



УДК 625.731.001.24

В.С. Морозов

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Морозов Владимир Станиславович родился в 1955 г., окончил в 1978 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры строительной механики и сопротивления материалов Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Имеет более 45 печатных работ в области строительства и эксплуатации зимних лесовозных дорог.
E-mail: v.morozov@agtu.ru



РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ОСНОВАНИЙ ЗИМНИХ ДОРОГ НА ЗАБОЛОЧЕННЫХ ГРУНТАХ

Предложена методика расчета оснований зимних дорог на прочность, базирующаяся на определении положения нейтральной оси и эквивалентного модуля упругости.

Ключевые слова: мерзлый торф, напряжения, прочность, модуль упругости.

Один из простейших способов строительства зимних (в том числе лесовозных) дорог на болотах состоит в расчистке проезжей части от снега с последующей проминкой поверхности болота трактором для формирования основания из мерзлого торфа.

Важной практической задачей, связанной с оценкой несущей способности таких дорог, является разработка научно обоснованных рекомендаций по определению минимальной толщины слоя мерзлого торфа для пропуска автопоездов заданной грузоподъемности. Приближенные методы решения этой задачи изложены в работах [4, 5], однако сама методика требует дальнейшего уточнения на основе более углубленного изучения напряженно-деформированного состояния массива мерзлого торфа в основании дороги.

В данной работе приведены некоторые результаты исследований по оценке прочности полотна зимних дорог на болотах с учетом ряда свойств мерзлого торфа, влияющих на работоспособность покрытия.

При разработке предлагаемой методики используем следующие основные предпосылки.

1. Слой мерзлого торфа в основании зимних дорог принимаем за балку (плиту) бесконечно большой длины постоянного поперечного сечения, лежащую на линейно-деформируемом полупространстве (талый торф), деформа-

ционные свойства которого характеризуются коэффициентом постели. Такая предпосылка использована в работах [5, 6] и подтверждена результатами наших исследований по изучению напряженно-деформированного состояния оснований зимних дорог на болотах с помощью метода конечных элементов [3].

2. Температура массива мерзлого торфа зависит от изменения температуры воздуха, имеет различные значения в отдельных точках массива, но в общем случае монотонно повышается от минимальной отрицательной $\Theta_{\text{п}}$ на поверхности проезжей части дороги до 0°C на подошве основания [2].

3. Модуль упругости мерзлого торфа E зависит от его температуры Θ . Функция $E(\Theta)$ в общем случае является нелинейной. Как и температура, модуль упругости монотонно уменьшается от наибольшей величины на поверхности проезжей части дороги до значения, которое ввиду его малости можно принять равным нулю.

4. Мерзлый торф представляет собой разномодульное тело, т. е. имеющее различные значения модуля упругости при растяжении и сжатии, которые могут отличаться друг от друга в несколько раз. Как отмечено в работе [5], мерзлый торф при сжатии работает как пластический материал, а при растяжении – как хрупкий.

5. Связь между напряжениями и деформациями принимается линейной, поэтому реологические свойства мерзлого торфа не рассматриваем. Следовательно, механические свойства мерзлого торфа полностью зависят от модуля упругости и коэффициента Пуассона.

Расчетная эпюра изменения модуля упругости мерзлого торфа по глубине основания дороги, учитывающая рассмотренные выше предпосылки, приведена на рис. 1. Она состоит из верхнего (1) и нижнего (2) участков. При изгибе балки (плиты) толщиной H на нейтральной оси эпюры модулей упругости имеется скачок, связанный с изменением характера деформации торфа.

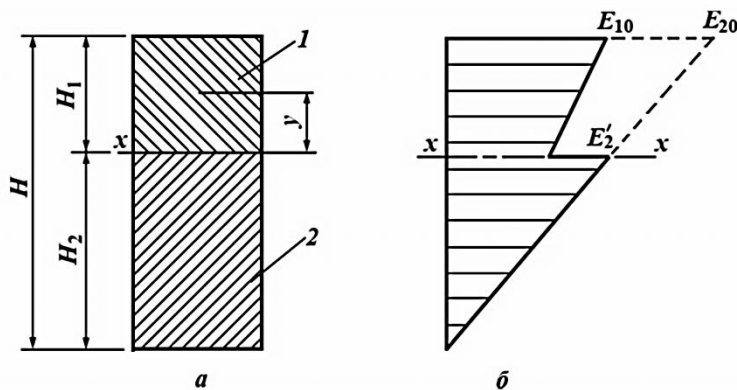


Рис. 1. Расчетная схема поперечного слоя зимней дороги (а) и эпюра изменения модуля упругости мерзлого торфа по глубине основания (б): 1 – участок сжатия с максимальным модулем упругости на поверхности дороги E_{10} ; 2 – участок растяжения с максимальным модулем упругости на поверхности дороги E_{20}

Расчет на прочность при изгибе балки (плиты) под воздействием внешней нагрузки от колес автопоезда включает определение положения нейтрального слоя, эквивалентного модуля упругости плиты, ее прогибов и напряжений в торфе.

Способы определения положения нейтрального слоя разномодульного тела рассмотрены в работе [1]. Расчетное уравнение

$$E_{10} v^2(3-v) - E_{20} (1-v)^3 = 0, \quad (1)$$

где v – безразмерный параметр, $v = H_1/H$;

H_1 – расстояние от нейтральной оси ($x-x$) до поверхности дороги.

Безразмерный параметр v находим, используя метод итераций (процесс вычислений быстро сходится, так как $v < 1$). Например, при $E_{10} = 460$ МПа и $E_{20} = 1600$ МПа имеем $v = 0,462$. Отсюда $H_1 = 0,462 H$, т. е. нейтральная ось смещена вверх по отношению к оси симметрии плиты.

Нормальные напряжения в поперечном сечении балки (плиты) определяем с помощью зависимостей, приведенных в работе [1]:

для зоны сжатия

$$\sigma_1 = \frac{E_{10}}{H\rho} (H_2 y + y^2); \quad (2a)$$

для зоны растяжения

$$\sigma_2 = \frac{E_{20}}{H\rho} (H_2 y + y^2), \quad (2б)$$

где ρ – радиус кривизны балки (плиты) в данном сечении;

H_2 – толщина зоны растяжения, $H_2 = H - H_1$;

y – расстояние от нейтральной оси до произвольного волокна сечения.

Эквивалентный модуль упругости

$$M = \int_F y \sigma dF.$$

С учетом выражений (2a) и (2б) приводим это уравнение к следующему виду:

$$M = \frac{B}{12H\rho} [E_{10} H_1^3(4H - H_1) + E_{20} (H - H_1)^4],$$

где B – ширина проезжей части дороги.

Выражая момент через эквивалентный модуль упругости

$$M = \frac{E_3 J}{\rho} = \frac{E_3 B H^3}{12\rho} \quad (3)$$

и вводя безразмерный параметр v , получаем

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

Следовательно, расчет балки (плиты) из разномодульного материала можно заменить расчетом балки из одномодульного материала, имеющего эквивалентный модуль упругости. Его нетрудно найти по уравнению (4). Например, при $E_{10} = 460$ МПа, $E_{20} = 1600$ МПа и $\nu = 0,462$ получаем $E_3 = 294,5$ МПа.

Для определения нормальных напряжений с учетом уравнения (3) используем следующие уравнения:

$$\sigma_1 = \frac{E_{10} M}{E_3 J H} (H_2 y + y^2); \quad (5a)$$

$$\sigma_2 = \frac{E_{20} M}{E_3 J H} (H_2 y + y^2). \quad (5b)$$

Основание из мерзлого торфа представляет собой плиту, расчет которой можно выполнить по известным алгоритмам [6] с использованием эквивалентного модуля упругости. Однако такой метод недостаточно удобен для анализа, так как не позволяет получить расчетные зависимости в конечном виде. Поэтому выполнен расчет слоя мерзлого торфа как балки на упругом основании с введением поправочного коэффициента α (α – коэффициент изгиба), учитывающего поперечные деформации слоя. Коэффициент α зависит от ширины проезжей части и может быть найден экспериментально или аналитически по известной методике [6].

При загрузении балки силами давления от осей автопоезда, получаем

$$M = \frac{\sum P_i \mu_i}{4k}, \quad (6)$$

где $\sum P_i \mu_i$ – система эквивалентных грузов;

$$\mu_i = e^{-kx_i} (\cos kx_i - \sin kx_i);$$

k – коэффициент относительной жесткости балки и ее основания,

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

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

C – коэффициент постели;

B – ширина проезжей части.

Для вычисления напряжений по уравнению (6) следует найти изгибающий момент в данном сечении, а затем определить напряжения по уравнению (5).

Эпюра нормальных напряжений по высоте поперечного сечения слоя мерзлого торфа приведена на рис. 2, по длине участка на поверхности дороги – на рис. 3.

Рис. 2. Эпюра нормальных напряжений по высоте поперечного сечения слоя мерзлого торфа

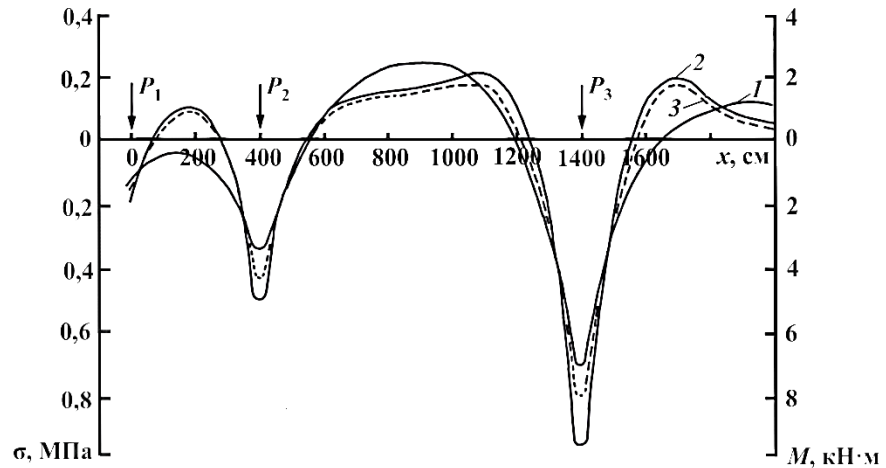
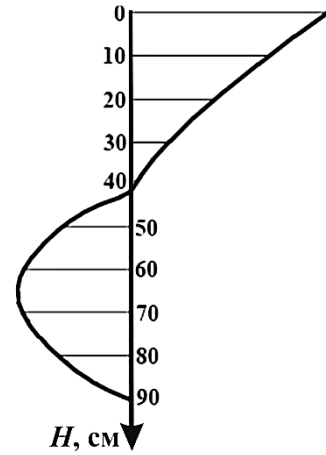


Рис. 3. Эпюры нормальных напряжений по длине участка на поверхности дороги (1, 2) и изгибающих моментов (3) при различных значениях коэффициента постели: 1 – 1 Н/см³; 2, 3 – 5 Н/см³

Нормальные напряжения σ рассчитаны для следующих исходных данных: $E_{10} = 460,0$ МПа, $E_{20} = 1600,0$ МПа, $E_3 = 294,5$ МПа, $C = 5$ Н/см³, $\alpha = 1$, $H = 90$ см, $B = 900$ см, нагрузка от автопоезда с тремя осями: $P_1 = 4\ 950$ Н, $P_2 = 9\ 600$ Н, $P_3 = 165\ 000$ Н.

По рис. 2 установлено, что сжимающие напряжения имеют наибольшие значения на поверхности дороги. При $y = H_1$ получаем

$$\sigma_{1\max} = \frac{12E_{10} M v}{E_3 B H^3}$$

Ординату максимума растягивающих напряжений определяем из условия $d\sigma_2/dy = 0$, откуда $y = -H_2/\rho$ и

$$\sigma_{2\max} = -\frac{3E M (1-\nu)^2}{20 E_3 B H^2}.$$

Для данного вида торфа отношение $\sigma_{1\max}/|\sigma_{2\max}|$ постоянно.

Например, для $E_{10} = 460$ МПа, $E_{20} = 1600$ МПа имеем $\nu = 0,462$ и $\sigma_{1\max}/|\sigma_{2\max}| = 1,84$.

Таким образом, для основания дороги из слоя мерзлого торфа во всех случаях растягивающие напряжения примерно в 2 раза меньше сжимающих.

Как видно из рис. 3, максимальных значений нормальные напряжения достигают под прицепом-ропуском. В этой зоне эпюра σ практически симметрична по отношению к вертикальной оси ропуска. Это означает, что влияние давления от колес автомобиля на поверхность дороги в зоне прицепа-ропуска незначительно и им можно пренебречь.

Следовательно, при расчете на прочность основания зимних лесовозных автомобильных дорог из мерзлого торфа достаточно рассмотреть воздействие на дорогу только нагрузки от прицепа-ропуска, что существенно упрощает дальнейшие вычисления. Напряжения в зоне воздействия на дорогу колес автомобиля значительно меньше.

Расчетные зависимости для определения максимальных напряжений с учетом предложенного подхода имеют следующий вид:

$$\sigma_{1\max} = \frac{4E P_3 \nu}{E_3 B H^2 k}; \quad (7a)$$

$$\sigma_{2\max} = -\frac{3E P_3 (1-\nu)^2}{4E_3 B H^2 k}, \quad (7b)$$

где P_3 – давление от прицепа-ропуска на поверхность дороги.

Прочность основания из мерзлого торфа рассчитываем по первой группе предельных состояний. В данном случае

$$|\sigma_{2\max}| \leq R_p,$$

где R_p – расчетное сопротивление мерзлого торфа на растяжение.

Записав в правой части выражение (7a) или (7b), получаем условие, из которого можно определить минимальную толщину слоя мерзлого торфа, обеспечивающего движение по нему автомобиля с давлением P_3 на прицеп-ропуск.

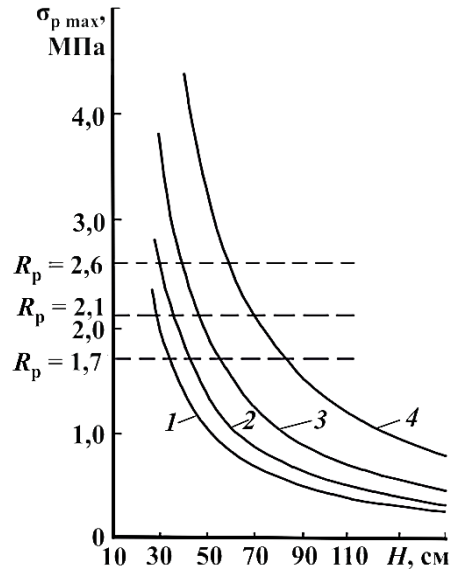
Для участков зимних лесовозных автомобильных дорог на болотах расчетные значения модуля упругости E и сопротивления мерзлого торфа на растяжение R_p , по данным работы [2], приведены в табл. 1.

Таблица 1

$\Theta, ^\circ\text{C}$	$E, \text{МПа}$	$R_p, \text{МПа}$
-1	430/1300	3,7/1,1
-5	480/1600	7,3/2,1
-10	770/1600	9,2/2,6

Примечание. В числителе – сжатие, в знаменателе – растяжение.

Рис. 4. Зависимость максимальных нормальных напряжений от толщины проезжей части при различной ширине дороги, см: 1 – 300; 2 – 500; 3 – 700; 4 – 900



Для болот первого типа (влажность $W = 800\%$) принимаем $C = 5,0 \text{ Н/см}^3$, второго типа ($W = 800 \dots 1400\%$) – $C = 2,5 \text{ Н/см}^3$, третьего типа ($W = 1400\%$) – $C = 1,0 \text{ Н/см}^3$.

Зависимости $\sigma_{2\max}(H)$ для $C = 5 \text{ Н/см}^3$ при различной толщине проезжей части представлены на рис. 4, там же приведены графики для каждого значения R_p . Точки пересечения линий $R_p = \text{const}$ и $\sigma_{2\max}(H)$ определяют минимальную толщину слоя мерзлого торфа в основании зимней лесовозной дороги при нагрузке ее автопоездом МАЗ-509А + ГКБ-9383.

Значения H_{\min} из табл. 2 показывают, что, кроме температуры, на прочность зимних дорог в равных условиях существенно (до определенных пределов) влияет ширина проезжей части. С увеличением ширины дороги напряжения в массиве мерзлого торфа уменьшаются, так как увеличивается профиль поперечного сечения дороги и связанные с ним его расчетные геометрические характеристики.

Таблица 2

$\Theta, ^\circ\text{C}$	$C, \text{ Н/см}^3$	$H_{\min}, \text{ см, при } B, \text{ см}$			
		300	500	700	900
–1	1,0	112	72	57	46
	2,5	91	63	48	39
	5,0	82	55	42	34
–5	1,0	88	62	47	38
	2,5	77	52	38	32
	5,0	69	46	35	28
–10	1,0	70	52	39	32
	2,5	65	44	33	28
	5,0	58	38	30	25

Выводы

1. Предложенная методика расчета оснований зимних дорог на прочность является достаточно обоснованной и позволяет иметь результаты, соответствующие данным, полученным при эксплуатации зимних лесовозных автомобильных дорог на болотах.

2. Методика определения положения нейтральной оси, эквивалентного модуля упругости, нормальных напряжений применима при расчете оснований других типов зимних дорог.

3. Определить толщину мерзлого слоя торфа, необходимого для безопасного движения транспортного средства, позволяют графики, приведенные на рис. 4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов В.С. Об оценке напряженного состояния оснований зимних дорог на болотах // Лесн. журн. 1990. № 1. С. 37–45. (Изв. высш. учеб. заведений).

2. Морозов В.С. Промерзание зимних дорог на болотах // Лесн. журн. 1989. № 4. С. 51–56. (Изв. высш. учеб. заведений).

3. Морозов В.С. Расчет напряженно-деформированного состояния основания зимних лесовозных автомобильных дорог из мерзлых грунтов // Лесосечные, лесоскладские работы и транспорт леса: межвуз. сб. науч. тр. ЛТА. Л., 1990. С. 98–103.

4. Савко Н.Ф., Тупицын Н.М., Ланецкий К.Н. Методические рекомендации по устройству и содержанию зимних автомобильных дорог на снежном и ледяном покрове для применения в условиях строительства БАМ / М.: Союздорнии, 1975. 52 с.

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

6. Уваров Б.В., Щелкунов В.В. Расчет на прочность основания зимних автомобильных дорог на болотах // Лесн. журн. 1982. № 6. С. 49–55. (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 20.10.11

V.S. Morozov

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Strength Analysis of Winter Road Bases on the Boggy Grounds

The author's technique of the winter road bases stress calculation found on an neutral axe position determination and equivalent modulus of elasticity is presented.

Key words: frozen bog muck, strains, strength, modulus of elasticity.
