

## ЛИТЕРАТУРА

[1]. Есафова З. Я. Влияние веса подвижных частей механизма подачи круглопильных станков, работающих с постоянным усилием подачи // Тр. / ХабПИ.— 1974.— С. 67—71. [2]. Есафова З. Я., Есафов В. Д. Определение оптимальных массовых параметров механизма подачи круглопильных станков циклического действия // Лесн. журн.— 1980.— № 4.— С. 68—70.— (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 24 апреля 1989 г.

УДК 625.731.001.24

## ОБ ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВАНИЙ ЗИМНИХ ДОРОГ НА БОЛОТАХ

В. С. МОРОЗОВ

СевНИИП

В современной практике расчета напряжений и деформаций оснований зимних дорог на болотах их принято рассматривать как плиты (балки), лежащие на слое талого торфа, обладающего винклеровскими свойствами [2, с. 116]. Такая предпосылка использована, в частности, в работах [3, 4]. Она подтверждена нами при расчетах оснований зимних дорог на болотах с помощью метода конечных элементов.

На зимних автомобильных лесовозных дорогах, проложенных по болотам и заболоченным участкам, широко применяют следующие три основные конструкции оснований: слой мерзлого торфа, образованного при проминке поверхности болот с разрушением мохового покрова; деревянный (лежневый) настил на слое мерзлого торфа и, наконец, конструкция, состоящая из насыпи (минеральный грунт), деревянного настила и слоя мерзлого торфа.

При исследовании напряженного состояния оснований зимних дорог необходимо учитывать присущие им особенности:

разномодульность слоев, состоящих из грунта, дерева, мерзлого торфа;

зависимость модуля упругости (деформации) мерзлого торфа от его температуры, которая повышается по глубине основания и в подошве его становится равной нулю [1, с. 122—125];

анизотропию механических свойств, т. е. разномодульность мерзлого торфа (и грунта) при растяжении и сжатии [2, с. 120].

Методика исследования включает следующие этапы: задание модулей упругости (деформации) отдельных слоев конструкции основания; определение положения нейтральной оси при его изгибе; построе-

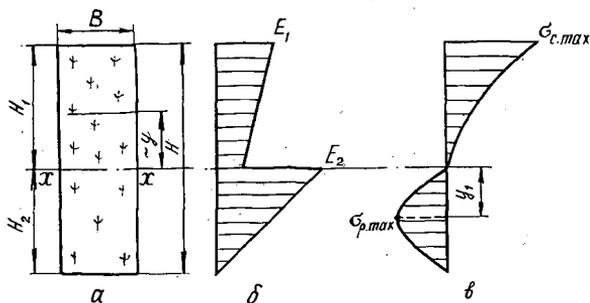


Рис. 1. Основание из мерзлого торфа: а — схема поперечного сечения; б — эпюра модуля деформации; в — эпюра напряжений

ние эпюры нормальных напряжений по высоте поперечного сечения; качественная оценка напряженного состояния.

Эту методику рассмотрим подробно для основания дороги первого типа (слой мерзлого торфа), а затем распространим на два других.

На рис. 1, а приведена схема поперечного сечения основания в виде прямоугольника шириной  $B$  и высотой  $H$ . При изгибе нейтральная ось  $x - x$  разбивает сечение на две части. Верхняя толщиной  $H_1$  находится в зоне сжатия, нижняя толщиной  $H_2$  — в зоне растяжения.

Как установлено в работе [2, с. 120], модуль деформации мерзлого торфа при растяжении примерно в 5—8 раз больше, чем при сжатии, и на нейтральной оси изменяется скачком. На верхней границе сжатой и растянутой зон соответствующие модули имеют наибольшие значения, которые обозначим  $E_1$  (сжатие) и  $E_2$  (растяжение). В подошве основания (т. е. на глубине  $H$ ) модуль деформации основания равен модулю деформации талого торфа, который (ввиду его малости по сравнению с  $E_1$  и  $E_2$ ) можно принять равным нулю. Полагая, что закон изменения модулей по толщине основания является линейным (рис. 1, б), получим:

на участке  $0 \leq y \leq H_1$

$$E = E_1(1 - H_1/H) + E_1 y/H; \quad (1)$$

на участке  $0 \leq y \leq H_2$

$$E = E_2(1 + y/H_2). \quad (2)$$

В уравнении (2) значение  $H_2$  принимается по абсолютной величине, а координата  $y$  отрицательна.

Считая мерзлый торф линейно деформируемым телом, получим уравнение для определения нормальных напряжений в сжатой и растянутой зонах (соответственно):

$$\sigma_{сж} = [E_1(1 - H_1/H)y + E_1 y^2/H]/\rho; \quad (3)$$

$$\sigma_p = E(y + y^2/H_2)/\rho. \quad (4)$$

Для определения положения нейтральной оси используем условие

$$\int_F \sigma dF = 0,$$

отсюда

$$E_1 H_1^2 (3 - H_1/H) - E_2 (H - H_1)^2 = 0. \quad (5)$$

Это уравнение позволяет найти величину  $H_1$ , т. е. расстояние от поверхности основания до нейтральной оси. Значения  $E_1$  и  $E_2$  принимают в соответствии с заданным температурным законом в основании дороги, что в отдельных случаях не исключает при определении  $H_1$  применение метода итераций.

Пусть для примера  $E_1 = 460$  МПа,  $E_2 = 1\,600$  МПа,  $H = 90$  см. Решая уравнение (5), получим  $H_1 = 48,9$  см. Нейтральная ось в данном случае проходит ниже центра тяжести сечения. Однако изменение расстояния до центра тяжести невелико, поэтому предпосылка, высказанная в работе [2, с. 110] о том, что «...в целях упрощения расчета замороженный покров в зимний период можно рассматривать как материал с постоянным модулем деформации...», достоверна и может быть использована в приближенных практических расчетах.

Эпюра нормальных напряжений для  $\rho = 1\,000$  см приведена на рис. 1, в. Она показывает, что максимальные сжимающие напряжения имеют место в поверхностном слое основания. Для определения максимальных растягивающих напряжений используем условие  $\sigma' = 0$ , отсюда:

$$y_1 = -H_2/2 = -(H - H_1)/2 \quad (6)$$

и

$$\sigma_{p. max} = -E_2 H_2 / 4\rho = -E_2 (H - H_1) / 4\rho. \quad (7)$$

Для рассмотренного выше примера  $y_1 = 20,65$  см (т. е. расстояние от поверхности дороги  $H_1 + y_1 = 69,55$  см),  $\sigma_{p. max} = -16,44$  МПа. Так как прочность на сжатие мерзлого торфа в два с лишним раза выше прочности на растяжение, то при расчете основания из мерзлого торфа исходят из условия его прочности на растяжение (как наименьшей).

В существующей практике расчета оснований зимних дорог на болотах используют понятие приведенного модуля упругости и приведенной толщины дорожной одежды. Пусть  $E_{пр} = E_2$ , тогда:

$$H_{пр} = H_{факт} \sqrt{E_1/E_2}$$

и

$$\sigma_{max} = E_2 H_{пр} / 2\rho.$$

Для  $E_1 = 460$  МПа,  $E_2 = 1600$  МПа,  $H = 90$  см имеем  $H_{пр} = 48,26$  см,  $\sigma_{max} = 38,6$  МПа, что примерно в два с лишним раза больше  $\sigma_{сж. max}$  и  $\sigma_{p. max}$ , вычисленных с учетом переменности модуля деформации по толщине основания, т. е. использование понятий приведенной толщины и модуля упругости в данном случае нельзя считать достаточно обоснованным.

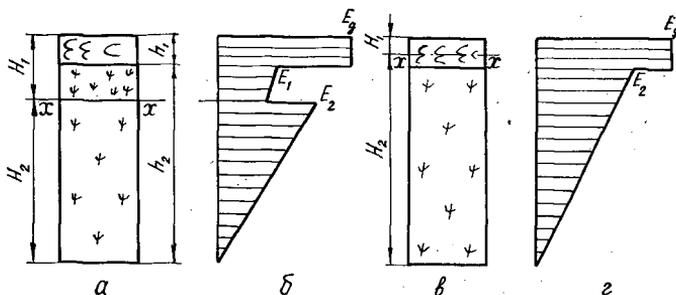


Рис. 2. Основание из деревянного настила и мерзлого торфа: а, в — схемы поперечного сечения; б, г — эпюры модулей деформаций

Для оснований зимних дорог второго типа (деревянный настил с модулем упругости  $E_d$  уложен на слое мерзлого торфа) возможны два расчетных случая: нейтральная ось проходит по мерзлому торфу (рис. 2, а) и по деревянному настилу (рис. 2, в). В частном случае при определенной комбинации значений  $E_2$ ,  $E_d$ ,  $h_1$  и  $H$  нейтральная ось проходит по низу настила, т. е. расположена на границе между слоями.

Применение рассмотренной методики для случая  $H_1 = h_1$  позволяет получить уравнение

$$3E_d H_1^2 - E_2 (H - H_1)^2 = 0, \quad (8)$$

отсюда

$$H_1 = mH / (1 + m), \quad (9)$$

где  $m = \sqrt{E_2 / 3 E_d}$ .

Пусть  $E_d = 1 \cdot 10^4$  МПа,  $E_2 = 1\,600$  МПа,  $H = 90$  см. Тогда  $m = 0,2309$  и  $H_1 = 0,1688$  м = 16,88 см. Следовательно, если толщина настила  $h_1$  больше 16,88 см, то нейтральная ось будет проходить по настилу, если меньше — по мерзлому торфу.

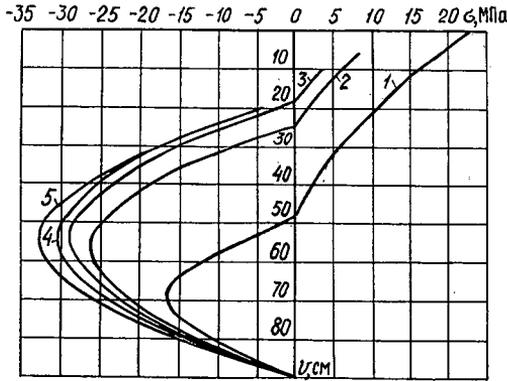


Рис. 3. Эпюры напряжений в слое мерзлого торфа при толщине деревянного настила: 1 —  $h = 0$  см; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 20; 5 —  $h = 30$  см

В общем случае положение нейтральной оси в двухслойной системе: деревянный настил — мерзлый торф и действующие в основании дороги напряжения можно определить аналогично тому, как это было сделано для основания из мерзлого торфа. Не приводя математических выкладок, проиллюстрируем результаты расчета графиками (эпюрами напряжений) на рис. 3. Положение максимума растягивающих напряжений в мерзлом торфе определяется по уравнению (6), а его значения — по уравнению

$$\sigma_{p. \max} = - \frac{E_2 (H - H_1)^2}{4\rho (H - h_1)} \quad (10)$$

Значения расчетных величин для  $E_2 = 1\,600$  МПа,  $H = 90$  см,  $\rho = 1\,000$  см при различных  $h_1$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

$h_1$ , см	$H_1$ , см	$H_1 + y_1$ , см	$\sigma_{p. \max}$
20	17,29	53,65	-30,21
25	18,38	54,19	-31,56
30	19,83	54,91	-32,83
35	21,50	55,75	-34,12
40	23,33	56,67	-35,67

Примечание. Напряжения приведены в условных единицах, так как для всех вариантов принято  $\rho = 1\,000$  см. В действительности по мере увеличения толщины настила значение  $\rho$  возрастает, т. е.  $\sigma_{p. \max}$  уменьшается.

Для трехслойной системы: насыпь из минерального грунта — деревянный настил — мерзлый торф (рис. 4) нейтральная ось может проходить по грунту, настилу или торфу. Уравнения для определения положения нейтральной оси имеют вид:

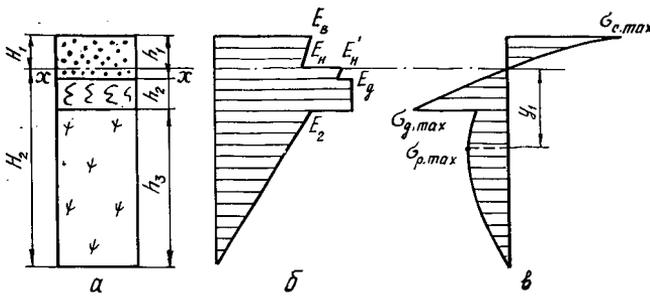


Рис. 4. Основание из минеральной насыпи, деревянного настила и мерзлого торфа: а — схема поперечного сечения; б — эпюра модулей деформаций; в — эпюра напряжений

при расположении оси по основанию настила

$$3A_1H_1^2 + 2B_1H_1^3 - 3E_d h_2^2 - 3A_2'(H_2^2 - h_2^2) - 2B_2'(H_2^3 - h_2^3) = 0; \quad (11)$$

по низу настила

$$3A_1(H_1^2 - h_2^2) + 2B_1(H_1^3 - h_2^3) + 3E_d h_2^2 - E_2 H_2^2 = 0; \quad (12)$$

по слою мерзлого торфа

$$3A_1[H_1^2 - (H_1 - h_1)^2] + 2B_1[H_1^3 - (H_1 - h_1)^3] + 3E_d[(H_1 - h_1)^2 - (H_1 - h_1 - h_2)^2] + 3A_2''(H_1 - h_1 - h_2)^2 + 2B_2''(H_1 - h_1 - h_2)^2 - E_2 H_2^2 = 0. \quad (13)$$

В уравнениях (11) — (13) обозначено:

$h_1, h_2$  — толщина насыпи и настила;  
 $H, H_1, H_2$  — толщина основания и расстояния от нейтральной оси до верха и низа основания дороги;

$$A_1 = E_b - B_1 H_1; \quad B_1 = (E_b - E_n) / h_1;$$

$$A_2' = E_2 - B_2 h_2; \quad B_2' = E_2 / (H_2 - h_2);$$

$$A_2'' = B_2'' (H - H_1); \quad B_2'' = E_1 (H - h_1 - h_2);$$

$E_b, E_n, E_2, E_d$  — модули деформации мерзлого грунта по поверхности насыпи и ее основанию; мерзлого торфа и древесины.

Некоторые результаты расчета приведены в табл. 2. Значения  $E_b$  приняты: для песка — 4 120 МПа, суглинка (супеси) — 2 880 МПа, глины — 560 МПа.

При вычислении принято  $E_1 = 480$  МПа,  $E_2 = 1 600$  МПа [2]. Модули деформации мерзлых грунтов определены по работе [5]. Для значений  $h_2$  в скобках записан номер расчетной формулы.

Нейтральная ось у насыпей большой толщины проходит по мерзлому грунту или по деревянному настилу. Например, для насыпи из песка толщиной  $h_1 = 50$  см при  $h_2 = 26,1$  см она проходит по основанию насыпи; для  $h_2 < 26,1$  см — по мерзлому грунту; при  $h_2 > 26,1$  см — по настилу.

Таблица 2

$h_1$ , см	Песок		Суглинок (супесь)		Глина	
	$E_H$ , МПа	$h_2$ , см	$E_H$ , МПа	$h_2$ , см	$E_H$ , МПа	$h_2$ , см
15	3 190	8,1 (12)	2 180	9,7 (12)	445	13,2 (12)
20	2 840	4,45 (12)	1 946	6,75 (12)	403	11,9 (12)
30	2 140	9,9 (11)	1 480	23,8 (11)	330	8,6 (12)
40	1 440	19,3 (11)	1 014	14,5 (11)	253	4,9 (12)
50	750	26,1 (11)	547	21,1 (11)	168	3,8 (11)

У насыпей небольшой толщины нейтральная ось проходит по настилу или мерзлому торфу. Так, для насыпи из песка толщиной  $h_1 = 15$  см при  $h_2 = 8,1$  см она проходит по низу настила; при  $h_2 > 8,1$  см — по настилу; при  $h_2 < 8,1$  см — по торфу.

На рис. 4, в приведена эпюра напряжений по высоте основания дороги. Они состоят из трех частей. Верхняя часть дает распределение напряжений в мерзлом грунте. Они, как правило, являются сжимающими, так как значительная часть насыпи расположена выше нейтральной оси. Средняя часть представляет собой эпюру распределения напряжений в деревянном настиле. Они, как правило, растягивающие. Нижняя часть — эпюра распределения растягивающих напряжений в мерзлом торфе. По абсолютному значению они имеют примерно такое же значение, как и в основании дороги второго типа.

Рассмотренная методика позволяет оценить распределение нормальных напряжений в основании зимних лесовозных автодорог различных конструкций на болотах. При необходимости можно качественно оценить распределение касательных напряжений, которые, как известно, достигают наибольших значений при изгибе вблизи нейтральной оси, где в основании дорог второго и третьего типа расположены слои с высокими значениями механических свойств.

Методика не дает значений напряжений, а определяет характер их распределения, в связи с чем пригодна только для сравнительного анализа конструкции дорожных оснований различных типов. Для определения расчетных значений напряжений необходимо знать радиус кривизны нейтральной оси. Во всех рассмотренных примерах  $\rho$  принято постоянным для всех типов дорог. В действительности же для дорог второго типа  $\rho$  выше, чем для первого, а для дорог третьего типа больше, чем для второго.

В общем случае значение  $\rho$  можно определить по уравнению

$$\rho = (EI)_{об}/M,$$

где  $M$  — изгибающий момент в данном поперечном сечении;  
 $(EI)_{об}$  — обобщенная жесткость плиты (балки).

С увеличением обобщенной жесткости при переходе от дорог первого типа ко второму и от второго к третьему кривизна прогибов уменьшается, а  $\rho$  — увеличивается.

Задачу по определению  $\rho$  обычно решают методами теории упругости.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / Н. А. Пузаков, И. А. Золотарь, В. М. Сиденко и др. — М.: Транспорт, 1971. — 416 с. [2]. Строительство промышленных сооружений на мерзлом торфе / С. С. Вялов, Г. Л. Каган, А. Н. Воевода, В. И. Муравленко. — М.: Недра, 1980. — 144 с. [3]. 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).

