

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5843

УДК 53.09

Статья

Изменения плотности снега при сжимающей нагрузке

Борисов Вячеслав Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Российская Федерация), vborisov@bmstu.ru

Акинин Дмитрий Вячеславович

кандидат технических наук, доцент, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Российская Федерация), akinin.dmitrij2013@yandex.ru

Паюл Александра Дмитриевна

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Российская Федерация), sestersatan@gmail.com

Получена: 27 июля 2021 / Принята: 24 сентября 2021 / Опубликовано: 30 сентября 2021

Аннотация: Около 80 % территории Российской Федерации покрывается снегом на длительный период времени (5—10 месяцев), что существенно влияет на экономику и образ жизни населения. Снег как дорожно-строительный материал 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, твёрдость, коэффициент жёсткости, связность, фрикционные свойства, прилипание и примерзание, влажность, температура, структура и текстура снега. Для увеличения твёрдости (несущей способности) снегового покрова необходимо максимально уплотнить его. Для выбора удельных давлений, осуществляемых машинами, надо располагать зависимостью между величиной удельного давления и плотностью снежного покрова. Практические наблюдения показали [1—6], что способность снега уплотняться зависит от его температуры (степень уплотнения снега зависит от температуры). В связи с этим в данной статье авторами были проведены экспериментальные исследования по определению зависимости между удельным давлением, прилагаемым к снежному покрову, и его

плотностью. Исследования проводились в полевых условиях непосредственно на снежной целине и в лабораторных условиях кафедр ЛТ4-МФ и ЛТ7-МФ МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Ключевые слова: сжимающая нагрузка; плотность снега; свойства снега; зимняя дорога; твёрдость снега

DOI: 10.15393/j2.art.2021.5843

Article

Changes in snow density under compressive load

Vyacheslav Borisov

Ph. D. in engineering, associate professor, N. E. Bauman Moscow State Technical University (Russian Federation), vborisov@bmstu.ru

Dmitry Akinin

Ph. D. in engineering, associate professor, N. E. Bauman Moscow State Technical University (Russian Federation), akinin.dmitrij2013@yandex.ru

Alexandra Payul

researcher, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (Russian Federation), sestersatan@gmail.com

Received: 27 July / Accepted: 24 September 2021 / Published: 30 September 2021

Abstract: About 80% of the territory of the Russian Federation is covered with snow for a long period of time (5...10 months), which significantly affects the economy and lifestyle of the population. Snow, as a road building material, is a set of phases of a substance of the same nature, but in different aggregate states. Snow as a track bed is a complex spatial system, which in topological terms is defined as a poly-relief, polyzonal, poly-layered, and polydisperse medium. The materials forming the motion surfaces are evaluated according to independent parameters. Independent parameters are understood as such physical and mechanical properties of the material that do not depend on the method of their determination. So for snow these are: density, hardness, stiffness coefficient, cohesion, frictional properties, adhesion and freezing, moisture, temperature, structure and texture of the snow. To increase the hardness (bearing capacity) of the snow cover it is necessary to compact it as much as possible. Selection of specific pressures applied by machines should be based on a relationship between the value of the specific pressure and the density of the snow cover. Practical observations have shown that the ability of snow to compact depends on its temperature. Therefore, the authors conducted experimental studies to determine the relationship between specific pressures, applied to the snow cover, and its density. The studies were performed in the field conditions on virgin snow and in the laboratory of the departments LT4-MF and LT7-MF MGTU named after N.E. Bauman.

Keywords: compressive load, snow density, snow properties, snow logging road, hardness of snow

1. Введение

Одно из первых определений тепловых и прочностных характеристик снега, не потерявших значения до настоящего времени, было выполнено Г. П. Абельсом в 1893 г. в Свердловске. Абельс определил коэффициенты тепло- и температуропроводности снега на площадке обсерватории по ежечасным наблюдениям за температурой снега, выполненным на глубинах 5 и 10 см.

Снежный покров в течение всего периода своего существования подвергается воздействию различных физических и механических факторов, приводящих к непрерывному изменению его структуры, состава и объёма. Эти факторы и оказываемые ими воздействия и в настоящее время ещё недостаточно изучены.

Систематизация 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 колёсного или гусеничного движителя с опорным основанием, разработаны учёными — Н. И. Фуссом, Р. Бернштейном, Горячкиным — Летошневым, М. Беккером, Л. Карафанзом, А. Рисом, а также МВТУ им. Н. Э. Баумана, НГТУ им. Р. Е. Алексеева и др. Но вопросы передвижения машин по снегу освещены пока явно недостаточно, т. к., согласно своду правил, для надёжного прохождения лесовозного и лесозаготовительного транспорта по зимним технологическим путям и зимним снеговым дорогам плотность и твёрдость снега, как минимум, должны быть равны 600 кг/м^3 и 10^6 Па [7].

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 чёткого представления о закономерностях изменений параметров снега и их взаимосвязях.

В нашем исследовании рассмотрены и изучены зависимости сопротивления снега сжатию с учётом наиболее важных параметров снежного покрова: высоты, плотности снега и его начальной жёсткости, а также в ходе проведённого эксперимента получены зависимости между удельным давлением, прилагаемым к снежному покрову, и его плотностью с учётом температурной составляющей.

2. Материалы и методы

Исследование основывается на основных положениях теории колёсных и гусеничных машин и теории наземных транспортных средств: при осуществлении расчётов и аппроксимации полученных экспериментальных данных нами были использованы методы математического анализа и прикладной математики. Полученные зависимости плотности от температуры описываются полиномиальными зависимостями четвёртого порядка с доверительной аппроксимацией, близкой к единице. Расчёты выполнены с использованием программы Microsoft Excel.

3. Результаты

В полевых условиях сжатие проводилось круглым плоским штампом площадью $0,01 \text{ м}^2$ (100 см^2), снабжённым штоком, скользящим в направляющих, на верхнем конце которого укреплён столик; на столик непосредственно накладывались грузы. Предельное удельное давление составило $0,785 \text{ МПа}$ ($0,8 \text{ кг/см}^2$). Грузы постепенно накладывались на столик, плотность замерялась на глубине $0,05 \text{ м}$ (5 см) от поверхности штампа. Данные, приведённые в таблицах 1 и 2, представляют собой средние из 10 наблюдений. Наблюдения проводились при различных температурах снега.

В лабораторных условиях снег сжимался в цилиндре с площадью сечения $0,002 \text{ м}^2$ (20 см^2) поршнем, на который накладывались грузы. Температура в камере изменялась от -21° до $-1,5^\circ \text{ C}$. При каждом значении температур, указанном на графиках, изображённых на рисунках 1 и 2, снег выдерживался в течение 3 суток.

Плотность снега определялась путём обмера и взвешивания всего образца снега, высота которого $\approx 0,05$ (5 см). Данные, приведённые в таблице 3, представляют собой среднее из 10 наблюдений. В таблице 1 и на рисунке 1 приведены данные полевых наблюдений плотности снега в зависимости от удельного давления при температурах $-10,8^\circ$ и $-1,3^\circ \text{ C}$.

Таблица 1. Изменение плотности снега в зависимости от удельного давления при одностороннем сжатии при постоянной температуре

Table 1. Change in snow density depending on the specific pressure at unilateral compression at constant temperature

Температура снега, $^\circ \text{C}$	Первоначальная плотность, кг/м^3 (г/см^3)	Удельное давление, МПа (кг/см^2)					
		0,0049 (0,05)	0,0098 (0,1)	0,0196 (0,2)	0,0392 (0,4)	0,0588 (0,6)	0,0785 (0,8)
-10,8	150 (0,15)	340 (0,34)	350 (0,35)	380 (0,38)	400 (0,40)	410 (0,41)	410 (0,41)
-1,3	180 (0,18)	330 (0,33)	360 (0,36)	460 (0,46)	560 (0,56)	580 (0,58)	590 (0,59)

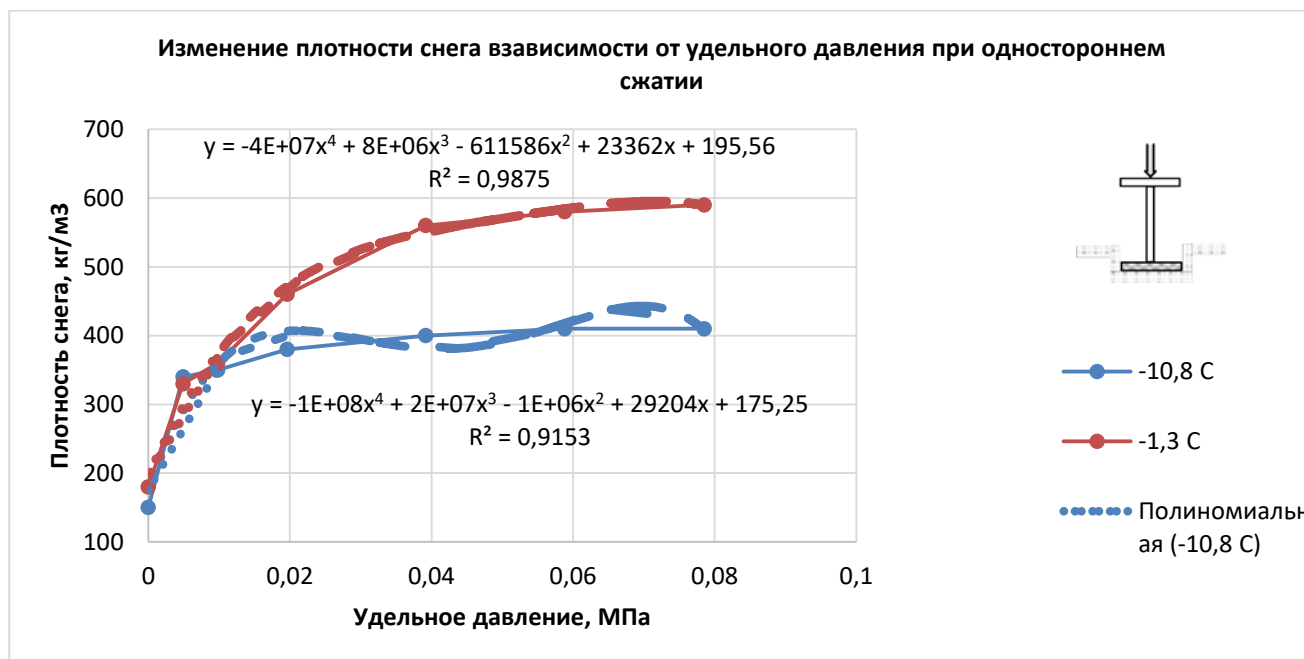


Рисунок 1. Изменение плотности снега в зависимости от удельного давления при температурах $-10,8^{\circ}$ и $-1,3^{\circ}$ °C

Figure 1. Change in snow density depending on specific pressure at temperatures of $-10,8^{\circ}$ and $-1,3^{\circ}$ °C

Анализируя рисунок 1, мы видим, что вначале наблюдается возрастание плотности при увеличении удельного давления, но по достижении некоторого предельного значения плотность перестаёт возрастать независимо от дальнейшего роста удельного давления.

Изменение плотности снега от удельного давления при температуре снега $-1,3^{\circ}$ °C описывается полиномиальной зависимостью четвертого порядка с достоверной аппроксимацией $R^2 = 0,9875$:

$$\rho = -3765512,7q^4 + 7769532,3q^3 - 611586,2q^2 + 23362,1q + 180, \quad (1)$$

где q — удельное давление.

Изменение плотности снега от удельного давления при температуре снега $-10,8^{\circ}$ °C описывается полиномиальной зависимостью четвёртого порядка с достоверной аппроксимацией $R^2 = 0,9153$:

$$\rho = -120194812,6q^4 + 21187195,7q^3 - 1256689,3q^2 + 29203,8q + 150. \quad (2)$$

Чем выше температура, тем больше предельное значение плотности. При $t = -10,8^{\circ}$ °C она равна 410 кг/м^3 ($0,41 \text{ г/см}^3$), при $t = -1,3^{\circ}$ °C — 590 кг/м^3 ($0,59 \text{ г/см}^3$). Зависимость плотности от температуры при постоянном удельном давлении (таблица 2) изображена на рисунке 2.

Таблица 2. Изменение плотности снега (кг/м³) в зависимости от температуры при одностороннем сжатии и постоянном удельном давлении

Table 2. Change in snow density (kg/m³) depending on temperature at unilateral compression and constant specific pressure

Удельное давление, МПа (кг/см ²)	Температура снега, °С				
	-1,3	-7,3	-10,8	-13,7	-15,8
0,0392 (0,4)	560 (0,56)	440 (0,44)	410 (0,41)	390 (0,39)	360 (0,36)
0,0588 (0,6)	580 (0,58)	480 (0,48)	410 (0,41)	380 (0,38)	370 (0,37)

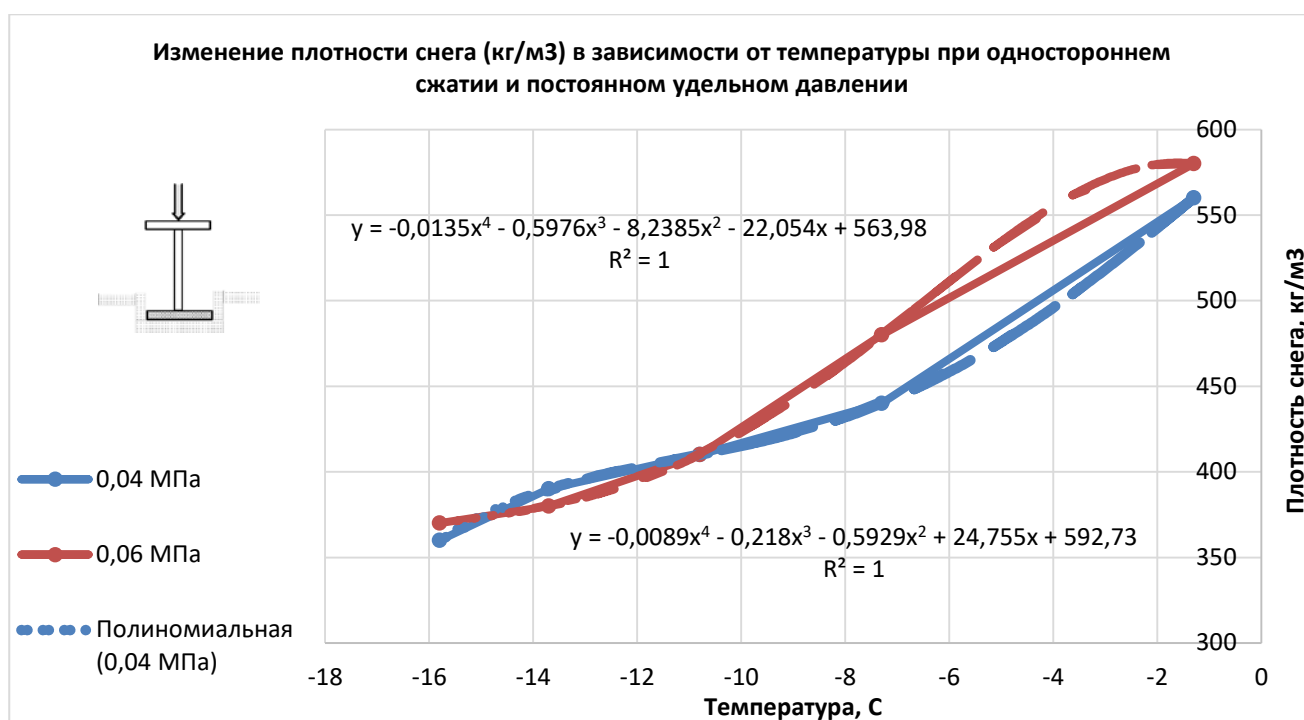


Рисунок 2. Зависимость плотности снега от температуры при постоянном удельном давлении

Figure 2. Dependence of snow density on temperature at constant specific pressure

Изменение плотности снега в зависимости от температуры описывается полиномиальными зависимостями четвёртого порядка с доверительной аппроксимацией, близкой к единице [8].

Как видно, в зоне температур, близких к нулю, плотность при падении температуры уменьшается почти линейно; с дальнейшим падением температуры уменьшение плотности замедляется и почти прекращается при $t = -20^{\circ}\text{C}$ (таблица 3, рисунки 3 и 4).

Таблица 3. Плотности снега (кг/м³) в зависимости от температуры и удельного давления при всестороннем сжатии в цилиндре

Table 3. Density of snow (kg/m³) depending on temperature and specific pressure at full compression in the cylinder

Температура снега, °С	Удельное давление, МПа (кг/см ²)			
	0,0294 (0,3)	0,0490 (0,5)	0,0981 (1)	0,1961 (2)
-1,5	467 (0,467)	493 (0,493)	513 (0,513)	528 (0,528)
-3	462 (0,462)	487 (0,487)	506 (0,506)	520 (0,520)
-5	455 (0,455)	470 (0,470)	500 (0,500)	510 (0,510)
-11	435 (0,435)	456 (0,456)	480 (0,480)	491 (0,491)
-16	426 (0,426)	438 (0,438)	465 (0,465)	480 (0,480)
-21	420 (0,420)	435 (0,435)	462 (0,462)	470 (0,470)

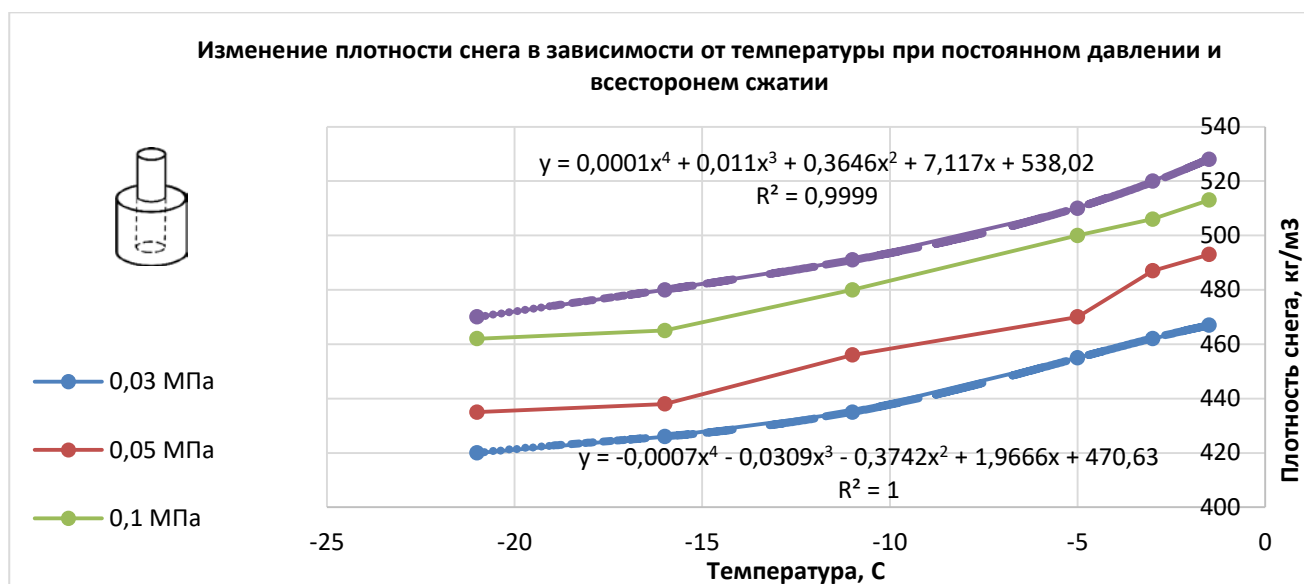


Рисунок 3. Изменение плотности снега в зависимости от температуры при постоянном давлении и всестороннем сжатии

Figure 3. Change in snow density depending on temperature at constant pressure and all-round compression

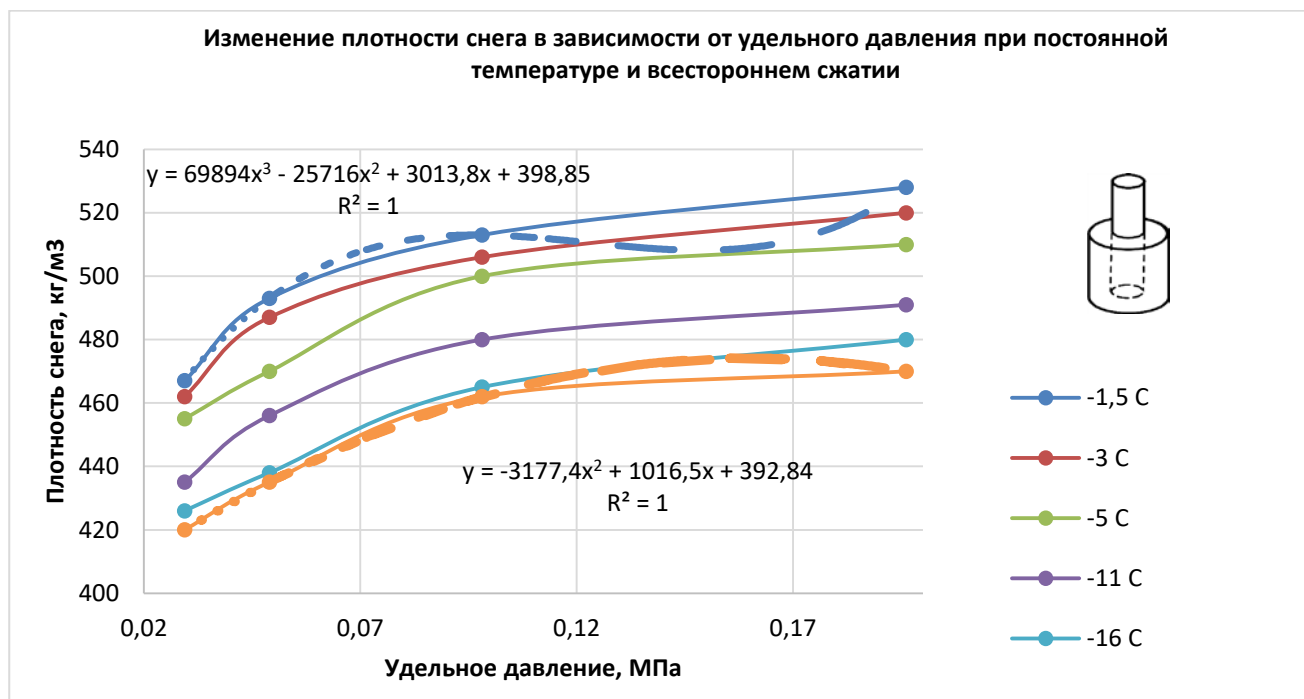


Рисунок 4. Изменение плотности снега в зависимости от удельного давления при постоянной температуре и всестороннем сжатии

Figure 4. Snow density change depending on specific pressure at constant temperature and all-round compression

Как видим, ход зависимостей совпадает с полученным ранее при одностороннем сжатии снега штампом. Зависимость плотности от удельного давления при различных температурах может быть выражена следующим эмпирическим уравнением:

$$\rho = \rho_0 + \frac{k_1 q (k_2 - t)}{q + k_3} \quad (3)$$

где t — температура (°C) по модулю; ρ_0 — исходная плотность; q — удельное давление; k_1, k_2, k_3 — коэффициенты.

При обработке экспериментальных данных были получены следующие значения коэффициентов при $\rho_0 = 180 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} (0,18 \frac{\text{г}}{\text{см}^3})$:

$$k_1 = 0,38; k_2 = 9600; k_3 = 0,8$$

Таким образом, получена следующая формула для расчёта плотности в зависимости от удельного давления:

$$\rho = 0,18 + \frac{0,0038q(96 - t)}{q + 0,08} \quad (4)$$

Формула (4) показывает, что предельное значение плотности при любом достаточно большом удельном давлении обусловлено температурой. Например, при $t = -1^{\circ}\text{C}$ плотность может достигать значения $\rho = 580 \text{ кг/м}^3$, при $t = -10^{\circ}\text{C}$ плотность $\rho = 584 \text{ кг/м}^3$, при $t = -20^{\circ}\text{C}$ плотность принимает показатель $\rho = 585 \text{ кг/м}^3$. Наличие указанных пределов плотности естественно, если учесть, что снег состоит из отдельных кристалликов с большим количеством выступов, между которыми заключён воздух. Известно, что плотность тела, состоящего из твёрдых шариков удельного веса 1, при самом компактном из возможных расположений не может превышать (по Сликтеру) 0,74.

Увеличение плотности снега происходит в результате более компактной укладки и излома кристалликов и сжатия самих кристаллов [9—11]. Твёрдость льда резко возрастает в зоне температур от 0 до -10°C , оставаясь в дальнейшем неизменной. Участок резкого возрастания твёрдости льда (рисунок 5) соответствует участку линейного изменения плотности снега с температурой при постоянном давлении, что позволяет предполагать, что сжатие снегового покрова при этих температурах происходит главным образом за счёт деформирования составляющих его снежинок.

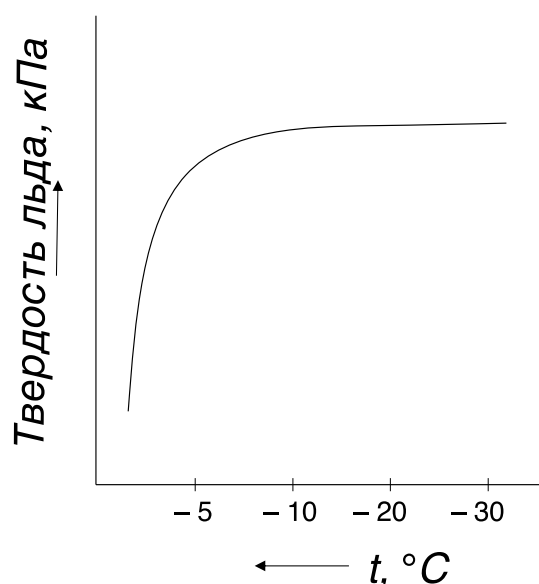


Рисунок 5. Характер изменения твёрдости льда в зависимости от температуры

Figure 5. Change behavior in ice hardness depending on temperature

Вышеизложенное показывает, что уплотнять снег целесообразно при температуре, близкой к нулю, причём очевидно, что применение технологического (уплотняющего) оборудования больше определённого веса не приводит к увеличению плотности [12—14]. Например:

- при весе катка 1,5 т получена плотность 400 кг/м^3 ($0,40 \text{ г/см}^3$);
- при весе катка 3,5 т получена плотность 440 кг/м^3 ($0,44 \text{ г/см}^3$).

В другом случае:

- при весе катка 0,5 т получена плотность 320 кг/м³ (0,32 г/см³);
- при весе катка 1,0 т получена плотность 390 кг/м³ (0,39 г/см³).

При сжатии снега плотность его распределяется неравномерно, быстро уменьшаясь по мере удаления от места приложения нагрузки (таблица 4).

Таблица 4. Неравномерность распределения плотности

Table 4. Uneven density distribution

Нагружение	Плотность, кг/м ³ (г/см ³)	
	сверху	снизу
Каток 0,5 т	320 (0,32)	260 (0,26)
Каток 1,0 т	390 (0,39)	350 (0,35)
Каток 1,5 т	400 (0,40)	360 (0,36)
Каток 3,5 т	440 (0,44)	400 (0,40)

Общая глубина уплотнённого снегового покрова составляет 15—18 см. Неравномерная плотность снега обусловлена тем, что давление затухает по мере удаления от места приложения нагрузки.

Распределение давления в снеговом покрове по глубине (рисунок 6) подчиняется уравнению Феппля (формула (5)).

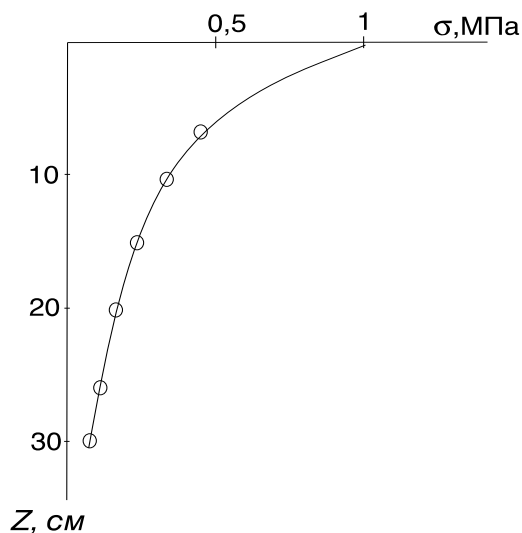


Рисунок 6. Распределение давления в снеговом покрове по глубине (по уравнению Феппля)

Figure 6. Distribution of pressure in the snow cover over depth (according to the Foppl equation)

$$\sigma = \frac{P}{\left(\frac{z}{a}\right)^2 - k}, \quad (5)$$

где P — нагрузка, кг; z — глубина снегового покрова, см; a — половина ширины дуги соприкосновения; k — константа.

4. Заключение и выводы

1. Способность снега уплотняться под влиянием снижающей нагрузки зависит от температуры снега, чем выше температура, тем до большей плотности может быть сжат снег.

2. Уплотнять снег целесообразно при температурах, близких к нулю, причём излишнее увеличение удельного давления не приводит к возрастанию плотности снега.

3. Снег целесообразно уплотнять тонкими слоями, т. к. изменение напряжения по глубине снегового покрова интенсивно затухает с увеличением расстояния от места приложения нагрузки.

Список литературы

1. Морозов В. С. Расчёт однослойных зимних автомобильных дорог на прочность // Инновационная наука. 2015. № 11-2. С. 84—88.
2. Симаков В. П. Обоснование конструктивных параметров ледяных лесовозных автомобильных дорог для условий Западной Сибири: Дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Химки, 1984.
3. Котельников В. В. Выбор скоростных режимов уплотнения снега дорожными машинами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Тюменский гос. нефтегазовый ун-т. Тюмень, 2000. 14 с.
4. Рихтер Г. Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.: Изд-во АН СССР, 1945. 120 с.
5. Малыгин В. А., Рукавишников С. В. Процессы, протекающие в снеге при сжатии его штампом // Снегоходные машины / ГПИ им. А. А. Жданова. 1969. Т. XXV. Вып. 16. С. 88—96.
6. Барахтанов Л. В., Аникин А. А., Донато И. О. Физико-механические свойства снега как полотна пути для движения машин // Наука и образование / МГТУ им. Н. Э. Баумана: Электронный журнал. 2010. № 10. Окт.
7. СП 288.1325800.2016. Свод правил. Дороги лесные. Правила проектирования и строительства. Утв. Приказом Минстроя России от 16.12.2016 № 952/пр.
8. Снег: Справочник / под ред. Д. М. Грея, Д. Х. Мэйла. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 751 с.
9. Исследование прочностных характеристик зимних лесных дорог, укрепленных древесными отходами / С. Б. Васильев, В. А. Борисов, А. И. Угаров, В. Ф. Никитин, Д. М. Килочек // Applied and Fundamental Studies. Proceedings of the 13th International Academic Conference. 2017. P. 64—68.
10. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств: Пер. с англ. М.: Машиностроение, 1982. 284 с.

11. Казакова Е. Н., Лобкина В. А. Зависимость плотности отложенного снега от его структуры и текстуры // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII, № 6. С. 64—71.
12. Теоретическое исследование глубины колеи и уплотнения снега под воздействием движителя лесной машины / Е. Г. Хитров, Г. С. Тарадин, А. В. Андронов, Е. В. Котенев, Ю. Л. Пушкин // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 227. С. 236—248. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.236-248.
13. Системы. Методы. Технологии / А. В. Андронов [и др.] // Экспериментальное исследование колееобразования и уплотнения снега под воздействием колёсного форвардера. 2020. № 2 (46). С. 106—111.
14. Анализ способов увеличения прочности снега при строительстве зимних дорог / С. М. Метелица, Ю. Ф. Кайзер, Р. Б. Желудкевич, С. Ч. Монгуш // Вестник Тувинского государственного университета. Вып. 3: Технические и физико-математические науки. 2019. № 2 (46).

References

1. Morozov V. S. Calculation of single-layer winter highways for strength. *Innovative Science*, 2015, No 11-2, pp. 84—88. (In Russ.)
2. Simakov V. P. *Substantiation of design parameters of ice logging highways for the conditions of Western Siberia: Dissertation of the candidate of technical sciences: 05.21.01*. Khimki, 1984. (In Russ.)
3. Kotelnikov V. V. *Selection of speed modes of compaction snow by road cars: abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: 05.05.04*. Tyumen, Tyumen state. oil and gas un-t., 2000, 14 p. (In Russ.)
4. Richter G. D. *Snow cover, its formation and properties*. Moscow, Publishing house of the Academy of Sciences of the USSR, 1945, 120 p. (In Russ.)
5. Malygin V. A., Rukavishnikov S. V. Processes in snow when it is compressed by a stamp. *Snowmobile machines: GPI im. A. A. Zhdanov*, 1969, t. XXV, issue 16, pp. 88—96. (In Russ.)
6. Barakhtanov L. V., Anikin A. A., Donato I. O. Physical and mechanical properties of snow as a track bed for machine movement. *Science and Education. MSTU them. N. E. Bauman: Electronic journal*, 2010, no. 10, october. (In Russ.)
7. SP 288.1325800.2016. *Set of rules. Forest roads. Design and Construction Rules*. Approved by Order of the Ministry of Construction of Russia dated 16.12.2016 No 952/pr. (In Russ.)
8. *Snow. Handbook*. Ed. D. M. Gray, D. H. Mail. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1986. 751 p. (In Russ.)
9. Vasiliev S. B., Borisov V. A., Ugarov A. I., Nikitin V. F., Kilochek D. M. Investigation of the strength characteristics of winter forest roads reinforced with wood waste. *Applied and Fundamental Studies. Proceedings of the 13th International Academic Conference*, 2017, pp. 64—68. (In Russ.)
10. Wong J. *Theory of land vehicles: trans. from English*. Moscow, Mashinostroenie, 1982. 284 p. (In Russ.)
11. Kazakova E. N., Lobkina V. A. Dependence of the density of deposited snow on its structure and texture. *Cryosphere of the Earth*, 2018, vol. XXII, no 6, pp. 64—71. (In Russ.)
12. Khitrov E. G., Taradin G. S., Andronov A. V., Kotenev E. V., Pushkov Yu. L. Theoretical study of rut depth compaction of snow cover under influence of forest machine rover. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicoskoj Akademii*, 2019, issue 227, pp. 236—248. doi: 10.21266/2079-4304.2019.227.236-248. (In Russ.)

13. Andronov A. V. et al. Systems. Methods and Technologies. *Experimental study of track formation and snow compaction under the influence of a wheel forwarder*, 2020, no 2 (46), pp. 106—111. (In Russ.)
14. Metelitsa S. M., Kaizer Y. F., Zhelukevich R. B., Mongush S. Ch. The ways of snow strengthening for winter road construction. *Bulletin of the Tuva State University Issue 3. Technical and Physical and Mathematical Sciences*, 2019, no 2 (46). (In Russ.)

© Борисов В. А., Акинин Д. В., Паюл А. Д., 2021