

УДК 620.199

UDC 620.199

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ  
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В  
УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ СО ЛЬДОМ И  
СНЕГОМ****STUDY OF POLYMERIC MATERIALS  
PERFORMANCE IN FRICTION CONDITIONS  
WITH ICE AND SNOW**Шадринов Николай Викторович  
к.т.н.*Институт проблем нефти и газа СО РАН,  
Якутск, Россия**Северо-Восточный федеральный университет им.  
М.К. Аммосова, Якутск, Россия*

SPIN-код 9747-4208

Nshadrinoff@yandex.ru

Shadrinov Nikolay Viktorovich  
Cand.Tech.Sci.*Institute of oil and gas problems SB RAS, Yakutsk,  
Russia,**North-Eastern federal university named after M.K.  
Ammosov, Yakutsk, Russia*

SPIN-cod 9747-4208

Nshadrinoff@yandex.ru

Попов Савва Николаевич  
д.т.н., профессор*Институт проблем нефти и газа СО РАН, Якутск,  
Россия*[inm@ysn.ru](mailto:inm@ysn.ru)Popov Savva Nikolaevich  
Dr.Sci.Tech., professor*Institute of oil and gas problems SB RAS, Yakutsk,  
Russia,*[inm@ysn.ru](mailto:inm@ysn.ru)

Антоев Карл Петрович

*Институт проблем нефти и газа СО РАН,  
Якутск, Россия**Северо-Восточный федеральный университет им.  
М.К. Аммосова, Якутск, Россия*

SPIN-код 6081-9695

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

Antoev Karl Petrovich

*Institute of oil and gas problems SB RAS, Yakutsk,  
Russia,**North-Eastern federal university named after M.K.  
Ammosov, Yakutsk, Russia*

SPIN-cod 6081-9695

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

Христофорова Александра Афанасьевна

*Институт проблем нефти и газа СО РАН,  
Якутск, Россия*

SPIN-код 1174-7878

[a\\_khristoforova@mail.ru](mailto:a_khristoforova@mail.ru)

Khristoforova Alexandra Afanasievna

*Institute of oil and gas problems SB RAS, Yakutsk,  
Russia,*

SPIN-cod 1174-7878

[a\\_khristoforova@mail.ru](mailto:a_khristoforova@mail.ru)

В статье рассматривается проблема определения наиболее перспективных полимерных материалов для применения в качестве опор скольжения саней. Проведены стендовые испытания полиэтилена, фторопласта, металлофторопласта стали и сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) с различной молекулярной массой и их композитов. На основании исследований полимерных образцов на трение по снегу и льду в условиях максимально приближенных к эксплуатационным, с применением специально разработанных макетов саней, показано, что СВМПЭ марки GUR 4150 имеет наименьший массовый и линейный износ. Так же в статье представлены результаты исследований адгезии льда к различным материалам в низкотемпературных климатических условиях в диапазоне температур окружающего воздуха от  $-21^{\circ}\text{C}$  до  $-46^{\circ}\text{C}$  и в криокамере по запатентованному Институтом проблем нефти и газа СО РАН способу. Исследования показали, что наименьшее значение адгезии ко льду также

The problem of identifying of the most promising polymer materials for sledge sliding application. The comparison of materials is given: the bench tests of polyethylene, fluoroplast, steel and ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) with different molecular weight and their composites are carried out. On the basis of research of polymeric samples on ice and snow friction in exploiting condition with the use of specially designed sledges was shown that GUR 4150 UHMWPE has the lowest mass volume and linear wear. Also in article the results of research of ice adhesion to different materials are presented. Adhesion research was carried out in low temperature conditions of air from  $-21^{\circ}\text{C}$  up to  $-46^{\circ}\text{C}$  and in cryocamera according method which was patented by Institute of oil and gas problems of SB RAS. The research showed that GUR 4150 UHMWPE has the lowest adhesion to ice. On the basis of obtained data the authors assumed that GUR 4150 is the most perspective materials for development of sledge sliding exploiting in Arctic conditions.

наблюдается у СВМПЭ марки GUR 4150. На основании полученных данных авторы приходят к выводу, что сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4150 представляет собой наиболее перспективный материал, для разработки полозьев саней эксплуатирующихся в условиях Арктики

Ключевые слова: СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ, САНИ, МАССОВЫЙ ИЗНОС, ЛИНЕЙНЫЙ ИЗНОС, АДГЕЗИЯ, СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЙ ПОЛИЭТИЛЕН, АВТОЗИМНИК

Keywords: BENCH TESTING, WEAR RESISTANCE, SLEDGE, WEAR MASS, LINEAR WEAR, ADHESION, ULTRA HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE, WINTER ROAD

## Введение

В Арктических регионах в холодное время года важной частью транспортной системы является автозимник – дорога, проложенная по замерзшей и обледеневшей поверхности водоемов. Перевозки по автозимникам в труднодоступные районы Крайнего Севера осуществляются с использованием грузовых саней с металлическими лыжными полозьями. Их недостатками являются: большая масса, необходимость применения специальных морозостойких сталей, высокий коэффициент трения по льду, низкая износостойкость полозьев, а также возможность их примерзания к грунту во время стоянки. Одним из перспективных решений данной проблемы является разработка санных прицепов выполненных полностью из полимерных материалов. При разработке санных прицепов необходимо учесть множество факторов влияющих на эксплуатационные свойства саней. Начиная с физико-механических свойств материалов применяемых в качестве полозьев и несущей рамы, заканчивая учетом эксплуатационных условий саней. В работе приведены результаты низкотемпературных стендовых испытаний полимерных материалов на трение по снегу и льду в условиях максимально приближенных к эксплуатационным, а также результаты исследования адгезии примерзания полимерных материалов в низкотемпературных климатических условиях и в криокамере.

Целью данной работы являлось определение наиболее перспективных полимерных композитов для применения в качестве опор скольжения саней (полозьев).

### **Состояние исследований и актуальность работы**

Как известно, износ при трении – одна из главных проблем, встречающихся в любых системах имеющих подвижные части. Несмотря на то, что количественные исследования по трению берут корни со времен Леонардо да Винчи, только 150 лет назад, трение по льду стало объектом научных исследований [1]. Лед – весьма сложный материал. Теоретическое объяснение того, что коэффициент трения мал, пока остается противоречивым. Традиционное объяснение Боудена и Хьюза [2, 3], состоит в том, что при трении о поверхность льда выделяется тепло, в результате чего образуется тонкая пленка талой воды. Однако еще остается много исследователей, которые не убеждены в том, что в наличии тонких пленок талых вод заключается основная причина низкого коэффициента трения по льду. Так, Хуциока [4] обнаружил, что талые воды увеличивают трение, по-видимому, вследствие вязкого сопротивления. В работах приводятся аргументы в пользу того, что малое трение льда и снега обусловлено также некоторыми уникальными характеристиками поверхности льда, а не только наличием пленки талой воды. Авторы рассматривают лед как твердый смазочный материал, аналогичный, например, графиту, который имеет относительно низкий коэффициент трения вследствие того, что плоскости соседних кристаллов могут легко скользить одна по другой и менять ориентировку. Поверхностные пленки окислов иногда играют роль твердой смазки, и их наличие не обязательно вызывается трением. В работе ученых Миннесотского университета [5] шероховатость ледяной поверхности была смоделирована как эластично-пластичные микроскопические выступы, что обуславливает чрезвычайно низкие значения напряжения сдвига. Было также выдвинуто

предположение, что ледяная поверхность обладает внутренней «жидкостноподобной» структурой независимо от таяния, возникающего вследствие трения, которое можно рассматривать как отдельный, самостоятельный эффект. Последующие исследования, выполненные в этом университете, многочисленные теоретические аргументы и результаты экспериментов показывают, что на поверхности льда в изобилии отмечаются подвижные протоны, хаотически расположенные атомы, замечен также большой масштаб дефектов. Было показано, что при температуре  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  толщина дефектного слоя составляет  $10^4$  нм, слоя хаотически расположенных атомов  $10^2$  нм, а слоя подвижных протонов 10 нм. Перечисленные выше факторы должны снижать напряжение сдвига шероховатостей льда, а следовательно, и уменьшать трение. При температуре ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  хаос и мобильность уменьшаются, а дефекты становятся труднее активизировать. Следовательно, бугорки, составляющие шероховатость, труднее сдвинуть (или переориентировать), так что трение льда увеличивается с понижением температуры.

Из всего вышеизложенного следует, что чем ниже будет температура окружающей среды, тем больше будет коэффициент трения полозьев по снегу и льду и, соответственно, износ полозьев саней.

Республика Саха (Якутия) является самым холодным регионом в Российской Федерации с резко-континентальным климатом, что делает его уникальным полигоном для проведения испытаний материалов, в максимально сложных условиях эксплуатации, приближенных к реальным. Соответственно, проведение стендовых испытаний в условиях Якутии дает возможность получения достоверной информации по триботехническим свойствам полимерных материалов в контакте со снегом и льдом, на основе которых можно подобрать наиболее оптимальные полимерные материалы для разработки грузовых саней.

### Постановка и решение задачи

Исследование полимерных образцов на трение по снегу и льду в условиях максимально приближенных к эксплуатационным, проводилось с помощью специально разработанных макетов саней, с учетом габаритов стандартных саней для снегохода «Буран» и максимальной массы буксируемого прицепа 500 кг, с возможностью установки исследуемых образцов в качестве сменных полозьев. Суть эксперимента заключается в определении массового и линейного износа материалов при определенной температуре окружающей среды. Перед проведением испытаний, образцы полимерных материалов предварительно взвешиваются, измеряются и крепятся к полозьям саней. Движение саней по автозимнику осуществляется за счет автомобильной тяги при постоянной скорости. После преодоления определенного расстояния образцы, демонтированные с полозьев, взвешиваются и измеряются повторно.

Испытания проводились на участке проселочной дороги протяженностью 100 км, наиболее приближенным к естественным условиям эксплуатации саней буранов по автозимникам (неравномерный снежный покров, с участками наледи и небольшим количеством щебня и песка).

Для проведения исследований трения по снегу и льду, выбраны следующие образцы:

1. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) марки GUR 4150 с молекулярной массой 9,2 млн.
2. СВМПЭ марки GUR 4130 с молекулярной массой 6,8 млн.
3. Полиэтилен марки ПЭ63
4. Металлофторопластовый материал. Подложка - Сталь 20, толщиной 1 мм. Бронзо-латунная сетка, припеченная к стали через тонкий слой оловянистой бронзы, толщиной 0,6 мм. Свободное пространство

бронзового слоя заполнено композицией политетрафторэтилена (65 мас.%) + порошковый свинец (35 мас.%).

Предварительные испытания образцов при температуре  $-21^{\circ}\text{C}$  показали, что образцы металлофторопласта не выдерживают нагрузки и разрушаются. Бронзо-латунная сетка с нанесенной композицией фторопласта со свинцом полностью стерлась до блестящей стальной пластины (до подложки).

Дальнейшие испытания проводились на образцах только полимерных материалов. Исследования (путь - 100 км, средняя скорость 35–40 км/ч, температура  $-26^{\circ}\text{C}$ ) показали, что износ у образцов СВМПЭ примерно одинаковый. Массовый износ у образца GUR4150 составил 30,0 г, что на 10 г меньше, чем у образца GUR 4130 (40 г). Наиболее существенный износ наблюдается у образца ПЭ63 (470г). Исследования показали, что у образца ПЭ63 массовый износ после трения по снегу и льду выше, чем у образца GUR4150 более чем в 15 раз. Массовый износ образцов GUR4150, GUR 4150 и ПЭ63 составили 0,20 мм, 0,35 мм и 3,42 мм соответственно.

Одним из основных аспектов в разработке материалов для изготовления полозьев саней является исследование адгезии примерзания материала к поверхности льда. Однако, исследование адгезии льда к различным полимерным материалам представляет собой сложную задачу [6]. Известно [7, 8], что на адгезию льда к твердым телам влияют множество факторов, определяемых как химическим строением материала и состоянием его поверхности, так и условиями формирования льда, метода исследования и т.д. Принято считать, что все экспериментальные данные по адгезии льда к различным материалам не являются абсолютными и не в полной мере характеризуют поведение того или иного материала в реальных условиях эксплуатации. Следовательно, исследование адгезии льда к различным полимерным материалам, ее

механизмов, разработка технических решений по ее снижению, а также методов по ее определению представляют собой актуальную задачу.

Проведение исследований при естественно низких температурах, дает возможность получить информацию об адгезии льда к материалам в широком диапазоне температур (до  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). В данной работе измерение адгезии проведены двумя различными способами: на улице при температурах от  $-21$  до  $-46\text{ }^{\circ}\text{C}$  и в низкотемпературной климатической камере.

Исследование адгезии льда к различным материалам при естественно-климатических условиях, проведено на 6 разных материалах. Схема измерения полимерных материалов ко льду представлена на рисунке.

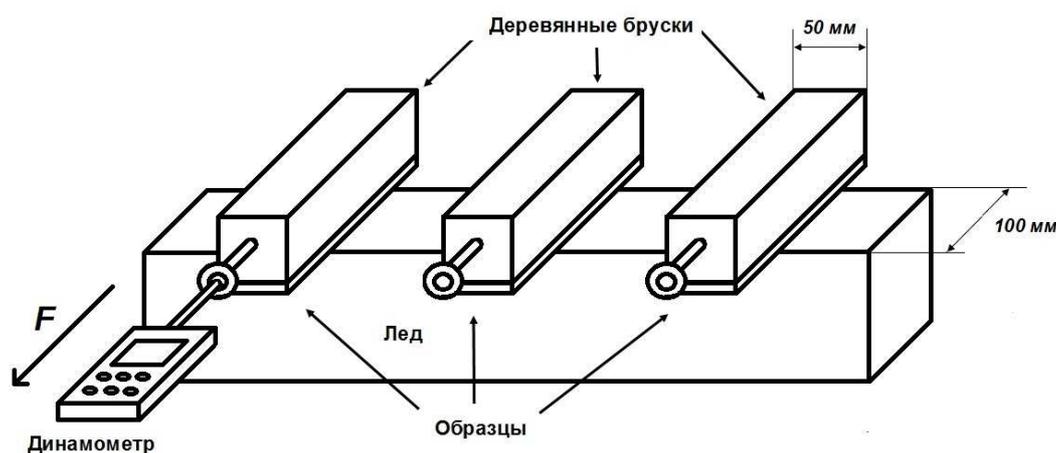


Рисунок – Схема измерения адгезии полимерных образцов ко льду

Перед исследованием образцы с обезжиренной поверхностью термостатируются, затем поверхность льда подплавляется с помощью электронагревателя и на эту поверхность примораживаются исследуемые образцы. Подплавление поверхности льда, имитирует реальные условия примерзания саней, где из-за трения по снегу и льду, полозья нагреваются и во время стоянок примерзают к грунту. Площадь контакта исследуемого материала и льда  $50\text{ см}^2$ . Через 5-6 часов (продолжительность выдержки образцов зависит от температуры), образцы отрываются и с помощью

электронного динамометра ДИН-1У, при этом фиксируется усилие отрыва образца от поверхности льда.

Измерения адгезии льда к полимерным материалам в низкотемпературной криокамере проведены по запатентованному Институтом проблем нефти и газа СО РАН способу [9].

В таблице представлены значения адгезии льда к исследуемым образцам, полученные при температурах окружающего воздуха от  $-21$  °С до  $-46$  °С и в низкотемпературной камере при  $-30$  °С.

Таблица – АДГЕЗИЯ ОБРАЗЦОВ К ПОВЕРХНОСТИ ЛЬДА

№	Материал	Температура испытаний, °С								Адгезия льда в камере при $-30$ °С, Н/см <sup>2</sup>
		-21	-24	-25	-26	-29	-30	-35	-46	
		Адгезия льда при естественно-низких температурах окружающего воздуха, Н/см <sup>2</sup>								
1.	Фторопласт	6,06	0,99	3,03	3,36	2,52	2,15	0,49	0,46	1,00
2.	СВМПЭ (GUR 4150)	2,67	4,42	1,84	1,92	1,34	2,33	0,11	0,42	1,40
3.	GUR 4150 +4мас.%MoS <sub>2</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	1,29
4.	GUR 4150 +4,5мас.%ТРГ	-	-	-	-	-	-	-	-	1,28
5.	СВМПЭ (GUR 4130)	2,88	4,88	1,96	4,00	0,65	3,90	0,17	0,21	-
6.	Полиэтилен (ПЭ 63)	4,39	2,88	2,17	2,08	1,83	4,10	0,16	0,18	1,23
7.	Металло-фторопласт	1,20	1,37	0,82	0,60	0,72	1,56	0,62	0,21	-
8.	Сталь	3,06	2,60	2,17	2,98	2,75	5,79	2,29	0,90	-

Как и ожидалось, наблюдается разброс показателей. Одной из возможных причин этого может быть отрыв образцов от поверхности льда не по зоне контакта, а в объеме льда. Причиной когезионного отрыва льда является большая адгезия исследуемого материала ко льду, а также образование трещины внутри льда при подплавлении. Однако четко видно, что при уменьшении температуры окружающей среды, наблюдается уменьшение адгезии примерзания образцов к поверхности льда.

Наибольшую адгезию имеют образцы стали. Низкие и относительно стабильные показатели адгезии к поверхности льда наблюдаются у образцов СВМПЭ GUR4150 и металлофторопласта. Причем у образцов чистого фторопласта адгезия значительно выше, чем у образцов металлофторопластов.

Наблюдается небольшое расхождение в значениях адгезии (табл. 1), измеренных двумя различными способами. Так, адгезия льда к поверхности фторопласта и СВМПЭ, полученные в климатической камере при температуре  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  в 2,15 и 1,6 раза ниже адгезии измеренной в естественно-климатических условиях при  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В случае ПЭ 63, наблюдается аномально высокое значение адгезии при измерении в естественно-климатических условиях. Необходимо отметить согласованность результатов измерений адгезии двумя различными способами. В обоих случаях наименьшую адгезию при температуре  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  показывают образцы фторопласта. Образцы СВМПЭ марки GUR 4150 показывают наиболее стабильные и низкие значения адгезии льда. Также, в низкотемпературной камере были исследованы образцы полимерных композитов на основе СВМПЭ марки GUR 4150. Видно, что введение  $\text{MoS}_2$  и ТРГ в матрицу СВМПЭ, приводит к снижению адгезии льда. Возможно, это объясняется изменением надмолекулярной структуры СВМПЭ, а именно трансформацией ламеллярной структуры в сферолитную [10].

### **Заключение**

Стендовые испытания триботехнических свойств полимерных материалов на трение по снегу и льду в условиях максимально приближенных к эксплуатационным показали, что СВМПЭ марки GUR 4150, после 100 км пробега со скоростью 35–40 км/ч по автозимнику, при

температуре воздуха  $-26^{\circ}\text{C}$  имеет наименьший массовый и линейный износ равный 30 г и 0,3 мм соответственно.

Исследование адгезии льда к различным материалам двумя различными способами в диапазоне естественно низких температур от  $-21^{\circ}\text{C}$  до  $-46^{\circ}\text{C}$  показало, что наименьшее значение адгезии также наблюдается у СВМПЭ марки GUR 4150.

Таким образом, предварительные исследования показали, что сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4150 представляет собой наиболее перспективный материал, для разработки полозьев саней эксплуатирующихся в условиях Арктики.

#### Библиографический список

1. Kietzig A.M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P. Ice friction: the effect of thermal conductivity // *Journal of glaciology*, 2010. – Vol. 56 – № 197. – P. 473-479.
2. Bowden F.P. Friction on snow and ice // *Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A*, 1953. – Vol. 217. – № 1131. – P. 462-478.
3. Bowden F.P., Hughes T.P. The mechanism of sliding on ice and snow // *Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A*, 1939. – Vol. 172. – No. 949. – P. 280-98.
4. Huzioka T. Studies on the resistance of snow sledge // *Teion-kagaku: Low Temperature Science, Ser. A*, 1963. – № 21. – P. 31-44.
5. Weyl W.A. Surface structure of water and some of its physical and chemical manifestation. // *J. Colloid and Interface Science*, 1951. – № 6. – P. 389-405.
6. Гольдштейн Р.В., Епифанов В.П. К измерению адгезии льда к другим материалам // *Вестник Пермского гос. техн. Университета*, 2011. – № 2. – С. 28–41.
7. Matsumoto K., Kobayashi T. *International Journal of Refrigeration*, 2007. – № 30. – P. 851–860.
8. Williams G.P. Reprinted from *Proceedings Twenty-Fourth Annual Eastern Snow Conference*, 1967. – № 2. – P. 82.
9. Попов С.Н., Шадрин Н.В., Архипов А.А., Соколова М.Д. Патент РФ № 2522818 от 21.05.2014, Бюл. 20.
10. Gogoleva O.V., Popov S.N., Petrova P. N., Okhlopkova A.A. *Russian Engineering Research*, 2014. – № 12 (34). – P. 743-746.

#### References

1. Kietzig A.-M., Hatzikiriakos S.G., Englezos P. Ice friction: the effect of thermal conductivity // *Journal of glaciology*, 2010. – Vol. 56 – № 197. – P. 473-479.
2. Bowden F.P. Friction on snow and ice // *Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A*, 1953. – Vol. 217. – № 1131. – P. 462-478.

3. Bowden F.P., Hughes T.P. The mechanism of sliding on ice and snow // Proceedings of the Royal Society of London, Ser. A, 1939. – Vol. 172. – No.949. – P. 280-98.
4. Huzioka T. Studies on the resistance of snow sledge // Teion-kagaku: Low Temperature Science, Ser. A, 1963. – № 21. – P.31-44.
5. Weyl W.A. Surface structure of water and some of its physical and chemical manifestation. // J. Colloid and Interface Science, 1951. – № 6. –P. 389-405.
6. Gol'dshtejn R.V., Epifanov V.P. K izmerenijuadgezii'da k drugimmaterialam // VestnikPermskogogos. tehn. Universiteta, 2011. – № 2. – S. 28–41.
7. Matsumoto K., Kobayashi T. International Journal of Refrigeration, 2007.–№ 30.–P. 851–860.
8. Williams G.P. Reprinted from Proceedings Twenty-Fourth Annual Eastern Snow Conference, 1967. –№ 2. – P. 82.
9. Popov S.N., Shadrinov N.V., Arhipov A.A., Sokolova M.D. Patent RF №2522818 ot 21.05.2014, Bjul. 20.
10. Gogoleva O.V., Popov S.N., Petrova P. N., Okhlopkova A.A. Russian Engineering Research, 2014. – № 12 (34). – P. 743-746.