

УДК 629.331

АНАЛИЗ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СНЕГА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОХОДИМОСТИ МАШИН

Л.В. Баракханов, д.т.н. / А.Н. Блохин, к.т.н. / Е.Г. Денисенко / С.Е. Манянин
НГТУ им Р.Е. Алексеева

Для исследования движения колесной машины по снежной поверхности необходимо в первую очередь знать сопротивление снега сжатию (зависимость вертикальной деформации снега от нормальной нагрузки), т.к. оно определяет погружение движителя, сопротивление движению, проходимость и энергоэффективность транспортного средства.

В работе [1] получены зависимости вертикальной деформации снега от нормальной нагрузки и силы сопротивления, обусловленной вертикальной деформацией снежного полотна пути с учетом наиболее важных параметров снежного покрова: высоты H , плотности снега ρ и его начальной жесткости $у$.

Вместе с тем сопротивление снега сжатию существенно зависит от других физико-механических свойств снега — влажности, температуры, твердости, связности.

Множество экспериментальных исследований и наблюдений за последние 40 лет, проведенных сотрудниками отраслевой научно-исследовательской лаборатории вездеходных машин (ОНИЛВМ), научно-исследовательской лаборатории транспортных интеллектуальных систем (НИЛ ТИС) и НОЦ «Транспорт» НГТУ, позволили собрать обширные сведения в областях, связанных с изучением свойств снежного покрова как полотна пути и взаимодействия движителя со снегом. В работах [2–4] были получены зависимости между механическими параметрами (коэффициент внутреннего трения, твердость, связность, коэффициент жесткости) и физическим параметром (плотность снега).

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

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \sum_{i=0}^n A_i \cdot \rho^i, \quad (1)$$

где $\operatorname{tg} \varphi_0$ — коэффициент внутреннего трения; i — показатель степени; n — наибольшая степень полиномиальной зависимости; A_i — коэффициенты регрессии, $(\text{см}^3/\text{г})^i$, ρ — плотность снега, $\text{г}/\text{см}^3$.

$$HC = \sum_{i=0}^n A_i \cdot \rho^i, \quad (2)$$

где HC — твердость снега, Па; i, n — параметры, указанные в формуле (1); A_i — коэффициенты регрессии, $0, 1^{3i}(m^{3i-2} H / \kappa z^i)$; ρ — плотность снега, $\text{г}/\text{см}^3$.

$$C_0 = \sum_{i=0}^n A_i \cdot \rho^i, \quad (3)$$

где C_0 — связность, Па; i, n — параметры, указанные в формуле (1); A_i — коэффициенты регрессии, $0, 1^{3i}(m^{3i-2} H / \kappa z^i)$, ρ — плотность снега, $\text{г}/\text{см}^3$.

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

где $K_{\text{ж}}$ — коэффициент жесткости, $\text{Н}/\text{м}^3$; i, n — параметры, указанные в формуле (1); A_i — коэффициенты регрессии $0, 1^{3i}(m^{3i-2} H / \kappa z^i)$; ρ — плотность снега, $\text{г}/\text{см}^3$.

В табл. 1 представлены полученные на основе метода наименьших квадратов коэффициенты регрессионных зависимостей (1)–(4).

Зависимости $\operatorname{tg} \varphi_0(\rho)$, $HC(\rho)$, $C_0(\rho)$, $K_{\text{ж}}(\rho)$, определяемые уравнениями (1)–(4), представлены на рис. 1–4.

Данные рисунков свидетельствуют, что с увеличением плотности снега происходит значительное уве-

Таблица 1. Коэффициенты регрессионных уравнений связи механических параметров снега и его плотности

Коэффициенты	Значения коэффициентов регрессии для зависимостей			
	Коэффициент внутреннего трения	Твердость снега	Связность	Коэффициент жесткости
A0	0,190571	7,208	-	194,8
A1	0,224523	-123,043	-	-4375,8
A2	0,90725	441,461	17,390	38093,7
A3	-0,52876	743,152	76,069	-158021,0
A4	-	45,784	-	292413,2
A5	-	-893,297	-	-94462,0
A6	-	-	-	-273373,0
A7	-	-	-	-17867,9
A8	-	-	-	354408,0

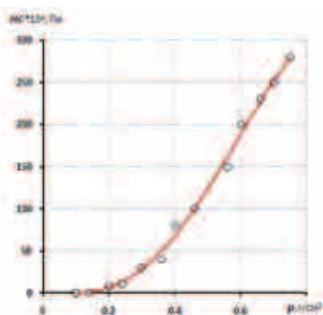


Рисунок 1. Зависимость твердости снега от его плотности

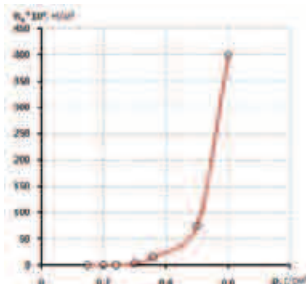


Рисунок 2. Зависимость коэффициента жесткости снега от его плотности

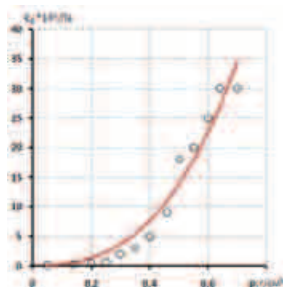


Рисунок 3. Зависимость связности снега от его плотности

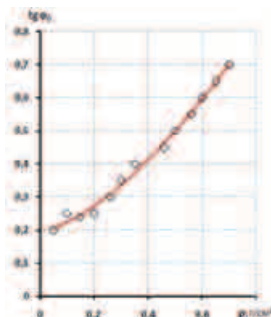


Рисунок 4. Зависимость коэффициента внутреннего трения снега от его плотности

личение твердости, коэффициента жесткости, связности. В интервале значений плотности 0,1...0,6 г/см³ 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°С происходит интенсивный процесс таяния и увлажнения. При этом свойства снега начинают существенно меняться. Исследования, проведенные В.И. Пановым в ОНИЛВМ [2], пока-

зали, что влажность заметно влияет на плотность, это в свою очередь приводит к изменению других свойств.

Взаимосвязи этих параметров наиболее адекватно описываются следующими уравнениями:

$$\rho(w, \rho_0) = \sum_{i=0}^n A_{(n-i),i} w^{n-i} \rho_0^i, \quad (5)$$

$$HC(\rho, T) = \sum_{i=0}^n A_{(n-i),i} \rho^{n-i} T^i, \quad (6)$$

Таблица 2. Коэффициенты регрессионных уравнений связи параметров состояния снега

Коэффициенты	Значения коэффициентов для зависимостей			
	$\rho = f_1(w, \rho_0)$	$HC = f_2(\rho, T)$	$\tau = f_3(w, \rho)$	$\rho = f_4(\varepsilon, \rho_0)$
A00	0,087334	-0,16599	-1,16514	0,636121
A10	0,010294	0,542153	8,855958	2,51303
A01	0,710542	-0,08925	0,255592	-2,42747
A20	-	0,447667	5,928529	-3,91265
A11	-	0,159256	2,47637	3,167023
A02	-	-0,01336	-0,02268	2,028997
A30	-	0,261043	3,026701	-1,31383
A21	-	-0,15863	-0,02819	4,508269
A12	-	0,022601	-0,07431	-6,98382
A03	-	-0,00032	0,000521	0,572309
A40	-	-	-	1,56956
A31	-	-	-	-1,08155
A22	-	-	-	2,48729
A13	-	-	-	-1,66261
A04	-	-	-	-0,12678
A50	-	-	-	2,73298
A41	-	-	-	-3,11744
A32	-	-	-	1,302128
A23	-	-	-	1,237096
A14	-	-	-	2,160579
A05	-	-	-	-0,632070
A60	-	-	-	2,70090
A51	-	-	-	-2,887590
A42	-	-	-	-0,173930
A33	-	-	-	0,097927
A24	-	-	-	-2,906680
A15	-	-	-	1,380304
A06	-	-	-	-0,020480

Таблица 3. Численные значения параметров снега [3]

Тип снега	ρ , г/см ³	γ , кПа/м	C_0 , кПа	$tg \varphi$
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: $\gamma = C' \cdot K_{\text{сн}}$, где γ — несущая способность (начальная жесткость) снега, C' — коэффициент пропорциональности ($C' = 0,735$) [2]

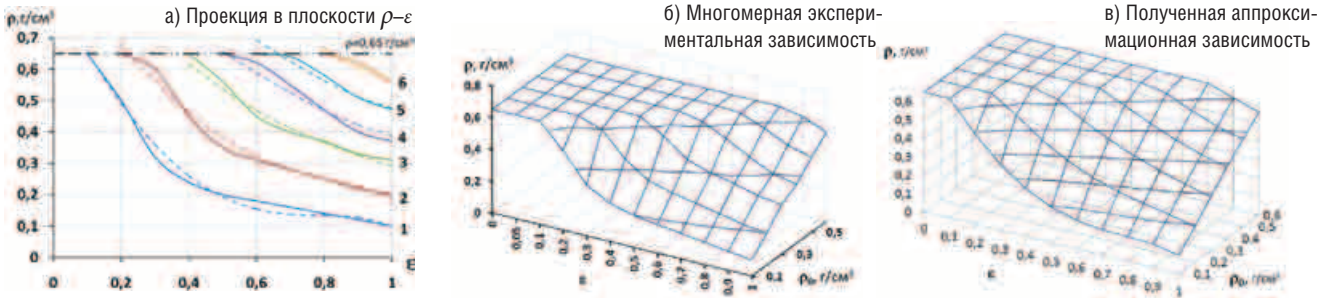


Рисунок 5. Зависимость плотности снега от относительной деформации при различных значениях начальной плотности ρ_0 : 1 - 0,1 г/см³; 2 - 0,2 г/см³; 3 - 0,3 г/см³; 4 - 0,4 г/см³; 5 - 0,5 г/см³; 6 - 0,6 г/см³
 — экспериментально полученные зависимости - - - - предложенные полиномиальные зависимости

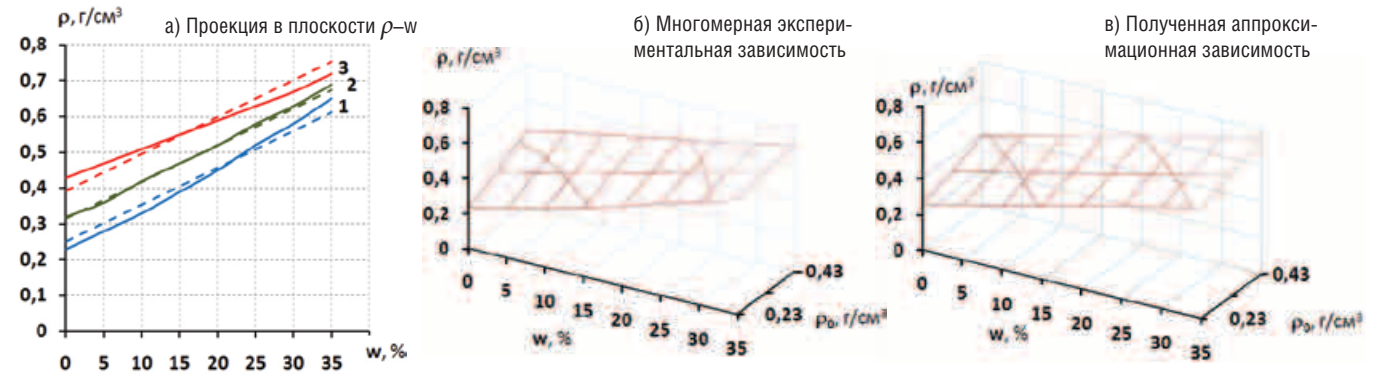


Рисунок 6. Зависимость плотности снега от влажности при различных значениях начальной плотности ρ_0 сухого снега: 1 - 0,23 г/см³; 2 - 0,32 г/см³; 3 - 0,43 г/см³
 — экспериментально полученные зависимости - - - - предложенные полиномиальные зависимости

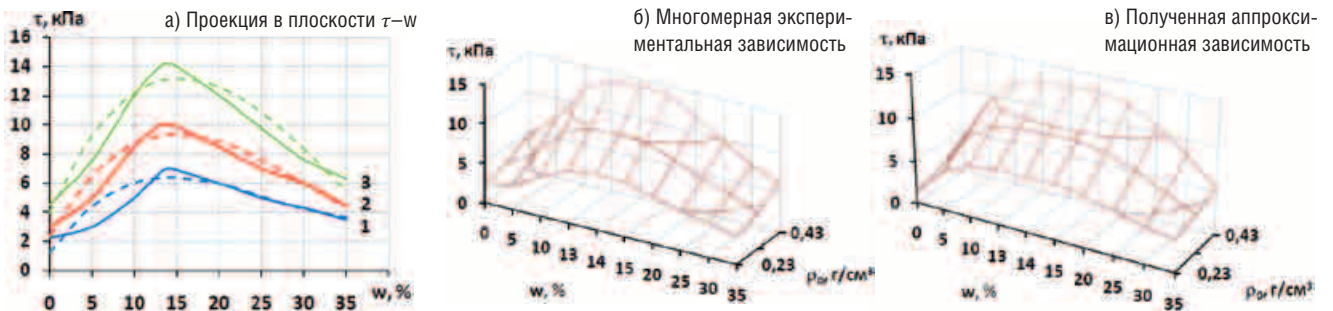


Рисунок 7. Зависимость сопротивления сдвигу снега от влажности при плотности ρ_0 сухого снега: 1 - 0,23 г/см³; 2 - 0,32 г/см³; 3 - 0,43 г/см³
 — экспериментально полученные зависимости - - - - предложенные полиномиальные зависимости

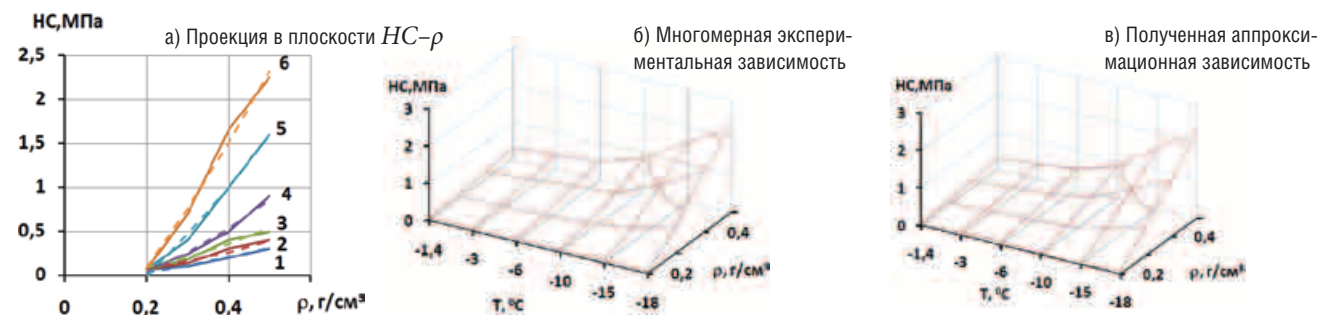


Рисунок 8. Зависимость твердости снега от его плотности при различных температурах: 1 - (-1,4)°C; 2 - (-3)°C; 3 - (-6)°C; 4 - (-10)°C; 5 - (-15)°C; 6 - (-18)°C
 — экспериментально полученные зависимости - - - - предложенные полиномиальные зависимости

$$\tau(w, \rho) = \sum_{i=0}^n A_{(n-i),i} w^{n-i} \rho^i, \quad (7)$$

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

В формулах (5)–(8): $A_{(n-i),i}$ — коэффициенты регрессии; i, n — параметры, указанные в формуле (1); w — влажность снега; T — температура снега; τ — сопротивление снега сдвигу; ε — относительная деформация, определяемая по выражению $\varepsilon = (H-z)/H$, где H — глубина снежного покрова, z — расстояние от поверхности подстилающего слоя до нижней точки внедряемого в снег штампа; ρ_0 — начальная плотность снежного покрова.

На основе метода наименьших квадратов для зависимостей (5)–(8) были получены коэффициенты регрессии, представленные в табл. 2. С учетом данных коэффициентов, например для снега зимнего периода, зависимость (6) твердости снега от его плотности при различных температурах примет вид:

$$\begin{aligned} HC(\rho, T) = & -0,16599 + 0,542153 \times \rho - 0,08925 \times T + \\ & + 0,447667 \times \rho^2 + 0,159256 \times \rho \times T - 0,01336 \times T^2 + \\ & + 0,261043 \times \rho^3 - 0,15863 \times \rho^2 \times T + 0,022601 \times \rho \times T^2 - \\ & - 0,00032 \times T^3 \end{aligned}$$

На рис. 5–8 показаны полученные аппроксимационные зависимости и сравнение их с экспериментальными данными.

На рис. 5 представлено изменение плотности снега от относительной деформации. При определенных значениях относительной деформации ε происходит возрастание плотности снега до значений $\rho = 0,65$ г/см³, после которых снег переходит в состояние льда, являющегося практически недеформируемым при тех давлениях, которые оказывают движители транспортных средств на него.

На основании приведённых результатов (см. рис. 5–8) можно говорить о соответствии новых предложенных зависимостей (5)–(8) с экспериментальными данными.

В работе [2] предложено 4 типа снега с соответствующими параметрами для оценки проходимости транспортных средств, а в работе [3] указанные значения параметров корректируются до значений, представленных в табл. 3.

Ранее 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) значения параметров снежного покрова выбирались с учетом заданного типа снега из показателей табл. 3. При этом считалось, что указанные параметры снега сохраняют свои значения в независимости от деформации, температуры и влажности снега.

Теперь на основании выражения (8) можно уточнить плотность снега в зависимости от относительной деформации снега (глубины колеи) и начальной плотности. Далее по зависимостям (4), (3) и (1) соответственно определяются остальные параметры снега: $tg \varphi_0, C_0, \gamma$, которые подставляются в выражения для описания процесса взаимодействия движителя со снегом.

Аналогично можно уточнять значения плотности снега от влажности по выражению (5), а затем по зависимостям (4), (3) и (1) соответственно определять параметры $\gamma, C_0, tg \varphi_0$, входящие в выражения (1)–(4).

Таким образом, на основании полученных новых зависимостей (1)–(8) 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, и возможен переход от дискретного анализа 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.

В заключение следует отметить, что работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации 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 работ на слабонесущих опорных поверхностях».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барахтанов А.В., Манянин С.Е.: Расчет сопротивления движению машин по снегу // Журнал ААИ. — 2012. — №1 (72). — С. 24-27.
2. Барахтанов А.В. Повышение проходимости гусеничных машин по снегу: дис. докт. техн. наук: 05.05.03. — Горький, 1988. — С. 352.
3. Барахтанов А.В., Аникин А.А., Донато И.О.: Физико-механические свойства снега как полотна пути для движения машин // Электрон. жур. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание». — 2010. — №10 <http://technomag.edu.ru/doc/160649.html>
4. Барахтанов А.В., Беляков В.В., Кравец В.Н.: Проходимость автомобиля // Н. Новгород: НГТУ, 1996. — С. 200.
5. Алипов А.А., Беляков В.В., Блохин А.Н., Зезюлин Д.В.: Распределение давлений в контакте шины с дорогой // Вестник ИжГТУ. — 2011. — №1 (49). — С. 15-18.