

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ КОЛЕСА ПО СНЕЖНОМУ ПОЛОТНУ ПУТИ С УЧЕТОМ НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЙ В ЗОНЕ КОНТАКТА

Зезюлин Д.В., Макаров В.С., Беляков В.В.

«Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород, Россия (603950, ГСП-41, Н.Новгород, ул. Минина, д.24), e-mail: balakhnaman@gmail.com

В статье рассматривается сила сопротивления качению колеса по снежной поверхности и влияние на нее характера распределения напряжений в зоне контакта. Показаны экспериментальные эпюры нормальных давлений в контакте шины с опорной поверхностью для шин 1300x600-533 «ТРЭКОЛ» и КИ-115АМ 12.00 R18. Приведена методика учета неравномерности распределения давлений в контакте шины с опорной поверхностью при расчете силы сопротивления от смятия снега. Рассчитаны и сведены в таблицу коэффициенты, характеризующие неравномерность распределения давлений для различных типов шин. Проанализировано влияние неравномерности распределения давлений. Установлено, что расхождения при расчете сопротивления для различной глубины и плотности снежного покрова могут составлять от 25 до 70%. Исследования проведены при поддержке «грантов Президента РФ» № 14.124.13.1869-МК «Разработка метода повышения эффективности использования транспортно-технологических машин в зимний период на основании экспериментально-теоретических исследований».

Ключевые слова: неравномерность распределения давлений, сопротивление качению, колесные машины, снег

METHOD OF CALCULATION OF WHEEL ROLLING RESISTANCE ON SNOWY ROAD WITH TAKING INTO ACCOUNT IRREGULARITY OF PRESSURE DISTRIBUTION IN THE CONTACT ZONE

Zezyulin D.V., Makarov V.S., Belyakov V.V.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E.Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, street Minina, 24), e-mail: balakhnaman@gmail.com

The article considers the rolling resistance force of wheel on the snow surface and the influence of the nature of the stress distribution in the contact zone on the resistance value. Experimental diagrams of normal pressure in contact zone of tires with the supporting surface for tires 1300x600-533 «TREKOL» and KI-115AM 12.00 R18 are shown. The methodology of account of the irregularity of the pressure distribution in the tire contact with the supporting surface when calculating the resistance force is given. Coefficients characterizing the irregularity of the pressure distribution for different types of tires were calculated and summarized in the table. Effect of the unevenness of the pressure distribution was analyzed.. Found that difference in the calculation of resistance for different height and density of the snow cover can range from 25 to 70%. The Investigations were carried out with the support of «The grants of the President of the Russian Federation» № 14.124.13.1869-МК «Development of a method of efficiency increasing of transport and technological vehicles in winter on the basis of experimental and theoretical researches»

Keywords: pressure distribution irregularity; rolling resistance, wheeled vehicles, snow

Сила сопротивления качению колеса складывается из $F_{fш}$ – сопротивления качению колеса, обусловленного гистерезисными потерями в шине; силы сопротивления F_{fc} , обусловленной деформацией снежного полотна пути колесом машины; $F_{fэб}$ – силы сопротивления от экскавационно-бульдозерных эффектов [4]; $F_{fфг}$ – силы сопротивления движению от фрезерования настовой корки и внутримассивных ледяных прослоек [1-3, 8]:

$$F_f = F_{fш} + F_{fc} + F_{fэб} + F_{fфг}$$

Центральное место в теории взаимодействия движителя с деформируемой опорной поверхностью занимает вопрос о распределении напряжений в зоне контакта.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены трехмерные эпюры распределений нормальных давлений в зоне контакта колес транспортных средств с опорной поверхностью при различных внутренних давлениях воздуха в шинах (рис. 1). Значения коэффициентов неравномерности распределения давлений для исследованных шин приведены в табл. 1.

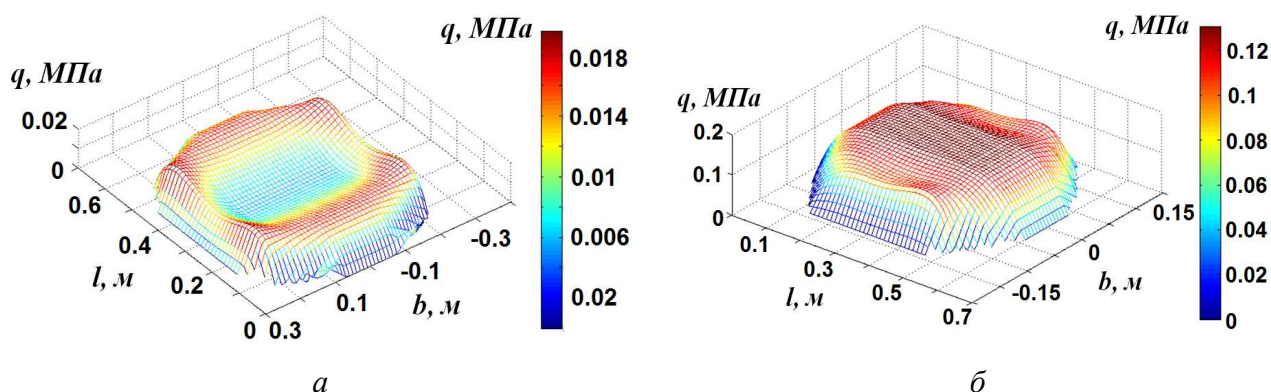


Рис. 2. Эпюры нормальных давлений в контакте шины с опорной поверхностью: *a* - для шины 1300x600-533 модели «ТРЭКОЛ» ($p_0 = 0,01$ МПа), *б* – для шины КИ-115АМ 12.00 R18 ($p_0 = 0,09$ МПа)

Необходимо стремиться к наиболее высокой точности определения силы сопротивления, обусловленного деформацией снежного полотна пути, так как она является причиной наибольших энергозатрат на передвижение машины [5]. На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма расчета сопротивления от смятия снега с учетом данных о неравномерности распределения давлений в зоне контакта шины с опорной поверхностью. Следует особо подчеркнуть, что данная методика предусматривает возможность использования любой математической модели взаимодействия пневмоколесного движителя с деформируемой опорной поверхностью. Данные о распределении давлений могут быть получены как экспериментальным, так и расчетным путем с использованием вычислительных систем, основанных на методе конечных элементов [10]. Однако в рамках данной работы расчетный метод не рассматривается.

Сила сопротивления, обусловленная деформацией снежного полотна пути колесом машины, вычисляется по [9]:

$$F_{fc} = b\gamma h_{\max}^2 \left(-\ln \left(\frac{\gamma h_{\max}}{\gamma h_{\max} + kq_{cp}} \right) - \frac{kq_{cp}}{\gamma h_{\max} + kq_{cp}} \right)$$

где k – коэффициент, характеризующий неравномерность распределения давлений в зоне контакта шин с опорной поверхностью, b – ширина колеса; γ – коэффициент начальной

жесткости снега; h_{\max} – коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному уплотнению, $q_{\text{ср}}$ – среднее давление колес на опорную поверхность.

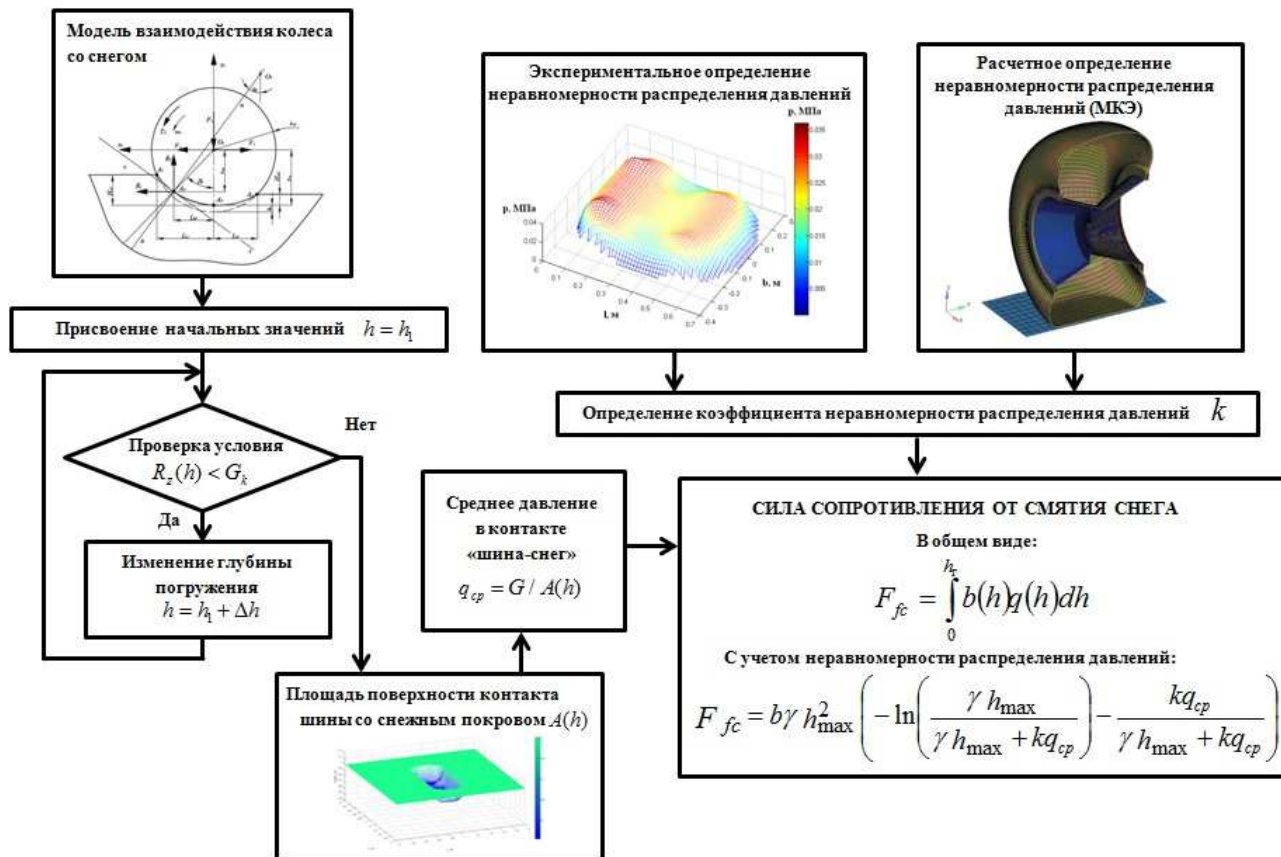


Рис. 2. Методика учета неравномерности распределения давлений в контакте шины с опорной поверхностью при расчете силы сопротивления от смятия снега

Коэффициент k рассчитан путем анализа полученных в результате экспериментальных исследований эпюр (при различных внутренних давлениях воздуха в шинах). Коэффициент k неравномерности распределения давлений – оценочный параметр, характеризующий отношение максимального (пикового) значения давления в зоне контакта шины с опорным основанием к среднему.

Значения коэффициента неравномерности распределения давлений для исследованных шин сведены в табл. 1 [6, 7].

Среднее давление на твердую опорную поверхность равно отношению нагрузки на колесо к площади контакта. В случае отсутствия точных данных о нагрузке на колесо следует определить объем эпюры либо получить сумму значений массива данных о распределении и разделить на число элементов массива. Пиковое давление определяется как максимальный элемент массива данных о распределении давлений по площади контакта колеса с опорной поверхностью.

Для нахождения объема, ограниченного поверхностью распределения нормальных давлений в пятне контакта и плоскостью XOY , необходимо воспользоваться интегрированием.

В современных системах компьютерной математики, например, MATLAB, реализовано множество современных методов численного интегрирования. Численное интегрирование заключается в приближенном вычислении определенного интеграла одним из численных методов. В основе методов численного интегрирования лежит суммирование с (некоторыми весами) значений подынтегральной функции. При наличии экспериментальных данных подынтегральные функции, характеризующие распределения давлений, задаются таблицами (массивами данных). Прямоугольная область, пределам которой соответствуют пределы интегрирования, разбивается на меньшие прямоугольники. Для каждого прямоугольника рассматривается параллелепипед, построенный на этом прямоугольнике как на основании, и с высотой равной значению подынтегральной функции в центре прямоугольника. Интеграл заменяется на сумму объемов этих параллелепипедов.

Для определения среднего давления в контакте взаимодействия колеса со снежным полотном пути по одной из существующих математических моделей необходимо проделать последовательность следующих действий. Необходимо задаваться значениями погружения колеса в снег (произвести перебор возможных погружений) и рассчитывать величины реакции снега на колесо. Если реакция снега на колесо равна нагрузке на колесо, то колесо дальше в снег погружаться не будет и выбранные значения погружения являются истинными (итерации прекращаются), в противном случае следует увеличивать значение погружения до тех пор, пока условие равенства нагрузки и реакции снега на колесо не выполнится.

В результате будет получена глубина погружения пневмоколесного движителя в снег и, соответственно, возможная поверхность контакта, площадь которой необходима для расчета величины среднего давления в контакте пары «шина-снег». В итоге будут получены все составляющие формулы расчета сопротивления от смятия снега колесом машины.

Рассмотрим, как учет реального характера распределения давления в зоне контакта колеса с опорной поверхностью влияет на точность расчета силы сопротивления от смятия снега.

На рис. 3 представлены гистограммы, позволяющие оценить, как влияет учет полученных коэффициентов на расхождения (ошибку) при расчете величины сопротивления при разной глубине снега.

Таблица 1

Обобщающие параметры колесных движителей

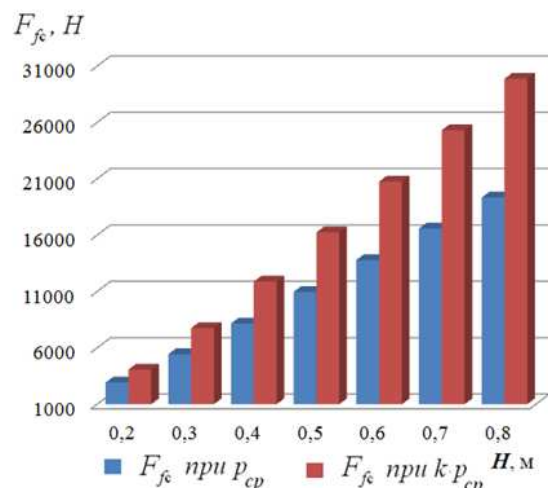
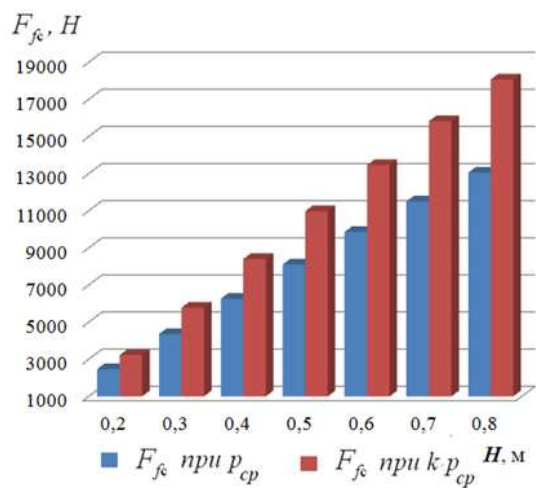
Тип шин Параметры	Шины с регулируемым давлением	Шины сверхнизкого давления	Сельскохозяйственные шины	Грузовые шины
Диапазон нагрузок, кН	15-45	4-17	10-50	9 – 50
Диапазон внутренних давлений, МПа	0,1-0,75	0,01-0,1	0,045-0,24	0,2 – 0,75
Наружный диаметр, м	0,9 – 1,4	0,9 – 1,7	0,9 – 1,7	0,9 – 1,4
Коэффициент ширины шины B/D	0,25-0,36	0,32-0,54	0,25 – 0,62	0,25 – 0,35
Коэффициент неравномерности распределения давлений, k	1,1-1,35	1,13 – 1,61	1,42 – 1,91	1,34 – 1,42

Необходимо отметить, что данные диаграммы построены при разном внутреннем давлении воздуха в шинах, поэтому также можно оценить расхождения между расчетными величинами сопротивлений при подстановке среднего давления колеса в контакте в формулу расчета и результатами расчета сопротивлений с учетом коэффициентов неравномерности распределения давлений в контакте.

Из рис. 3 отчетливо видно, что для шин с регулируемым давлением с увеличением глубины снега расхождения в расчетных данных растут. Причем, чем больше величина внутришинного давления воздуха, тем значительнее рост расхождения между расчетными данными о сопротивлениях. Что объясняется увеличением неравномерности контактных напряжений при увеличении давления воздуха в шинах.

Для шин сверхнизкого давления наблюдается противоположная картина. При снижении величины внутреннего давления воздуха в шинах наблюдается увеличение расхождения между расчетными данными о сопротивлениях. Что объясняется увеличением неравномерности контактных напряжений при снижении давления воздуха в шинах.

Общую картину влияния учета полученных коэффициентов на расчетную величину сопротивления от смятия снега в зависимости от задаваемой глубины снежного покрова, а также внутреннего давления воздуха в шинах отражают представленные на рис. 5 поверхности. Поверхности построены для двух типов снега, поэтому можно сделать и некоторые выводы о влиянии учета коэффициентов неравномерности на величину сопротивления при разной плотности снега.



$p_w = 0.09 \text{ МПа}$

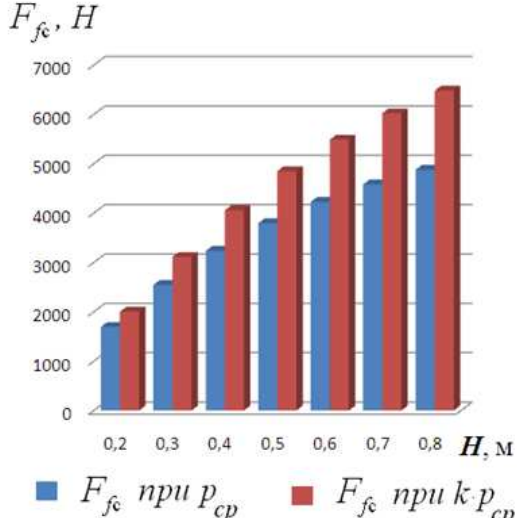
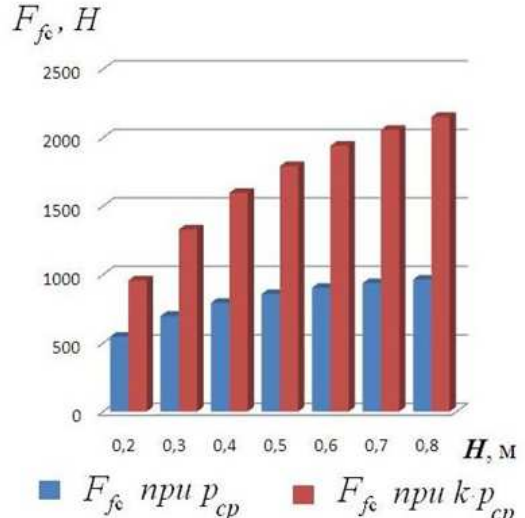
$p_w = 0.25 \text{ МПа}$

■ Подстановка среднего давления колеса в контакте в формулу расчета

■ Расчет сопротивления с учетом коэффициентов неравномерности распределения давлений

Рис. 3. Влияние учета полученных коэффициентов на расчетную величину сопротивления от смятия «снега-2» шинами КИ-115АМ 12.00 R18

Из графиков видно, что с увеличением плотности снега расхождения в расчетных данных уменьшаются, что особенно проявляется при низких давлениях воздуха в шинах.



$p_w = 0.01 \text{ МПа}$

$p_w = 0.03 \text{ МПа}$

■ Подстановка среднего давления колеса в контакте в формулу расчета

■ Расчет сопротивления с учетом коэффициентов неравномерности распределения давлений

Рис. 4. Влияние учета полученных коэффициентов на расчетную величину сопротивления от смятия «снега-2» шинами ТРЭКОЛ 1300x600-533

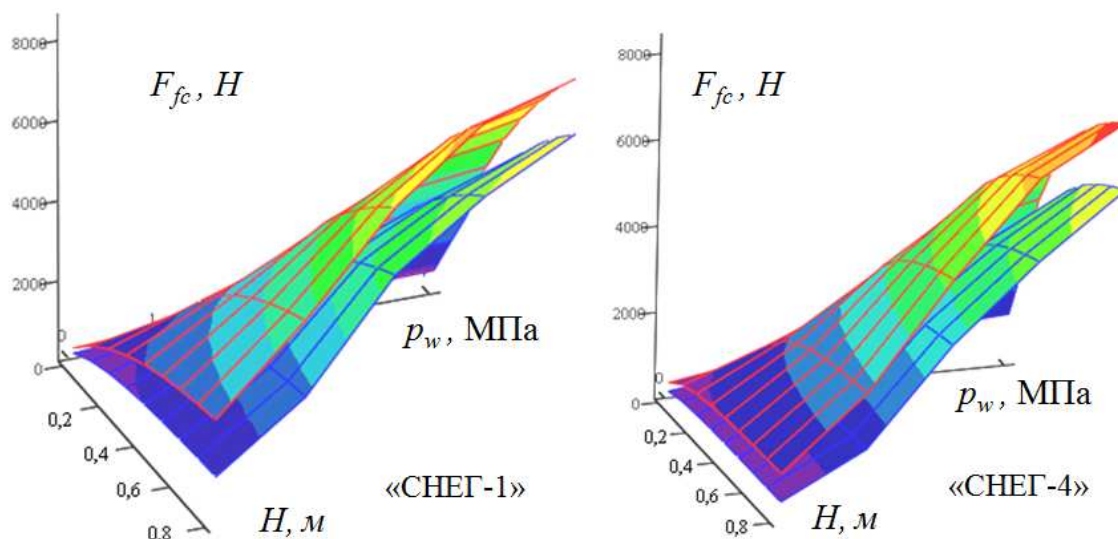


Рис. 5. Характер изменения сопротивления от смятия F_{fc} в зависимости от глубины снега H и давления воздуха в шинах p_w

В результате проведенных исследований установлено, что расхождения между расчетной величиной сопротивления от смятия снега без учета неравномерности распределения давлений в контакте шины с опорной поверхностью и результатом расчета сопротивления с учетом полученных коэффициентов неравномерности для различной глубины и плотности снежного покрова могут составлять от 25 до 70%.

Исследования проведены при поддержке «грантов Президента РФ» № 14.124.13.1869-МК «Разработка метода повышения эффективности использования транспортно-технологических машин в зимний период на основании экспериментально-теоретических исследований».

Список литературы

1. Беляков В.В. Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных средств. Дис...док.тех.наук: 05.05.03. – Нижний Новгород, 1999. – 485 с.
2. Беляков, В.В. Оценка эффективности специальных транспортных средств при движении по снегу / Беляков В.В., Галкин Д.А., Зайцев А.С., Зезюлин Д.В., Кудряшов Е.М., Макаров В.С // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – 2012. - № 2 (95). – С. 156-166.
3. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения. Научно-техническое издание (Монография) / Под. общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова Н. Новгород: ТАЛАМ, 2004. – 961 с. (ISBN 5-93496-036-9).
4. Гончаров К.О. Влияние экскавационно-бульдозерных эффектов возникающих при криволинейном движении колеса на сопротивление качению / К.О Гончаров, В.С. Макаров,

В.В. Беляков // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. – 2010. - № 6. – С. 3-3.

5. Зезюлин Д.В. Влияние параметров двигателей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин, У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. – 2012. - № 5; URL: www.science-education.ru/105-6927 (дата обращения: 17.09.2012).

6. Зезюлин Д.В. Разработка методики выбора конструкционных параметров двигателей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: Дисс... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2013 г. – 218 с.

7. Зезюлин, Д.В. Расчетный анализ влияния параметров двигателей на показатели эффективности колесных машин при движении по снежному полотну пути / Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. – 2012. – Т. 1-2. - № 42-43. – С. 41-42.

8. Макаров В.С. Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: Дисс... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2009. – 161 с.

9. Манянин С.Е. Повышение проходимости колесных машин по снегу путем применения шин сверхнизкого давления: Автореферат дисс... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2012 г. –19 с.

10. Панов В.И. Взаимодействие со снежным покровом гусеничносаночных поездов и пути повышения тяговых качеств: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Горький, 1965. – 212 с.

Рецензенты:

Молев Ю.И., д.т.н., профессор кафедры «Строительные и дорожные машины» «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева», г. Нижний Новгород.

Кравец В.Н. д.т.н., профессор кафедры «Автомобили и тракторы» «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева», г. Нижний Новгород.