



УДК 630*377.49

И.Н. Кручинин

Кручинин Игорь Николаевич родился в 1962 г., окончил в 1984 г. Уральский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта и дорожного строительства Уральского государственного лесотехнического университета. Имеет 46 печатных работ по проблемам транспорта леса, строительства и эксплуатации автомобильных дорог.



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ХОДОВОЙ ЧАСТИ ЛЕСОТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Предложены методы и математическая модель оценки опорной проходимости лесотранспортных машин при перемещении по водонасыщенным лесным почвогрунтам и глубокому снежному покрову.

Ключевые слова: опорная поверхность, лесотранспортные машины, математическая модель, колееобразование, нормальное давление.

Урал характеризуется суровым климатом, многоснежной зимой, преобладанием заболоченных и переувлажненных грунтов 3-й и 4-й категорий, продолжительным межсезоньем. Современные отечественные и зарубежные лесотранспортные машины удовлетворительно работают лишь на сухих почвах при ограниченном количестве проходов по одному следу и небольшой глубине снежного покрова.

Различия в типах опорной поверхности вызывают определенные трудности при проектировании ходовых частей лесотранспортных машин (ЛТМ). Поэтому приобретает актуальность проблема создания ходовых частей, одинаково хорошо работающих в различных условиях, особенно в регионах, для которых характерна сезонность заготовки древесины.

Цель настоящей работы – обосновать математическую модель взаимодействия ходовой части ЛТМ с различными опорными поверхностями для выбора таких их параметров, которые обеспечивают движение ЛТМ в течение всего осенне-зимне-весеннего сезона.

Проходимость современных машин обычно оценивают по критерию среднего нормального давления на опорную поверхность. Принимая во внимание, что для современных ЛТМ допускаются достаточно малые значения давления на почву, они должны соответствовать лесоводственным

требованиям [2], поэтому необходимы новые научно обоснованные подходы к конструированию и совершенствованию методов расчета ходовых частей.

Кафедра транспорта и дорожного строительства Уральского государственного лесотехнического университета проводит научные исследования в области повышения эффективности работы лесотранспортных систем и их влияния на лесную экосистему, одним из направлений которых является совершенствование ходовых частей ЛТМ.

Для реализации теоретических предложений и оценки адекватности полученных результатов на практике был изготовлен экспериментальный сортиментовоз [3] на гибких резинометаллических гусеницах (РМГ), надетых на пневматические шины. Он был использован для разработки математической модели.

Оценка воздействия ЛТМ на опорную поверхность возможна лишь при анализе ее напряженно-деформированного состояния. Моделью водонасыщенного грунтового массива является классическая система дифференциальных уравнений Терцаги – Герсеванова [4], описывающая напряженное состояние грунта при действии нормальных нагрузок от прохода ЛТМ. Для модели снежного покрова использовали систему дифференциальных уравнений в переменных Лагранжа, описывающую многокомпонентную упругопластичную среду и ее напряженное состояние.

В качестве расчетной схемы применили гибкую резинометаллическую гусеницу, надетую на пневматические колеса (рис. 1). Такая схема позволяет изучать не только гусеничные ходовые устройства, но и пневмоколесную часть современных ЛТМ.

При выборе расчетной схемы и построении математической модели приняты следующие допущения: ЛТМ движется по ровной, однородной

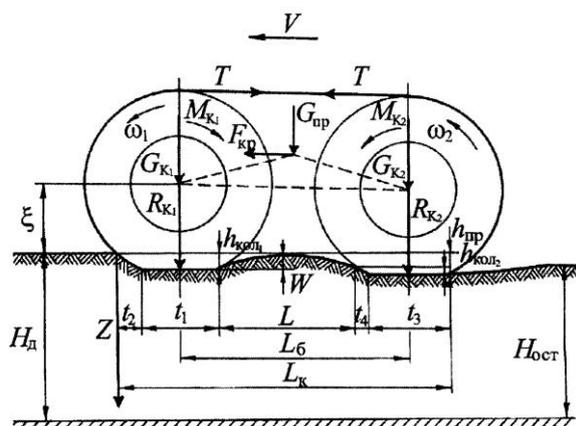


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия резинометаллической гусеницы экспериментального сортиментовоза с деформируемой опорной поверхностью

опорной поверхности глубиной H_d . В наиболее неблагоприятных почвенно-грунтовых условиях (отсутствуют корни деревьев, ветки, порубочные остатки как армирующий слой опорной поверхности); колеса сортировоза находятся в ведомом режиме; натяжение гусеницы T передается на протектор пневмошины по дуге обхвата; РМГ принимаем нерастяжимой в продольном направлении и гибкой в поперечном сечении.

Внешнюю нагрузку на опорную поверхность от РМГ рассчитывают в виде эпюр давления по длине ходовой части и глубине опорной поверхности. Однако получить решение непосредственно в виде деформации поверхности невозможно, так как в выражение входят параметры, зависящие от самой глубины погружения $h_{\text{кол}}$.

Системы уравнений можно решить методом подстановки (подбора), задаваясь различными значениями глубины колеи $h_{\text{кол}}$ до момента, при котором давление от ходовой части уравновесится силой сопротивления уплотнению опорной поверхности. Если для расчета давления от пневмоколес можно воспользоваться методикой А.С. Агейкина [1], то гибкая резинометаллическая гусеница взаимодействует с опорной поверхностью иначе, чем общеизвестные металлические гусеницы.

Рабочую ветвь L (межколесное пространство с учетом длины пятна контакта пневмокатка) гусеницы можно представить в виде гибкой анизотропной пластинки [3, 4], у которой края $t_1 - t_4$ свободно оперты, а боковые свободны. Пластика находится под действием равномерного растягивающего усилия T (Н) в направлении y . Причем на поверхность пластинки действует равномерно распределенная нагрузка q (Н/м²) со стороны опорного массива.

Края t_1 и t_4 соответствуют месту выхода гусеницы из пятна контакта переднего и заднего пневмокатков. Распределение равномерной q со стороны опорного массива на пластинку представим в виде двойных тригонометрических рядов

$$f(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}. \quad (1)$$

Тогда граничные условия для свободно опертых краев имеют вид:

$$W = 0 \text{ при } x = 0, x = a, y = 0, y = b;$$

$$-D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) = 0 \text{ при } x = a, y = b;$$

для свободных краев

$$\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \mu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) = 0 \text{ при } y = b;$$

$$\frac{\partial^3 W}{\partial y^3} + (2 - \mu) \frac{\partial^3 W}{\partial x^2 \partial y} = 0,$$

где W – прогиб пластинки;

μ – коэффициент Пуассона.

Прогиб W должен удовлетворять приведенным граничным условиям и однородному дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^4 W}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 W}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} - \frac{T}{D} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = f(x, y). \quad (2)$$

Это уравнение и граничные условия будут удовлетворены, если применять прогиб W пластинки в виде двойных тригонометрических рядов (1)

$$W = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}.$$

Постоянные a_{mn} определены путем подстановки в уравнение (2) разложенных гиперболических функций и их производений на $m\pi x/b$ в ряды Фурье по синусам в интервале $0 \leq x \leq a$.

В конечном виде уравнение изогнутой центральной линии опорной ветви гусеницы представлено в виде оригинального решения:

$$W = \frac{16q}{\pi^6 D} \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{mn \left[\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) + \frac{T_y m^2}{\pi^2 D a^2} \right]} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b},$$

где m, n – нечетные числа 1, 3, 5, ...;

a, b – ширина и длина пластинки соответственно, м;

D – изгибная жесткость пластинки в продольном направлении, Н·м.

Основываясь на быстрой сходимости ряда, для практических расчетов можно выполнить решение при $m = 1$ и $n = 1$.

На рис. 2 представлены значения прогиба рабочей ветви, определенные на модели, и экспериментальные для РМГ на пневмошинах 320–508 модели ИЯВ-12 на переувлажненном минерализованном волокне с несущей способностью 140 кПа, при нагрузке на сортиментовоз 131 кН.

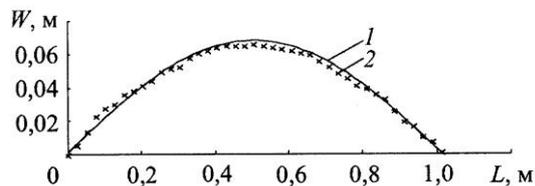


Рис. 2. Прогиб рабочей ветви резинометаллической гусеницы на переувлажненном минерализованном волокне: 1 – расчетные значения; 2 – экспериментальные

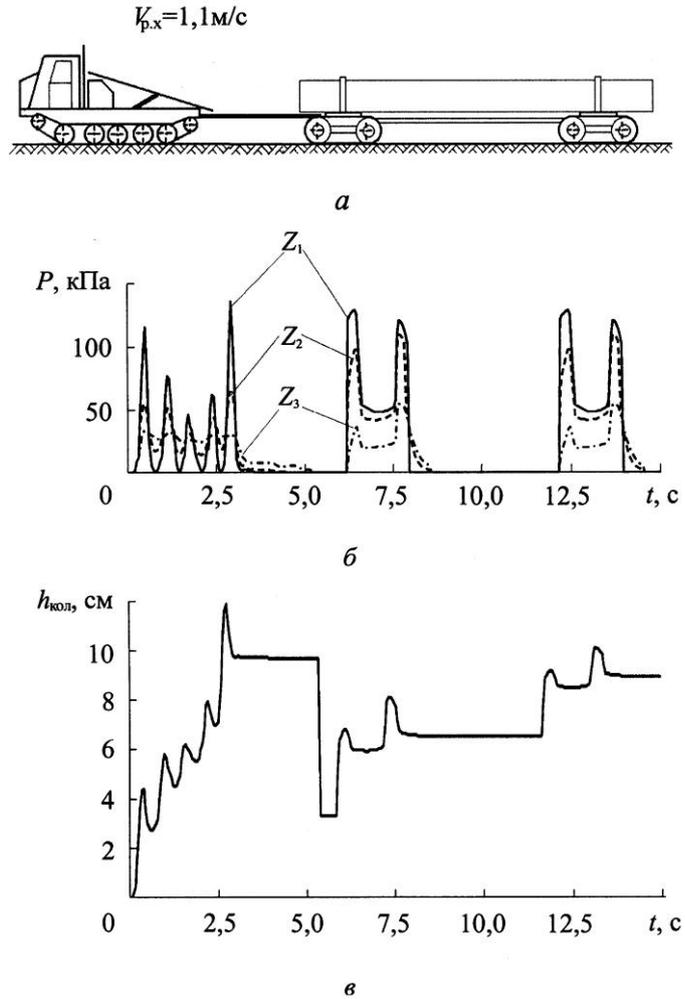


Рис. 3. Результаты численного моделирования однократного прохода экспериментального сортиментовоза по переувлажненному волоку: *a* – схема экспериментального сортиментовоза; *б* – распределение нормальных напряжений по глубине грунтового массива; $Z_1 = 0,2$; $Z_2 = 0,3$; $Z_3 = 0,5$ м; *в* – колееобразование

На рис. 3 представлен один из вариантов решения в виде эпюры распределения нормального давления по длине контакта экспериментального сортиментовоза, а также численное решение текущей деформации на переувлажненном минерализованном волоку в виде колеи. При моделировании грунтовых условий задавали диапазон изменения параметров грунта и использовали встроенную программу реализации нормального закона распределения случайной величины, так как анализ выборочной плотности вероятностей грунтовых условий, по которым перемещаются ЛТМ, позволяет с

достаточно высокой надежностью принимать в качестве теоретической нормальную плотность распределения.

Разработанная модель дает возможность оценивать изменения физико-механических свойств опорной поверхности как при однократных, так и при многократных проходах по одному следу и выработать рекомендации по применению систем ЛТМ в заданных условиях эксплуатации.

Выводы

1. Рассмотренная математическая модель и результаты расчета хорошо согласуются с опытными данными.

2. Впервые получены закономерности взаимодействия гибкой резинометаллической гусеницы с различными опорными поверхностями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агейкин, Я.С.* Проходимость автомобилей [Текст] / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
2. Заготовка сортиментов на лесосеке. Технология и машины / А.В. Жуков, И.К. Иевинь, А.С. Федоренчик, Ю.И. Провоторов [и др.]. – М.: Экология, 1993. – 311 с.
3. *Кручинин, И.Н.* Основы взаимодействия резинометаллических гусениц с лесными грунтами и пути повышения проходимости лесотранспортных машин [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И.Н. Кручинин. – Воронеж, 1998. – 22 с.
4. *Тимошенко, С.П.* Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1966. – 636 с.

I.N. Kruchinin

Mathematical Model for Calculation of Undercarriage Parameters of Forest Machines

Methods and mathematical model for assessment of supporting flotation of forest-transport machines in their movement along water-saturated soils and deep snow cover have been suggested.

