

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 более 30 печатных работ в области строительства и эксплуатации зимних лесовозных дорог.



РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ОСНОВАНИЙ ЗИМНИХ ЛЕСОВОЗНЫХ ДОРОГ ИЗ МЕРЗЛОГО ТОРФА

Изложены методика расчета толщины дорожной одежды из мерзлого торфа, результаты расчета и их анализ. Получены аппроксимирующие уравнения по определению минимальной толщины слоя мерзлого торфа для пропуска транспортной техники заданной грузоподъемности на участках дорог по болотам.

зимние дороги, расчет на прочность, мерзлый торф.

Зимние лесовозные дороги широко применяют на лесозаготовках для освоения лесосырьевых баз, расположенных на сырых и заболоченных территориях или на значительном удалении от магистральных дорог. Стоимость их строительства и эксплуатации существенно ниже, чем дорог других типов (гравийные, лежневые, железобетонные и т. д.), что обеспечивает технико-экономическое преимущество зимних сезонных лесовозных дорог и снижает стоимость транспортировки древесины.

Зимние дороги, как правило, строят по упрощенной технологии, прокладывая их по естественной поверхности земли с минимумом земляных работ. Основные сложности возникают при пересечении дорогами водотоков и болот. Это требует применения специальных методов строительства и конструкций, устройство которых обеспечивает нормальную эксплуатацию зимних дорог в течение всего осенне-зимнего и весеннего сезона лесозаготовок.

В настоящей работе изложена методика расчета толщины дорожной одежды из мерзлого торфа и анализ полученных результатов. Материал ее может найти применение не только в лесной промышленности, но и в других отраслях народного хозяйства, деятельность которых связана с транспортным освоением территории Европейского Севера России и Сибири, где в течение длительного периода температуры отрицательны.

Исследованию различных способов расчета и строительства зимних лесовозных дорог на болотах и заболоченных территориях посвящено достаточно много работ [4, 5, 9, 10, 12, 13]. Используемая ниже методика раз-

работана нами в 1990 – 1999 гг. В обобщенном виде она представлена в работах [6, 7].

Расчетная система уравнений (математическая модель) для определения минимально допускаемой толщины слоя мерзлого торфа на болотах имеет вид

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

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

$$H_{\min} = \left[\frac{0,075(1-\mu^2)(1-v)^2 E_{20}P}{[\sigma_2]B(0,3\alpha CE_3)^{0,25}} \right]^{0,8}. \quad (3)$$

Здесь v – безразмерная расчетная величина, $v = z_1/H_{\min}$;

z_1 – расстояние от поверхности дороги до нейтральной плоскости плиты из мерзлого торфа при ее продольном изгибе, см;

H_{\min} – минимальная толщина проезжей части, см;

E_{10}, E_{20} – модули упругости на сжатие и растяжение мерзлого торфа при данной температуре на поверхности проезжей части, МПа;

E_3 – эквивалентный (расчетный) модуль упругости, МПа;

μ – коэффициент Пуассона для мерзлого торфа;

P – давление на поверхность дороги от тележки прицепа-ропуска лесовозного автопоезда (для других транспортных средств – давление от наиболее нагруженной оси), Н;

$[\sigma_2]$ – допускаемое напряжение для мерзлого торфа на прочность при растяжении, МПа;

B – ширина проезжей части (ширина слоя мерзлого торфа), см;

C – коэффициент постели для основания из талого торфа, Н/см³;

α – коэффициент поперечного изгиба, вычисляемый по отдельной методике [8];

0,075 и 0,3 – множители для выравнивания размерностей величин в левой и правой частях уравнения (3).

Систему уравнений (1) – (3) можно решить с помощью ЭВМ по следующему алгоритму:

а) задать исходные значения расчетных величин: $E_{10}, E_{20}, \mu, P, [\sigma_2], B, C, \alpha$;

б) используя метод итераций, вычислить значение v по формуле (1) с точностью $w = 0,000001$. Для этого следует задать начальное значение $z < 1$ (например $z = 0,5$) и затем последовательно в цикле найти новое значение

ние v . Цикл продолжают до тех пор, пока разность между предыдущим и новым значениями v не станет меньше w ;

в) по формуле (2) вычислить значение эквивалентного модуля упругости E_3 ;

г) по методике, приведенной в работе (9), найти коэффициент поперечного изгиба α ;

д) вычислить значение H_{\min} по формуле (3) и распечатать его на принтере. Затем задать новое значение P и повторить расчет с п. «г»).

Переменными величинами в наших расчетах являлись: сила P (в диапазоне от 40 до 300 кН с шагом 20 кН); ширина проезжей части дороги B (в диапазоне от 300 до 900 см с шагом 200 см); коэффициент постели C , зависящий от типа болота (1, 3 или 5 Н/см³); температура мерзлого торфа на поверхности проезжей части Θ (–1, –5 и –10 °С).

Модули упругости E_{10} , E_{20} и предел прочности на растяжение мерзлого торфа зависят от температуры Θ . Их значения приведены в работе [6].

В качестве примера в табл. 1 даны результаты расчета H_{\min} при $P = 160$ кН.

Аналогичные результаты получены для других значений силы P при изменении ее в рассматриваемом диапазоне.

Таблица 1

Тип болота	C , Н/см ³	B , см	H_{\min} , см, при θ , °С		
			–1	–5	–10
I	5	300	30,6	30,8	27,4
		500	21,8	21,9	19,6
		700	17,1	17,2	15,3
		900	14,4	14,4	12,8
II	3	300	38,8	34,8	33,8
		500	25,4	27,3	24,0
		700	21,1	21,7	19,0
		900	18,2	18,1	15,9
III	1	300	48,7	47,2	41,6
		500	34,2	33,8	29,7
		700	27,1	26,7	23,7
		900	22,7	22,5	19,8

Данные табл. 1 позволяют сделать следующие выводы.

1. Толщина дороги H_{\min} обратно пропорциональна ее ширине B . График этой зависимости приведен на рис. 1, а. Он близок к гиперболическому. Наименее прочной является дорога шириной 300 см, наиболее – шириной 900 см. Такая закономерность наблюдается в диапазоне изменения B от 300 см до 900 см.

При $B > 900$ см она может изменяться, но в принципе чем шире слой мерзлого торфа, тем дорога прочнее (до определенных пределов).

Обычно зимние дороги имеют ширину 500 ... 700 см. Данные расчета показывают, что для увеличения прочности дорожной одежды ширину дорожной полосы, расчищаемой от снега, целесообразно делать как можно больше.

2. С возрастанием отрицательной температуры прочность дороги увеличивается. Однако в диапазоне изменения температуры от -1 до -10 °С при прочих равных условиях такое увеличение (рис.1, б) менее существенно, чем при увеличении ширины дороги B .

3. На прочность зимних дорог влияет тип болота. График, приведенный на рис.1, в, показывает, что наиболее прочными являются зимние дороги на болотах I типа ($C = 5$ Н/см³). Для дорог на болотах II и III типов (C равен соответственно 3 и 1 Н/см³) прочность мерзлого слоя торфа снижается, а минимальная толщина увеличивается. Если вычисленное значение H_{\min} окажется меньше фактической толщины слоя мерзлого торфа H_{ϕ} , то придется рассмотреть способы усиления дорожной одежды за счет устройства на болотах II и III типов деревянного настила или грунтовой насыпи на слое мерзлого торфа.

4. С возрастанием внешней нагрузки P (рис.1, г) для ее пропуска требуется увеличить толщину слоя мерзлого торфа H_{\min} .

Зависимость $H(P)$ близка к линейной, и ее можно аппроксимировать уравнением

$$H_{\min} = a_0 + a_1 P. \quad (4)$$

Уравнение (4) не вполне соответствует реальному физическому процессу. По (4) при $P = 0$ имеем $H_{\min} = a_0$, в то же время для $P = 0$ должно быть $H_{\min} = 0$. Это противоречие объясняется тем, что в действительности зависимость $H_{\min}(P)$ близка к параболической.

Такое уточнение представляет в основном теоретический интерес, так как в диапазоне $40 \leq P \leq 300$ кН линейное приближение (4) дает небольшую погрешность.

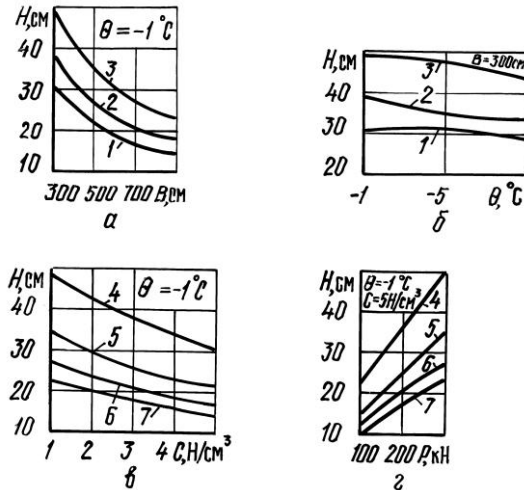


Рис. 1. Расчетные зависимости: а – $H(B)$; б – $H(\Theta)$; в – $H(C)$; г – $H(P)$; 1, 2, 3 – тип болота I, II, III; 4 – 7 – B равно соответственно 300, 500, 700 и 900 см

Коэффициенты линейного приближения уравнения (4), найденные по программе в работе [2], для различных вариантов массива расчетных данных приведены в табл. 2. Использование их позволит избежать трудоемкого расчета на ЭВМ и более удобно для решения практических задач, обеспечивая одинаковую точность расчета.

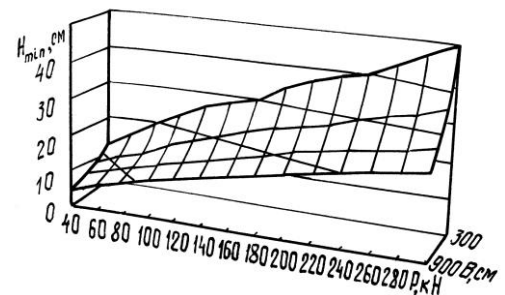
Для определения H_{\min} с помощью уравнения (4) и данных табл. 2 необходимо задать B , C и Θ . Сама процедура вычислений необременительна и легко позволяет найти значения H_{\min} для конкретного типа внешней нагрузки на полотно зимней дороги.

Таблица 2

Тип болота	C , Н/см ³	B , см	a_0 при θ , °С			a_1 при θ , °С		
			-1	-5	-10	-1	-5	-10
I	5	300	7,9087	7,6096	7,1768	0,1419	0,1448	0,1261
		500	5,4465	5,4290	5,0104	0,1021	0,1031	0,0911
		700	4,1735	4,5266	3,8731	0,0810	0,0791	0,0714
		900	3,1630	3,5391	2,8583	0,0700	0,0680	0,0620
II	3	300	7,7201	7,5336	6,9972	0,1941	0,1935	0,1673
		500	4,8799	5,8327	4,7187	0,1282	0,1343	0,1207
		700	3,2499	4,3203	3,8306	0,1117	0,1084	0,0945
		900	3,8199	3,7230	3,4099	0,0901	0,0900	0,0780
III	1	300	9,4701	10,5029	7,5959	0,2450	0,2294	0,2128
		500	7,2949	7,2577	6,4067	0,1679	0,1662	0,1456
		700	5,7747	5,3278	4,7880	0,1331	0,1336	0,1181
		900	4,6212	4,5802	4,2512	0,1133	0,1122	0,0973

4 «Лесной журнал» № 2

Рис. 2. Зависимость минимальной толщины слоя мерзлого торфа H_{\min} от внешней нагрузки P и ширины дороги B при $C = 5$ Н/см³ и $\Theta = -1^\circ\text{C}$



Можно также использовать другой способ аппроксимации массива расчетных данных. В общем случае величина H_{\min} является функцией четырех независимых переменных: P , B , Θ и C , т. е.

$$H_{\min} = H(P, B, \Theta, C). \quad (5)$$

Зависимость H_{\min} от какого-либо одного фактора изображается линией (см. рис. 1), от двух факторов ее можно представить в виде поверхности (рис. 2), от трех и более построить графически невозможно.

Для изучения такой зависимости удобно использовать теорию многофакторного анализа, наподобие приведенной в работе [3].

В результате применения линейного уравнения множественной регрессии для трех независимых переменных при $B = \text{const}$ с помощью программы Н. Н. Буторина [1] нами получены следующие зависимости:

при $B = 300$ см

$$H_{\min} = 23,6 + 0,182P - 4,29C + 0,550\Theta;$$

при $B = 500$ см

$$H_{\min} = 16,4 + 0,128P - 3,02C + 0,486\Theta; \quad (6)$$

при $B = 700$ см

$$H_{\min} = 13,3 + 0,102P - 2,43C + 0,299\Theta;$$

при $B = 900$ см

$$H_{\min} = 11,3 + 0,087P - 2,09C + 0,278\Theta.$$

В эти формулы входят следующие величины: H_{\min} – минимальная толщина слоя мерзлого торфа, см; P – внешняя нагрузка, кН; C – коэффициент постели, Н/см³; Θ – температура на поверхности проезжей части дороги (температура воздуха), °С.

Качество аппроксимации оценивали с помощью коэффициентов множественной (R) и частной (R_1 , R_2 и R_3) корреляций. Их значения приведены в табл. 3.

Таблица 3

B , см	R	R_1	R_2	R_3
300	0,973	0,967	0,875	0,464
500	0,977	0,972	0,894	0,393
700	0,980	0,975	0,905	0,510
900	0,980	0,975	0,913	0,552

Примечание. R_1 – корреляция H_{\min} от P ; R_2 – от C ; R_3 – от θ .

Значения коэффициента R_3 показывают, что в рассматриваемом диапазоне температура Θ слабо связана с толщиной слоя мерзлого торфа. Тенденция к повышению прочности этого слоя при уменьшении Θ является не очень существенной. Можно предположить, что здесь влияет не только температура, но и продолжительность времени ее действия.

Входящие в систему уравнений (6) коэффициенты связаны с шириной дороги B примерно гиперболически. Поэтому в каждом из этих уравнений, полученных методом линейной множественной корреляции, значения B принимают постоянными. Однако, аппроксимируя эти коэффициенты уравнением гиперболы вида $b = b_0 + b_1/x$ по методу наименьших квадратов [12], найдем их зависимость от B , что позволит вместо четырех уравнений системы (6) записать только одно уравнение множественной регрессии

$$H_{\min} = 5,341 + \frac{5491,635}{B} + \left(0,04107 + \frac{42,5162}{B}\right)P + \left(1,0173 + \frac{985,7475}{B}\right)C + \left(0,1536 + \frac{126,824}{B}\right)\Theta$$

или

$$H_{\min} = 5,341 + 0,04107P + 1,0173C + 0,1536\Theta + \frac{1}{B} (491,635 + 42,5196P + 985,74C + 126,824\Theta) \quad (7)$$

Уравнение (7) можно теперь назвать уравнением множественной нелинейной регрессии и использовать его для вычисления H_{\min} практически в любых условиях, которые могут встретиться в природных условиях.

При оценке требуемой толщины слоя мерзлого торфа на болоте для пропуска заданного транспортного средства возможно вместо системы уравнений (1)–(3) использовать аппроксимирующие формулы (4), (6) или (7), что существенно облегчает процедуру вычислений при несущественных расхождениях в результатах расчета. Это видно из данных табл. 4.

Таблица 4

Тип болота	С, Н/см ³	В, см	Минимальная толщина слоя мерзлого торфа, см, при θ , °С								
			-1			-5			-10		
			H	H ₄	H ₆	H	H ₄	H ₆	H	H ₄	H ₆
I	5	300	30,6	30,6	30,7	30,8	30,8	28,5	27,4	27,4	25,8
		500	21,8	21,8	21,5	21,9	21,9	20,4	19,6	19,6	18,9
		700	17,1	17,1	17,2	17,2	17,2	16,0	15,3	15,3	14,5
		900	14,4	14,4	14,5	14,4	14,4	13,4	12,8	12,8	12,0
II	3	300	28,8	28,8	39,3	34,8	34,8	37,1	33,8	33,8	34,4
		500	25,4	25,4	27,5	27,3	27,3	26,4	24,0	24,0	25,0
		700	21,1	21,1	22,0	21,7	21,7	20,8	19,0	19,0	19,3
		900	18,2	18,2	18,7	18,1	18,1	17,6	15,9	15,9	16,2
III	1	300	48,7	48,7	47,9	47,2	47,2	45,7	41,6	41,6	42,9
		500	34,2	34,2	33,6	33,8	33,8	32,4	29,7	29,7	31,0
		700	27,1	27,1	26,9	26,7	26,7	25,7	23,7	23,7	24,2
		900	22,7	22,7	22,8	22,5	22,5	21,7	19,8	19,8	20,4

Значения H_{\min} в табл. 4 приведены при одной и той же $P = 160$ кН, но различных значениях C , Θ и B . Условия вычислений обозначены буквами: H – на ЭВМ; H_4 – по уравнению (4); H_6 – по уравнениям системы (6). Как видим, результаты расчетов весьма близки.

В целом расчетные значения H_{\min} совпадают с экспериментальными [11]. Однако предложенная расчетная модель не совсем совпадает с физической из-за погрешностей в экспериментальном определении модулей упругости мерзлого торфа на сжатие и растяжение и предела прочности, а также из-за того, что массив мерзлого торфа болота не является однородным.

Для учета неточности исходных данных и приближения значения H_{\min} к фактическим H_{ϕ} необходимо расчетное значение толщины умножить на коэффициент запаса прочности $\eta = 1,1$:

$$H_{\phi} = \eta H_{\min} \quad (8)$$

и результат расчета округлить до целых сантиметров.

Материалы, представленные в статье, позволяют сделать следующие выводы.

Предложена методика решения задачи по расчету толщины слоя мерзлого торфа на болотах, обеспечивающей безопасный пропуск заданной автомобильной нагрузки. Эта методика основана на использовании математической модели в виде системы расчетных уравнений и программы для их решения на ЭВМ.

На основании результатов расчета однослойные зимние автомобильные дороги рекомендуется устраивать на переходах через болота I и частично II типов. Для продления срока эксплуатации следует устраивать дороги из двух, трех и более слоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Буторин Н. Н.* Программа для анализа экспериментальных зависимостей. – Архангельск, 1995. – 3 с. – (Информ. листок / ЦНТИ).
2. *Дьяконов В. П.* Справочник по расчетам на микрокалькуляторах. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-матем. лит.-ры, 1985. – 244 с.
3. *Езекиэл М., Фокс К. А.* Методы анализа корреляций и регрессий линейных и криволинейных. – М.: Статистика, 1966. – 558 с.
4. *Каган Г. Л.* Определение прочностных характеристик мерзлого торфа с учетом скоростного режима деформирования // Проблемы нефти и газа Тюмени. – 1971. – № 1. – С. 70-80.
5. *Калашиников А. П.* Лесовозные автомобильные дороги из материалов сезонного промерзания. – Петрозаводск: Карелия, 1983. – 88 с.
6. *Морозов В.С.* Обоснование и разработка оптимальных конструкций и технологии строительства зимних лесовозных дорог на болотах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 1992. – 20 с.
7. *Морозов В. С.* Расчет и проектирование оснований зимних дорог на болотах: Учеб. пособие. – Архангельск: АГТУ, 1999. – 236 с.
8. *Морозов В.С.* Расчет коэффициента поперечного изгиба для оснований зимних дорог на болотах // Лесн. журн. – 2000. – № 5-6. – С. 108-112. – (Изв. высш. учеб. заведений).
9. *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.
10. *Павлов Ф. А.* Покрытия лесных дорог. – М.: Лесн. пром-сть, 1986. – 176 с.
11. Строительство промысловых сооружений на мерзлом торфе / С. С. Вялов, Г. Л. Каган, А. Н. Воевода, В. И. Муравленко. – М.: Недра, 1980. – 144 с.
12. *Уваров Б. В., Щелкунов В. В.* Расчет на прочность оснований зимних дорог на болотах // Лесн. журн. – 1982. – № 6. – С. 49-55. – (Изв. высш. учеб. заведений).
13. *Яковенко Ю. Г.* Разработка конструкций зимних лесовозных дорог с продленным сроком действия и обоснование сроков продления для условий Северо-

Запада европейской территории России: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Химки, 1987. – 22 с.

Архангельский государственный технический университет

Поступила 21.01.2000 г.

V.S. Morozov

**Calculation of Foundation Strength of Winter Wood
Tracks Constructed of Frozen Peat**

The technique of calculating the thickness of the roadbed constructed from frozen peat is presented as well as the results of such technique and their analysis. The approximate equations are obtained for determining the minimum thickness of the frozen peat layer for the vehicles' given load capacity on the road areas down the swamps.
