

## Математические зависимости физико-механических свойств снежного покрова как опорного основания для движения машин

# 08, август 2012

DOI: 10.7463/0812.0443019

Барахтанов Л. В., Беляков В. В., Блохин А. Н., Денисенко Е. Г.

УДК 629.113

ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный  
технический университет им. Р.Е. Алексеева»

[nauka@nntu.nnov.ru](mailto:nauka@nntu.nnov.ru)

[a.n.blokhin@gmail.com](mailto:a.n.blokhin@gmail.com)

[denisenkoel@gmail.com](mailto:denisenkoel@gmail.com)

Снег прямо или косвенно влияет на многие происходящие на Земле явления и играет большую роль в жизни человека. На рисунке 1 показана взаимосвязь снега с различными аспектами жизни человека – с условиями его обитания, техникой, сельским хозяйством и климатом.



Рисунок 1 – Взаимосвязь снега с различными аспектами жизни человека [19]

1 – свойства снега, необходимые для рассмотрения передвижения машин,

2 - свойства снега, необходимые для рассмотрения изменений, вносимых машиной на местности,

3 - свойства снега, необходимые для рассмотрения последствий движения машины по местности;

↔ рассматриваемые в работе свойства снега.

Около 80 % территории Российской Федерации покрывается снегом на длительный период времени (5...10 месяцев), что существенно влияет на экономику и образ жизни населения. В условиях, когда полотно пути покрыто снегом, движение транспортно-технологических машин затруднено. Теория колесных и гусеничных машин хорошо разработана отечественными и зарубежными учеными [1, 2], но вопросы передвижения машин по снегу освещены пока явно недостаточно. Специфические условия работы требуют пересмотра ряда положений, особенно в области взаимодействия движителя со снежным полотном пути. Снежный покров является одной из наиболее своеобразных поверхностей движения, поэтому до сих пор нет четкого представления о закономерностях изменений параметров снега и их взаимосвязях. Данная статья направлена на систематизацию сведений о свойствах снежного покрова, оказывающих существенное влияние на проходимость, подвижность, мобильность, энергоэффективность и другие показатели транспортного средства, и уточнение существующих моделей снега, используемых при описании процессов взаимодействия движителя с опорным основанием.

Исследованиями снега занимались А.А. Крживицкий [14], П.П. Кузьмин [15], Г.Д. Рихтер [18] и другие [19]. Большой вклад в изучение снежного покрова как полотна пути внесли ученые Нижегородской научной школы [4-8, 10-13, 16,17]: А.Ф. Николаев,

С.В. Рукавишников, В.И. Панов, В.А. Малыгин, Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.И. Ершов, А.П. Куляшов, В.А. Шапкин, Ю.И. Молев и другие.

Снег представляет собой совокупность фаз вещества одной природы, но разных агрегатных состояний. Снег как полотно пути есть сложная пространственная система, которая в топологическом плане определяется как полирельефная полизональная полислоистая полидисперсная среда. Оценку материалов, образующих поверхности движения, проводят по независимым параметрам. Под независимыми параметрами понимают такие физико-механические свойства материала, которые не зависят от способа их определения. Так для снега это: плотность, твердость, коэффициент жесткости, связность, фрикционные свойства, прилипание и примерзание, влажность, температуру, структуру и текстуру снега [4, 7, 8, 10, 12, 17-19].

Рассмотрим некоторые физико-механические свойства снега.

Плотность – одна из важнейших характеристик снежного покрова, так как непосредственно связана с твердостью, жесткостью, связностью, коэффициентом внутреннего трения и т.д. Плотность снега зависит от многих факторов и меняется в очень широких пределах. Плотность снега может быть в пределах от 0,01 до 0,7 г/см<sup>3</sup>. Плотность меняется по глубине снежного покрова. Это происходит за счет микросублимационных процессов, происходящих под влиянием температуры в снежном покрове.

Под твердостью снега понимают его способность сопротивляться проникновению в него другого тела, не получающего остаточных деформаций [4, 8, 12, 17]:

$$HC = \frac{F_z}{A}, \quad (1)$$

где  $HC$  – твердость снега, Па,  $F_z$  - нормальная нагрузка, Н;  $A$ - площадь отпечатка, мм<sup>2</sup>.

Твердость, как и плотность снега, зависит от ряда факторов и характеризует прочность снежного покрова, компактность расположения кристаллов, поддерживающую способность и другие физико-механические свойства снега.

Коэффициент жесткости характеризуется величиной нормального давления, необходимого для деформации снежного покрова на единицу длины [8]:

$$K_{ж} = \frac{p_r}{h_r}, \quad (2)$$

где  $K_{ж}$  – коэффициент жесткости, Н/м<sup>3</sup>,  $p_r$  - нормальное давление штампа на снежный покров, Па;  $h_r$  - величина вертикального перемещения штампа, м.

Исследования влияния температуры снега на его сопротивление деформации показали [8], что чем ниже температура снега, тем больше коэффициент жесткости, то есть больше сопротивление снега деформации.

Связность характеризует сопротивление снега сдвигу. Связность – это сила сцепления, связывающая кристаллы снега капиллярным действием плёнок влаги и другими сложными физическими явлениями не изменяющихся от внешнего давления.

Коэффициент внутреннего трения определяется трением различных слоев снега. Он также как и связность характеризует сопротивление сдвигу снежного покрова.

Связность и коэффициент внутреннего трения оказывают существенное влияние на сопротивление снега сдвигу, которое определяется выражением (закон Кулона-Мора) [8]:

$$\tau = C_0 + q \cdot \operatorname{tg} \varphi_0, \quad (3)$$

где  $\tau$  – удельная сила трения, распределенная по поверхности скольжения, Па

$C_0$  – связность трущихся поверхностей, Па;

$q$  – удельная нагрузка, Па

$\operatorname{tg} \varphi_0$  – коэффициент трения, независящий от нагрузки

С учетом вариации значений параметров снежного покрова учеными Нижегородской школы была предложена классификация, представленная в таблице 1 [8].

Множество экспериментальных исследований и наблюдений за последние 40 лет, проведенных сотрудниками отраслевой научно-исследовательской лаборатории вездеходных машин (ОНИЛВМ), а в последствии и научно-исследовательской лаборатории транспортных интеллектуальных систем (НИЛ ТИС) НГТУ, позволили собрать обширные сведения в областях, связанных с изучением свойств снежного покрова как полотна пути и взаимодействия движителя со снегом. В 90-х годах прошлого века В.В. Беляковым, Л.В. Барахтановым и другими [7] были получены аппроксимационные зависимости между механическими параметрами (коэффициент внутреннего трения, твердость, связность, коэффициент жесткости) и физическим параметром (плотность снега).

Таблица 1 – Классификация снега [8]

Тип	Вид	Разновидность	Состояние	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость, НС, кПа	Несущая способность, $\gamma$ , кПа/м	Связность, кПа	Коэффициент внутреннего трения, $\text{tg}\varphi$
1	2	3	4	7	8	9	10	11
фрикционно-связной	свежевыпавший	пушистый	сухой	до 0,10	0	0	0,1 – 0,2	0,20
		игольчатый		до 0,10				
		порошко-видный		до 0,15				
		мучнистый		1,0	—	0,1 ÷ 0,5	0,20	
		снег-изморозь						0,1 – 0,15
	уплотненный	осевший	сухой	0,10 – 0,21	1,5 – 5,0	0,1 – 0,25	0,5 ÷ 1,6	0,25
		метелевый		0,23 – 0,30	до 5,0	до 1,6	0,6 — 2,0	0,35
фрикционно-связной	перекристаллизованный	мелкозернистый	рыхлый	0,16 – 0,26	4,6 – 8,0	0,15 – 0,5	0,2 — 1,6	0,30
		среднезернистый		0,19 – 0,28	1,6 – 8,7	0,18 – 1,1	0,2 — 2,0	0,25 – 0,35
	перекристаллизованный (зернистый)	крупнозернистый	сухой рыхлый	0,20 – 0,32	1,7 – 11,5	0,2 – 1,5	1,0 – 4,0	0,27 – 0,35
смерзшийся	0,26 – 0,35		41,2 и больше	до 5,2	1,0 – 4,3	0,30 – 0,40		
фрикционный	фирновый	сухопластинчатый (снег-пльвун)	сухой сыпучий	0,24 – 0,35	2,0 – 14,3	6,6 – 7,5	0,5 ÷ 4,5	0,30 – 0,40
		трубчатый						
		повторно фирнизованный	сухой сыпучий	0,35 – 0,40			9,0 ÷ 8,0	0,60 – 0,70

На основе новых экспериментальных данных установленные ранее зависимости были уточнены авторами статьи. Для описания взаимосвязи параметров снега предложены следующие регрессионные зависимости:

$$\text{tg } \varphi_0 = \sum_{i=0}^n A_i \cdot \rho^i, \quad (4)$$

$\text{tg } \varphi_0$  – коэффициент внутреннего трения;

$i$  – показатель степени;

$n$  – наибольшая степень полиномиальной зависимости;

$A_i$  – коэффициенты регрессии, (см<sup>3</sup>/г) <sup>$i$</sup>

$\rho$  – плотность снега, г/см<sup>3</sup>.

$$HC = \sum_{i=0}^n A_i \cdot \rho^i, \quad (5)$$

где  $HC$  – твердость снега, Па;

$i, n$  – параметры, указанные в формуле (4);

$A_i$  – коэффициенты регрессии,  $0,1^{3i} \cdot \frac{M^{3i-2} \cdot H}{\text{кг}^i}$ ;

$\rho$  – плотность снега, г/см<sup>3</sup>.

$$C_0 = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \rho^i, \quad (6)$$

где  $C_0$  – связность, Па

$i, n$  – параметры, указанные в формуле (4);

$A_i$  – коэффициенты регрессии,  $0,1^{3i} \cdot \frac{M^{3i-2} \cdot H}{\text{кг}^i}$ ,

$\rho$  – плотность снега, г/см<sup>3</sup>.

$$K_{ж} = \sum_{i=0}^n A_i \cdot \rho^i, \quad (7)$$

где  $K_{ж}$  – коэффициент жесткости, Н/м<sup>3</sup>;

$i, n$  – параметры, указанные в формуле (4);

$A_i$  – коэффициенты регрессии,  $0,1^{3i} \cdot \frac{M^{3i-3} \cdot H}{\text{кг}^i}$ ;

$\rho$  – плотность снега, г/см<sup>3</sup>.

В таблице 2 представлены полученные на основе метода наименьших квадратов коэффициенты регрессионных зависимостей (4)-(7).

Таблица 2 – Коэффициенты регрессионных уравнений связи механических параметров снега и его плотности

	Значения коэффициентов регрессии для зависимостей			
	Коэффициент внутреннего трения	Твердость снега	Связность	Коэффициент жесткости
$A_0$	0,190571	7,208	-	194,8
$A_1$	0,224523	-123,043	-	-4375,8
$A_2$	0,90725	441,461	17,390	38093,7
$A_3$	-0,52876	743,152	76,069	-158021,0
$A_4$	-	45,784	-	292413,2
$A_5$	-	-893,297	-	-94462,0
$A_6$	-	-	-	-273373,0
$A_7$	-	-	-	-17867,9
$A_8$	-	-	-	354408,0

Зависимости  $\operatorname{tg} \varphi_0(\rho)$ ,  $HC(\rho)$ ,  $C_0(\rho)$ ,  $K_{ж}(\rho)$ , описываемые уравнениями (4)-(7) представлены на рисунках 2-5.

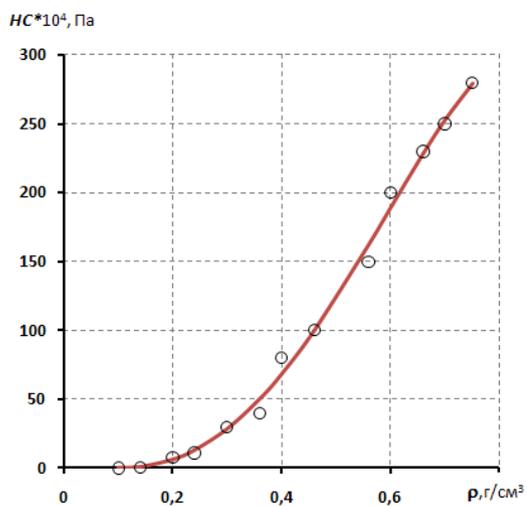


Рисунок 2. – Зависимость твердости снега от его плотности

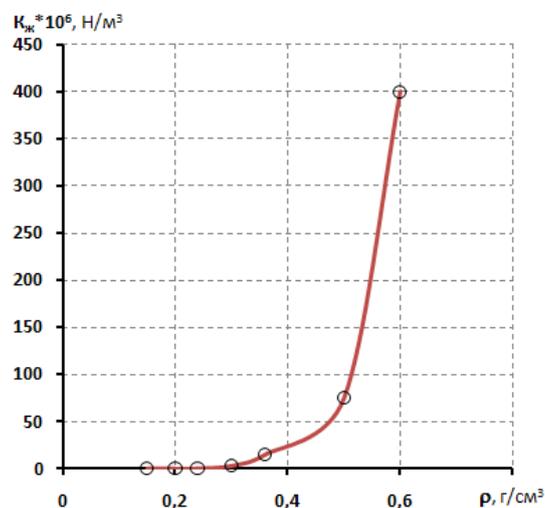


Рисунок 3. – Зависимость коэффициента жесткости снега от его плотности

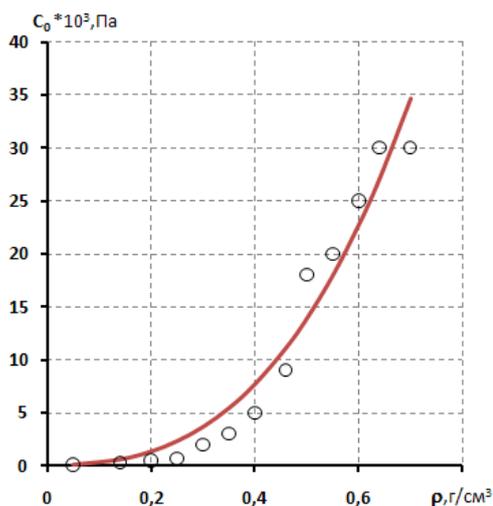


Рисунок 4. – Зависимость связности снега от его плотности

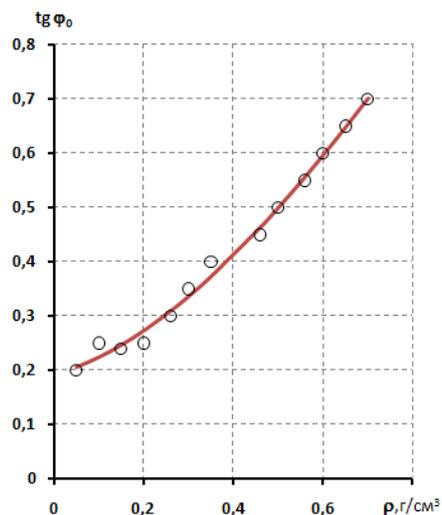


Рисунок 5. – Зависимость коэффициента внутреннего трения снега от его плотности

Из представленных рисунков следует, что с увеличением плотности снега происходит существенное увеличение твердости, коэффициента жесткости, связности. В интервале значений плотности 0,1...0,6 г/см<sup>3</sup> значения вышеуказанных параметров возрастают на несколько порядков.

Снежный покров является сложной физико-химической системой. Состояние его зависит от термодинамического равновесия твердой, жидкой и газообразной фаз. Одним из факторов, определяющим состояние снега, является наличие в нем воды. При температуре 0<sup>0</sup>С происходит интенсивный процесс таяния и увлажнения. При этом свойства снега начинают существенно меняться. Исследования, проведенные В.И. Пановым в ОНИЛВМ [17], показали, что влажность существенно влияет на плотность, это в свою очередь приводит к изменению других свойств.

Взаимосвязи этих параметры наиболее адекватно описываются представленными ниже уравнениями:

$$\rho(w, \rho_0) = \sum_{i=0}^n A_{(n-i),i} w^{n-i} \rho_0^i, \quad (8)$$

$$HC(\rho, T) = \sum_{i=0}^n A_{(n-i),i} \rho^{n-i} T^i, \quad (9)$$

$$\tau(w, \rho) = \sum_{i=0}^n A_{(n-i),i} w^{n-i} \rho^i, \quad (10)$$

$$\rho(\varepsilon, \rho_0) = \sum_{i=0}^n A_{(n-i),i} \varepsilon^{n-i} \rho_0^i. \quad (11)$$

В формулах (8)-(11)

$A_{(n-i),i}$  – коэффициенты регрессии;

$i, n$  – параметры, указанные в формуле (4);

$w$  – влажность снега;

$T$  – температура снега;

$\tau$  – сопротивление снега сдвигу;

$\varepsilon$  – относительная деформация, определяемая по выражению  $\varepsilon = \frac{H - z}{H}$ ,

где  $H$  – глубина снежного покрова,  $z$  – расстояние от поверхности подстилающего слоя до нижней точки внедряемого в снег штампа.

$\rho_0$  – начальная плотность снежного покрова.

На основе метода наименьших квадратов для зависимостей (8) – (11) были получены коэффициенты регрессии, представленные в таблице 3. С их учетом, например, для снега зимнего периода зависимость твердости снега от его плотности при различных температурах с учетом уравнения (9) примет вид:

$$HC(\rho, T) = -0,16599 + 0,542153 \cdot \rho - 0,08925 \cdot T + 0,447667 \cdot \rho^2 + 0,159256 \cdot \rho \cdot T - 0,01336 \cdot T^2 + 0,261043 \cdot \rho^3 - 0,15863 \cdot \rho^2 \cdot T + 0,022601 \cdot \rho \cdot T^2 - 0,00032 \cdot T^3$$

Таблица 3 – Коэффициенты регрессионных уравнений связи параметров состояния снега

Коэффициенты	Значение коэффициентов для зависимостей			
	$\rho = f_1(w, \rho_0)$	$HC = f_2(\rho, T)$	$\tau = f_3(w, \rho)$	$\rho = f_4(\varepsilon, \rho_0)$
$A_{00}$	0,087334	-0,16599	-1,16514	0,636121
$A_{10}$	0,010294	0,542153	8,855958	2,51303
$A_{01}$	0,710542	-0,08925	0,255592	-2,42747
$A_{20}$	-	0,447667	5,928529	-3,91265
$A_{11}$	-	0,159256	2,47637	3,167023
$A_{02}$	-	-0,01336	-0,02268	2,028997
$A_{30}$	-	0,261043	3,026701	-1,31383
$A_{21}$	-	-0,15863	-0,02819	4,508269
$A_{12}$	-	0,022601	-0,07431	-6,98382
$A_{03}$	-	-0,00032	0,000521	0,572309
$A_{40}$	-	-	-	1,56956
$A_{31}$	-	-	-	-1,08155
$A_{22}$	-	-	-	2,48729
$A_{13}$	-	-	-	-1,66261
$A_{04}$	-	-	-	-0,12678

$A_{50}$	-	-	-	2,73298
$A_{41}$	-	-	-	-3,11744
$A_{32}$	-	-	-	1,302128
$A_{23}$	-	-	-	1,237096
$A_{14}$	-	-	-	2,160579
$A_{05}$	-	-	-	-0,632070
$A_{60}$	-	-	-	2,70090
$A_{51}$	-	-	-	-2,887590
$A_{42}$	-	-	-	-0,173930
$A_{33}$	-	-	-	0,097927
$A_{24}$	-	-	-	-2,906680
$A_{15}$	-	-	-	1,380304
$A_{06}$	-	-	-	-0,020480

На рисунках 6-9 представлены полученные аппроксимационные зависимости и сравнение их с экспериментальными данными.

На рисунке 6, а представлено изменение плотности снега от относительной деформации. При определенных значениях относительной деформации  $\varepsilon$  происходит возрастание плотности снега до значений  $\rho=0,65 \text{ г/см}^3$ , после которых снег переходит в состояние льда [8], являющегося практически недеформируемым при тех давлениях, которые оказывают движители транспортных средств на него.

На основании представленных результатов на рисунках 6-9 можно говорить об удовлетворительной сходимости новых предложенных зависимостей (8)-(11) с экспериментальными данными.

В работе [6] предложено 4 типа снега с соответствующими параметрами для оценки проходимости наземных транспортных средств, а в работе [12, 13] указанные значения параметров корректируются до значений, представленных в таблице 4.

Таблица 4 – Численные значения параметров снега [12, 13]

Тип снега	$\rho, \text{ г/см}^3$	$\gamma, \text{ кПа/м}$	$C_0, \text{ кПа}$	$\text{tg } \varphi$
1	0,15	20	0,5	0,25
2	0,20	30	1,0	0,30
3	0,25	50	2,5	0,33
4	0,30	100	5,0	0,36

Примечание:  $\gamma=C' \cdot K_{\text{ж}}$ , где  $\gamma$  - несущая способность (начальная жесткость) снега,  $C'$  - коэффициент пропорциональности ( $C'=0,735$ ) [7, 8]

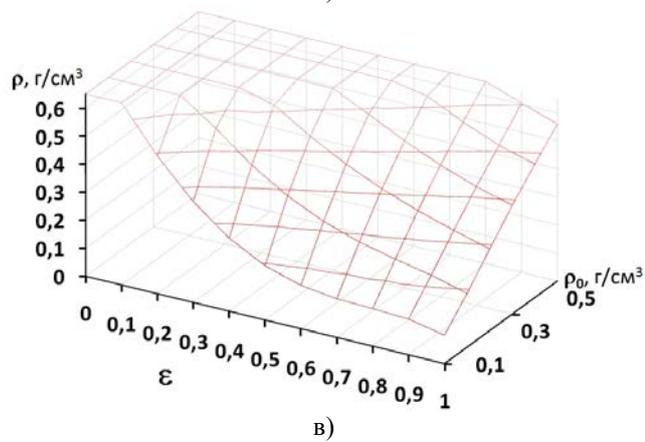
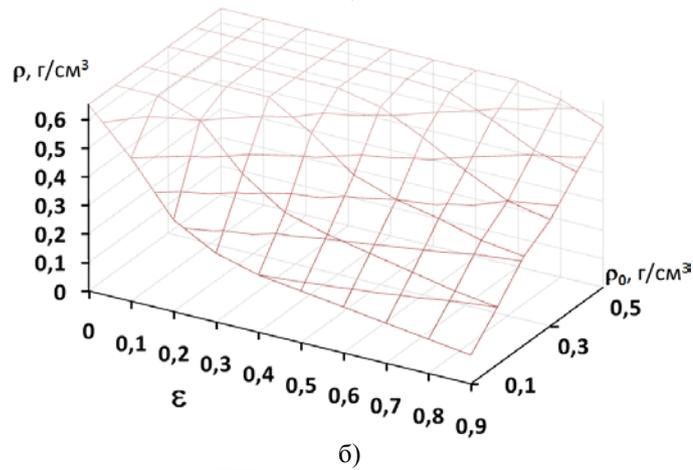
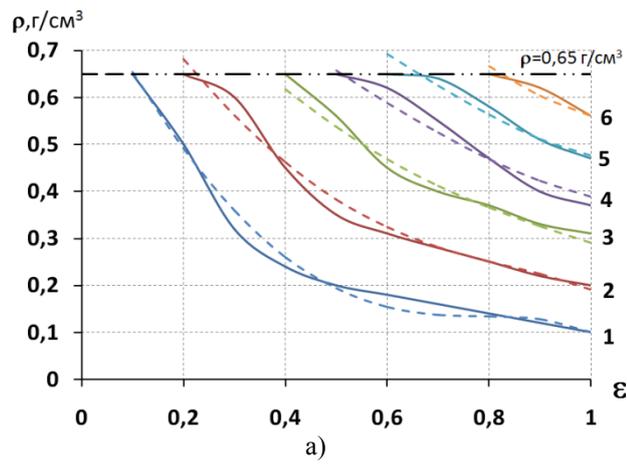


Рисунок 6. – Зависимость плотности снега от относительной деформации при различных значениях начальной плотности  $\rho_0$ : 1 - 0,1 г/см<sup>3</sup>; 2 - 0,2 г/см<sup>3</sup>; 3 - 0,3 г/см<sup>3</sup>; 4 - 0,4 г/см<sup>3</sup>; 5 - 0,5 г/см<sup>3</sup>; 6 – 0,6 г/см<sup>3</sup>

— - экспериментально полученные зависимости, полученные в ОНИИЛВМ

- - предложенные полиномиальные зависимости

а – Проекция в плоскости  $\rho O \epsilon$ ; б – Многомерная экспериментальная зависимость; в – Полученная аппроксимационная зависимость

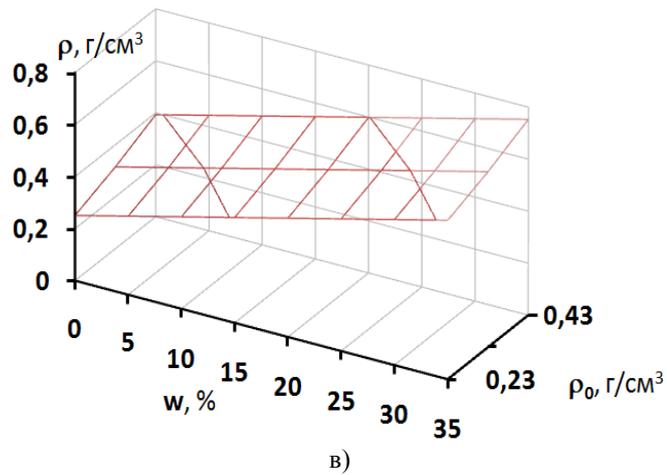
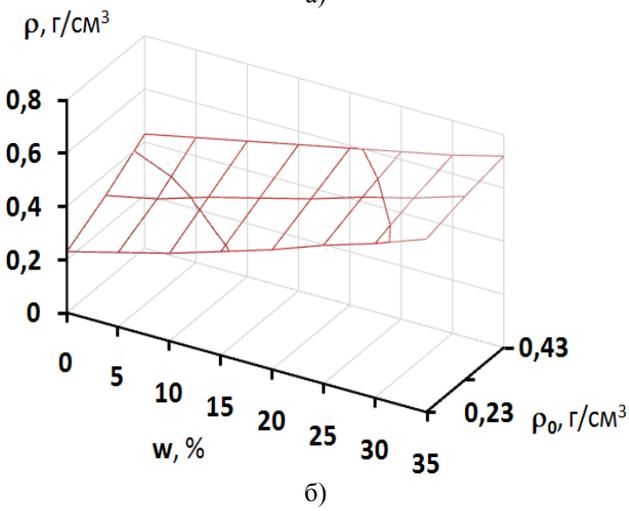
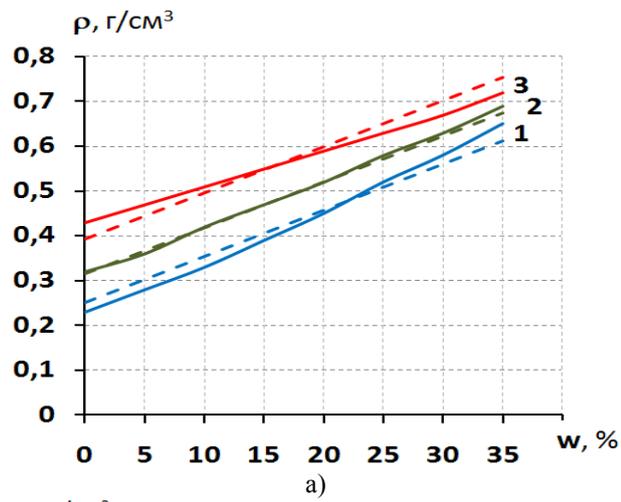


Рисунок 7. – Зависимость плотности снега от влажности при различных значениях начальной плотности  $\rho_0$  сухого снега: 1 - 0,23 г/см<sup>3</sup>; 2 - 0,32 г/см<sup>3</sup>; 3 - 0,43 г/см<sup>3</sup>

— экспериментально полученные зависимости, полученные в ОНИЛВМ

- - предложенные полиномиальные зависимости

а – Проекция в плоскости  $\rho$ О $\epsilon$ ; б – Многомерная экспериментальная зависимость; в – Полученная аппроксимационная зависимость

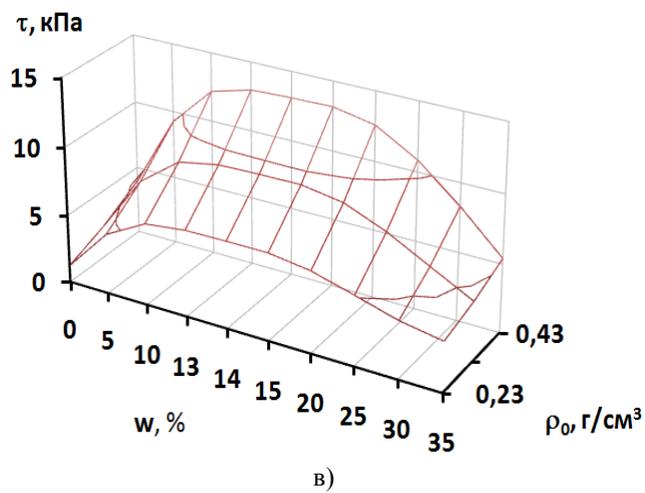
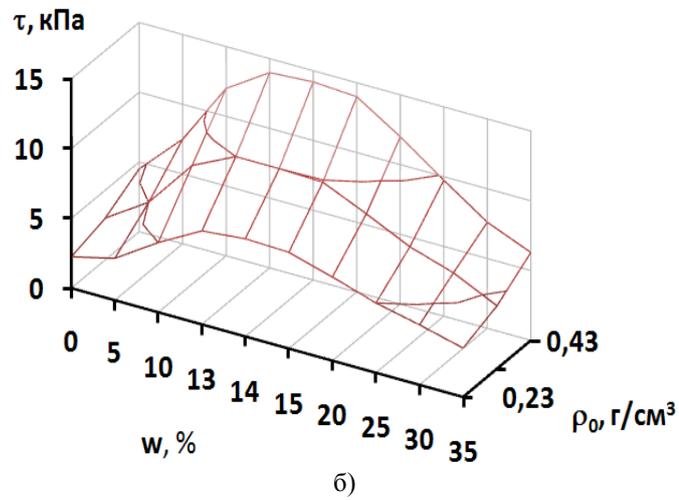
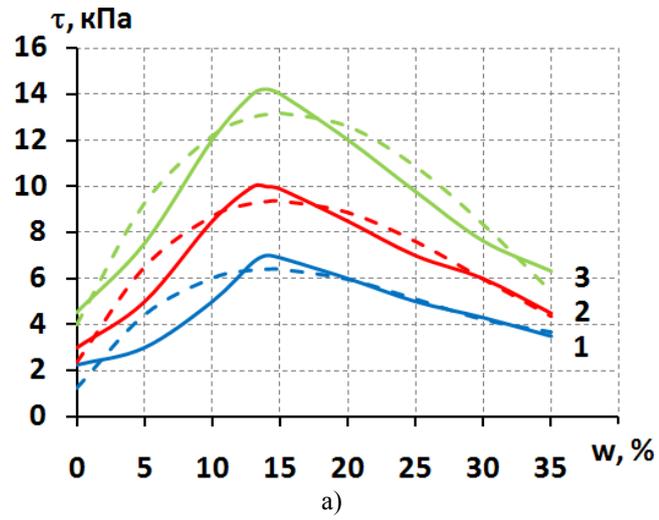


Рисунок 8. – Зависимость сопротивления сдвигу снега от влажности при плотности  $\rho$  сухого снега: 1 - 0,23 г/см<sup>3</sup>; 2 - 0,32 г/см<sup>3</sup>; 3 - 0,43 г/см<sup>3</sup>

— экспериментально полученные зависимости, полученные в ОНИЛВМ  
 - - предложенные полиномиальные зависимости

а – Проекция в плоскости  $\rho O \epsilon$ ; б – Многомерная экспериментальная зависимость; в – Полученная аппроксимационная зависимость

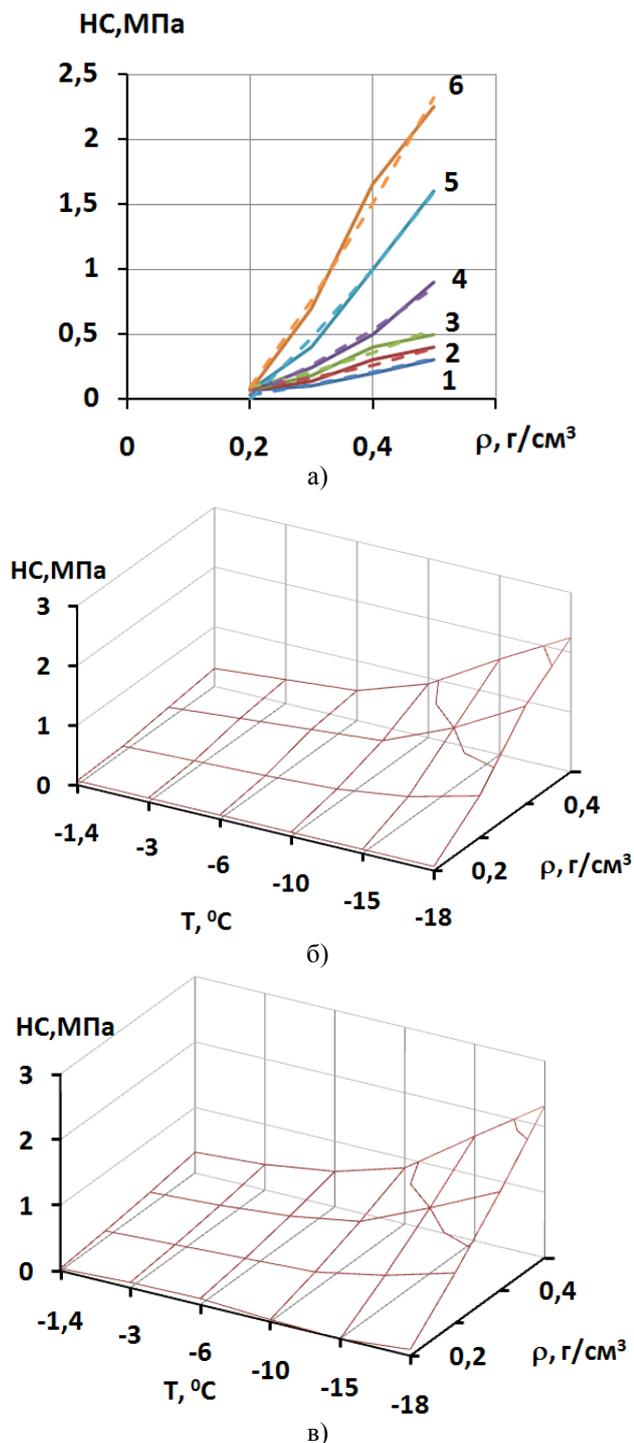


Рисунок 9. – Зависимость твердости снега от его плотности при различных температурах: 1 – (-1,4)<sup>0</sup>С; 2 – (-3)<sup>0</sup>С; 3 – (-6)<sup>0</sup>С; 4 – (-10)<sup>0</sup>С; 5 – (-15)<sup>0</sup>С; 6 – (-18)<sup>0</sup>С

— - экспериментально полученные зависимости, полученные в ОНИЛВМ  
 - - - - предложенные полиномиальные зависимости

а – Проекция в плоскости ρОε; б – Многомерная экспериментальная зависимость; в – Полученная аппроксимационная зависимость

Известно, что упорная реакция грунта, от которой зависит сила тяги транспортного средства, определяется связностью и углом внутреннего трения, а выражение силы тяги можно записать в виде [3, 9, 7, 12]:

$$F_{T\varphi_x} = \varphi_p k_H R_z + (1 - k_H) A_k (C_0 + p_{cp} \operatorname{tg} \varphi_0) \left( 1 - e^{-\frac{SX}{k}} \right) \quad (12)$$

где  $F_{T\varphi_x}$  - максимальная сила сцепления колеса с грунтом;

$\varphi_p$  - коэффициент трения резины по снегу;

$k_H$  - коэффициент насыщенности протектора;

$R_z$  - вертикальная реакция опорной поверхности;

$A_k$  - площадь пятна контакта;

$p_{cp}$  - среднее давление в пятне контакта;

$S$  - коэффициент буксования;

$X$  - расстояние от передней точки кромки опорной поверхности до рассматриваемой зоны буксования;

$k$  - коэффициент, характеризующий деформацию, требуемую для создания максимального напряжения сдвига [20]. Определяется экспериментально по наклону кривой сдвига в начальной фазе и максимальному напряжению сдвига. Для большинства снегов 10-30 мм.

Сила сопротивления движению, обусловленная деформацией снежного полотна пути, зависит от коэффициента начальной жесткости снега, определяемого через коэффициент жесткости (см. примечание к таблице 4), который с изменением плотности снега будет существенно меняться. Глубина колеи и максимальные давления в контакте движителя с опорной поверхностью определяют сопротивление движению, связанное с деформацией снежного полотна пути  $F_{fc}$  [3, 9, 7, 12]:

$$F_{fc} = 2b\gamma h_{\max}^2 \left( -\ln \left( \frac{\gamma h_{\max}}{\gamma h_{\max} + q_{\max}} - \frac{q_{\max}}{\gamma h_{\max} + q_{\max}} \right) \right) \quad (13)$$

где  $b$  - ширина колеи;

$h_{\max}$  - коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному уплотнению;

$q_{\max}$  - максимальное давление в контакте колеса с опорной поверхностью;

$\gamma$  - начальная жесткость снега.

Во многих работах [4-7, 11-13, 16] при исследовании взаимодействия движителя со снегом (в том числе при многократном проходе движителя по одной колее или при анализе работы колес разных осей многоосных машин) использовались выражения (12)- (13), но значения параметров снежного покрова в них выбирались с учетом заданного типа снега из таблицы 4. Причем считалось, что указанные параметры снега сохраняют свои значения в независимости от деформации, температуры и влажности снега.

Теперь на основании выражения (11) можно уточнить плотность снега, представленную в таблице 4, в зависимости от относительной деформации снега (глубины колеи) и начальной плотности. Далее по зависимостям (4), (6) и (7) соответственно определяются остальные параметры снега:  $\operatorname{tg} \varphi_0$ ,  $C_0, \gamma$ , которые подставляются в выражения для описания процесса взаимодействия движителя со снегом, например, в выражения силы тяги (12) и силы сопротивления движению (13), соотношение которых в свою очередь характеризует проходимость и энергоэффективность машины.

Аналогично можно уточнять значения плотности от влажности по выражению (8), а затем по зависимостям (4), (6) и (7) соответственно определять параметры  $\gamma$ ,  $C_0$ ,  $\operatorname{tg} \varphi_0$ , входящие в выражения (12)-(13).

Таким образом, на основании полученных новых зависимостей (4)-(11) для показателей физико-механических свойств снега, уточняется описание процесса взаимодействия движителей транспортных средств со снегом и определение затрат энергии (энергоэффективности) при многократном проходе по колее, поскольку учитываются изменения физико-механических свойств снега в выражениях (12)-(13) сил тяги и сопротивления движению машины. Кроме этого, выражения (4)-(11) позволяют перейти от дискретного описания свойств снега, заложенного в типах 1-4, к непрерывному, позволяющему определять физико-механические свойства снега и их изменения в любой момент времени на протяжении всего процесса взаимодействия движителя с опорной поверхностью.

Работа проводилась в рамках государственного контракта от 21.04.2011 №16.516.11.6023 «Создание экспериментального образца специального транспортного средства северного исполнения на шинах сверхнизкого давления для работы на слабонесущих опорных поверхностях» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### **Библиографический список:**

1. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. Теория и расчет. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
2. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. – М.: Машиностроение, 1981. – 230 с.
3. Алипов А.А. Распределение давлений в контакте шины с дорогой/ А.А. Алипов, В.В. Беляков, А.Н. Блохин, Д.В. Зезюлин // Вестник ИжГТУ. – 2011. – №1 (49). –С. 15-18.
4. Аникин А.А. Теория передвижения колесных машин / А.А. Аникин, В.В. Беляков, И.О. Донато. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.
5. Барахтанов Л.В. Физико-механические свойства снега как полотна пути для движения машин / Л.В. Барахтанов, А.А. Аникин, И.О. Донато // Наука и образование. МГТУ

им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2010. – № 10. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/160649.html> (дата обращения 17.08.2012).

6. Барахтанов Л.В. Повышение проходимости гусеничных машин по снегу: дисс... докт. техн. наук: 05.05.03. – Горький, 1988 г. – 352 с.
7. Барахтанов Л.В. Проходимость автомобиля / Л.В. Барахтанов, В.В. Беляков, В.Н. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ, 1996. – 200 с.
8. Барахтанов Л.В. Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов, В.И. Ершов, А.П. Куляшов, С.В. Рукавишников. – Горький: Волго-Вятское книжное изд-во, 1986. –192 с.
9. Блохин А.Н., Беляков В.В., Зезюдин Д.В., Алипов А.А. Определение нормальных усилий в контакте шины сверхнизкого давления с опорной поверхностью // Журнал ААИ (Журнал автомобильных инженеров). – 2011. – №2 (67). – С. 30-33.
10. Вездеходные транспортно-технологические машины / под редакцией В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Н. Новгород : ТАЛАН, 2004. – 960 с.
11. Гончаров К.О. Оценка влияния экскавационно-бульдозерных эффектов на проходимость многоосных колесных машин при криволинейном движении по снегу: автореферат дисс... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2011. – 19 с.
12. Донато И.О. Проходимость колесных машин по снегу. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 231 с.
13. Донато И.О. Теоретическое и экспериментальное обоснование повышения проходимости колесных машин по снегу: дис... докт. тех. наук. – Н. Новгород, 2007. – 306 с.
14. Крживицкий А.А. Снегоходные машины. Г. Н. Т. – М.: Машгиз, 1949. – 215 с.
15. Кузьмин П.П. Формирование снежного покрова и методы определения снегозапасов. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 176 с.
16. Макаров В.С. Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: автореферат дисс... канд. техн. наук: 05.05.03.– Н. Новгород, 2009. – 19 с.
17. 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.
18. Рихтер Г.Д. Снежный покров, его формирование и свойства. - М.: Изд-во АН СССР, 1945. – 120 с.
19. Снег. Справочник / под ред. Д.М. Грея, Д.Х. Мэйла. - Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 751 с.
20. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1982.– 284 с.

## Mathematical dependence of physical-mechanical properties of snow cover as support base for movement of vehicles

# 08, August 2012

DOI: 10.7463/0812.0443019

Barakhtanov L.V., Belyakov V.V., Blokhin A.N., Denisenko E.G.

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.Y. Alexeev

[nauka@nntu.nnov.ru](mailto:nauka@nntu.nnov.ru)

[a.n.blokhin@gmail.com](mailto:a.n.blokhin@gmail.com)

[denisenkoel@gmail.com](mailto:denisenkoel@gmail.com)

The article systematizes information about characteristics of snow cover significantly influencing cross-country ability, movability, mobility, energy efficiency and other properties of the vehicles. The authors provide equations of the most important communication parameters of snow cover condition, such as density, hardness, rigidity, cohesion, coefficient of internal friction, moisture, temperature, relative deformation, shear which are obtained from experimental data. Basing on the analysis of these dependencies the authors specify existing models of snow which are used to describe interaction of an engine with its support base.

---

**Publications with keywords:**[snow](#), [snow mechanical-and-physical properties](#), [bearing area](#), [interaction between vehicle's mover and support base](#)

**Publications with words:**[snow](#), [snow mechanical-and-physical properties](#), [bearing area](#), [interaction between vehicle's mover and support base](#)

---

### References

1. Ageikin Ia.S. *Vezdekhodnye kolesnye i kombinirovannye dvizhiteli. Teoriia i raschet* [All-terrain wheels and dual propellers. Theory and calculation]. Moscow, Mashinostroenie, 1972. 184 p.
2. Ageikin Ia.S. *Prokhodimost' avtomobilei* [Cross-country ability of cars]. Moscow, Mashinostroenie, 1981. 230 p.
3. Alipov A.A., Beliakov V.V., Blokhin A.N., Zeziulin D.V. Raspredelenie davlenii v kontakte shiny s dorogoi [The pressure distribution in the tire to road contact]. *Vestnik IzhGTU* [Herald of Izhevsk STU], 2011, no. 1 (49), p. 15-18.

4. Anikin A.A., Beliakov V.V., Donato I.O. *Teoriia peredvizheniia kolesnykh mashin* [The theory of movement of wheel machines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 240 p.
5. Barakhtanov L.V., Anikin A.A., Donato I.O. Fiziko-mekhanicheskie svoistva snega kak polotna puti dlia dvizheniia mashin [Physicomechanical properties of snow as cloths of a way for movement of cars]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2010, no. 10. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/160649.html> , accessed 18.08.2012.
6. Barakhtanov L.V. *Povyshenie prokhodimosti gusenichnykh mashin po snegu. Dokt. diss.* [Increasing of cross-country ability of tracked vehicles on snow. Dr. diss.]. Gor'kii, 1988. 352 p.
7. Barakhtanov L.V., Beliakov V.V., Kravets V.N. *Prokhodimost' avtomobilei* [Cross-country ability of cars]. Nizhnii Novgorod, NSTU Publ., 1996. 200 p.
8. Barakhtanov L.V., Ershov V.I., Kuliashov A.P., Rukavishnikov S.V. *Snegokhodnye mashiny* [Snowmobile machine]. Gor'kii, Volga-Vyatka Book Publ., 1986. 192 p.
9. Blokhin A.N., Beliakov V.V., Zeziudin D.V., Alipov A.A. Opredelenie normal'nykh usilii v kontakte shiny sverkhnizkogo davleniia s opornoii poverkhnost'iu [Determination of the normal forces in contact with the low pressure tire with support surface]. *Zhurnal AAI* [Journal of Automotive Engineers], 2011, no. 2 (67), pp. 30-33.
10. Beliakov V.V., Kuliashov A.P., Eds. *Vezdekhodnye transportno-tehnologicheskie mashiny* [All-terrain transport and technological machines]. Nizhnii Novgorod, TALAM, 2004. 960 p.
11. Goncharov K.O. *Otsenka vliianiia ekskavatsionno-bul'dozernykh effektov na prokhodimost' mnogoosnykh kolesnykh mashin pri krivolineinom dvizhenii po snegu. Kand. diss.* [Assessing the impact of excavation-bulldozing effects on cross-country ability of multi-wheeled vehicles the curvilinear motion on the snow. Cand. diss.]. Nizhnii Novgorod, 2011. 19 p.
12. Donato I.O. *Prokhodimost' kolesnykh mashin po snegu* [Cross-country ability of wheeled vehicles on snow]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006. 231 p.
13. Donato I.O. *Teoreticheskoe i eksperimental'noe obosnovanie povysheniia prokhodimosti kolesnykh mashin po snegu. Dokt. diss.* [Theoretical and experimental justification improve cross-country ability of wheeled vehicles on snow. Dr. diss.]. Nizhnii Novgorod, 2007. 306 p.
14. Krzhivitskii A.A. *Snegokhodnye mashiny* [Snowmobile machine]. Moscow, Mashgiz, 1949. 215 p.
15. Kuz'min P.P. *Formirovanie snezhnogo pokrova i metody opredeleniia snegozapasov* [Formation of snow cover and snow cover methods of determining]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1966. 176 p.
16. Makarov V.S. *Metodika rascheta i otsenka prokhodimosti kolesnykh mashin pri krivolineinom dvizhenii po snegu. Avtoreferat kand. diss.* [Method of calculation and

assessment of cross-country ability of wheeled machines in the curvilinear motion in the snow. Abstract of cand. diss.]. Nizhnii Novgorod, 2009. 19 p.

17. Panov V.I. *Vzaimodeistvie so snezhnym pokrovom gusenichnosannykh poezdov i puti povysheniia tiagovykh kachestv. Kand. diss.* [Interaction with snow cover the tracked-sled trains and ways of increasing traction qualities. Cand. diss.]. Gor'kii, 1965. 212 p.

18. Rikhter G.D. *Snezhnyi pokrov, ego formirovanie i svoistva* [Snow cover, its formation and properties]. Moscow, AN SSSR Publ., 1945. 120 p.

19. Gray D.M., Male D.H., Eds. *Handbook of snow: principles, processes, management and track use*. Pergamon Press. 1981. (Russ. ed.: Grei D.M., Meil D.Kh., Eds. *Sneg. Spravochnik*. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1986. 751 p.).

20. Wong J.Y. *Theory of ground vehicles*. John Wiley & Sons, Inc., USA, 1978. (Russ. ed.: Vong Dzh. *Teoriia nazemnykh transportnykh sredstv*. Moscow, Mashinostroenie, 1982. 284 p.).