

## ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 625.711.83.001.24

***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 более 40 печатных работ в области строительства и эксплуатации зимних лесовозных дорог.



### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ОСНОВАНИЙ ЗИМНИХ 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.

зимние автомобильные дороги, болота, расчет толщины, математическая модель.

Северные территории России характеризуются суровым климатом, продолжительной и многоснежной зимой с устойчивыми морозами, значительной заболоченностью, слабым развитием транспортных коммуникаций и др. Для освоения этих территорий требуется развитая транспортная сеть, в том числе сезонных зимних автомобильных дорог.

К достоинствам их относятся сравнительно низкая стоимость строительства и эксплуатации, возможность устройства простейших переходов через болота и водотоки, большая пропускная способность, высокая рейсовая нагрузка и др.; к недостаткам – временный и ограниченный срок эксплуатации, зависимость прочностных показателей от погодноклиматических условий в зимний период, быстрое разрушение проезжей части при оттепелях зимой и повышении температуры воздуха весной.

Сдерживающим фактором, определяющим срок эксплуатации сезонных зимних дорог, являются переходы через болота и водотоки, которые промерзают значительно медленнее, чем минеральный грунт.

Поэтому следует уделить больше внимания разработке методов расчета оснований зимних автомобильных дорог на переходах через болота и новых конструкций дорог, обеспечивающих продление срока эксплуатации в осенне-весенний периоды.

Цель настоящей работы – обосновать математическую модель для определения минимальной толщины слоя мерзлого торфа, обеспечивающей

движение транспортных средств заданной грузоподъемности в течение всего осенне-зимне-весеннего сезона при отрицательных температурах.

Для такого расчета используем следующие предпосылки:

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

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 механические характеристики при растяжении и сжатии;

конструкция зимней дороги на болоте, как правило, многослойная (минимум два слоя), и отдельные слои имеют разные механические характеристики;

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

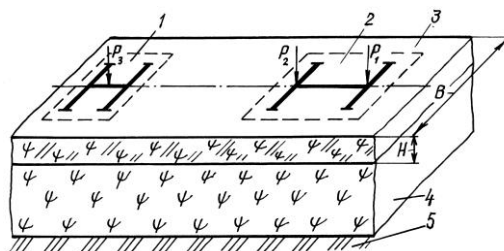
расчет требуемой толщины дорожной одежды зимних дорог на болотах ведут на прочность по допускаемым напряжениям, а проходимость автомобильного транспорта по дорогам оценивают в наиболее неблагоприятных условиях их эксплуатации.

Отметим также, что ввод зимних дорог в эксплуатацию осенью совпадает с наступлением устойчивой морозной погоды. К этому времени поверхность проезжей части имеет тонкий снежный покров (часто уплотненный), и ее температура близка к температуре воздуха, которая в этот период существенно ниже нуля ( $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и менее). Следовательно, мерзлый торф осенью имеет сравнительно высокие механические характеристики, что допускает движение тяжелого автомобильного транспорта при толщине этого слоя 20 ... 35 см (в зависимости от типа болота и нагрузки от транспортного средства).

В весенний период толщина мерзлого торфа значительна (40 ... 50 см и более), однако его температура близка к нулю, т. е. механические свойства невысоки.

В качестве расчетной схемы рассматриваем плиту неограниченной длины, лежащую на линейно-деформируемом основании с коэффициентом постели  $C$  (рис. 1). Влияние поперечного изгиба плиты учитываем введени-

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



ем 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. В общем случае плита состоит из нескольких слоев с различными механическими свойствами.

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

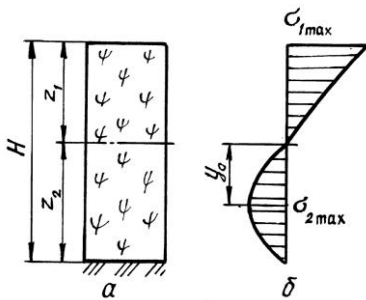


Рис. 2. Однослойная дорожная конструкция: *a* – схема дорожной конструкции; *b* – эпюра нормальных напряжений

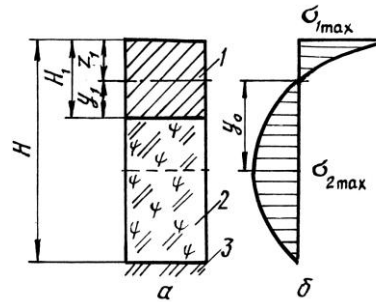


Рис. 3. Двухслойная дорожная конструкция: *a* – схема; *b* – эпюра нормальных напряжений; 1 – верхнее строение; 2 – мерзлый торф; 3 – подстилающий слой

Основные зависимости для расчета толщины однослойной дорожной одежды имеют вид:

определение 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;

определение эквивалентного модуля упругости:

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

определение максимального растягивающего напряжения:

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

Здесь  $M$  – система эквивалентных грузов при определении напряжений,  $M = \sum P_i\mu_i$ ;

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

$$z_2 = H - z_1;$$

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

$B$  – ширина проезжей части;

$k$  – коэффициент относительной жесткости основания и плиты,

$$k = 4 \sqrt{\frac{U}{4E_3 J}},$$

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

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

условие для определения минимальной толщины дороги:

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

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

максимальный прогиб  $\omega$  полотна дороги:

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

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

К двухслойным относят дорожные конструкции, которые состоят из слоя мерзлого торфа и лежащего на нем верхнего слоя (снеголед, минеральный грунт, колесопроводы и т. д.). Расчетные зависимости для такой дорожной конструкции (рис. 3) имеют вид:

нейтральная плоскость проходит по верхнему слою:

$$E_3 = \{B_1 E_0 [v^3 (4 - \nu) - (\nu - \nu_1)^3 (4 - \nu - 3\nu_1)] - B_2 E_{20} [(1 - \nu)^4 - (\nu_1 - \nu)^3 (4 - \nu - 3\nu_1)]\} / B; \quad (7)$$

нейтральная плоскость проходит по нижнему слою:

$$E_3 = \{B_1 E_0 [v^3 (4 - \nu) - (\nu - \nu_1)^3 (4 - \nu - 3\nu_1)] + B_2 E_{10} [(\nu - \nu_1)^3 (4 - \nu - 3\nu_1)] + B_2 E_{20} (1 - \nu)^4\} / B; \quad (8)$$

нейтральная плоскость проходит по границе между слоями:

$$E_3 = [B_1 E_0 v^3 (4 - \nu) + B_2 E_{20} (1 - \nu)^4] / B, \quad (9)$$

где  $\nu = z_1/H$ ;  $\nu_1 = H_1/H$ ;

$H_1, B_1$  – 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 снеговой слой, то можно принять  $B_1 = B_2 = B$ . Для определения максимума нормальных растягивающих напряжений (значение  $\sigma_2$ ) следует определить  $y_0$  – расстояние от нейтральной плоскости до точек максимума:

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

Обозначим расстояние от нейтральной плоскости до нижней грани верхнего слоя  $y_1 = z_1 - H$ . Если  $|y_0| > |y_1|$ , то нейтральная плоскость проходит по нижнему слою, т. е. по мерзлому торфу и  $\sigma_{2\max} = [\sigma_2]$ . Если  $|y_0| < |y_1|$ , то эта плоскость проходит по верхнему слою и  $\sigma_{2\max} = [\sigma_r]$  – 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.

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

Чрезмерное увеличение высоты насыпи для обеспечения проходимости транспорта по зимним дорогам на болотах при температурах, близких к нулю, 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 для расчета одно- и двухслойных зимних дорог на болотах позволили выполнить расчет минимальной толщины слоя мерзлого торфа, безопасной для пропуска транспортных средств заданной грузоподъемности [2] при различных типах болот и температуре. Для однослойных дорог некоторые результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными приведены в табл. 1. Как видим, экспериментальные и расчетные значения хорошо сходятся при достаточно большой ширине проезжей части зимних дорог на болотах.

Результаты расчета показывают, что расчетная глубина промерзания  $H_p$  однослойных зимних дорог на болотах зависит 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  $H_p$ :

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

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

Таблица 1

Тип нагрузки	Тип болота	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 до 45 кН	I	90	$\frac{7}{12}$	23	17	13	11
	II	90	$\frac{8}{15}$	28	18	15	13
Гусеничные машины массой до 45 т, автомобили с нагрузкой на колесо до 75 кН	I	140	$\frac{8}{15}$	31	22	17	14
	II	140	$\frac{15}{20}$	38	25	21	18

Примечания. 1. Экспериментальные значения получены для температуры мерзлого торфа  $\theta = -(1...10)^\circ\text{C}$ .

2. Для экспериментальных данных в числителе приведена толщина слоя мерзлого торфа, при которой от заданной нагрузки были проломы, в знаменателе – проломов не было.

3. Экспериментальные значения  $H_{\min}$  следует рассматривать как ориентировочные. Для практических условий их следует увеличить на 20...30 %.

4. Расчетные значения приведены для четырех значений ширины дорожной одежды. Они совпадают с экспериментальными при ширине дороги 700...900 см.

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 для отдельных случаев приведены в табл. 2.

Оптимальная толщина верхнего слоя 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 – надо рассмотреть вопрос о применении трехслойной дорожной одежды.

Таблица 2

Тип болота	Температура, °С	Значения $H_{\min}$ в зависимости от типа верхнего слоя и $B$ , 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 величины. 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.

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 нагрузки на дорогу, типа болота (коэффициент постели), ширины дороги и температуры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вялов С.С. и др. Строительство промышленных сооружений на мерзлом торфе / С. С. Вялов, Г. Л. Каган, А. Н. Воевода, В. И. Муравленко. – М.: Недра, 1980. – 144 с.

2. Морозов В.С. Рекомендации по применению сезонных зимних лесовозных дорог на болотах: Справочное пособие. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2000. – 124 с.

Архангельский государственный  
технический университет  
Поступила 26.04.2000 г.

V.S. Morozov

### Mathematical Model for Calculating Base Thickness of Winter Highways on Swamps

The substantiation of the mathematical model is carried out in the form of a set of calculated equations for determining the minimum thickness of the frozen peat layer, ensuring the motion of transportation means of the assigned load capacity along the single-layer and two-layer winter roads.