

## **АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ ПОДХОДОВ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО-ГРУНТ» С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРИМЕНИМОСТИ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ СНЕЖНОЙ МАССЫ ПНЕВМОКОЛЕСНЫМ КАТКОМ**

*Русмиленко А.К., Егоров А.Л., Егоров М.А.  
Тюменский индустриальный университет, Тюмень*

**Ключевые слова:** пневмоколесный каток, математическая модель шины, уплотнение снежной массы, реологические процессы снега, деформация колеса, оседание снега, модель «колесо-грунт».

**Аннотация.** В статье проведен анализ построения математических моделей взаимодействия системы «колесо-грунт», отдельно рассмотрены математические модели грунта и колесного движителя. Определена схема математической модели, которая будет в основе математической модели, описывающей взаимодействие шины пневмоколесного катка со снежной массой в момент выполнении этапа уплотнения при строительстве автозимников. Основной вопрос дальнейшей разработки математической модели «колесо-снег» состоит в определении взаимосвязи влияния воздействия различных факторов на качество уплотнения снежной массы, на определение которых и будет направлена дальнейшая работа. Полученные в работе результаты можно будет применить для дальнейшей разработки математической модели, описывающей взаимодействие системы «колесо-снег», на основании которой можно будет определить оптимальные рабочие параметры и режимы работы пневмоколесного катка при строительстве автозимников.

## **ANALYSIS OF KNOWN APPROACHES TO MATHEMATICAL MODELING OF THE INTERACTION OF THE "WHEEL-GROUND" SYSTEM FROM THE POINT OF VIEW OF APPLICABILITY IN SOLVING THE PROBLEM OF MODELING THE PROCESS OF COMPACTION OF SNOW MASS BY A PNEUMATIC ROLLER**

*Rusmilenko A.K., Egorov A.L., Egorov M.A.  
Tyumen Industrial University, Tyumen*

**Keywords:** pneumatic roller, mathematical model of a tire, compaction of snow mass, rheological processes of snow, wheel deformation, snow subsidence, "wheel-ground" model.

**Abstract.** The article analyzes the construction of mathematical models of interaction of the "wheel-soil" system, separately considering mathematical models of soil and wheel propeller. The scheme of the mathematical model is defined, which will be the basis of the mathematical model describing the interaction of the tire of a pneumatic-tire roller with a snow mass at the time of performing the compaction stage during the construction of winter roads. The main issue of further development of the mathematical model "wheel-snow" is to determine the relationship between the influence of various factors on the quality of compaction of the snow mass, the definition of which will be the focus of further work. The results obtained in the work can be used for the further development of a mathematical model describing the interaction of the wheel-snow system, on the basis of which it will be possible to determine the optimal operating parameters and operating modes of a pneumatic-tire roller during the construction of winter roads.

### **Введение**

Теоретической основой исследований взаимодействия колесного движителя с поверхностью качения являются положения механики грунтов [1, 2], использованные при разработке теории движения транспортных средств в условиях бездорожья [3].

Важное значение при рассмотрении моделей имеют подходы, используемые в теории упругости и пластичности, с помощью которых описывается поведение материалов и элементов конструкций под действием нагрузок. При учете временного фактора действия нагрузки и реакции системы «колесо-грунт» необходимо использовать теорию ползучести. Существующие математические модели системы «колесо-грунт» позволяют подобрать оптимальную технику для эффективного уплотнения грунта.

На данный момент времени имеется проблема отсутствия математической модели описания процессов, происходящих с уплотняемой снежной массой при строительстве автозимников, и учитывающей зависимости влияния факторов, варьирование которых влияет на конечную плотность, что не дает полной информации о происходящих процессах при уплотнении снежной массы. Как следствие, невозможно подобрать оптимальную снегоуплотняющую технику для выполнения эффективного уплотнения снежной массы при строительстве автозимников. Планируется провести анализ существующих математических моделей по уплотнению, на основе которых разработать требуемую математическую модель системы «колесо-снег» с учетом реологических свойств снежной массы.

Приближением к реальным моделям является рассмотрение систем с упругим основанием и с жестким или упругим колесом. И, наконец, последним шагом в развитии моделей системы «колесо-грунт» является одновременный учет пластических и реологических свойств грунта и упругости колеса [4].

### **Известные математические модели системы «колесо-грунт» и математические модели описания реологических процессов снега**

В таблице 1 приведены рассматриваемые в статье работы.

Табл. 1. Рассматриваемые работы

№	Название работы	Авторы	Год опубликования
1	Аналитический анализ процесса качения пневматического колеса по деформируемому грунту	Лазарев В.В.	2009
2	Тракторы: Теория	Гуськов В.В., Велев Н.Н., Артамонов Ю.Е.	1988
3	Научные основы создания комплексов машин для строительства временных зимних дорог в районах Севера и Сибири	Мерданов Ш.М.	2010
4	Исследование колеобразования и тягово-сцепных свойств движителей колесных лесных машин при работе на заснеженных лесосеках	Тарадин Г.С.	2020
5	Estimation of Rheological Properties of Snow Subjected to Creep	Chaman Chandel, P.K. Srivastava, Agraj Upadhyay	2007

В статье Лазарева В.В. «Аналитический анализ процесса качения пневматического колеса по деформируемому грунту» [5] автор анализирует процесс качения пневматика (ведомое колесо) по деформируемому грунту. Рассмотрена зависимость между нормальным напряжением и осадкой грунта, которая представлена функцией гиперболического тангенса (при ряде допущений). Приведены зависимости для расчета глубины колеи, силы сопротивления деформируемого грунта.

В работе использовали ряд зависимостей. Приведем их. По В.В. Кацигину:

$$\sigma = \sigma_0 \operatorname{th} \left( \frac{k_0 h}{\sigma_0} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma$  – нормальное напряжение грунта в зависимости от глубины  $h$  погружения штампа;  $\sigma_0$  – предел прочности грунта на одноосное сжатие, при котором начинает возрастать деформирование грунта без дальнейшего увеличения действующей на опорную поверхность вертикальной нагрузки, Па;  $k_0$  – коэффициент объемного смятия грунта, Н/м<sup>3</sup>;  $h$  – глубина колеи, м.

Подтвержденную экспериментом (Н.А. Ульяновым) зависимость напряжения от сжатия и усадки грунта:

$$\sigma = \frac{q}{1 + \left(\frac{z}{aD}\right)}, \quad (2)$$

где  $a$  – коэффициент, характеризующий затухание напряжения в грунте;  $D$  – диаметр штампа;  $q$  – коэффициент уплотнения грунта;  $z$  – расстояние от рассматриваемого элементарного слоя грунта до поверхности контакта штампа с грунтом.

Рассматривали прямолинейную и криволинейную зоны контакта. После проведения преобразований было получено:

$$h = \frac{\sigma_0}{2k_0} \ln \frac{(1+q/\sigma_0)}{(1-q/\sigma_0)}. \quad (3)$$

Значения коэффициента объемного смятия грунта находятся в обратной зависимости от размера колеса. Поэтому вместо него рекомендуют рассматривать коэффициент, приведенный к размерам колеса:

$$k_k = \frac{k_0}{100\sqrt{B \cdot D}}, \quad (4)$$

где  $B$  и  $D$  – соответственно ширина и диаметр колеса.

С учетом этого фактора в зависимостях, приведенных выше, вместо коэффициента  $k_0$  следует подставлять коэффициент  $k_k$ . В начале уплотнения зависимость между деформацией и нагрузкой линейна. Затем под колесом образуется более плотный слой, который вместе с колесом уплотняет нижние слои. Предлагается учесть это явление введением множителя. В результате:

$$h = \frac{\sigma_0}{2k_0} \cdot \frac{1}{1 - \frac{q}{\sigma_0}} \ln \left[ \frac{1 + q/\sigma_0}{1 - q/\sigma_0} \right]. \quad (5)$$

Далее определяется зависимость силы сопротивления грунта качению, предела прочности грунта, деформации грунта:

$$P_{fr} = \frac{b\sigma_0^2}{2k_k} \ln \left( \frac{e^{4k_k z/\sigma_0} + 1}{2e^{2k_k z/\sigma_0}} \right), \quad (6)$$

где  $z = 2h/3$  – условная глубина колеи в криволинейной зоне контакта колеса с грунтом;  $b$  – ширина площади проекции криволинейной зоны контакта колеса с грунтом на плоскость ZOY.

Полученные зависимости позволяют рассчитать параметры процесса качения пневматического колеса, их связь с параметрами грунта и шины.

В работе Гуськова В.В. «Тракторы: Теория» [6] рассмотрена теория колесных машин, их взаимодействие с грунтом. Приведены сведения о физических и механических свойствах грунтов. Большое внимание уделено шине, ее свойствам и поведению под нагрузкой (рис. 1, автор Гуськов В.В.).

Абсолютная деформация шины (по Хейдекею) описывается выражением:

$$h_w = \frac{G}{2\pi p_w \sqrt{r_0 r_c}}, \quad (7)$$

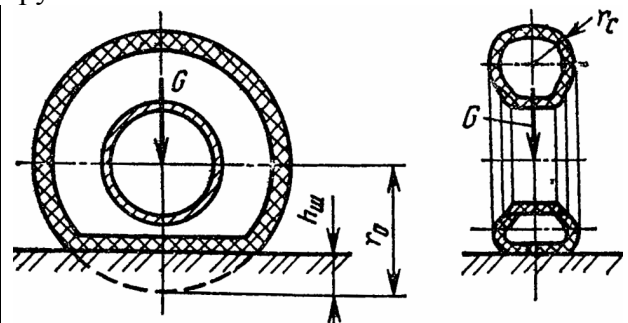


Рис. 1. Схема деформации колеса нормальной нагрузкой:  $G$  – нагрузка на колесо;  $r_0$  – свободный радиус ненагруженного колеса;  $r_c$  – радиус сечения шины;  $h_w$  – абсолютная деформация шины

где  $G$  – нагрузка на колесо;  $p_{ш}$  – давление воздуха в шине, МПа;  $r_0$  – свободный радиус ненагруженного колеса, м;  $r_c$  – радиус сечения шины, м (см. рис. 1).

Приведены расчетные зависимости для глубины колеи  $h$  и силы сопротивления  $F_{ср}$  процессу равномерного качения:

$$h = \sqrt[3]{\frac{G^2}{k^2 b^2 D}}, \quad (8)$$

$$F_{ср} = 0,5G \sqrt{\frac{G}{kbD^2}}, \quad (9)$$

где  $D$  – диаметр колеса.

Рассматривается и качение ведомого эластичного колеса по деформируемому грунту, когда имеем деформацию шины и грунта. Из-за деформирования грунта и шины эластичное колесо опирается на большую поверхность, чем жесткое, при одинаковом размере. По результатам ряда исследований предлагается заменить эластичное колесо жестким, но с другим диаметром, увеличенным, так как нагрузка нормальная распределяется на большую площадь. Схема замены размеров колес в этом случае показана на рисунке 2 (автор: Гуськов В.В.), где  $r_{жп}$  – радиус жесткого колеса;  $r_0$  – радиус эластичного колеса;  $B$  – высота грунта относительно вертикальной оси колеса;  $A$  – точка начала контакта;  $h$  – глубина колеи эластичной шины;  $h_{ш}$  – разность глубины колеи.

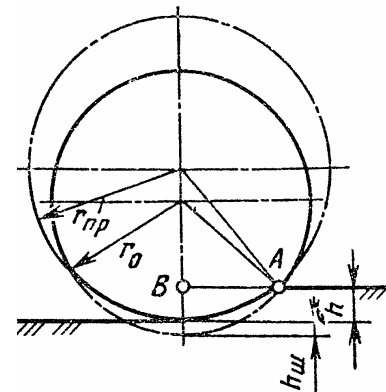


Рис. 2. Приведение размеров колеса (от эластичного к жесткому)

Соотношение для определения приведенного диаметра имеет следующий вид:

$$D_{жп} = \frac{D_0(h + h_{ш}) - h_{ш}(2h + h_{ш})}{h} = D_0 + \frac{h_{ш}}{h}(D_0 - 2h - h_{ш}), \quad (10)$$

где  $h_{ш}$  – разность глубины колеи, м.

Кроме того, приведен пример расчета (см. рис. 3, автор Гуськов В.В.) для эластичного колеса 13,6R38 с давлением шины  $0,8 \times 10^5$  Па и эквивалентного жесткого колеса (диаметр 1,57 м и ширина 0,32 м), для различных нагрузок по поверхности суглинка с нормальной влажностью ( $\sigma_0 = 2,6$  МПа и  $k = 0,14 \cdot 10^7$  Н/м<sup>3</sup>).

Сопоставление зависимостей глубины колеи и усилия сопротивления качению от приложенного усилия показывает, что как глубина колеи, так и усилие сопротивления при одинаковом значении приложенной нагрузки меньше для случая эластичного колеса. Это связано с большей площадью контакта колеса с грунтом.

Модели, при всей своей сложности, позволяют уменьшить число гипотез, предположений и рассматривать конкретное колесо, его деформацию и деформацию конкретного грунта с применением минимального возможного количества экспериментальных параметров и результатов.

В работе Мерданова Ш.М. «Научные основы создания комплексов машин для строительства временных зимних дорог в районах Севера и Сибири» [7] рассмотрены научные основы проектирования техники для строительства автозимников. Большое внимание уделено снежному грунту, технологии создания дорог, их этапам, важным характеристикам грунта и техники, в зависимости от этапа. Выдвинуто предложение

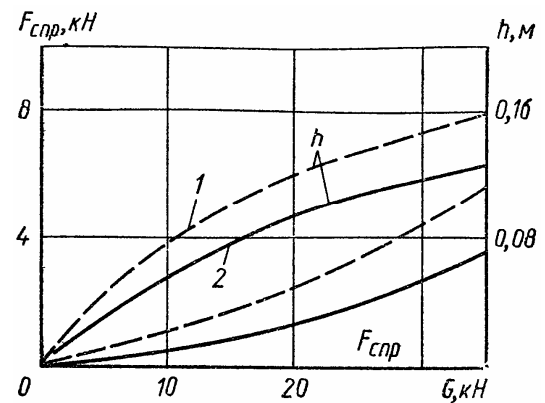


Рис. 3. Зависимость глубины колеи и силы сопротивления: 1 – жесткое колесо, 2 – эластичное колесо

рассматривать снежный грунт как упруговязкопластическую, релаксирующую среду по модели Шведова (рис. 4, автор Мерданов Ш.М., где  $P$  – напряжение;  $U_1, U_2$  – механический элемент, показывающих упругие свойства;  $B$  – механический элемент, изображающий вязкие свойства;  $Ж$  – механический элемент, изображающий пластические свойства).

В соответствии с данной моделью работу системы элементов для снега рассматривают в нескольких этапах. Первый – при нагрузке сжатия на снег работает упругий элемент  $U_1$ , возникает упругая деформация; второй этап – при дальнейшем нагружении включается вязкий элемент  $B$  (стадия ползучести); третий этап – ползучесть продолжается до тех пор, пока приложенная нагрузка не будет скомпенсирована деформацией

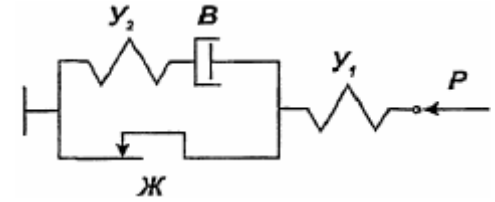


Рис. 4. Модель Шведова для снежного грунта

элемента  $U_2$ ; четвертый этап нагружения – включается пластический элемент  $Ж$ . Характеристики упругих, вязкого и пластичных элементов зависят от многих факторов состояния снежного грунта, таких как плотность и влажность, температура, уровня напряжений и деформаций. Реологическая модель Шведова описывается следующими уравнениями:

$$\sigma + T_p \left( \frac{dV}{dt} \right) + G_\sigma \gamma = \epsilon E + E_0 T_p \left( \frac{d\epsilon}{dt} \right), \quad (11)$$

$$E = \frac{E_0 E_1}{(E_0 + E_1)}; \quad T_p = \frac{\eta}{(E_0 + E_1)}, \quad (12)$$

где  $\sigma$  – удельное давление;  $\epsilon$  – относительная деформация;  $E, E_0, E_1$  – модули деформации;  $\eta$  – коэффициент вязкости;  $\gamma$  – напряжение сдвига;  $T_p$  – время релаксации;  $\gamma$  – относительный сдвиг;  $G_\sigma$  – модуль упругости;  $V$  – скорость сдвига.

Нахождение коэффициентов в уравнениях модели Шведова (коэффициент вязкости, модули) достаточно трудоемко, поэтому в работе предлагается применять математический метод планирования многофакторного эксперимента. Эта теория позволяет найти оптимальные условия процесса, а также построить интерполяционную модель с определенной точностью.

Приведены виды зависимостей конечной плотности снега от одного из факторов при постоянстве других. Соотношения важны для понимания поведения грунта в тех или иных условиях. Желательно, при имеющейся информации по грунту, все-таки проводить их с конкретным грунтом и в конкретных условиях для понимания его поведения.

В диссертационной работе Г.С. Тарадина «Исследование колееобразования и тягово-сцепных свойств движителей колесных лесных машин при работе на заснеженных лесосеках» [8] рассматривается снежный грунт, который уплотняется и упрочняется под колесами машин. Кроме исследования процесса уплотнения, анализируются тягово-сцепные свойства машины. При теоретических разработках применен модельный подход, численное решение уравнений взаимодействия грунта и машины в зоне контакта. Предложенная модель уточняет теоретическое описание контакта, так как используется нелинейная зависимость упрочнения грунта в ходе процесса уплотнения. Проведенное исследование для условий бездорожья и снежного покрытия позволяет обосновать и выбрать параметры машины, используя оценку глубины колеи и тяговых свойств машины, а также оптимизировать интервал свойств снежного грунта и давления на него. В работе по данным ряда исследователей представлен обширный материал по физико-механическим свойствам снега, в разных его состояниях. Приведены зависимости характеристик процесса уплотнения. Деформация снега  $h$  под воздействием нормального давления  $p_z$  определяется по формуле:

$$h = \frac{p_z}{\left( \frac{1}{h_{\max}} \right) p_z + k}, \quad (13)$$

где  $k$  – жесткость снега при начальной плотности;  $h_{\max}$  – коэффициент, характеризующий деформацию снега при давлении, соответствующем максимальному уплотнению;  $p_z$  – воздействие нормального давления.

Для коэффициента уплотняемости предложена формула

$$n_y = \frac{a}{\rho_0 + a}, \quad (14)$$

где  $a$  – эмпирический коэффициент,  $a = 0,3 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_0$  – плотность целинного снега.

Удельное сопротивление снега сдвигу  $\tau$  определяется, базируясь на формулировке закона Кулона-Мора:

$$\tau = C + p_z \operatorname{tg} \varphi, \quad (15)$$

где  $C$  – удельное сцепление снега,  $\varphi$  – угол внутреннего трения снега.

В работе приводятся в табличном виде величины указанных в уравнениях коэффициентов. Получены следующие уравнения, позволяющие определить физико-механические свойства снега: угол внутреннего трения  $\varphi$  [°], удельное сцепление  $C$  [МПа], модуль общей деформации  $E$  [МПа], коэффициент трения резины и стали о снег  $\varphi_{mp}$  в зависимости от его удельного веса  $\gamma$  и температуры  $T$ :

$$\varphi = a_f (1000\gamma)^{b_f}, \quad (16)$$

$$C = a_c + (50\gamma)^{b_c}; \quad C = a_c + (100\gamma)^{b_c}, \quad (17)$$

$$E = a_E (1000\gamma)^{b_E}; \quad \varphi_{mp} = a_{mp} (1000\gamma)^{b_{mp}}, \quad (18)$$

где  $a, b$  – эмпирические коэффициенты.

Проведенный Г.С. Тарадиным анализ показал, что снег по своим свойствам сопоставим со слабыми грунтами, и основные параметры модели взаимодействия определяются удельным весом. Важно, что при разработке модели машина рассматривалась как жесткий штамп, а поверхность – как деформируемое полупространство. Действовала внешняя нагрузка, равная весу машины. Находилась осадка штампа, сила сопротивления перемещению и сила сцепления с поверхностью. Предложенная методика может быть реализована с применением вычислительных средств. Рассмотрено одноосное сжатие, приведены зависимости деформации, напряжения от плотности снега. Затем приводится случай взаимодействия с упругим полупространством. Входные параметры для снега в модели – плотность и толщина, для машины – геометрические размеры колеса, скорость, нагрузка.

Оседание снега происходит в результате явления ползучести под действием давления вскрышных пород, а также из-за метаморфических процессов, происходящих внутри снежного покрова. В статье Chaman Chandel «Estimation of Rheological Properties of Snow Subjected to Creep» [9] для моделирования ползучести снега используется четырехпараметрическая модель вязкоупругой жидкости ( $E_1, E_2, \eta_1, \eta_2$ ), которая объединяет модели Кельвина и Максвелла, как показано на рисунке 5, (автор Chaman Chandel).

Общая деформация системы в зависимости от времени определяется соотношением:

$$\varepsilon(t) = \sigma \left\{ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{E_2} \left( 1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}} \right) \right\}, \quad (19)$$

где  $e$  – модуль упругости.

Вязкоупругий характер снега по данной модели контролируется различными реологическими константами. В статье выполнена оценка всех реологических констант в

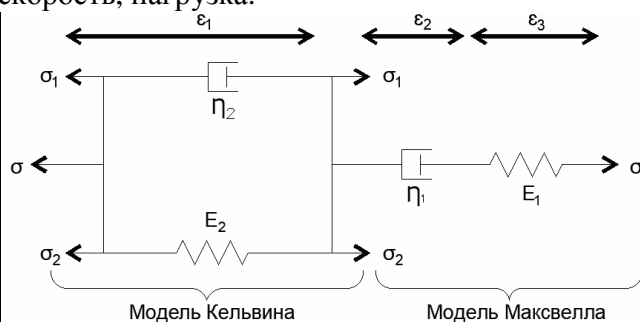


Рис. 5. Модель вязкоупругой жидкости:  $\sigma, \sigma_1, \sigma_2$  – напряжение;  $E_1, E_2, E_3$  – механический элемент, показывающих упругие свойства;  $\eta_1, \eta_2$  – механический элемент, изображающий вязкие свойства;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  – относительная деформация.

четырёхпараметрической модели вязкоупругой жидкости, соответствующей свойствам снега при ползучести. Для их определения был проведен 91 эксперимент по одноосному неограниченному постоянному напряжению на просеянном снегу при контролируемых температурных условиях. Обнаружено существенное влияние плотности и изменения температуры на эти константы. Аналогичная модель описывается и в работе [10].

Для описания свойств грунта применяют модели сплошной среды. К ним относятся разные модели (частные случаи): изотропные и анизотропные среды или тела, однородные и неоднородные, линейные и нелинейные. В свою очередь каждая из таких моделей тоже представляет собой сочетание элементов с упругими или пластическими свойствами, вязкие среды. Комбинацией моделей получают комбинированные модели, в которых среды сочетают несколько свойств. То есть существует набор моделей, который можно совершенствовать до бесконечности, чтобы все более точно описывать среду, учитывать глубину познания факторов поведения. Количество моделей среды для рассмотрения ее деформирования может быть множество, но все они представляют собой разные комбинации основных моделей среды – упругой, пластической и вязкой.

### **Выводы**

Работы Лазарева В.В. «Аналитический анализ процесса качения пневматического колеса по деформируемому грунту» (№1 в таблице 1) и Гуськова В.В. «Тракторы: Теория» (№2 в таблице 1) позволяют использовать уже полностью готовые математические модели, описывающие поведение шины пневмоколесного катка, так как в работах уделено большое внимание свойствам шины и поведению под нагрузкой, учитываются зависимости оказываемой нагрузки и деформирования шин при уплотнении, а так же учитывается взаимодействие с грунтом, рассмотрена зависимость между нормальным напряжением и осадкой грунта, которую представляют функцией гиперболического тангенса (при ряде допущений). Но в работах рассмотрено взаимодействие только системы «колесо-грунт», что не позволяет дать представление о поведении снежной массы при уплотнении и не позволяет определить параметры техники для достижения определённой конечной плотности.

Работа Г.С. Тарадина «Исследование колеобразования и тягово-сцепных свойств движителей колесных лесных машин при работе на заснеженных лесосеках» (№4 в таблице 1) дает представление, что снег по своим свойствам сопоставим со слабыми грунтами, и основные параметры модели взаимодействия определяются удельным весом, рассмотрено одноосное сжатие, приведены зависимости деформации, напряжения от плотности снега. Предложенная модель уточняет теоретическое описание контакта, позволяет обосновать и выбрать параметры машины, используя оценку глубины колеи и тяговых свойств машины, а также оптимизировать интервал свойств снежного грунта и давления на него. Но данная модель не описывает упруговязкопластические процессы поведения снежной массы с высоким напряжением.

Работа Chaman Chandel «Estimation of Rheological Properties of Snow Subjected to Creep» (№5 в таблице 1) дает более точное описание процесса ползучести снега, путем использования четырехпараметрической модели вязкоупругой жидкости, сочетающей модели Кельвина и Максвелла, что является важным при изучении уплотнения снежной массы.

Для дальнейших исследований с целью определения воздействия свойств и параметров шины пневмоколесного катка на уплотняемую снежную массу за основу целесообразно взять уже имеющуюся математическую модель (экспериментально подтвержденные и научно обоснованные) Ш.М. Мерданова, приведенную в работе «Научные основы создания комплексов машин для строительства временных зимних дорог в районах Севера и Сибири» (№3 в таблице 1), так как в работе большое внимание уделено снежному грунту, технологии создания автозимников, их этапам, важным характеристикам грунта и техники, в зависимости от этапа. Выдвинуто предложение рассматривать снежный грунт как упруговязкопластическую, релаксирующую среду по модели Шведова. Приведены виды зависимостей конечной плотности снега от одного из факторов при постоянстве других,

которые важны для понимания поведения грунта в тех или иных условиях. Так же приведены аналитические выражения и характер зависимостей. Но в работе не рассмотрено влияние различных факторов снежной массы на качество уплотнения снежной массы, что является необходимым, потому что они играют значимую роль в эффективности работы снегоуплотняющей техники.

#### Список литературы

1. Цытович Н.А. Механика грунтов. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1963. – 638 с.
2. Мангушев Р.А., Карлов В.Д., Сахаров И.И. Механика грунтов. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2009. – 264 с.
3. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
4. Аванесян А.М., Оберемок В.А., Сергеев Н.В. К вопросу о моделировании процесса взаимодействия эластичного колеса с почвенным основанием // Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ. – 2020. – №155. – С. 13-24. – DOI: 10.21515/1990-4665-155-002.
5. Лазарев В.В. Аналитический анализ процесса качения пневматического колеса по деформируемому грунту // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2009. – №22. – DOI: 10.0000/cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-analiz-protsesta-kacheniya-pnevmaticheskogo-kolesa-po-deformiruемому-gruntu.
6. Гуськов В.В., Велев Н.Н., Артамонов Ю.Е. Тракторы: теория / под общ. ред. В.В. Гуськова. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с.
7. Мерданов Ш.М. Научные основы создания комплексов машин для строительства временных зимних дорог в районах Севера и Сибири: Дисс. ... докт. техн. наук. – Тюмень, 2010. – 326 с
8. Тарадин Г.С. Исследование колееобразования и тягово-сцепных свойств движителей колесных лесных машин при работе на заснеженных лесосеках: Дисс. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург: 2020. – 115 с.
9. Chaman Chandel, P.K. Srivastava, Agraj Upadhyay. Estimation of Rheological Properties of Snow Subjected to Creep // Defence Science Journal. 2007, vol. 57, no. 4, pp. 393-401.
10. Lewis H. Shapiro, Jerome B. Johnson, Matthew Sturm, George L. Blaisdell. Snow Mechanics: Review of the State of Knowledge and Applications // CRREL Report 97-3. August 1997. 41 p.

#### References

1. Tsytoovich N.A. Mechanics of soils. – Ed. 4, revised and add. – M.: Higher School, 1963. – 638 p.
2. Mangushev R.A., Karlov V.D., Sakharov I.I. Soil mechanics. – M.: Association of Construction Universities, 2009. – 264 p.
3. Ageikin Ya.S. The passability of cars. – M.: Mechanical Engineering, 1981. – 232 p.
4. Avanesyan A.M., Oberemok V.A., Sergeev N.V. On the issue of modeling the process of interaction of an elastic wheel with a soil base // Polythematic network electronic scientific journal of KubSAU. 2020, vol. 155, pp. 13-24. – DOI: 10.21515/1990-4665-155-002.
5. Lazarev V.V. Analytical analysis of the rolling process of a pneumatic wheel on deformable soil // Actual problems of the forest complex. 2009, no. 22. DOI: 10.0000/cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-analiz-protsesta-kacheniya-pnevmaticheskogo-kolesa-po-deformiruемому-gruntu.
6. Guskov V.V., Velev N.N., Artamonov Yu.E. Tractors: Theory / under the general editorship of V.V. Guskov. – M.: Mechanical Engineering, 1988. – 376 p.
7. Merdanov Sh.M. Scientific foundations of the creation of complexes of machines for the construction of temporary winter roads in the regions of the North and Siberia: Diss. ... doct. of tech. sc. – Tyumen, 2010. – 326 p.
8. Taradin G.S. Investigation of track formation and traction properties of movers of wheeled forest machines when working on snow-covered logging areas: Diss. ... of cand. of tech. sc. – Saint-Petersburg, 2020. – 115 p.
9. Chaman Chandel, P.K. Srivastava, Agraj Upadhyay. Estimation of Rheological Properties of Snow Subjected to Creep // Defence Science Journal. 2007, vol. 57, no. 4, pp. 393-401.
10. Lewis H. Shapiro, Jerome B. Johnson, Matthew Sturm, George L. Blaisdell. Snow Mechanics: Review of the State of Knowledge and Applications // CRREL Report 97-3. August 1997. 41 p.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Русмиленко Антон Константинович</b> – аспирант	<b>Rusmilenko Anton Konstantinovich</b> – postgraduate student
<b>Егоров Андрей Леонидович</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспортные и технологические системы»	<b>Egorov Andrey Leonidovich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of transport and technological systems
<b>Егоров Максим Андреевич</b> – студент	<b>Egorov Maksim Andreevich</b> – student
rustorm@bk.ru	

Получена 15.08.2024