

УДК 661:625

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ СНЕЖНО-ЛЕДОВОЙ МАССЫ ТОРОСА

Никандров И.С., Шурашов А.Д., Малыгин А.Л., Никандров М.И.

Дзержинский политехнический институт

*ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,
Дзержинск, e-mail: al.malygin.dpi@yandex.ru*

При установке ячеек нейтринного телескопа на оз. Байкал ежегодно приходится проводить очистку ледового покрова на рабочих площадях от сформировавшихся заснеженных торосов. С этой целью используются машины-планировщики, оснащенные режущей шнековой фрезой. Разработка режущих органов, транспортирующих измельченную массу торосовых образований, является актуальной. Данные по физико-механическим свойствам снежно-ледовой смеси частиц, образующейся при дроблении торосов на ледовом покрытии водоемов, необходимы для расчета транспортирования её рабочим органом машины планировщика. Определены гранулометрический состав и физико-механические свойства (насыпная масса, угол естественного откоса, коэффициент текучести, коэффициент трения по стали, коэффициент внутреннего трения) снежно-ледовой массы с долей снега 0,1–0,7 в смеси. Изучено влияние доли снега в смеси (в пределах 0,1–0,7) и её температуры (минус 2–22°С). Получены уравнения зависимости свойств от температуры и доли снега в смеси, необходимые для расчета оборудования транспортирования массы при использовании системы автоматического проектирования. Плотность массы равна 450–750 г/м³, углы естественного откоса равны 56–60°, коэффициенты текучести 2,8–4 м²/кг, коэффициенты трения по стали равны 0,09–0,13, коэффициенты внутреннего трения равны 0,54–0,75.

Ключевые слова: торосы, снежно-ледовая масса, свойства, влияние, температура, доля снега

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES SNOW-ICE MASS OF HUMMOCKS

Nikandrov I.S., Shurashov A.D., Malygin A.L., Nikandrov M.I.

*Dzerzhinsky Polytechnic Institute of Nizhny Novgorod State Technical University
named after R.E. Alekseev, Dzershinsk, e-mail: al.malygin.dpi@yandex.ru*

When installing the cells of the neutrino telescope on Lake Baikal, it is necessary to clean the ice cover on the working areas from the formed snow hummocks every year. For this purpose, leveling machines equipped with a cutting auger milling cutter are used. The development of cutting bodies transporting the crushed mass of hummocks is urgent. Data on the physical and mechanical properties of the snow-ice mixture of particles formed when crushing hummocks on the ice cover of reservoirs is necessary for calculating its transportation by the working body of the planner machine. Define next physical and mechanical properties of snow-ice mass of hummocks: packed density, natural slope corner, coefficient fluctuation, coefficient of friction on steel, coefficient inside pressure. Diagram composition property is given. Dependence physical and mechanical properties on temperatures and share snow of mass is define. Packed density snow-ice mass is 450–750 kg/m³, natural slope corner moving salted equals 56–60 degree, coefficient friction on steel equals 0.09–0.13, coefficients fluctuation is equals 2,8–4 m²/kg, coefficients inside pressure salted equals 0,54–0,75.

Keywords: hummock, snow-ice mass, properties, influence, temperature, share snow

Интенсивное образование торосов имеет место в период ледостава на всех водоемах Сибири и Дальнего Востока в начале зимнего периода [1–2]. Смещение молодого льда, излом и вздыбливание льдин происходит под действием ветрового напора и нагонных волн в местах мелководья и вблизи береговой полосы. Высота вздыбленных вмержших в покров льдин в торосах достигает 1,5–2 м. Образовавшиеся торосы являются значительным препятствием для проведения работ технологических комплексов на ледовом покрове [3–5].

Так при установке ячеек нейтринного телескопа на оз. Байкал ежегодно приходится проводить очистку ледового покрова на рабочих площадях от сформировавшихся заснеженных торосов [6] высотой

от 2–2,5 м. С этой целью используются машины-планировщики, оснащенные режущей шнековой фрезой.

Разработка режущих органов, транспортирующих измельченную массу торосовых образований, является актуальной [7].

Данные по физико-механическим свойствам снежно-ледовой смеси частиц, образующейся при дроблении торосов на ледовом покрытии водоемов, необходимы для расчета транспортирования её рабочим органом машины планировщика. В связи с этим экспериментальное определение отсутствующих в литературе данных по свойствам снежно-ледовой массы является необходимым.

Целью работы является экспериментальное определение физико-механических

свойств снежно-ледовой массы от разрушения торосов и установление зависимости этих свойств от температуры смеси частиц и массовой доли снега в смеси.

Для экспериментального определения свойств готовили смеси снега и измельченного льда. Снег просеивали через сито с размером ячеек 5x5 мм. Лед готовили замораживанием воды при температуре 16–24 °С в блоках размером 100x300 x500 мм.

После выдержки в течение трех суток блок разбивали на куски и измельчали до частиц размером менее 25 мм. Дробленую массу льда разделяли на фракции с размером кусков: 1 – менее 5 мм, 2 – с размером кусков 5–20 мм и 3 – более 20 мм.

Фракцию 3 подвергали вторично дроблению и рассеву. Фракцию 1 сыпали в снег, а фракция 2 считалась льдом и использовалась для приготовления изучаемых образцов снежно-ледовой массы.

Приготовленные образцы хранили при температуре минус 16–24 °С. Образцы для измерения смешивали в течение 30 мин.

Насыпную плотность снежно-ледовой массы определяли взвешиванием заполненного массой мерного стакана. Стакан заполняли свободным засыпанием исследуемой массой со сбрасыванием избытка материала рейкой.

Свойства дробленой снежно-ледовой массы определяли на приборе Дженике по методикам, описанным в [8]. Измерительный прибор с загруженным образцом материала помещали в термостат с температурой опыта (минус 2°, 8°, 15° и 22 °С) и выдерживали перед измерением 3 ч.

За показание принимали среднее значение из трех параллельных измерений. Рассевы образцов дробленого льда, используемого для получения его смеси со снегом, показали, что в нем доля фракции с размером частиц 10–25 мм составляла 32–38%, доля фракции размером 5–10 мм была 45–50%, доля фракции с размером частиц 1–5 мм была 6–9% и фракции менее 1 мм было 5–9%. При расчете состава снежно-ледовой массы смеси фракцию с размером частиц менее 1 мм относили к снегу.

Приготовленные для смешивания со льдом образцы снега имели следующий гранулометрический состав: фракции менее 1мм 20–24%, размером 1–2 мм 65–70%, размером комочков 2–5мм 8–14%. Насыпная масса исходного снега при температуре минус 22 °С была равна 83 кг/м³. Насыпная масса исходного льда была равна 787 ± 8 кг/м³. Результаты определения насыпной плотности приведены на рис. 1.

Судя по полученным данным насыпную плотность снежно-ледовой смеси с относительной достоверностью 10% можно представить уравнением зависимости от температуры t и доли снега в смеси S имеющим вид

$$\rho_0 = \rho_0 (1 - 0,008 \cdot t - 0,8\sqrt{S}),$$

где ρ_0 – насыпная плотность льда с размером кусочков 10–25 мм при температуре минус 2 °С ($\rho_0 = 805 \text{ кг/м}^3$);

0,008 – коэффициент влияния температуры на насыпную плотность;

0,8 – коэффициент влияния доли снега в смеси на насыпную плотность снежно-ледовой массы.

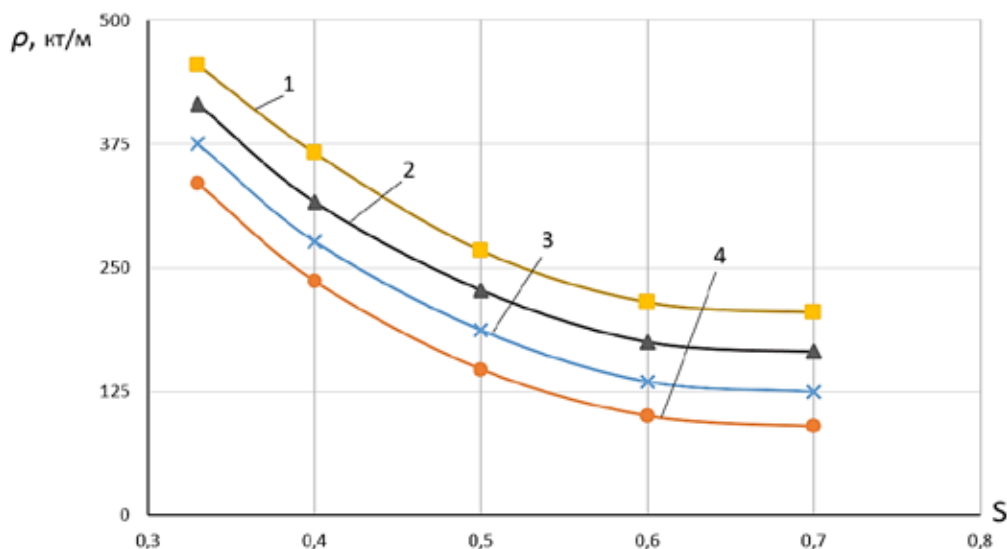


Рис. 1. Влияние доли снега в снежно-ледовой массе на её насыпную плотность
Температура измерения, минус °С: 1 – 22; 2 – 15; 3 – 8 и 4 – 2

Таблица 1

Углы естественного откоса снежно-ледовой смеси частиц

Доля снега в смеси	Углы откоса при температурах, °С			
	-2	-8	-15	-22
0,3	62	61	60	59
0,4	61	60	59	58
0,5	59	58	57	56,5
0,6	58	57,5	57	55,5

Таблица 2

Коэффициенты внутреннего трения снега, льда и снежно-ледовой массы

Доля снега в смеси	Значения коэффициентов при температуре, °С			
	-2°С	-8°С	-15°С	-22°С
0,2	0,53	0,59	0,69	0,83
0,4	0,42	0,54	0,64	0,75
0,5	0,39	0,50	0,61	0,75
0,6	0,36	0,46	0,55	0,72
1,0 снег свежесвыпавший	0,29	0,30	0,38	0,44
1,0 снег плотный	0,42	0,52	0,53	0,61

Насыпная плотность измельченной массы тороса с размером частиц менее 5 мм оказалась равной 490 кг/м³.

С понижением температуры от минус 2°С до минус 22°С угол естественного откоса снежно-ледовой массы меняется на 2,5–3°.

Экспериментально установлено, что углы естественного откоса снежно-ледовой смеси близки к значениям углов естественного откоса для плотного снега, равного 51,5–58°. Углы естественного откоса для снежно-ледовой смеси приведены в табл. 1.

Угол откоса мало меняется и с ростом доли снега в смеси в 2 раза, всего на 3,5–4°.

Для расчетного определения угла естественного откоса снежно-ледовой массы можно использовать уравнение

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 - 0,0033t + 0,225 \frac{\rho}{\rho_0} \right),$$

где α_0 – угол естественного откоса свежесвыпавшего снега при температуре минус 2°С ($\alpha_0 = 30^\circ$);

0,0033 – коэффициент влияния температуры массы на его плотность (град⁻¹);

0,225 – коэффициент учета плотности снежно-ледовой массы;

ρ_0 – плотность свежесвыпавшего снега при температуре минус 2°С ($\rho_0 = 150$ кг/м³).

Угол естественного откоса при температуре минус 15°С для измельченной мас-

сы тороса оказался равным 56° для образца с долей снега 0,54.

Коэффициент текучести снежно-ледовой массы в интервале температур минус 2–22 °С мало зависит от температуры. Так, коэффициент текучести снежно-ледовой массы смеси с долей снега 0,5 при повышении температуры определения с минусом 22°С до минус 2°С снижается с 3,7 до 3,4 м²/кг.

С увеличением доли снега в смеси более 0,2 при температуре минус 22°С коэффициент текучести понижается с 4,2 м²/кг до 2,8 м²/кг при доле снега в смеси 0,7.

Результаты экспериментального определения коэффициента внутреннего трения снежно-ледовой массы приведены в табл. 2.

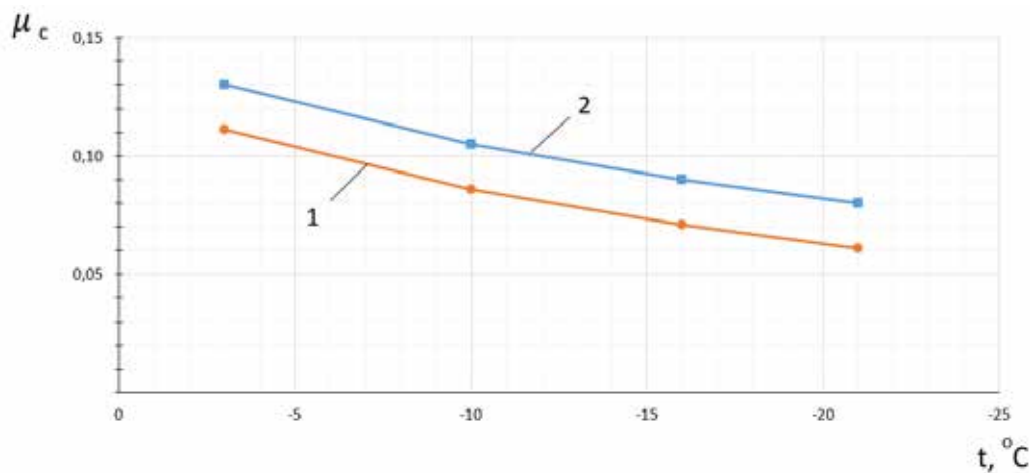
Зависимость коэффициентов внутреннего трения снежно-ледовой смеси (μ_{bh}) от температуры и относительной плотности снежно-ледовой смеси можно представить уравнением

$$\mu_{bh} = \mu_{bh}^0 \left(1 - 0,06t + 0,09 \frac{\rho}{\rho_0} \right),$$

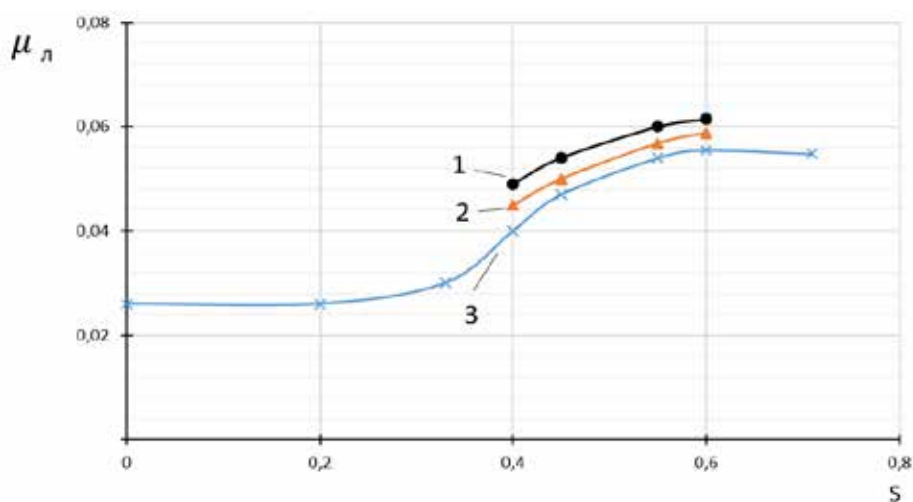
где μ_{bh}^0 – коэффициент внутреннего трения свежесвыпавшего снега с плотностью ρ_0 равной 120 кг/м³ при температуре минус 2°С;

0,06 – коэффициент влияния температуры (град⁻¹);

0,09 – коэффициент учета плотности снежно-ледовой массы.



Доля снега в смеси: 1 – 0,24; 2 – 0,8
Рис. 2. Влияние температуры (t) на коэффициент трения снежно-ледовой смеси по стали (μ_c)



Температура, минус °C: 1 – 22; 2 – 15 и 3 – 2
Рис. 3. Влияние доли снега в снежно-ледовые массы (S) на коэффициент трения смеси по льду (μ_l)

Как видно из данных табл. 2, коэффициент внутреннего трения с увеличением доли снега в смеси понижается, и для свежес выпавшего снега он почти в 2 раза ниже, чем для уплотненного снега с долей снега 0,2. Для уплотненного снега ($\rho_0 = 470 \text{ кг/м}^3$) он возрастает до значений, характерных для снежно-ледовой массы с долей снега в смеси 0,4–0,6. С понижением температуры снежно-ледовой массы от минус 2°C до минус 22°C коэффициент внутреннего трения возрастает в 1,6–2 раза.

Коэффициенты трения снежно-ледовой массы по стали оказались ниже, чем для снега. С увеличением доли снега в смеси с 0,2 до 0,8, как видно на рис. 2, возрастает примерно на 10%. Более существенно влияние температуры на свойство смеси.

При понижении температуры с минус 2°C до минус 22°C величина коэффициента

трения массы по стали уменьшается в 2,2–2,35 раза. Совместное влияние температуры (t) и относительной плотности массы снежно-ледовой смеси на величину коэффициента трения по стали описывается уравнением

$$\mu_c = \mu_c^0 \left(1 + 0,025t - 0,002 \frac{\rho}{\rho_0} \right),$$

где μ_c^0 – коэффициент трения по стали свежес выпавшего снега при температуре минус 2°C ($\mu_c^0 = 0,150$);

ρ_0 – плотность свежес выпавшего снега при температуре минус 2°C ($\rho_0 = 150 \text{ кг/м}^3$);
0,025 – коэффициент влияния температуры (град^{-1});

0,002 – коэффициент учета относительной плотности снежно-ледовой массы по льду в равных условиях в 2,5–3,5 раза меньше, чем по стали (рис. 3).

Он прогрессивно возрастает с 0,026 до 0,057 с увеличением доли снега в смеси от 0 до 0,5. При дальнейшем увеличении доли снега в смеси до 0,7 темпы роста коэффициента трения по льду снижаются. При доле снега в снежно-ледовой массе 0,7 коэффициент трения по льду увеличился до 0,062 (в 1,09 раза) и далее до 0,065 (для чистого снега). Вероятно, это связано с тем, что при малой доле льда в смеси со снегом кусочки льда окружены с поверхности частицами снега и контакт кусочков льда с поверхностью льда и друг с другом отсутствует. В результате при смещении слоя снежно-ледовой массы по поверхности льда с поверхностью контактируют только частицы снега. Поэтому величина коэффициента трения массы смеси приближаются к величине коэффициента трения снега по льду.

С понижением температуры снежно-ледовой массы с минус 2 до минус 22°C коэффициент её трения по льду возрастает только в 1,08–1,18 раза.

Значение модуля уплотнения массы (ψ), зависит от размера частиц и их прочностных свойств, равно 0,12–0,15. Это характерно для грязного снега, убираемого в городах, с плотностью ~ 350 кг/м³.

Модуль уплотнения для сыпучих материалов обычно определяется уравнением

$$\psi = \frac{K_p}{\ln \beta + \left(\frac{1}{K_i - 1} \right)},$$

здесь β – критическое давление на слой, после достижения которого частицы начинают входить в микропространства между собой с частичным разрушением острых углов и ребер частиц.

$$\beta = 0,836 \left(\frac{E_n}{E_1} \right) \cdot \left(\frac{R_{4m}}{n_d} \right)^{0,5} \cdot \frac{1}{n_{\text{тк}}} \cdot \frac{\text{Cos} \gamma_1}{\text{Cos} \gamma_2},$$

где E_n – модуль упругости при пластической деформации, МПа;

$$E_1 = \frac{E}{1 - g^2};$$

g – коэффициент Пуассона, E – модуль упругости, МПа;

R_{4m} – радиус частиц максимального размера;

n_d – величина деформации частиц в точке контакта, м;

$n_{\text{тк}}$ – число точек контакта частицы;

γ_1 и γ_2 – углы трения в точках контакта соответственно для состояния покоя и состояния смещения (обычно отношение

$$\frac{\text{Cos} \gamma_1}{\text{Cos} \gamma_2} = 1,3 - 1,5).$$

Для снежно-ледовой массы с долей снега $S = 0,4 - 0,6$ коэффициенты бокового давления (φ) имеют значения для температурного интервала от минус 2 до минус 22°C, равные $\varphi = 0,9 - 1,1$. Это близко к значениям коэффициента снега ($\varphi = 0,95 - 1,2$). Для расчета коэффициента бокового давления можно использовать уравнение

$$\varphi = \varphi_0 \left(1 - 0,09t + 0,135 \frac{\rho}{\rho_0} \right),$$

где φ_0 – коэффициент бокового давления свежеснегавывающего снега при температуре минус 2°C ($\varphi_0 = 0,35$);

ρ_0 – плотность свежеснегавывающего снега ($\rho_0 = 150$ кг/м³);

0,09 – коэффициент влияния температуры (град⁻¹);

0,135 – коэффициент влияния относительной плотности массы снежно-ледовой смеси.

Заключение

Измельченная снежно-ледовая масса торосов может иметь следующие значения физико-механических свойств:

- насыпная масса 450–750 кг/м³ при колебании доли снега в ней в пределах 0,4–0,5;
- угол естественного откоса 56–60°;
- коэффициент внутреннего трения 0,54–0,75;
- коэффициент трения по стали 0,09–0,13;
- коэффициент бокового давления 0,9–1,1;
- модуль уплотнения 0,1–0,14.

Список литературы

1. Огородов С.А. Роль морских льдов в динамике рельефа береговой зоны. М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2012. 173 с.
2. Миронов Е.У., Порубаев В.С. Статистическая модель морфометрии гряды тороса на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Лёд и снег. 2012. Т. 52. № 3. С. 67–72.
3. Тихонов В.В., Хвостов И.В., Романов А.Н., Шарков Е.А. Анализ изменений ледяного покрова пресноводных водоемов по данным SMOS // Исследование Земли из космоса. 2017. № 6. С. 46–53.
4. Мазнев С.В., Огородов С.А. Воздействие ледяных образований на берега и дно мелководных морей и крупных озёр умеренных и субарктических широт // Лёд и снег. 2020. Т. 60. № 4. С. 578–591.
5. Миронов Е.У., Гузенко Р.Б., Порубаев В.С., Харитонов В.В., Корнишин К.А., Ефимов Я.О. Морфометрия и внутренняя структура стамух в замерзающих морях России // Метеорология и гидрология. 2020. № 4. С. 62–73.
6. Dunaev I., Zolotov D., Shurashov A., Gorshkov A., Nikandrov I. Structure and property hummock on the river and lake. Norwegian diurnal of development of the international science. 2018. Vol. 1. No.18. P. 46–50.
7. Ганжа В.А., Верещагин В.И. Разрушение снежно-ледяных образований механическим способом // Сибирский федеральный университет. Красноярск. 2018. 202 с.
8. Никандров И.С., Малыгин А.Л., Дунаев И.М., Кукушкин А.А., Парамонов В.В. Построение математической модели силы резания снежно-ледовой массы // Труды НГТУ. 2019. № 5. С. 187–191.