

УДК 629.113

В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, К.О. Гончаров, А.В. Федоренко, В.В. Беляков

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНЫХ МАШИН
НА ОСНОВАНИИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНОГО ПОКРОВА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дается определение подвижности транспортно-технологических машин в зимний период. Рассматривается частная задача подвижности – проходимость машины в зимний период, а также понятие эффективности движения колесных машин. Представлена методика и подходы для определения статистических характеристик снежного покрова. Приводятся статистические данные по глубинам залегания и изменению плотности снежного покрова на территории Нижегородской области на примере станции метеонаблюдения «Ветлуга». Приводится пример определения проходимости и эффективности для машин одной весовой категории, но оснащенных колесами различных размеров. Делаются выводы о том, что выбор транспортных средств необходимо производить, основываясь именно на их эффективности движения, рассчитанной с учетом статистических характеристик снежного покрова.

Ключевые слова: подвижность, эффективность движения, колесные машины, статистические характеристики, снег.

Одним из важнейших свойств характеризующих транспортные средства, является подвижность. *Подвижность* – это интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин (ТТМ), определяющее способность ТТМ выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и состоянию самой машины. Можно выделить потерю подвижности по живучести и мобильности. *Живучесть* (подвижность по живучести) – это отказная надежность транспортного средства ТС. *Мобильность* (подвижность по мобильности) – эксплуатационная надежность ТС. При этом *проходимость* – это эксплуатационное свойство, определяющее возможность движения автомобиля в ухудшенных дорожных условиях, по бездорожью, которая относится к критическим условиям подвижности машины по мобильности [1, 2, 5, 7-9, 18].

При разработке транспортных машин для заснеженной местности проектировщик задается вопросом обеспечения необходимого уровня проходимости машины. Другим важным моментом при проектировании колесных машин (КМ) является расчет эффективности их движения по снегу. Под эффективностью следует понимать обобщающий показатель, характеризующий отношение результатов деятельности к затратам на их получение.

Повышение эффективности колесных машин при движении по снегу (автозимникам, снежным пустыням, подъездам к местам добычи полезных ископаемых) может быть достигнуто за счет усовершенствования конструкции как самой машины, так и её движителя.

Также при оценке эффективности движения КМ необходимо учитывать степень ее соответствия условиям эксплуатации. Проходимость и эффективность должны быть сопоставлены с меняющимися в течение года погодными условиями.

Проанализируем, как меняется глубина снежного покрова и его плотность в течение года на рассматриваемой территории [19].

На основании наблюдений 2005–2012 гг. за территорией Нижегородской области найдем зависимости изменения глубины и плотности снежного покрова в течение зимнего периода. Рассмотрим искомые показатели на примере станции метеонаблюдения «Ветлуга».

Изменение глубины установившегося снежного покрова в течение зимнего периода будет выглядеть следующим образом (рис. 1).

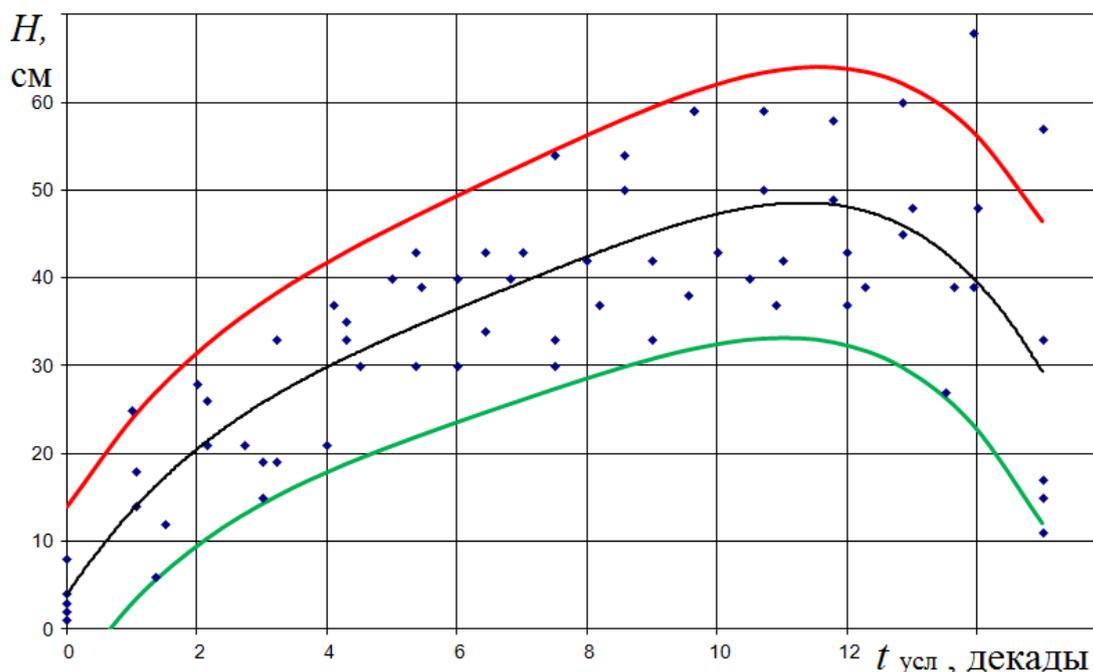


Рис. 1. Глубина залегания снежного покрова в зависимости от условной продолжительности зимнего периода по станции метеонаблюдения «Ветлуга» Нижегородской области (представлены результаты многолетних наблюдений)

Протяженность периода залегания снега принимаем $T_{\text{усл}} = 16$ условных декад. По исходным данным строим полином (как показали исследования, наиболее подходящим является полином четвертой степени), являющийся математическим ожиданием глубины снежного покрова.

В общем виде средние значения глубины снежного покрова можно определить по зависимости:

$$H = \sum_{i=0}^4 a_i t_{\text{усл}}^i,$$

где a_i – эмпирические коэффициенты ($a_0 = 3,92$, $a_1 = 11,15$, $a_2 = -1,75$, $a_3 = 0,17$, $a_4 = -0,01$); $t_{\text{усл}}^i$ – текущая условная продолжительность зимнего сезона с установившимся снежным покровом.

Как показали исследования [19], распределение отклонений глубин снега подчиняется нормальному закону.

Зависимости для определения границ 5 и 95% вероятностей глубин снежного покрова будут вычисляться следующим образом:

$$H_{5(95)} = H \mp e^{0,5} \cdot \zeta \cdot \sigma,$$

где $\zeta = 0,0625(e - 2)t_{\text{усл}}$ – эмпирический коэффициент; $\sigma = 6,2$ – среднеквадратичное отклонение для станции метеонаблюдения «Ветлуга».

В результате анализа данных по плотностям снега за определенный период имеем следующие зависимости (рис. 2).

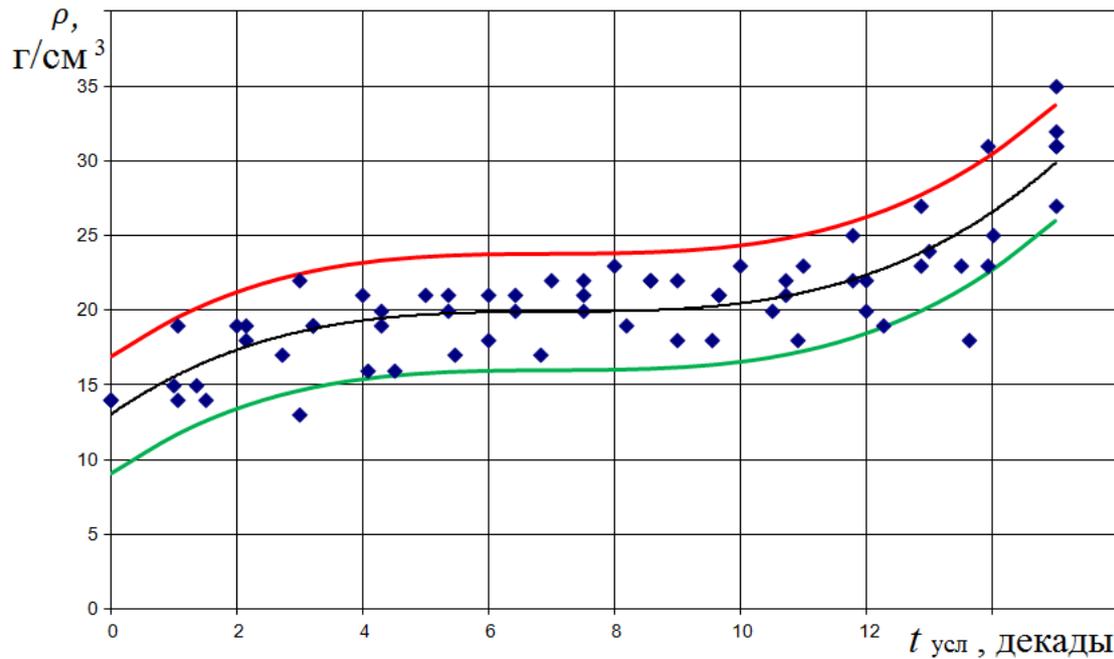


Рис. 2. Плотность снежного покрова в зависимости от условной продолжительности зимнего периода по станции Ветлуга Нижегородской области (приводятся результаты многолетних наблюдений)

По исходным данным строим полином (как показали исследования, наиболее подходящим является полином четвертой степени), являющийся математическим ожиданием плотности снежного покрова.

В общем виде средние значения плотности снежного покрова можно определить по зависимости:

$$\rho = \sum_{i=0}^4 b_i t_{\text{усл}}^i,$$

где b_i — эмпирические коэффициенты ($b_0 = 13$, $b_1 = 2,9$, $b_2 = -0,41$, $b_3 = -0,02$, $b_4 = 0$).

Зависимости для определения границ 5 и 95% вероятностей плотностей снежного покрова будут определяться по равенству:

$$\rho_{5(95)} = \rho \mp e^{0,5} \cdot \sigma,$$

где $\sigma = 2,6$ — среднее квадратичное отклонение для станции метеонаблюдения «Ветлуга».

Как показали исследования [19], распределение отклонений плотности снега подчиняется нормальному закону. Сроки залегания установившегося снежного покрова можно принять 14 ± 2 декады. Хотя бывали зимы и с большими, и с меньшими значениями, но большинство значений укладываются именно в этот интервал.

Для связи реальных сроков залегания установившегося снежного покрова и условных предложена зависимость: $t_{\text{усл}} = \frac{T_{\text{усл}}(t-1)}{T-1} + 1$, где t — текущая декада и T — число декад, продолжительности залегания снежного покрова.

Также необходимо знать сроки начала установившегося снежного покрова. На основе анализа данных получаем, что датой начала установившегося снежного покрова считается третья декада ноября с отклонением в месяц.

Зная статистические характеристики снега: плотность и глубину залегания в течение года, а также продолжительность и сроки начала сезона в разных районах рассматриваемой территории, можно все остальные параметры получить исходя из плотности ρ_c , например,

жесткость K_c , связность c_c и угол внутреннего трения φ_c , необходимые для оценки проходимости машин [3, 10, 12-14, 17].

Аналогичные данные можно получить для всей территории Нижегородской области. На рис. 3 показаны средние максимальные значения глубин залегания снежного покрова, примеры графиков зависимостей изменения глубины и плотности в течение зимнего периода, а также зависимости для определения прочих необходимых параметров снега, которые могут быть использованы при оценке проходимости и эффективности КМ.

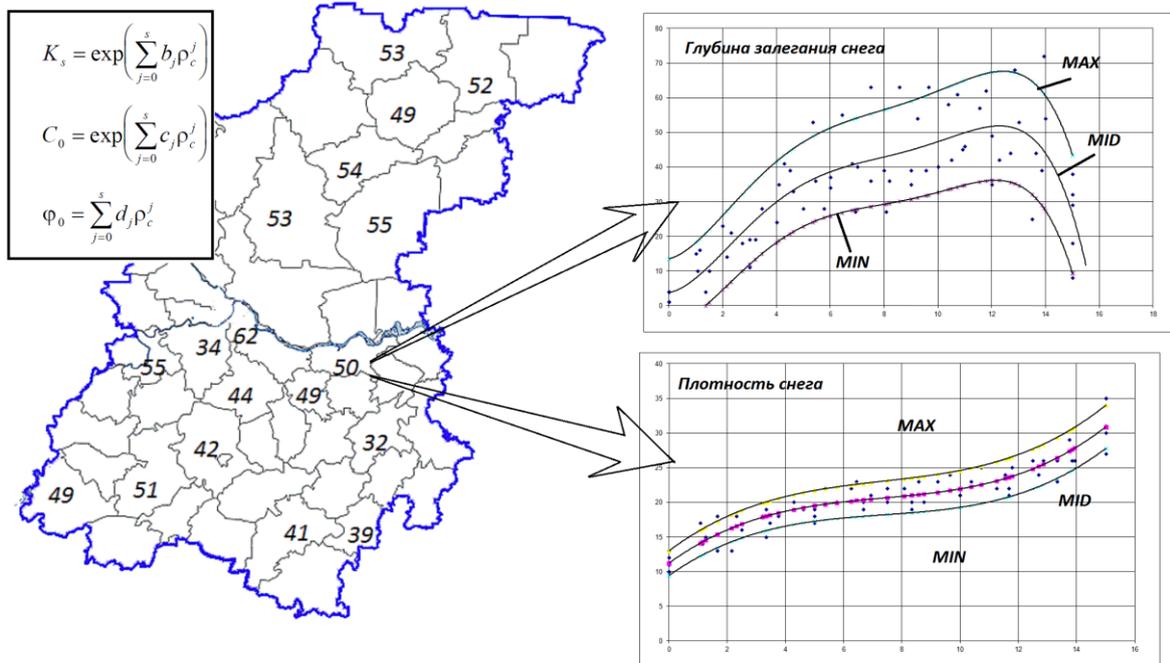


Рис. 3. Средние значения максимальных глубин снега на территории Нижегородской области

Зная характеристики снежного покрова, можно определить проходимость и эффективность колесных машин. [4, 6, 11, 15, 16]. Рассмотрим как определить данные показатели на примере конкретных колесных машин.

Расчётная схема автомобиля представлена на рис. 4. Дифференциальное уравнение движения корпуса машины имеет вид:

$$m_a \frac{dV}{dt} = \sum R_{x\varphi_i} - \sum F_{f_i} - F_{дн} - F_{кр},$$

где $\sum R_{x\varphi_i}$ – сумма продольных реакций на ведущих колесах машины; $\sum F_{f_i}$ – сумма сил сопротивления качению колес по снегу; $F_{дн}$ – сила сопротивления, обусловленная взаимодействием со снежным покровом днища корпуса и элементов шасси; $F_{кр}$ – сила тяги на крюке автомобиля; m_a – полная масса машины; V – скорость движения автомобиля.

Уравнение динамического равновесия ведущего колеса имеет следующий вид:

$$I_K \frac{dw_K}{dt} = T_K - R_{x\varphi} r_d - T_f,$$

где T_K – момент, передаваемый колесу от двигателя через трансмиссию; w_K – угловая скорость вращения колеса; I_K – момент инерции колеса; T_f – суммарный момент сопротивления качению колеса; r_d – динамический радиус колеса.

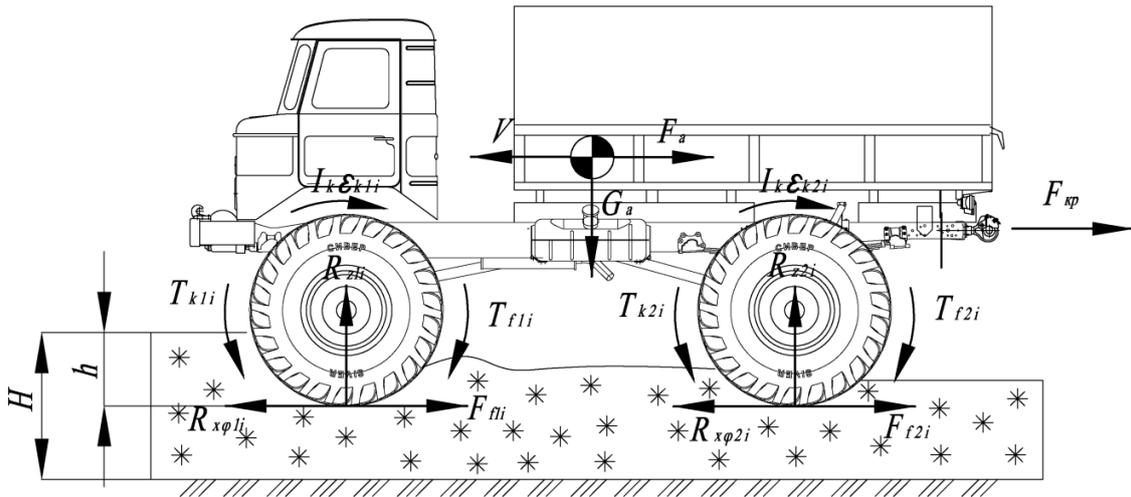


Рис. 4. Расчетная схема движения полноприводной колесной машины

Уравнения, описывающие трансмиссию, устанавливают связь между моментом двигателя, моментами, подводимыми к колесам, угловой скоростью вращения вала двигателя и угловыми ускорениями вращения колес. Более подробно данные уравнения рассмотрены в работе [15].

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; $F_{fфр}$ – силы сопротивления движению от фрезерования настовой корки и внутримассивных ледяных прослоек:

$$F_f = F_{fш} + F_{fc} + F_{fэб} + F_{fфр}.$$

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 исследуемых транспортных средств с опорной поверхностью при различных внутренних давлениях воздуха в шинах (рис. 5, 6).

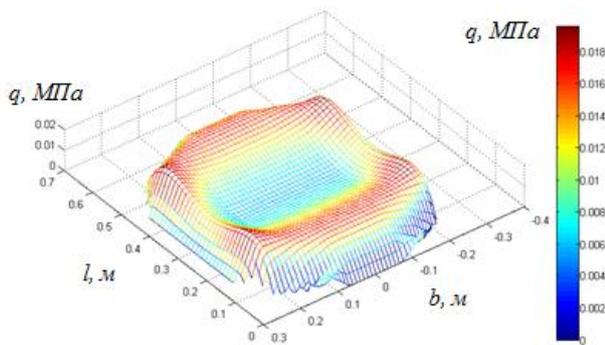


Рис. 5. Эпюра нормальных давлений в контакте шины 1300x600-533 модели «ТРЭКОЛ» с опорной поверхностью ($p_0 = 0,01$ МПа)

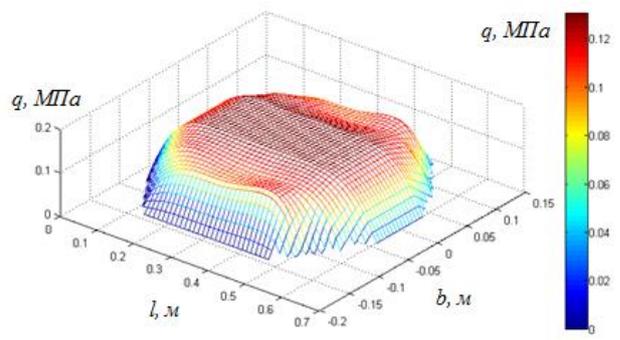


Рис. 6. Эпюра нормальных давлений в контакте шины KI-115AM 12.00 R18 с опорной поверхностью ($p_0 = 0,09$ МПа)

Необходимо стремиться к наиболее высокой точности определения силы сопротивления, обусловленного деформацией снежного полотна пути, так как она является причиной

наибольших энергозатрат на передвижение машины. Сила сопротивления, обусловленная деформацией снежного полотна пути колесом машины, вычисляется по зависимости:

$$F_{fc} = b\gamma h_{\max}^2 \left(-\ln \left(\frac{\gamma h_{\max}}{\gamma h_{\max} + kq_{cp}} \right) - \frac{kq_{cp}}{\gamma h_{\max} + kq_{cp}} \right), \quad (4)$$

где k – коэффициент, характеризующий неравномерность распределения давлений в зоне контакта шин с опорной поверхностью (определяется в соответствии с [15]), b – ширина колеса; γ – коэффициент начальной жесткости снега; h_{\max} – коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному уплотнению, q_{cp} – среднее давление колес на опорную поверхность.

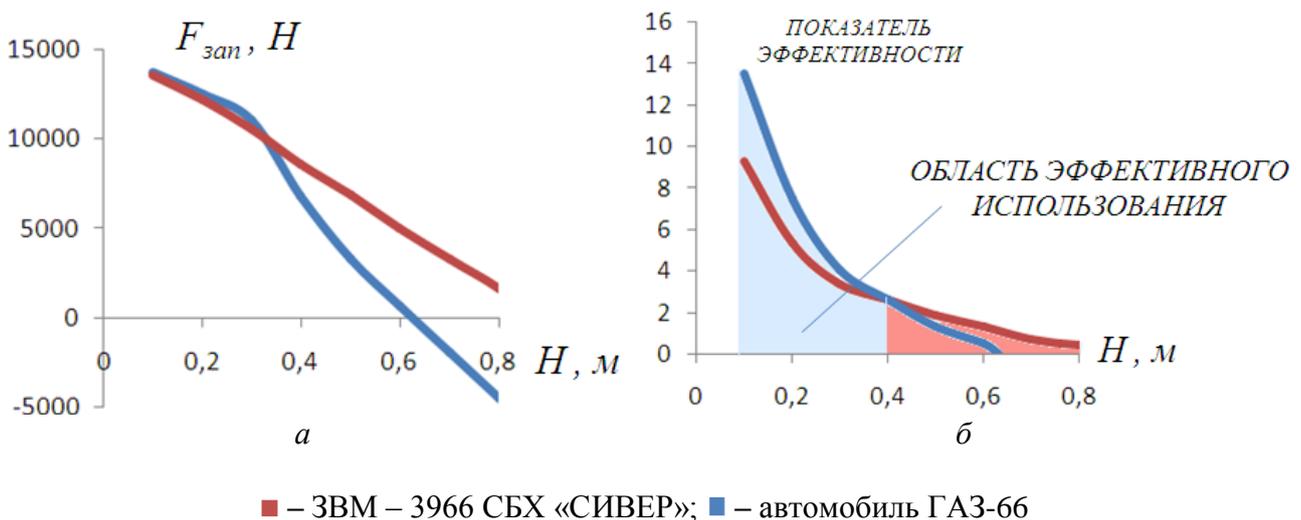
Наиболее рациональным критерием оценки эффективности колесных машин при движении по снегу является показатель, определяемый как отношение транспортной производительности к соответствующей входной мощности системы (потребной мощности двигателя):

$$\eta_{\text{эфф}} = \frac{(m_{\Gamma} g) \cdot V}{P_e}, \quad (5)$$

где m_{Γ} – масса перевозимого груза; V – скорость транспортного средства; P_e – потребная мощность двигателя машины.

Данный показатель является наиболее удобным для оценки эффективности колесных машин, так как в нем отсутствуют трудноопределимые показатели расхода топлива.

На рис. 7 приведен пример результатов расчетных исследований для автомобилей ГАЗ 66 на шинах КИ-115А 12.00 R18 (рис. 7, а) и ЗВМ – 3966 СБХ «СИБЕР» на шинах ИЯВ-79 (21,3-24) 1400x540 (рис. 7, б). Полные массы автомобилей близки и находятся в пределах 5800 – 6150 кг. Представленные графики демонстрируют следующее: при выборе конфигурации движителя необходимо учитывать, что при обладании колесными машинами проходимость в заданных условиях их эффективность может быть различной.



■ – ЗВМ – 3966 СБХ «СИБЕР»; ■ – автомобиль ГАЗ-66

Рис. 7. Зависимости:

а – запасов силы тяги сравниваемых машин от высоты снега;

б – показателей эффективности сравниваемых машин от высоты снега

Данные графики иллюстрируют то, что при глубинах снега менее 0,4 м эффективнее для выполнения транспортно-технологических операций использовать стандартный автомобиль, а для больших глубин – модифицированную КМ.

Таким образом, при разработке рекомендаций по выбору параметров машины и дви-

жителя для работы на конкретных территориях необходимо опираться на данные гидрометеорологических станций. Зная статистические характеристики снега: плотность и глубину залегания в течение года, а также продолжительность и сроки начала сезона в разных районах рассматриваемой территории, можно получить все необходимые параметры, необходимые для оценки эффективности функционирования колесных машин.

Библиографический список

1. **Барахтанов, Л.В.** Экспериментально-теоретические исследования опорной проходимости многоосных колесных машин / Л.В. Барахтанов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2012. №3. С. 162-170.
2. **Барахтанов, Л.В.** Экспериментальные исследования поворота многоосных колесных машин / Л.В. Барахтанов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2012. №4. С. 175-181.
3. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных средств: дисс. ... док. техн. наук: 05.05.03 / Беляков В.В. Нижний Новгород, 1999. – 485 с.
4. **Беляков, В.В.** Оценка эффективности специальных транспортных средств при движении по снегу / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2012. № 2 (95). С. 156-166.
5. **Беляков, В.В.** Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа «stone-road» / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2012. №1. С. 143-151.
6. **Беляков, В.В.** Оценка эффективности работы транспортной системы / В.В. Беляков, У.Ш. Вахидов, Ю.И. Молев // Приволжский научный журнал. 2010. № 4. С. 214-219.
7. **Вахидов, У.Ш.** Моделирование трасс движения транспортных средств, характерных для территории Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.В. Беляков, В.С. Макаров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №7. С. 24-26.
8. **Вахидов, У.Ш.** Математическое описание дорог типа «stone-road» / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3; URL: www.science-education.ru/103-6376 (дата обращения: 05.06.2012).
9. **Вахидов, У.Ш.** Определение характеристик микропрофиля в поймах рек Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Интеллектуальные системы в производстве. 2011, №1. С. 82-87.
10. Вездеходные транспортно-технологические машины / под редакцией В. В. Белякова, А. П. Куляшова. – Н. Новгород.: ТАЛАН, 2004. – 960 с.
11. **Галкин, Д.А.** Влияние параметров шин на подвижность многоосных колесных машин / Д.А. Галкин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6; URL: www.science-education.ru/106-7882 (дата обращения: 24.12.2012).
12. **Гончаров, К.О.** Влияние экскавационно-бульдозерных эффектов, возникающих при криволинейном движении колеса на сопротивление качению / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание», 2010. Вып. 6. - Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/145884.html> , свободный.
13. **Гончаров, К.О.** Экспериментальные исследования многоосной колесной машины / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание». 2010. Вып. 12. - Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/164456.html> , свободный.
14. **Гончаров, К.О.** Оценка влияния экскавационно-бульдозерных эффектов, на проходимость многоосных колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03 / Гончаров, К.О. – Н. Новгород, 2011. – 263 с.
15. **Зезюлин, Д.В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03 / Зезюлин Д.В. – Н. Новгород, 2013. – 218 с.
16. **Зезюлин Д.В.** Влияние параметров движителей 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).
17. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс... канд. техн. наук: 05.05.03 / Макаров В.С. – Н. Новгород, 2009. –161 с.

18. **Макаров, В.С.** Определение характеристик микропрофиля дорог, предназначенных для движения транспортно-технологических машин / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. <http://www.science-education.ru/105-7111> (дата обращения: 05.10.2012).
19. **Макаров, В.С.** Статистический анализ характеристик снежного покрова // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8289> (дата обращения: 05.02.2013).

*Дата поступления
в редакцию 12.02.2013*

V.S. Makarov, D.V. Zezyulin, K.O. Goncharov, A.V. Fedorenko, V.V. Belyakov

**ASSESSMENT OF MOVEMENT WHEELED MACHINES BASED ON STATISTICAL
CHARACTERISTICS OF SNOW COVER**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev

Subject/topic/purpose: Experimental and theoretical studies of movability, and efficiency of cross-wheeled vehicles.

Methodology of work: Assessing the impact of the snow cover and the different options of tires for continuity and efficiency of the movement of wheeled vehicles.

Results/application: Results are important for the activities of research laboratories and automotive companies involved in the development of wheeled vehicles. Experimental and theoretical studies can be used to select the rational design of the vehicle, and the selection of the most effective vehicles for use in the snow.

Findings: Recommendations on the choice of rational parameters of tire wheeled vehicles in terms of ensuring the greatest efficiency when driving on snow

Key words: movability, efficiency of movement, wheeled vehicles, statistical characteristics, snow.