

УДК 625.711.84

**В.С. Морозов, Е.Г. Фомин**

Архангельский государственный технический университет

Морозов Владимир Станиславович родился в 1955 г., окончил в 1978 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры строительной механики и сопротивления материалов Архангельского государственного технического университета. Имеет около 45 печатных работ в области строительства и эксплуатации зимних лесовозных дорог.

E-mail: v.morozov@agtu.ru



Фомин Евгений Геннадьевич родился в 1984 г., окончил в 2006 г. Архангельский государственный технический университет, ассистент кафедры эксплуатации автомобилей и машин лесного комплекса АГТУ. Область научных исследований – расчет и строительство автомобильных зимних дорог на переувлажненных грунтах.

E-mail: FominEG@gmail.com



### **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕРЗЛОГО ТОРФА**

Рассмотрено влияние вязкости на прочностные свойства мерзлого торфяного грунта. Определены зависимости коэффициента вязкости от температуры, времени действия нагрузки, напряжения, влажности.

*Ключевые слова:* зимние автомобильные дороги, мерзлый торф, тип болот, вязкость.

Малонаселенные территории Европейского Севера и Сибири с суровыми климатическими условиями и продолжительным зимним периодом имеют слабо развитую сеть усовершенствованных дорог круглогодочного действия. В связи с этим большое значение при организации транспортировки массовых грузов приобретают, наряду с водными путями, зимние дороги (снежные, снежно-ледяные и ледяные).

Достоинством таких дорог являются: невысокие стоимость строительства и расходы на содержание проезжей части; возможность устройства простейших переходов через болота и водотоки; хорошая пропускная способность; низкие эксплуатационные затраты и, как следствие, себестоимость транспортировки грузов. Эти дороги часто проходят по заболоченным местностям с довольно толстым слоем торфа, который при создании зимних автомобильных дорог исполняет роль основания и является фактором, сдерживающим их ввод в эксплуатацию.

Мерзлый торф представляет собой многокомпонентную композитную систему, состоящую из четырех фаз: твердой (растительные остатки и минеральные частицы), жидкой (незамерзшая вода), газообразной (защемленный воздух и газ) и кристаллической (лед) [1,3]. Связующим материалом мерзлого торфа служит лед. Кристаллизация воды в порах и капиллярах происходит при температуре ниже 0 °С в результате влияния скрытой теплоты льдообразования.

Прочность мерзлых торфов существенно зависит от сил сцепления между частицами льда и твердого скелета. Эти связи осуществляются через пленки незамерзшей воды, которые обволакивают частицы скелета и ледяные кристаллы. Под действием внешней нагрузки возникает пластическое течение льда, так как при контактах с частицами скелета он плавится, образуя пленочную воду. Вязкое течение воды сопровождается взаимным смещением твердых частиц грунта, что значительно снижает длительную прочность мерзлых торфов, которая может быть в несколько раз меньше кратковременной. Поскольку мерзлый торф можно отнести к дисперсно-структурированным грунтам, чувствительным к изменению температурно-влажностного режима, то все процессы развития в нем деформаций следует рассматривать при постоянной температуре [1].

Целью данной статьи является изучение реологических свойств мерзлого торфа в зависимости от его влажности, температуры, продолжительности нагрузки, действующих напряжений.

Общепринято рассматривать три типа болот [1].

Тип I. Болота с торфяными залежами до твердого минерального дна. Под действием внешней нагрузки происходит в основном сжатие массива торфа в залежи. Торф сильноразложившийся влажностью 400...900 %.

Тип II. Болота с торфяными залежами, покоящимися на мягком основании из минеральных илов и сапропелей (органических илов). При действии небольшой нагрузки происходит сжатие торфяных слоев. При значительной нагрузке, помимо сжатия, наблюдается растекание мягкого основания, залегающего под торфом, что может привести к разрыву торфяного слоя и разрушению проезжей части дороги. Торф среднеразложившийся влажностью 900...1400 %.

Тип III. Болота с торфяными залежами, плавающими на жидком торфе или жидком иле. Имеют небольшую несущую способность. Толщина залежи под нагрузкой постепенно уменьшается за счет выделения воздуха из растительных тканей, что может привести к погружению проезжей части дороги. Эту особенность используют при строительстве ледяных дорог за счет втапливания поперечного настила [1], что позволяет снизить расход воды на поливку. Торф слаборазложившийся влажностью 1400...3000 %.

Строительный тип болот определяет механические свойства мерзлого торфа, дает возможность оценить характер ожидаемых деформаций и наметить методы усиления несущей способности проезжей части. Механические характеристики мерзлого торфа даны в табл. 1. Как видим, при сжатии прочность торфа выше, чем при растяжении, но деформация ниже. Это объясняется тем, что сжатие мерзлого торфа происходит, как у пластичного материала, а растяжение, как у хрупкого. По своим свойствам он занимает промежуточное положение между чистым льдом и мерзлым грунтом.

Таблица 1

Температура в нижней половине	Скорость движения транспортно-	Скорость деформирования,	Модуль деформации, МПа	Расчетное сопротивление (предел прочности), МПа
-------------------------------	--------------------------------	--------------------------	------------------------	---

покрова, °С	го средства, км/ч	мин <sup>-1</sup>	Сжатие		Растяже- ние	
			Сжатие	Растяже- ние	Сжатие	Растяже- ние
-1	0,4	0,02	110	1300	1,0	0,8
	0,8	0,04	120	1300	1,5	0,9
	2,0	0,10	130	1300	1,8	1,0
	4,0	0,20	230	1300	2,5	1,7
	10,0	0,50	430	1300	3,7	1,9
-5	0,4	0,02	120	1600	2,8	1,7
	2,0	0,10	200	1600	4,0	1,9
	10,0	0,50	480	1600	7,3	2,1
-10	0,4	0,02	230	1600	4,5	1,9
	2,0	0,10	350	1600	6,0	2,0
	10,0	0,50	770	1600	9,2	2,5

Примечание. Влажность торфа примерно 1000 %, коэффициент Пуассона 0,36.

Поскольку мерзлый торфяной грунт содержит в себе лед и незамерзшую воду, а напряженно-деформированное состояние изменяется во времени по нелинейной зависимости [3], то его можно представить как реологическое тело, проявляющее свойства ползучести, релаксации и снижения прочности. На все эти параметры влияет вязкость (коэффициент вязкости) мерзлого торфяного грунта. Рассмотрим способы определения коэффициента вязкости в зависимости от различных внешних факторов.

Коэффициент вязкости можно найти, например, по уравнению Бингама-Шведова [3]:

$$\tau - \tau_0 = \eta \dot{\gamma}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – интенсивность касательных напряжений;

$\tau_0$  – предельное напряжение сдвига;

$\eta$  – коэффициент пластичной вязкости;

$\dot{\gamma}$  – относительная скорость деформации сдвига.

Уравнение (1) приводим к расчетному виду. Для этого касательное напряжение  $\tau$  выражаем через нормальное напряжение  $\sigma$ , деформации при сдвиге  $\gamma$  через относительные деформации при сжатии  $\varepsilon$ ; относительную скорость  $\dot{\gamma}$  представляем как отношение приращения  $\Delta\gamma$  к приращению времени  $\Delta t$ . Приняв  $\tau_0 \approx 0$ , получим

$$\eta = \frac{\sigma}{2(1+\nu)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)} \Delta t, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_2, \varepsilon_1$  – относительные деформации для рассматриваемого интервала времени;

$\nu$  – коэффициент Пуассона.

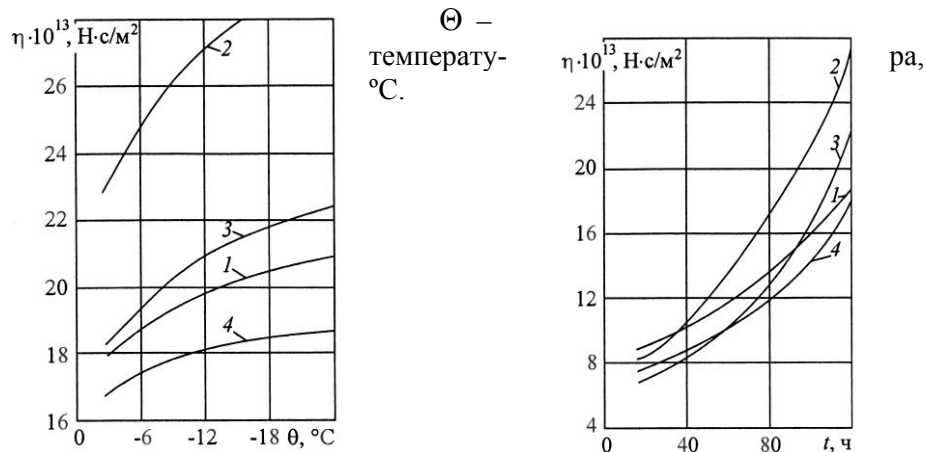
По уравнению (2) рассчитаны коэффициенты вязкости мерзлого торфяного грунта для различных условий с использованием коэффициентов

$B$  и  $n$  ( $B$  – коэффициент деформации,  $n$  – коэффициент упрочнения) [2]. Оказалось, что непосредственное использование коэффициентов  $B$  и  $n$  не дает удовлетворительных результатов. Естественный разброс опытных данных не позволял установить по результатам вычислений каких-либо закономерностей в зависимости коэффициентов вязкости от температуры, влажности, времени действия и внешней нагрузки. Поэтому перед началом вычислений потребовалось упорядочить коэффициенты  $B$  и  $n$  при помощи линейной аппроксимации, так как даже небольшая погрешность вызывает существенный разброс значений коэффициентов вязкости. При линейаризации использован метод наименьших квадратов. Результаты вычислений представлены ниже.

Зависимость коэффициента вязкости от отрицательной температуры показана на рис. 1. Она выражается уравнением вида [4]

$$\eta_{\Theta} = U(1 + \Theta)^q, \quad (3)$$

где  $U, q$  – параметры, определяемые из опытов (табл. 2);



Зависимость коэффициента вязкости от температуры;  $\sigma = 0,5$  МПа

Рис. 2. Зависимость коэффициента вязкости от времени действия нагрузки:  $\Theta = -8$  °C;  $\sigma = 0,05$  МПа

Таблица 2

Влажность $W, \%$	Напряжение $\sigma, \text{МПа}$	Коэффициенты $U \cdot 10^{13}, \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ , и $q$ в моменты времени $t, \text{ч}$			
		20		120	
		$U$	$q$	$U$	$q$
300	0,05	8,079	0,49	23,485	0,15
	0,50	2,008	0,70	16,162	0,08
400	0,05	3,801	0,66	22,004	0,12
	0,50	1,791	0,71	19,485	0,13
500	0,05	3,165	0,74	18,172	0,09

600	0,50	1,584	0,72	15,884	0,11
	0,05	2,558	0,61	17,875	0,05
	0,50	2,107	0,64	15,753	0,08

Из графика видно, что по мере понижения температуры коэффициент вязкости возрастает, что можно объяснить изменением качества льда, а также соотношения количества незамерзшей воды и льда.

На рис. 2 показана зависимость коэффициента вязкости от времени действия нагрузки, которую можно описать уравнением Н.Н. Маслова [4]:

$$\eta_t = \eta_k - (\eta_k - \eta_0)e^{-rt}, \quad (4)$$

где  $\eta_0, \eta_k$  – начальный и конечный коэффициенты вязкости;

$r$  – параметр, определяемый по опытным данным (табл. 3);

$t$  – время действия нагрузки.

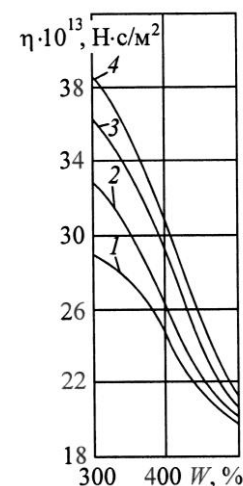
Кривые на рисунке показывают, что с увеличением времени действия нагрузки коэффициент вязкости возрастает (т. е. ползучесть мерзлого торфяного грунта уменьшается), что соответствует физической природе рассматриваемого явления.

Таблица 3

Влажность $W, \%$	Напряжение $\sigma, \text{МПа}$	Коэффициент $r \cdot 10^3$ при $\Theta, ^\circ\text{C}$			
		-3	-8	-17	-25
300	0,05	5,15	5,10	3,83	6,46
		15,07	16,90	19,26	17,03
	0,50	3,32	3,23	3,69	4,45
		11,56	11,95	16,08	14,06
400	0,05	5,04	6,58	4,45	4,86
		18,30	14,93	17,48	17,61
	0,50	3,42	4,01	3,83	3,35
		12,51	11,43	13,86	12,70
500	0,05	5,39	4,93	4,77	5,26
		15,10	15,86	28,80	14,86
	0,50	3,20	2,15	3,93	2,31
		11,35	11,47	33,18	9,11
600	0,05	4,96	5,16	4,19	5,44
		15,05	12,53	12,45	16,03
	0,50	2,61	3,01	3,22	1,01
		10,12	10,26	8,87	5,29

Примечание. В числителе – время действия нагрузки 40 ч, в знаменателе – 100 ч.

Определенное влияние на изменение коэффициента вязкости во времени оказывает уровень действующей



щих напряжений. Как правило, при небольших напряжениях деформации ползучести затухают быстрее, чем при больших.

Рис. 3. Зависимость коэффициента вязкости от напряжений:  $t = 120$  ч;  $W = 500\%$

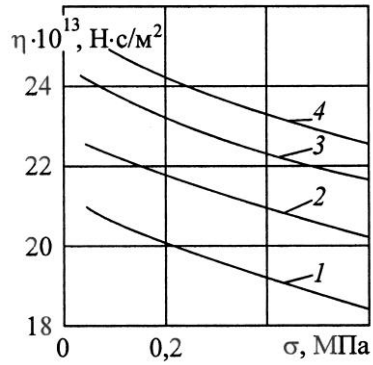
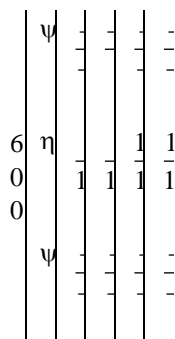


Рис. 4. Зависимость коэффициента вязкости от влажности:  $t = 120$  ч;  $\sigma = 0,05$  МПа

Таблица 4

Влажность, %	Значения $\eta$ и $\psi \cdot 10^{13}$ , Н·с/м <sup>2</sup> , при $\Theta$ , °С			
	30	40	50	60
30	$\eta$	11	11	11
40	$\eta$	12	12	12
50	$\eta$	11	11	11



Примечание. Здесь и в табл. 5 в числителе – время действия нагрузки 20 ч, в знаменателе – 120 ч.

На рис. 3 представлен график зависимости коэффициента вязкости от действующих напряжений, который уменьшается с их возрастанием. Зависимость  $\eta = f(\sigma)$  выражается уравнением [5]

$$\eta_{\sigma} = \eta_0 (1 + \psi \ln \sigma_i), \quad (5)$$

где  $\eta_0, \psi$  – параметры, определяемые по полулогарифмическому графику (табл. 4).

На основании данных табл. 4 построен график зависимости вязкости мерзлого торфяного грунта от влажности (рис. 4). Из графика видно, что с увеличением влажности вязкость уменьшается, что объясняется, по всей видимости, влиянием незамерзшей воды.

Таким образом, подтвердилось предположение о зависимости коэффициента вязкости мерзлого торфяного грунта от таких факторов, как температура, влажность грунта, нагрузка и время ее действия. Поэтому коэффициент  $\eta$  следует определять непосредственно для конкретного вида торфа. В табл. 5 приведены значения коэффициентов вязкости, вычисленные для различных температуры, влажности, интенсивности и времени действия нагрузки на основании данных наших исследований. Полученные результаты могут быть использованы для создания более корректной реологической модели мерзлого торфяного грунта.

Таблица 5

Влажность $W, \%$	Напряжение $\sigma$ , МПа	Коэффициент $\eta \cdot 10^3, \text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2$ , при $\Theta, ^\circ\text{C}$			
		-3	-8	-17	-25
300	0,05	15,934	23,710	33,357	39,870
		28,973	32,724	36,336	38,409
	0,10	13,579	20,537	29,362	35,425
		26,576	29,748	32,807	34,558
	0,20	11,710	18,019	26,190	31,896
		24,674	27,385	30,005	21,500
	0,30	8,514	13,714	20,769	25,863
		21,421	23,346	20,216	26,274
	0,50	5,319	9,406	15,347	18,831
		18,169	19,307	20,427	21,047

400	0,05	<u>9,450</u>	<u>16,142</u>	<u>25,387</u>	<u>32,325</u>
		25,770	28,266	30,591	31,901
	0,10	<u>8,415</u>	<u>14,446</u>	<u>22,847</u>	<u>29,168</u>
		25,207	27,708	30,047	31,363
	0,20	<u>7,594</u>	<u>13,100</u>	<u>20,831</u>	<u>26,663</u>
		24,761	27,266	29,612	30,936
	0,30	<u>6,193</u>	<u>10,800</u>	<u>17,385</u>	<u>22,379</u>
		23,998	26,509	28,872	30,205
	0,50	<u>4,791</u>	<u>8,498</u>	<u>13,939</u>	<u>18,096</u>
		23,234	25,753	28,131	29,474
500	0,05	<u>8,864</u>	<u>16,192</u>	<u>27,100</u>	<u>35,615</u>
		20,701	22,341	23,865	24,684
	0,10	<u>7,846</u>	<u>14,297</u>	<u>23,878</u>	<u>31,347</u>
		20,196	21,841	23,368	24,203
	0,20	<u>7,039</u>	<u>12,793</u>	<u>21,321</u>	<u>27,959</u>
		19,796	21,447	22,973	23,821
	0,30	<u>5,569</u>	<u>10,222</u>	<u>16,950</u>	<u>22,167</u>
		19,111	20,770	22,297	23,167
	0,50	<u>4,278</u>	<u>7,653</u>	<u>12,579</u>	<u>16,375</u>
		18,426	20,094	21,622	22,514
600	0,05	<u>5,967</u>	<u>9,194</u>	<u>14,958</u>	<u>18,726</u>
		19,131	19,907	20,593	20,967
	0,10	<u>5,772</u>	<u>9,512</u>	<u>14,578</u>	<u>18,284</u>
		18,669	19,452	20,144	20,523
	0,20	<u>5,617</u>	<u>9,288</u>	<u>14,276</u>	<u>17,933</u>
		18,302	19,090	19,788	20,171
	0,30	<u>5,352</u>	<u>8,905</u>	<u>13,760</u>	<u>17,339</u>
		17,673	18,473	19,180	19,568
	0,50	<u>5,088</u>	<u>8,522</u>	<u>13,244</u>	<u>16,732</u>
		17,047	17,856	18,572	18,966

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов [Текст]: учеб. пособие для строит. вузов / С.С. Вялов. – М.: Высш. шк., 1978. – 447 с.
2. Коваленко, Н.П. Деформационные свойства мерзлого торфа [Текст] / Н.П. Коваленко, В.С. Морозов // Лесн. журн. – 1978. – № 3. – С. 43–48. – (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Морозов, В.С. Расчет и проектирование оснований зимних дорог на болотах [Текст]: учеб. пособие / В.С. Морозов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 1999. – 236 с.
4. Цытович, Н.Н. Механика мерзлых грунтов [Текст] / Н.Н. Цытович. – М.: Высш. шк., 1973. – 446 с.

Поступила 21.05.08



---

Arkhangelsk State Technical University

**Investigation of Rheological Characteristics of Frozen Peat**

The effect of viscosity on strength characteristics of frozen peat soil is analyzed. The dependencies of viscosity factor on temperature, time of load action, stress, humidity are determined.

Keywords: winter automobile roads, frozen peat, bog type, viscosity.

---