

УДК 625.711.84+625.31

В.С. Морозов

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



РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ТИПА ЗИМНИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА БОЛОТАХ

Обоснованы расчетная схема, математическая и компьютерная модели для выбора типа конструкции дорожной одежды сезонных зимних автомобильных дорог на болотах.

тип болота, тип дороги, математические модели, расчет на прочность, теплотехнический расчет, рекомендации.

Сезонные зимние дороги на болотах имеют важное практическое значение при освоении заболоченных и заторфованных территорий с ограниченным сроком эксплуатации, к которым можно отнести, например, лесопокрываемые площади или месторождения полезных ископаемых. Во многих случаях срок действия таких дорог ограничен климатическими и природно-географическими условиями местности. Строительство капитальных дорог в этих условиях нецелесообразно. Для снижения стоимости транспортировки грузов приходится использовать сезонные зимние дороги, имеющие низкую стоимость строительства, содержания и эксплуатации по сравнению с дорогами капитального типа.

В настоящее время в зависимости от нагрузки на проезжую часть дороги, типа болота или заболоченной местности и температуры воздуха различают три основных типа зимних дорог [3]: однослойные (рис. 1, а), двухслойные (рис. 1, б) и многослойные (рис. 1, в).

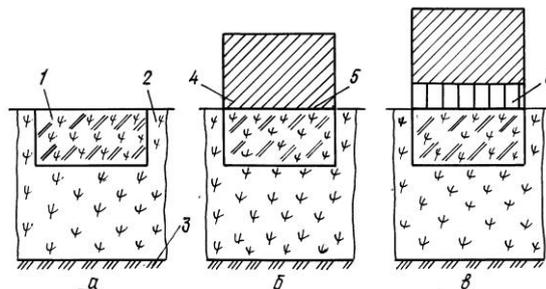


Рис. 1. Схемы поперечных сечений однослойных (а), двухслойных (б) и трехслойных (в) автомобильных дорог на болотах: 1 – слой мерзлого торфа; 2 – массив талого торфа; 3 – минеральное дно болота; 4 – насыпь из минерального грунта; 5 – прослойка из сучьев, веток или синтетического материала (типа дорнита, ОСС); 6 – продольный или поперечный бревенчатый настил

Очевидно, что чем сложнее конструкция зимних автомобильных дорог на болотах, тем выше их прочность и несущая способность, но одновременно больше стоимость строительства.

Существенное влияние на выбор конструкции дорожной одежды оказывает тип болота. В наиболее распространенной строительной классификации [4] различают три основных типа болот. Их характеристика приведена в табл. 1.

Таблица 1

Тип болота	Характеристика торфяной залежи	Влажность торфа, %	Коэффициент постели C , Н/см ³
I	Торфяная залежь до твердого минерального практически несжимаемого дна. При действии внешней нагрузки происходит в основном сжатие массива торфа. Торф слабо разложившийся, плотный. На поверхности болота развитая древесная растительность преимущественно хвойных пород и смешанный лес	≤ 800	4,2...6,0

Продолжение табл. 1

Тип болота	Характеристика торфяной залежи	Влажность торфа, %	Коэффициент постели C , Н/см ³
II	Торфяная залежь покоится на мягком основании из минеральных илов и сапропелей (органических илов). При действии небольшой нагрузки происходит сжатие массива торфа. При действии значительной нагрузки, помимо сжатия, наблюдается растяжение мягкого основания. Торф разложившийся, рыхлый. На поверхности болота низкорослый смешанный лес, осоковые луга с кочками или гипновыми мхами (топи)	800...1400	1,5...3,3
III	Торфяная залежь плавает на жидком торфе или жидком иле. Толщина залежи под нагрузкой постепенно уменьшается за счет выдавливания воздуха из растительных тканей, что может привести к погружению проезжей части дороги. Торф сильно разложившийся, рыхлый. Древесная растительность на поверхности болота отсутствует	>1400	1,2...0,7

Таким образом, при выборе конструкции зимних дорог на болотах необходимо рассмотреть следующую задачу: чем ниже тип болота, тем выше должен быть тип дорожной одежды, т. е. с понижением коэффициента постели основания дорожной одежды возрастают требования к ее прочности.

Расчетные зависимости для определения толщины дорожной одежды

Для определения конструкции дорожной одежды нами были выполнены аналитические исследования напряженно-деформированного состояния однослойных, двух- и многослойных зимних дорог на болотах [2]. На основании анализа результатов этих исследований получены следующие приближенные расчетные уравнения:

для однослойной зимней дороги с основанием из мерзлого торфа (рис. 1, а)

$$H_p = \gamma[5,875 + 0,0452P - 1,119C - 0,169\Theta + \frac{1}{B} (6040,8 + 46,772P - 1084,3C - 139,5\Theta)], \quad (1)$$

где H_p – расчетная толщина слоя мерзлого торфа, см;

γ – поправочный коэффициент (для болота I типа $\gamma = 1$; II типа $\gamma = 1,2$; III типа $\gamma = 1,4$);

P – внешняя нагрузка на поверхность дороги, кН;

C – коэффициент постели основания из талого торфа, Н/см³ (для болот I типа $C = 5$ Н/см³, II типа $C = 3$ Н/см³, III типа $C = 1$ Н/см³);

Θ – отрицательная температура воздуха на поверхности проезжей части, °С;

B – ширина проезжей части дороги, см;

для двухслойной зимней дороги (насыпь из минерального грунта на слое промороженного торфа – рис. 1, б), внешняя нагрузка $P = 165$ кН:

$$H_4 = 31,190 - 1,095H_1 - 0,520C - 0,3110\Theta + \frac{1}{B} (12770,5 - 151,405H_1 - 326,027C - 377,539\Theta), \quad (2)$$

где H_1 – толщина насыпи из минерального грунта, см;

H_4 – толщина слоя мерзлого торфа, см;

для трехслойной зимней дороги (продольное расположение бревен – рис. 1, в), внешняя нагрузка $P = 165$ кН:

а) толщина бревен $H_2 = 10$ см:

$$H_4 = 29,172 - 1,257H_1 - 0,423C - 0,136\Theta + \frac{1}{B} (10480,23 - 289,848H_1 - 194,47C - 219,16\Theta), \quad (3)$$

б) толщина бревен $H_2 = 20$ см:

$$H_4 = 12,299 - 1,222H_1 - 0,187C - 0,162\Theta + \frac{1}{B} (8408,79 - 255,47H_1 - 213,78C - 174,51\Theta); \quad (4)$$

для трехслойной зимней дороги (поперечное расположение бревен – рис. 1, в), внешняя нагрузка $P = 165$ кН:

а) толщина бревен $H_3 = 10$ см:

$$H_4 = 28,232 - 1,098H_1 - 0,316C - 0,408\Theta + \frac{1}{B} (12651,6 - 87,207H_1 - 586,64C - 340,16\Theta), \quad (5)$$

б) толщина бревен $H_3 = 20$ см:

$$H_4 = 21,323 - 1,165H_1 - 0,413C - 0,476\Theta + \frac{1}{B} (15840,0 - 68,755H_1 - 714,352C - 572,588\Theta). \quad (6)$$

Результаты расчетов с помощью формул (1)–(6) по определению толщины слоя мерзлого торфа для зимних дорог различных конструкций приведены ниже.

Определение глубины промерзания болот

Для определения глубины промерзания торфа на трассе зимних автомобильных дорог нами было использовано решение стационарной задачи теплопроводности с учетом фазовых переходов. Время t промерзания зимней дороги на болоте находили по уравнению

$$t = \frac{Q \left(\frac{1}{\alpha_{\text{а}}} + \frac{h_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{h_{\text{а\delta}}}{\lambda_{\text{а\delta}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{і}}} \right)}{24F(\Theta_1 - \Theta_{\text{а\delta}})}, \quad (7)$$

полученному при решении задачи Стефана с учетом граничных условий I рода [1]:

$$\Theta_S(t) = f_1(S, t).$$

В уравнении (7) обозначено:

- t – время промерзания слоя грунта, сут;
- $h_{\text{с}}, h_{\text{гр}}$ – толщина слоя снега и промерзающего слоя грунта, м;
- $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент теплопередачи от воздуха к поверхности грунтового слоя дороги, Вт/(м²·°C);
- $\alpha_{\text{н}}$ – коэффициент теплоотдачи от нижней поверхности минерального слоя грунта (насыпи) к торфяной залежи, Вт/(м²·°C);
- $\lambda_{\text{с}}, \lambda_{\text{гр}}$ – коэффициенты теплопроводности снега и минерального грунта, Вт/(м·°C);
- F – площадь слоя, м² (обычно принимают $F = 1$ м²);
- Θ_1 – температура воздуха на поверхности грунтового минерального слоя дороги зимой, °C;
- $\Theta_{\text{гр}}$ – температура грунта на поверхности торфяной залежи, °C;
- Q – количество холода, необходимого для замерзания грунта до температуры поверхности торфяной залежи, °C:

$$Q = C_{\text{с}} \gamma_{\text{с}} f_{\text{с}} \Theta_1 h_{\text{с}} + C_{\text{гр}} \gamma_{\text{гр}} f_{\text{гр}} \Theta_1 h_{\text{гр}}, \quad (8)$$

где C_c – теплоемкость снега, приведенная к воде, 4,19 кДж/(кг·°С);
 $C_{гр}$ – теплоемкость грунта, 4,19 кДж/(кг·°С);
 γ_c – плотность снега, приведенная к воде по плотности 1 т/м³;
 $\gamma_{гр}$ – плотность грунта, кг/м³;

Дата	тср, °С	ho,сут. м	Q, ккал	hp,сут. м	ht, м	hp,сум. м
4.11	-0.2	0.0000	-827.6	0.0038	0.9962	0.0038
5.11	-1.2	0.0000	-4946.5	0.0071	0.9891	0.0109
6.11	-4.3	0.0000	-17599.4	0.0076	0.9815	0.0185
7.11	-6.9	0.0000	-28024.9	0.0077	0.9739	0.0261
8.11	-3.0	0.0000	-12089.5	0.0076	0.9663	0.0337
9.11	-5.4	0.0000	-21591.8	0.0077	0.9586	0.0414
10.11	-9.8	0.0000	-38871.5	0.0078	0.9507	0.0493
11.11	-18.6	0.0000	-73172.7	0.0079	0.9428	0.0572
12.11	-21.3	0.0000	-83095.4	0.0080	0.9348	0.0652

f_c, f – площадь снега и грунта на дороге, м².

Значения α_v и α_n находим по формулам

$$\alpha_{\dot{a}} = \frac{\lambda_{\dot{a}}}{h_{\dot{a}}}; \quad (9)$$

$$\alpha_{\dot{i}} = \frac{\lambda_{\dot{o}}}{h_{\dot{o}}}, \quad (10)$$

где λ_v, λ_t – коэффициенты теплопроводности воздуха и торфа, Вт/(м·°С);
 h_v, h_t – толщина воздушного слоя теплообмена и слоя промерзающего торфа, м.

Для решения задачи промерзания грунта или торфа необходимо задаться временем промерзания (сутки). Температура воздуха после перехода через 0 °С меняется постепенно. Поэтому промерзание грунта и торфа на дороге следует рассчитывать за каждые сутки. Для облегчения расчетов нами разработана программа для ЭВМ. Образец распечатки с экрана монитора приведен на рис. 2.

Рис. 2. Пример распечатки результатов расчета глубины промерзания однослойной зимней дороги на болоте I типа

Рекомендации по определению срока эксплуатации зимних дорог

Каждый тип зимних дорог имеет свои преимущества и недостатки.

К достоинствам однослойных дорог относят простоту конструкции, низкую стоимость строительства и содержания; к недостаткам – малый срок

эксплуатации по сравнению с двух- и многослойными конструкциями. В принципе их можно применять на болотах различных типов, но срок действия зависит от толщины слоя мерзлого торфа. Соответствующие данные, рассчитанные при нагрузке $P = 165$ кН, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Тип болота	Температура, °С	Толщина слоя мерзлого торфа h_1 , см	Глубина промерзания h_2 , см, по датам										Дата начала эксплуатации дороги	
			05.11	10.11	15.11	20.11	25.11	30.11	05.12	10.12	15.12	30.12		
I	-1	19												21.11
	-5	19	1,1	4,9	8,9	13,9	17,4	21,6	26,2	30,1	36,0	41,4		27.11
	-10	17												25.11
II	-1	24												30.11
	-5	23	1,2	5,2	9,5	13,8	15,3	22,9	27,8	32,9	38,4	44,2		01.12
	-10	21												27.11
III	-1	30												04.12
	-5	30	1,5	5,8	10,6	15,5	20,7	25,9	31,5	37,5	43,9	50,8		04.12
	-10	26												30.11

Таким образом, начало эксплуатации однослойных зимних дорог на болотах зависит от трех факторов: толщины слоя мерзлого торфа h_1 , определяемой расчетом на прочность; глубины промерзания торфа h_2 ; типа болота и погодных-климатических условий местности.

В принципе однослойные зимние дороги можно устраивать на болотах всех трех основных типов, но срок их действия различен: наибольший для болот I типа, наименьший – III типа.

Двух-, трех- и многослойные дороги имеют более сложную конструкцию и высокую стоимость строительства. Это окупается, однако, продлением срока их службы осенью и весной.

В табл. 3 приведены значения полной толщины дорожной одежды H и слоя мерзлого торфа h_4 , рассчитанного по прочности, и глубины промерзания двухслойных дорог h_2 в разных природно-климатических условиях местности. Полагаем, что верхний слой представляет собой насыпь из песка толщиной 25 см, нижний – мерзлый торф.

Таблица 3

Тип болота	Температура, °С	Толщина, см		Глубина промерзания h_2 , см, по датам							Дата начала эксплуатации дороги	
		H	h_4	05.11	10.11	15.11	20.11	25.11	30.11	05.12		
I	-1	42,9	17,9									25.11
	-5	39,5	14,5	8,5	29,5	34,2	38,2	42,3	46,3	50,7		22.11
	-10	35,2	10,2									17.11
II	-1	44,8	19,8									27.11
	-5	41,4	16,4	8,5	30,4	34,5	38,7	43,1	43,4	52,0		23.11
	-10	37,2	12,2									19.11
III	-1	46,8	21,8									27.11
	-5	43,4	18,4	8,5	30,6	35,2	39,9	44,9	49,7	55,0		24.11

| -10 | 39,2 | 14,2 | | | | | | | | 20.11

Из данных табл. 3 видно, что устройство двухслойной зимней дороги в одних и тех же условиях позволит примерно на 8 дн. увеличить срок службы зимней дороги осенью по сравнению с однослойной.

Другие типы двухслойных зимних дорог, верхний слой которых представляет собой продольный деревянный настил, несмотря на увеличение их прочности, не рекомендуются для практического применения, так как настил приходится засыпать слоем грунта, и конструкция становится уже трехслойной.

В табл. 4 приведены данные расчета для трехслойной зимней дороги, состоящей из грунтовой насыпи, продольного деревянного настила и мерзлого торфа.

Как видим, с момента начала промерзания грунта (т. е. 05.11) толщина слоя мерзлого торфа является отрицательной, следовательно, прочность трехслойной дорожной одежды за счет промерзания насыпи достаточна даже при отсутствии слоя мерзлого торфа.

Таблица 4

Тип болота	Температура, °С	Толщина, см			Глубина промерзания h_2 , см, по датам							Дата начала эксплуатации дороги
		H	h_1	h_4	05.11	10.11	15.11	20.11	25.11	30.11	05.12	
I	-1	35,0	25,0	-1,6								05.11
	-5	35,0	25,0	-3,4	18,7	40,0	45,4	51,0	57,0	62,8	69,6	05.11
	-10	35,0	25,0	-5,7								05.11
II	-1	35,0	25,0	-1,9								05.11
	-5	35,0	25,0	-8,0	18,7	40,1	45,8	51,7	58,2	64,4	71,7	05.11
	-10	35,0	25,0	-4,8								05.11
III	-1	35,0	25,0	-1,2								05.11
	-5	35,0	25,0	-6,0	17,8	40,4	45,7	53,4	60,7	67,7	76,2	05.11
	-10	35,0	25,0	-2,9								05.11

Примечание. H – полная толщина дорожной одежды; h_1 – толщина деревянного настила; h_4 – толщина слоя мерзлого торфа.

Данные табл. 4 показывают:

толщина грунтового слоя (насыпи) во всех случаях была принята равной 25 см; толщину продольного (или поперечного) деревянного настила h_2 варьировали и принимали равной 10 и 20 см;

толщина мерзлого слоя торфа h_4 при любом расположении деревянного настила ($h_2 = 10$ см или $h_2 = 20$ см) имеет отрицательное значение. Поэтому прочность зимней дороги на болотах обеспечивается за счет прочности первых двух слоев: насыпи и деревянного настила. По мере увеличения толщины настила прочность возрастает.

Рассмотрим сводные результаты расчета, приведенные в табл. 5.

Таблица 5

Тип болота	Температура, °С	Однослойная дорога			Двухслойная дорога			Трехслойная дорога		
		t_n	Δt	h_4	t_n	Δt	h_4	t_n	Δt	h_4
I	-1	27.11	19	35	25.11	36	18	05.11	56	-1,6
	-5	27.11	19	35	22.11	39	15	05.11	56	-1,4
	-10	25.11	17	37	17.11	44	10	05.11	56	-5,7
II	-1	30.11	23	32	27.11	35	20	05.11	56	-1,9
	-5	01.12	24	31	23.11	38	16	05.11	56	-2,0
	-10	27.11	21	35	19.11	42	12	05.11	56	-4,3
III	-1	04.12	30	27	27.11	34	22	05.11	56	-1,2
	-5	04.12	30	27	24.11	37	18	05.11	56	-1,5
	-10	30.11	26	27	20.11	41	14	05.11	56	-2,5

Примечание. t_n – дата начала эксплуатации зимней дороги; Δt – продолжительность работы дороги до конца года, сут; h_4 – требуемая толщина мерзлого торфа, см.

По данным, приведенным в табл. 5, можно сделать выводы.

1. Наиболее прочной и долговечной является трехслойная зимняя дорога, состоящая из грунтовой насыпи, продольного деревянного настила и слоя мерзлого торфа. Она обеспечивает эксплуатацию сразу после наступления устойчивой морозной погоды и промерзания насыпи из минерального грунта. Промерзание торфа не обязательно.

2. Допустимо устраивать однослойную зимнюю автомобильную дорогу, однако ее эксплуатация возможна в наименьшие сроки и после промерзания торфа на глубину не менее 20 ... 30 см.

3. Двухслойная дорога занимает промежуточное положение между однослойной и трехслойной. При ее устройстве увеличивается срок службы дороги и снижаются требования к глубине промерзания болота.

Результаты расчетов являются ориентировочными, так как получены с учетом осредненных температур наружного воздуха по данным многолетних наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорощев А.Г., Дорощев В.А. Зимние лесовозные дороги с увеличенным сроком действия: Обзор. информ. – М.: ВНИПИЭИлеспром, 1987. – 52 с. (Лесоэксплуатация и лесосплав; Вып. 10).
2. Морозов В.С. Справочное пособие по определению толщины зимних автомобильных дорог на болотах. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2000. – 40 с.
3. Морозов С.И., Павлов Ф.А. Современные методы строительства лесовозных дорог. – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 88 с.
4. Морозов С.И. и др. Зимние дороги в лесной промышленности / С.И. Морозов, Ф.А. Павлов, Л.Н. Плакса, Э.Н. Савельев. – М.: Лесн. пром-сть, 1969. – 168 с.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 24.01.02

V.S. Morozov

Recommendations on Choosing Road Type for Bogs

The design model, as well as mathematical and computer models for choosing the construction type of pavements for seasonal winter roads on bogs are substantiated.
