



УДК 625.711.84+625.31

***В.С. Морозов***

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.



### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ОСНОВАНИЙ ЗИМ- НИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА БОЛОТАХ**

Выполнено обоснование математической модели в виде совокупности расчетных уравнений для определения минимальной толщины слоя мерзлого торфа, обеспечивающей движение транспортных средств заданной грузоподъемности по одно- и двухслойным зимним дорогам.

*Ключевые слова:* тип болота, тип дороги, математические модели, расчет на прочность, рекомендации.

Северные территории России характеризуются суровым климатом, продолжительной и многоснежной зимой с устойчивыми морозами, слабым развитием транспортных коммуникаций, значительной заболоченностью и т. д. При освоении этих территорий требуется построить развитую транспортную сеть, в том числе сезонные зимние автомобильные дороги.

Достоинством их являются: сравнительно низкая стоимость строительства и эксплуатации, высокая пропускная способность.

К недостаткам относят: временный и ограниченный срок эксплуатации, зависимость прочностных показателей от погодно-климатических условий местности в зимний период, быстрое разрушение проезжей части во время оттепелей и весной.

Сдерживающим фактором, определяющим срок эксплуатации сезонных зимних дорог, являются переходы через болота и водотоки, так как продолжительность их промерзания выше, чем у минерального грунта. Поэтому следует уделить больше внимания разработке методов расчета оснований зимних автомобильных дорог на переходах через болота и новых конструкций дорог, обеспечивающих продление срока их эксплуатации в осенний и весенний периоды.

Цель настоящей работы – обоснование математической модели для определения минимальной толщины слоя мерзлого торфа, обеспечивающей движение в течение всего осенне-зимне-весеннего сезона.

Для обоснования такой модели используем следующие предпосылки:

при кратковременных нагружениях допустимо рассматривать мерзлый торф как упругое тело и для расчета зимних дорог на прочность применять методы теории упругости;

для этих условий связь между напряжениями и деформациями является линейной, однако модуль упругости и предел прочности мерзлого торфа зависят от его температуры;

мерзлый торф является разномодульным материалом и имеет различные модули упругости при растяжении и сжатии;

зимние дороги на болотах являются, как правило, многослойными (минимум два слоя);

дорожную одежду зимних дорог на болотах можно рассматривать как тонкую плиту, лежащую на линейно-деформируемом основании из талого торфа, механические свойства которого оценивают коэффициентом постели основания  $C$ ;

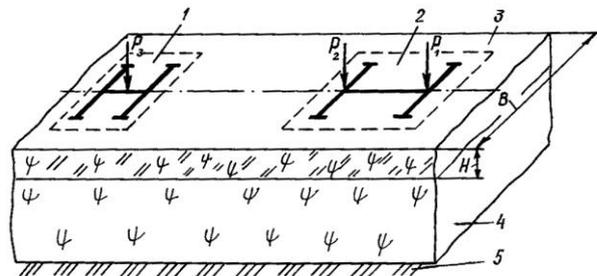
расчет требуемой толщины дорожной одежды зимних дорог на болотах ведут на прочность по допускаемым напряжениям, а возможность проезда автомобильного транспорта оценивают в наиболее неблагоприятных условиях их эксплуатации.

Отметим также, что начало ввода зимних дорог в эксплуатацию осенью совпадает с наступлением устойчивой морозной погоды. Поверхность проезжей части к этому времени имеет тонкий снежный покров (часто уплотненный), и ее температура близка к температуре воздуха, которая в этот период существенно ниже нуля. Следовательно, осенью мерзлый торф имеет сравнительно высокие механические характеристики, что допускает движение тяжелого автомобильного транспорта при толщине слоя мерзлого торфа 20 ... 35 см (в зависимости от типа болота и нагрузки от транспортного средства).

В весенний период мерзлый торф имеет значительную толщину (40 ... 50 см и более), однако его температура близка к  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , т. е. механические свойства невысоки.

В качестве расчетной схемы рассматриваем узкую плиту неограниченной длины, лежащую на линейно-деформируемом основании (рис. 1).

Рис. 1. Расчетная схема:  
1 – прицеп-ропуск; 2 – автомобиль-тягач; 3 – плита из мерзлого торфа; 4 – талый торф; 5 – минеральное дно болота;  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  – нагрузка на дорогу



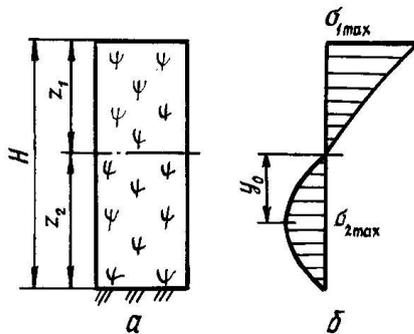


Рис. 2. Однослойная дорожная конструкция: *a* – схема дорожной конструкции; *б* – эпюра нормальных напряжений

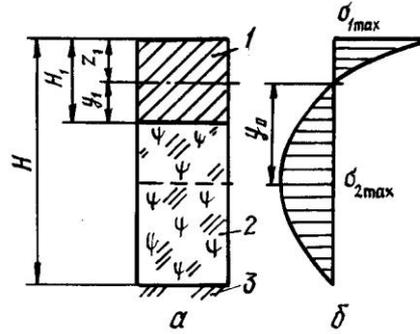


Рис. 3. Двухслойная дорожная конструкция: *a* – схема; *б* – эпюра нормальных напряжений; 1 – верхнее строение; 2 – мерзлый торф; 3 – подстилающий слой

Влияние поперечного изгиба плиты учитываем введением коэффициента поперечного изгиба  $\alpha$ . Поперечное сечение плиты – прямоугольник со сторонами  $B$  и  $H$ . Внешняя нагрузка представлена сосредоточенными силами  $P$ , действующими от колес транспортного средства на поверхность дороги.

Методика расчета приведена в работе [2]. Схемы поперечного сечения дорожной одежды и эпюры распределения нормальных напряжений представлены на рис. 2 и 3.

Основные расчетные зависимости однослойной дорожной одежды имеют вид:

– для определения положения нейтральной плоскости:

$$v = \sqrt{\frac{E_{20}(1-\nu)^3}{E_{10}(3-\nu)}}, \quad (1)$$

где  $\nu$  – относительное расстояние от поверхности проезжей части до нейтральной плоскости,  $\nu = z_1/H$ ;

$z_1$  – расстояние от поверхности проезжей части до нейтральной плоскости;

$H$  – толщина слоя мерзлого торфа;

$E_{10}, E_{20}$  – модули упругости мерзлого торфа соответственно на сжатие и растяжение;

– для определения значений эквивалентного модуля упругости:

$$E_3 = E_{10}\nu^3(4-\nu) + E_{20}(1-\nu)^4; \quad (2)$$

– для определения значений максимальных растягивающих напряжений:

$$\sigma_{2\max} = \frac{0,3ME_{20}(1-\mu^2)(z_2y_0 + y_0^2)}{BE_3H^4k}, \quad (3)$$

где  $z_2 = H - z_1$ ;

$y_0$  – расстояние от нейтральной плоскости до сечения, в котором  $\sigma_2$  принимает максимальные значения,  $y_0 = -z_2 / 2$ ;

$B$  – ширина проезжей части;

$\mu$  – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона);

$M$  – система эквивалентных грузов при определении напряжений,

$$M = \sum P_i \mu_i;$$

$k$  – коэффициент относительной жесткости основания и плиты,

$$k = \sqrt[4]{\frac{U}{4E_3 J}};$$

$U$  – модуль упругости основания,  $U = \alpha CB$ ;

$J$  – момент инерции поперечного сечения,  $J = BH^3 / 12$ ;

$C$  – коэффициент постели;

$\alpha$  – коэффициент поперечного изгиба;

– условие для определения минимальной толщины дороги:

$$|\sigma_{2\max}| = [\sigma_2], \quad (4)$$

где  $[\sigma_2]$  – предел прочности на растяжение,  $[\sigma_2] = R_2$ ;

– для определения максимального прогиба полотна дороги  $\omega$ :

$$\omega = k \frac{\sum P_i \eta_i}{2U}, \quad (5)$$

где  $\sum P_i \eta_i$  – система эквивалентных грузов при определении прогибов;

– для определения минимальной толщины слоя мерзлого торфа:

$$H_{\min} = \left[ \frac{0,075 E_{20} (1 - \mu^2) (1 - \nu)^2 \sum P_i \eta_i}{B [\sigma_2] (0,3 C \alpha E_3^3)^{0,25}} \right]^{0,8}. \quad (6)$$

В уравнении (6) линейные величины имеют размерности: длина – см; сила – Н, модуль упругости и напряжение – МПа. Множители 0,075 и 0,3 служат для согласования размерностей.

Двухслойные дороги состоят из слоя мерзлого торфа и лежащего на нем верхнего строения (снеголед, минеральный грунт, деревянные колесо-проводы и т. д.). Расчетные зависимости для них (рис. 3) имеют вид:

– нейтральная плоскость проходит по верхнему слою:

$$E_{\bar{y}} = \{ B_1 E_0 [v^3 (4 - \nu) - (\nu - \nu_1)^3 (4 - \nu - 3\nu_1)] - B_2 E_{20} [(1 - \nu)^4 - (\nu_1 - \nu)^3 (4 - \nu - 3\nu_1)] \} / B; \quad (7)$$

– нейтральная плоскость проходит по нижнему слою:

$$E_{\bar{y}} = \{ B_1 E_0 [v^3 (4 - \nu) - (\nu - \nu_1)^3 (4 - \nu - 3\nu_1)] + B_2 E_{10} [(\nu - \nu_1)^3 (4 - \nu - 3\nu_1)] + B_2 E_{20} (1 - \nu)^4 \} / B; \quad (8)$$

– нейтральная ось проходит по границе между слоями:

$$E_{\bar{y}} = [B_1 E_0 v^3 (4 - v) + B_2 E_{20} (1 - v)^4] / B; \quad (9)$$

где  $v = z_1/H$ ;  $v_1 = H_1/H$ ;

$H_1, B_1$  – соответственно толщина и ширина верхнего слоя;

$H$  – толщина дорожной одежды;

$B_2$  – ширина нижнего слоя;

$E_0$  – модуль упругости материала верхнего слоя;

$B$  – эквивалентная ширина дорожной одежды.

Нормальные напряжения и прогибы дорожной одежды находят по формулам (3)–(5). Если верхний слой представляет собой минеральный грунт или снеголед, то можно принять  $B_1 = B_2 = B$ . Для определения максимума нормальных растягивающих напряжений следует определить  $y_0$  – расстояние от нейтральной оси до точек максимума (значение  $\sigma_2$ ):

$$y_0 = -\frac{H - z_1}{2}. \quad (10)$$

Обозначим расстояние от нейтральной оси до нижней грани верхнего слоя  $y_1 = z_1 - H$ . Если  $|y_0| > |y_1|$ , то нейтральная ось проходит по нижнему слою, т. е. по мерзлому торфу, и  $[\sigma] = [\sigma_2]$ . Если  $|y_0| < |y_1|$ , то нейтральная ось проходит по верхнему слою и  $[\sigma] = [\sigma_1]$  – пределу прочности мерзлого минерального грунта.

Для обеспечения прочности дорожных одежд при их минимальной толщине максимум нормальных растягивающих напряжений должен находиться в слое мерзлого торфа, т. е.

$$H_1 \leq \frac{H + z_1}{2}. \quad (11)$$

При температурах, близких к нулю, чрезмерное увеличение высоты насыпи для обеспечения проезда по зимним дорогам на болотах нецелесообразно.

Расчет на прочность конструкций зимних дорожных одежд на болотах многовариантен. Его результаты существенно зависят от таких факторов, как тип болота, тип грунта насыпи, температура воздуха, механические свойства материалов слоев, ширина дороги и т. п.

Приведенные формулы позволяют выполнить расчет минимальной толщины слоя мерзлого торфа для пропуска транспортных средств заданной грузоподъемности [2] по болотам различных типов и при разной температуре. Некоторые результаты расчета для однослойных дорог в сравнении с экспериментальными данными, полученными при температуре мерзлого торфа – (1 ... 10) °С, приведены в табл. 1. Данные показывают, что экспериментальные и расчетные значения хорошо сходятся при достаточно большой ширине проезжей части зимних дорог на болотах. Экспериментальные значения следует рассматривать как ориентировочные. Для практических условий их надо увеличивать на 20 ... 30 %.

Таблица 1

Тип нагрузки	Тип болота	Расчетное значение $P$ , кН	Значения $H_{\min}$ , см				
			экспериментальные [1]*	расчетные при $B$ , см			
				300	500	700	900
Гусеничные машины массой до 20 т, автомобили с нагрузкой на колесо 45 кН	I	90	7/12	23	17	13	11
	II	90	8/15	28	18	15	13
Гусеничные машины массой до 45 т, автомобили с нагрузкой на колесо до 75 кН	I	140	8/15	31	22	17	14
	II	140	15/20	38	25	21	18

\* В числителе данные при наличии проломов от заданной нагрузки; в знаменателе – без проломов.

Как видно из приведенных результатов, значения расчетной толщины слоя промерзания  $H_p$  зависят от четырех факторов: нагрузки  $P$ , коэффициента постели  $C$ , ширины дороги  $B$  и температуры  $\Theta$ . Это позволяет записать с помощью метода множественной регрессии обобщенное уравнение для определения расчетной толщины слоя мерзлого торфа  $H_p$ :

$$H_p = 5,875 + 0,04518P + 1,1190C + 0,1690\Theta + \frac{1}{B}(6040,798 + 46,7716P + 1084,31C + 139,506\Theta). \quad (12)$$

Его можно использовать для вычисления  $H_p$  в различных производственных условиях.

Для повышения несущей способности зимних дорог на болотах применяют обычно двух-, трех- и (в общем случае) многослойные дорожные одежды.

К двухслойным (рис. 3) относят такие дороги, у которых нижним слоем является мерзлый торф, а верхним – слой из минерального грунта (насыпь), льда или снегольда, продольный (или поперечный) деревянный настил. В отдельных случаях (при соответствующем технико-экономическом обосновании) в качестве верхнего слоя допустимо использовать железобетонные плиты.

Двухслойная дорожная одежда первого типа (мерзлый торф + минеральный грунт или мерзлый торф + лед, снеголед) одинаково хорошо сопротивляется изгибу как вдоль, так и поперек дороги.

Рекомендуемые значения толщины верхнего слоя двухслойных зимних автомобильных дорог на болотах трех типов при разных температурах приведены в табл. 2.

Оптимальная толщина верхнего строения из минерального грунта составляет 25 ... 35 см. Если расчетные значения толщин меньше оптимальных, то следует рассмотреть вопрос об отказе от укладки верхнего слоя на мерзлый торф; если больше, то надо рассмотреть вопрос о применении трехслойной дорожной одежды.

Таблица 2

Тип болота	Температура, °С	Расчетные значения $H_{\min}$ в зависимости от типа верхнего строения и ширины дороги $B$ , см							
		Насыпь из влажного песка				Насыпь из супеси			
		300	500	700	900	300	500	700	900
I	-1	27,5	22,5	20,0	17,5	35,0	30,0	25,0	20,0
	-5	25,0	17,5	17,5	7,5	25,0	20,0	17,5	15,0
	-10	15,0	12,5	10,0	7,5	20,0	17,5	15,0	12,5
II	-1	27,5	22,5	20,0	17,5	35,0	30,0	25,0	20,0
	-5	25,0	20,0	17,5	15,0	25,0	20,0	17,5	15,0
	-10	20,0	15,0	10,0	10,0	20,0	17,5	15,0	12,5
III	-1	40,0	30,0	27,5	22,5	40,0	35,0	30,0	15,0
	-5	30,0	25,0	20,0	20,0	30,0	22,5	20,0	20,0
	-10	25,0	20,0	17,5	15,0	27,5	20,0	17,5	17,5

Укладка верхнего слоя расчетной толщины позволяет эксплуатировать дорогу при наступлении устойчивой морозной погоды, не дожидаясь образования слоя мерзлого торфа достаточной толщины. Это способствует продлению срока действия зимних дорог, что экономически оправдано.

Таким образом, применение двухслойных зимних дорог на болотах экономически целесообразно, так как позволяет эксплуатировать большегрузные транспортные средства без опасности разрушения дорожной одежды ранней осенью, при оттепелях зимой и ранней весной.

На основании представленного материала можно сделать заключение, что рассмотренные математические модели и результаты расчетов, выполненные для одно- и двухслойных зимних дорог на болотах, хорошо согласуются с опытными данными. Кроме того, в работе впервые получены расчетные зависимости и рассмотрены результаты расчетов  $H_{\min}$  в зависимости от следующих факторов: нагрузка на дорогу, тип болота (коэффициент постели), ширина дороги и температура.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вялов С.С. Строительство промысловых сооружений на мерзлом торфе / С.С. Вялов [и др.]. – М.: Недра, 1980. – 144 с.
2. Морозов В.С. Рекомендации по применению сезонных зимних лесовозных дорог на болотах: справ. пособие / В.С. Морозов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2000. – 124 с.

Архангельский государственный  
технический университет  
Поступила 01.11.02

V.S. Morozov

### Mathematical Model for Estimating Bed Thickness of Winter Highways on Bogs

Substantiation of mathematical model is carried out as a complex of estimated equations for determining minimal thickness of a frozen peat layer, ensuring movement of the vehicles with specified carrying capacity along single- and two-layer winter roads.