–125.

- [27] Chudinov S.A. *Issledovanie nabora prochnosti fibrotsementogrunta v dorozhnoy odezhdе lesovoznoy avtomobil'noy dorogi* [Study of the strength gain of fiber cement soil in the road surface of a logging road]. Resources and Technology [Resources and Technology], 2024, t. 21, no. 2, pp. 1–14.
- [28] Majstorovic A., Jajac N. Maintenance Management Model for Nonurban Road Network. *Infrastructures*, 2022, no. 6 (7), p. 80.
- [29] Porin V.O., Chudinov S.A., Filimoshkin D.V. *Primenenie mnogokomponentnoy dobavki dlya ukrepleniya gruntov v dorozhnykh odezhdakh lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Application of a multicomponent additive for soil stabilization in road surfaces of logging roads]. *Effektivnyy otvet na sovremennye vyzovy s uchetom vzaimodeystviya cheloveka i prirody, cheloveka i tekhnologiy: materialy XV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [An effective response to modern challenges taking into account the interaction of man and nature, man and technology: Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference], Ekaterinburg, 08 fevralya 2024 g. Ekaterinburg: Ural'skiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet, 2024. pp. 399–404.
- [30] Sushkov S.I., Burmistrova O.N., Mikhieevskaya M.A. *Metodika dinamicheskogo rascheta nasypi lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Methodology for dynamic calculation of the embankment of logging roads]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering J.], 2013, no. 4(12), pp. 89–93.
- [31] Burmistrova O.N., Burgonutdinov A.M., Pil'nik Yu.N. *Mekhanizm obrazovaniya morozoboynykh treshchin na avtomobil'nykh dorogakh, ekspluatiruemyykh v umerenno-kontinental'nom klimate* [Mechanism of frost crack formation on roads operated in a temperate continental climate]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry J.], 2016, v. 6, no. 4 (24), pp. 133–138.
- [32] Burgonutdinov A.M., Kolobova A.A. *Primenenie neftesoderzhashchikh otkhodov i neftezagryaznennykh gruntov dlya ustroystva parogidrozoliruyushchikh prosloek v zemlyanom polotne lesovoznoy avtomobil'noy dorogi* [Application of oil-containing waste and oil-contaminated soils for the construction of vapor-water-insulating layers in the roadbed of a logging road]. *Teoriya i praktika sovremennoy nauki* [Theory and practice of modern science], 2022, no. 3(81), pp. 60–66.
- [33] Improving the efficiency of logging machines: a review // Australia. Forest wood, 2010, 48 p.
- [34] Manukovsky A. Yu., Grigoriev I.V., Ivanov V.A., Gasparyan G.D., Lapshina M.L., Makarova Ju.A., Chetverikova I.V., Yakovlev K.A., Afonichev D.N., Kunitskaya O.A. Improving the efficiency of logging roads by reducing the intensity of trackage: Mathematical modeling. *J. of Research and Development in Mechanical Engineering*, 2018, no. 41 (2), pp. 35–41.
- [35] Makarova Yu.A., Manukovskiy A. Yu. *Ispol'zovanie geosinteticheskikh materialov dlya zashchity otkosov zemlyanogo polotna lesovoznoy avtomobil'noy dorogi v usloviyakh podtopleniy* [Use of geosynthetic materials to protect the slopes of the roadbed of a logging road in flooded conditions]. *Russian Lesnoy zhurnal*, 2017, no. 3(357), pp. 114–122.
- [36] Birulya A.K. *Ekspluatatsiya avtomobil'nykh dorog* [Operation of Highways]. Moscow: Transport, 1966, 326 p.
- [37] Kaluzhskiy N.A. *Povyshenie effektivnosti tekhnologii proizvodstva glinozema i poputnykh produktov* [Improving the Efficiency of Alumina and By-Products Production Technology]. *Sb. nauch. tr. VNIPI alyuminievoy, magnievoy i elektrodnoy promyshlennosti* [Collection of scientific papers of VNIPI of the Aluminum, Magnesium and Electrode Industry]. Ed. N.A. Kaluzhskiy. Leningrad: VAMI, 1984, 136 p.

Authors' information

Borovlev Yuriy Alekseevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, borov.borov.ar@yandex.ru

Kozlov Dmitriy Gennadievich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, dimvsau@mail.ru

Skrypnikov Aleksey Vasil'evich — Dr. Sci. (Tech.), Dean of the Faculty of Management and Computer Science in Technological systems of the Voronezh State University of Engineering Technologies, skrypnikovvsafe@mail.ru

Sergeev Aleksandr Sergeevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Perm National Research Polytechnic University, pnipu_sk@mail.ru

Yarovenko Aleksandr Andreevich — Assistant of the Voronezh State University of Engineering Technologies, skrypnikovvsafe@mail.ru

Received 06.03.2025.

Approved after review 25.03.2025.

Accepted for publication 29.05.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest