



УДК 625.711.84

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 более 70 печатных работ в области строительства и эксплуатации зимних лесовозных дорог, механики деформируемого твердого тела.



ВЛИЯНИЕ ДЕРЕВЯННОГО НАСТИЛА НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЗИМНИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Рассмотрено влияние продольного и поперечного деревянных настилов, устраиваемых в основании зимних автомобильных дорог и повышающих их несущую способность и срок эксплуатации.

Ключевые слова: зимние автомобильные дороги, болота, расчетные схемы, расчеты.

При транспортном освоении северных регионов России и Сибири, характеризующихся значительным количеством болот и заболоченных территорий, требуется построить разветвленную сеть автомобильных дорог. Однако прокладка дорог круглогодочного действия обычно экономически не оправдана. Для снижения стоимости строительства особое внимание следует уделить временным дорогам сезонного действия (зимним), к которым относят снежные, снежно-ледяные и ледяные.

Для усиления оснований зимних дорог на средне- и сильнообводненных грунтах по поверхности болот укладывают продольный и поперечный деревянный настилы или хворостяную подушку, отсыпают насыпь из минерального грунта, а в последнее время в основании насыпи укладывают прослойку из геотекстильного синтетического материала. Поперечный и продольный настилы (слани, лежни) широко используют в лесной и болотно-таежной зонах в основании автомобильных [1] и железных [5] дорог.

Цель настоящей работы – установить влияние продольного и поперечного деревянных настилов на несущую способность зимних автомобильных дорог, устраиваемых на переходах через болота и заболоченные участки. Назначение продольного настила состоит в повышении изгибной

жесткости дорожной одежды в продольном направлении, поперечного – в поперечном, увеличение несущей способности поверхности проезжей части и формирование основания насыпи из минерального грунта.

Влияние продольного настила на несущую способность зимних дорог

Расчетная схема двухслойной дороги приведена на рис.1, а методика расчета дана в работах [3, 4]. Продольный настил представляет собой два колесопротока толщиной H_2 , суммарной шириной B_2 с модулем упругости E_d , уложенных на слой мерзлого торфа толщиной H_4 и шириной B_4 .

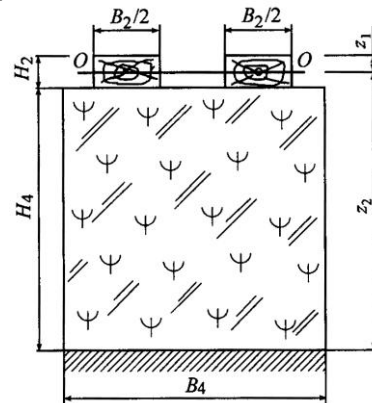


Рис. 1. Схема двухслойной дороги с продольным настилом

При расчете напряженно-деформированного состояния дорожной одежды необходимо знать положение нейтральной плоскости и эквивалентный модуль упругости. Вид расчетных уравнений зависит от того, по какому слою дорожной одежды проходит нейтральная плоскость.

1. Нейтральная плоскость проходит по настилу:

а) положение нейтральной плоскости (безразмерной величины v) определяем по формуле

$$v = \sqrt{\frac{3B_2 E_d (v_1 - v)^2 + B_4 E_{20} (1 - v)^3 - (v_1 - v)^2 (3 - v - 2v_1)}{3B_2 E_d}}; \quad (1)$$

б) эквивалентный модуль упругости

$$E_3 = \frac{1}{B} [3B_2 E_d [v^3 + (v_1 - v)^3] + B_4 E_{20} [(1 - v)^4 - (v_1 - v)^3 (4 - v - 3v_1)]]; \quad (2)$$

в) минимальная толщина дорожной одежды (максимум нормальных растягивающих напряжений находится в слое мерзлого торфа):

$$H_{\min} = \left[\frac{0,075(1 - \mu^2)(1 - v)^2 P E_{20}}{\sigma_{\text{adm}}^p B (0,3C\alpha E_3^3)^{0,25}} \right]^{0,8}. \quad (3)$$

2. Нейтральная плоскость проходит по мерзлому торфу:

а) положение нейтральной плоскости:

$$v = \sqrt{\frac{3B_2E_d(v-v_2)^2 + B_4E_{10}(v-v_2)^2(3-v-2v_2) + B_4(1-v)^3}{3B_2E_d}}; \quad (4)$$

б) эквивалентный модуль упругости:

$$E_3 = \frac{1}{B} [4B_2E_d[v^3 - (v-v_2)^3] + B_4E_{10}[(v-v_2)^3(4-v-3v_2) + B_4E_{20}(1-v)^4]]; \quad (5)$$

в) для определения минимальной толщины дорожной одежды H_{\min} используют выражение (3).

В формулах (1)–(5) обозначено:

B – эквивалентная ширина проезжей части дороги;

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

z_1 – расстояние от верха проезжей части до нейтральной плоскости, которая проходит по деревянному настилу;

z_2 – расстояние от нейтральной плоскости до талого торфа;

H – полная толщина дороги;

H_{\min} – минимальная расчетная толщина дорожной одежды;

μ – коэффициент Пуассона (для мерзлого торфа $\mu \approx 0,36$);

P – эквивалентная сила от колес автомобиля на поверхность дороги;

σ_{adm}^p – допускаемое напряжение;

C – коэффициент постели основания дороги (талого торфа);

α – коэффициент поперечного изгиба;

E_3 – эквивалентный модуль упругости;

0,075 и 0,3 – коэффициенты, выравнивающие размерности в левой и правой частях уравнения (3);

$$v = z_1/H;$$

$$v_1 = H_1/H;$$

$$v_2 = H_2/H.$$

Результаты расчетов для различных случаев положения нейтральной плоскости приведены в табл. 1. Они получены при следующих исходных данных: $E_d = 10000$ МПа; $E_{10} = 460$ МПа; $E_{20} = 1600$ МПа; $B_2 = 200$ см; $B_4 = 700$ см; $C = 3$ Н/см³; $\mu = 0,36$; $P = 165000$ Н; $\sigma_{\text{adm}}^p = 1,9$ МПа; $\alpha = 0,3$.

По данным табл. 1 отметим три частных случая.

1. Нейтральная плоскость расположена на границе между слоями, т. е. $z_1 = H_2$ и $v = v_2$. По формулам (1) или (4) получаем

$$v = \sqrt{\frac{B_4E_{20}(1-v)^3}{3B_2E_d}} = \sqrt{\frac{700 \cdot 1600(1-v)^2}{3 \cdot 200 \cdot 10000}} = \sqrt{\frac{14(1-v)^2}{75}}.$$

Применяя метод итераций, находим $v = 0,2697$.

Далее вычисляем эквивалентный модуль упругости по формулам (2) или (5), которые при $v_2 = v$ принимают вид

$$E_3 = \frac{1}{B} [4B_2E_d v^3 + B_4E_{20}(1-v)^4],$$

Таблица 1

ν_2	ν	E_3 , МПа	H , см	H_2 , см	H_4 , см	z_1 , см	z_2 , см
0	0,4620	294,5	18,6	0	18,6	8,57	9,98
0,1	0,3166	650,0	28,3	2,8	25,5	8,94	19,40
0,2	0,2756	677,0	30,3	6,1	23,9	8,34	22,00
0,2667	0,2667	679,3	31,2	8,4	22,8	8,40	22,80
0,3	0,2708	679,5	31,1	9,9	21,2	8,40	22,70
0,4	0,2805	693,6	30,1	12,0	18,0	8,40	22,70
0,6	0,3301	899,2	23,0	13,8	9,2	7,60	15,40
0,8	0,4064	1546,3	13,7	10,9	2,7	5,60	8,10
1,0	0,5000	2857,1	7,20	7,2	0	3,60	3,60

Примечание. В выделенной строке приведены результаты расчета для нейтральной плоскости.

отсюда

$$E_3 = \frac{1}{700} [4 \cdot 200 \cdot 10000 \cdot 0,2697^3 + 700 \cdot 1600 (1 - 0,2697)^4] = 679,3 \text{ МПа.}$$

2. Толщина деревянного настила равна толщине дорожной одежды, т. е. колесопродолы уложены непосредственно на поверхность талого торфа.

Здесь $H_2 = H$; $\nu_2 = 1$; $H_4 = 0$. Используя эти условия, находим:

– $\nu = 0,5$, т. е. нейтральная плоскость проходит посередине высоты деревянного настила;

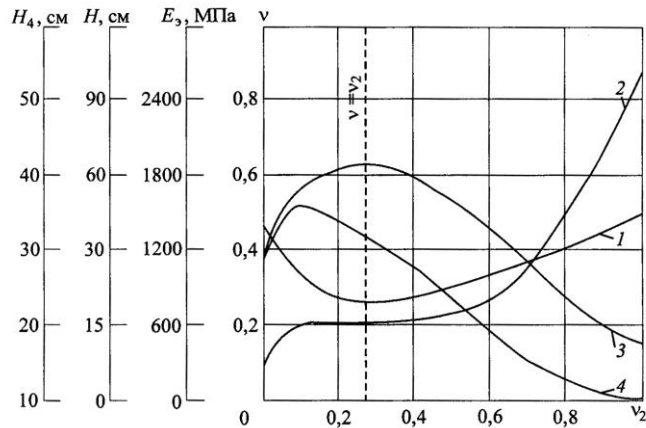
– $E_3 = 2857,14$ МПа, что меньше модуля упругости для дерева ($E_d = 10000$ МПа), так как фактическая ширина $B_2 = 200$ см была приведена к эквивалентной ширине $B = 700$ см.

3. Дорожная одежда состоит только из слоя мерзлого торфа, т. е. $H_2 = 0$. В этом случае имеем: $\nu = 0,462$; $E_3 = 294,5$ МПа.

Таким образом, расчетные данные, приведенные в табл. 1, охватывают все возможные случаи расположения нейтральной плоскости по толщине дорожной одежды, состоящей из продольного деревянного настила и мерзлого торфа.

Для наглядности построим графики основных расчетных величин при $\nu_2 = H_2/H$, т. е. в зависимости от толщины деревянного настила (рис. 2).

Кривая 1 отображает зависимость $\nu(\nu_2)$. Она имеет параболический вид с минимумом в точке $\nu = \nu_2$, т. е. при расположении нейтральной плоскости между слоями.

Рис. 2. Графики зависимости расчетных величин от v_2

Кривая 2 характеризует зависимость $E_3(v_2)$. Она состоит из двух участков. В точке $v = v_2$ находится точка перегиба. По мере увеличения относительной толщины деревянного настила v_2 значение эквивалентного модуля упругости увеличивается.

Кривая 3 отображает зависимость $H(v_2)$. Ее максимум при $v = v_2$ показывает, что при расположении нейтральной плоскости на границе между слоями толщина дорожной одежды максимальна.

Кривая 4 характеризует зависимость толщины замороженного слоя торфа H_4 от относительной толщины деревянного настила v_2 .

На участке изменения v_2 от 0,2667 до 1,0 кривые 3 и 4 подобны. Расстояние между ними равно H_2 . На участке от 0 до 0,2667 такого подобия не наблюдается. Для объяснения этой особенности необходимо дополнительно проанализировать уравнения (2), (3) и (5). Можно, однако, предположить, что на значения H и H_4 влияет величина поперечного изгиба α . На данной стадии анализа было предположено, что $\alpha = \text{const}$. На самом деле это не так, т. е. требуется выполнить более точный расчет.

Влияние продольного деревянного настила на несущую способность двухслойной дорожной одежды проявляется следующим образом: по мере увеличения толщины слоя деревянного настила (H_2) значения толщины дорожной одежды (H) и слоя мерзлого торфа (H_4) могут как увеличиваться, так и уменьшаться (рис. 3). Приведенные графики в известной

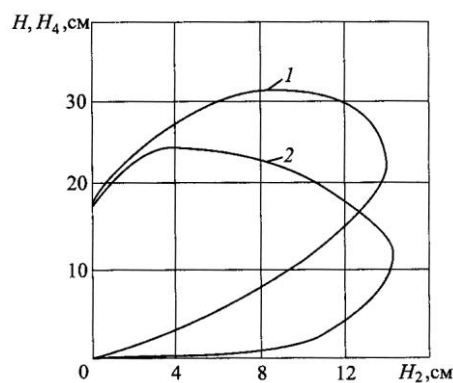
Рис. 3. Графики зависимостей: 1 – $H(H_2)$; 2 – $H_4(H_2)$

Таблица 2

H_2 , см	H_3 , см		H_4 , см		H_2 , см	H , см		H_4 , см	
	min	max	min	max		min	max	min	max
0	0	18,0	0	18,0	8	9,0	31,0	1,0	23,5
2	1,5	24,0	0,1	22,5	10	12,0	32,0	2,0	21,5
4	3,5	28,0	1,0	24,5	12	17,0	30,0	4,5	18,5
6	6,0	30,0	1,0	25,0	14	24,0	24,0	11,5	11,5

степени подобны, но не являются монотонными, а представляют собой петли, т. е. при одной и той же H_2 толщины H и H_4 могут иметь два разных значения, что объясняется сложным характером взаимодействия различных факторов.

По графикам на рис. 3 составим дополнительную таблицу значений H и H_4 в зависимости от H_2 (табл. 2).

Очевидно, что при одной и той же толщине бревен настила достаточно взять минимальные значения полной толщины дорожной одежды и толщины мерзлого слоя торфа.

Для данных, рассмотренных в примере, расчетная толщина деревянного продольного настила равна 14 см. В этом случае полная толщина дорожной одежды составляет 23 см (в том числе слоя мерзлого торфа – 9 см). При $H_2 > 14$ см колесопроводы можно укладывать на слой талого торфа и движение возможно при отсутствии слоя мерзлого торфа, т. е. круглогодично.

Влияние поперечного настила на несущую способность зимних дорог

Расчетная схема приведена на рис. 4, где показано поперечное сечение двухслойной дорожной одежды. Предполагаем, что нейтральная плоскость проходит в слое мерзлого торфа. Поскольку поперечный настил не сопротивляется продольному изгибу, то можно принять $E'_d = 0$, т. е. сопротивление продольному изгибу оказывает только мерзлый торф.

Толщину поперечного деревянного настила обозначим H_3 , слоя мерзлого торфа – H_4 .

Расчетное уравнение для определения положения нейтральной плоскости имеет вид

$$3B_3 E'_d \lambda_3 + B_4 E_{10} \lambda'_4 - B_4 E_{20} \lambda''_4 = 0, \quad (6)$$

где $\lambda_3 = (v - v_3)^2 - v^2$;

$$\lambda'_4 = (v - v_3)^2 (3 - v - 2v_3);$$

$$\lambda''_4 = (1 - v)^3.$$

Подставим выражения для λ в уравнение (6). Учитывая, что $E'_d = 0$, получаем

$$B_4 E_{10} (v - v_3)^2 (3 - v - 2v_3) - B_4 E_{20} (1 - v)^3 = 0.$$

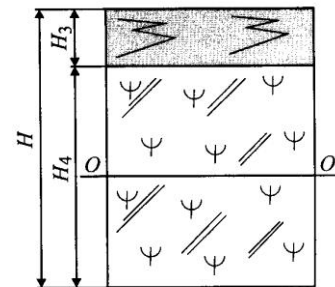


Рис. 4. Расчетная схема

Отсюда

$$v = v_3 + \sqrt{\frac{E_{20}(1-v)^3}{E_{10}(3-v-2v_3)}}. \quad (7)$$

Задавая v_3 , E_{10} и E_{20} , находим значения v из уравнения (7) по методу простых итераций.

Аналогично запишем уравнение для определения эквивалентного модуля упругости:

$$E_3 = \frac{1}{B} (B_3 E'_d \gamma_3 + B_4 E_{10} \gamma'_4 + B_4 E_{20} \gamma''_4), \quad (8)$$

где $\gamma_3 = v^3 - (v - v_3)^2$;

$$\gamma'_4 = (v - v_3)^2 (4 - v - 3v_3);$$

$$\gamma''_4 = (1 - v)^4;$$

$$v_3 = H_3 / H.$$

Подставим эти выражения в уравнение (8). Полагая $E'_d = 0$ и выполняя другие преобразования, получаем

$$E_3 = E_{10}(v - v_3)^3 (4 - v - 3v_3) + E_{20}(1 - v)^4. \quad (9)$$

Для определения H_{\min} используем полученное ранее выражение (3):

$$H_{\min} = \left[\frac{0,075(1 - \mu^2)(1 - v)^2 P E_{20}}{[\sigma_2] B (0,3 C \alpha E_3)^{0,25}} \right]^{0,8}. \quad (10)$$

Уравнения (8)–(10) позволяют определить несущую способность двухслойных зимних дорог, верхний слой которых представляет собой поперечный деревянный настил, нижний – мерзлый торф.

В формулу (10) входит расчетная величина α . Для ее определения необходимо произвести расчет вспомогательной балки, поперечное сечение которой показано на рис. 5. Оно состоит из продольного настила и слоя мерзлого торфа. Подробная методика такого расчета приведена выше. Согласно ей находим положение нейтральной плоскости, т. е. величину v' , эквивалентный модуль упругости E_3 , а затем коэффициент поперечного изгиба α .

Приведем пример расчета при следующих исходных данных: $E_{10} = 460$ МПа; $E_{20} = 1600$ МПа; $\mu = 0,36$; $[\sigma_2] = 1,9$ МПа; $P = 165000$ Н; $B = 700$ см; $C = 3$ Н/см³; $\alpha = 0,6$. Результаты расчета даны в табл. 3.

Анализ результатов расчета. 1. В первой строке табл. 3 приведены расчетные величины при $v_3 = 0$. Если поперечный настил отсутствует,

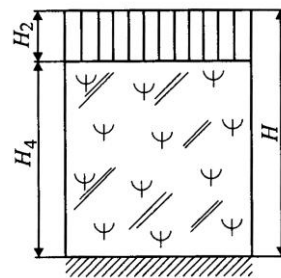


Рис. 5. Поперечное сечение балки

v_3	Расчетные показатели							
	ν	E_3 , МПа	H_3 , см	H_3 , см	H_4 , см	z_1 , см	z_2 , см	y_{\max} , см
0	0,462	294,5	27,0	0	27,0	12,5	14,5	7,26
0,2	0,570	120,6	32,3	6,46	25,8	18,4	13,9	6,96
0,4	0,677	38,2	40,6	16,25	24,4	27,5	13,1	6,56
0,6	0,784	7,5	56,2	33,70	22,5	44,1	12,1	6,05
0,8	0,892	4,7	73,1	58,48	14,6	65,2	7,9	3,95

имеем однослойную дорогу из мерзлого торфа. В этом случае значения расчетных величин совпадают с результатами расчетов, полученными ранее для однослойной дороги при тех же самых исходных данных [2].

2. При увеличении v_3 , т. е. при укладке поперечного настила различной толщины H_3 , одновременно уменьшается расчетная величина слоя мерзлого торфа H_4 . Это приводит к уменьшению эквивалентного модуля упругости. Полная толщина дорожной одежды H с возрастанием H_3 и рабочая толщина слоя мерзлого торфа H_4 , создающая основное сопротивление изгибу поперечного настила, уменьшаются.

3. В табл. 3 приведены максимальные значения z_1 , z_2 , y_{\max} . Можно отметить, что при любой толщине поперечного бревенчатого настила максимальные растягивающие напряжения приходятся на слой мерзлого торфа, т. е. применение формулы (3) для определения величины H является оправданным.

4. На рис. 6 даны схемы поперечных сечений дорожной одежды для различных расчетных случаев. Рисунок наглядно демонстрирует зависимость толщины H_4 слоя мерзлого торфа от толщины поперечного настила H_3 . С увеличением H_3 значение H_4 сохраняется, но одновременно возрастает толщина дорожной одежды H .

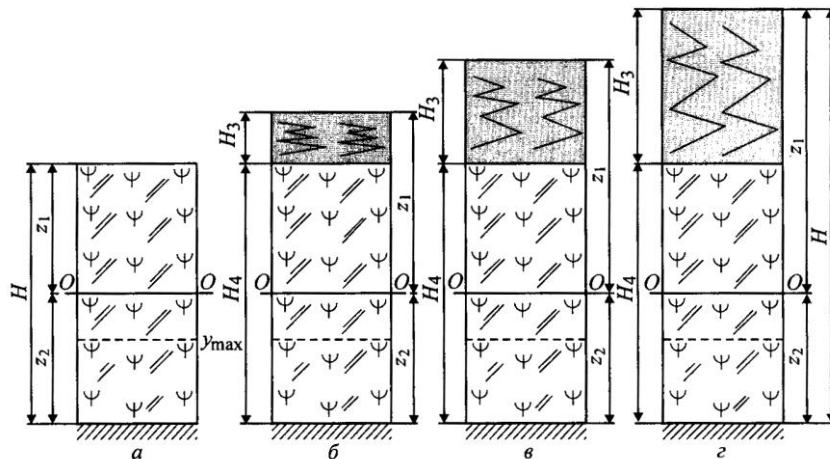


Рис. 6. Схемы поперечных сечений двухслойных дорожных одежд:

$$a - v_3 = 0; \quad b - v_3 = 0,2; \quad v - v_3 = 0,3; \quad z - v_3 = 0,4$$

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

Влияние поперечного настила на несущую способность зимних дорог на болотах не является эффективным. Поперечный настил в основном увеличивает конструктивную жесткость дорожной одежды, продольный настил – продольную жесткость.

Несущая способность зимних дорог, состоящих из продольного настила и слоя мерзлого торфа, определяется преимущественно прочностью настила, так как на практике обычно $\sigma_{\max}^{\text{д}} > \sigma_{\text{adm}}^{\text{д}}$. Это условие имеет место при толщине настила ≤ 10 см. При толщине настила ≥ 20 см и достаточно большой толщине мерзлого слоя торфа выполняется условие $\sigma_{\max}^{\text{д}} < \sigma_{\text{adm}}^{\text{д}}$, т. е. излома лежней не будет.

С увеличением ширины настила нормальные напряжения $\sigma_{\max}^{\text{д}}$ уменьшаются, что также способствует повышению несущей способности дорожной одежды.

Максимальное напряжение в мерзлом торфе существенно зависит от толщины настила. При $H_3 = 5 \dots 10$ см нормальные напряжения для слоя мерзлого торфа толщиной менее 40 см больше допустимых значений, т. е. укладка настила не повышает несущей способности дорожной одежды. При $H_3 \geq 20$ см толщина слоя мерзлого торфа не ограничивает применения зимних дорог ($\sigma_{\max}^{\text{т}} \leq \sigma_{\text{adm}}^{\text{т}}$).

Несущая способность зимних дорог на болотах, состоящих из деревянного лежневого настила и слоя мерзлого торфа, лимитируется прочностью деревянного настила.

Для уменьшения напряжений в настиле можно увеличить не только толщину, но и ширину настила. При изменении этих характеристик выполняется условие $\sigma_{\max}^{\text{д}} < \sigma_{\text{adm}}^{\text{д}}$, но это сопряжено с повышенным расходом древесины.

Укладка поперечного настила приводит к увеличению коэффициента поперечного изгиба α , что позволяет уменьшить $\sigma_{2\max}$ и $\sigma_{\max}^{\text{т}}$ в зависимости от толщины поперечин и расстояния между ними. Она особенно заметна при малых толщинах слоя мерзлого торфа.

Таким образом, укладка продольного и поперечного настила незначительно повышает несущую способность зимней дороги. Однако такую конструкцию следует рассматривать как временную, так как она не обеспечивает существенного повышения долговечности дороги в осенний и весенний периоды эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Евгеньев, И.Е.* Строительство автомобильных дорог через болота [Текст] / И.Е. Евгеньев. – М.: Транспорт, 1968. – 219 с.
2. *Морозов, В.С.* Расчет толщины зимних лесовозных дорог на болотах [Текст] / В.С. Морозов // Лесн. журн. – 1991. – № 3. – С. 48–52. – (Изв. высш. учеб. заведений).

3. *Морозов, В.С.* Расчет и проектирование оснований зимних дорог на болотах [Текст]: учеб. пособие / В.С. Морозов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 1999. – 236 с.

4. *Морозов, В.С.* Рекомендации по применению сезонных зимних лесовозных дорог на болотах [Текст] / В.С. Морозов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2000. – 124 с.

5. *Шахуняни, Г.М.* Земляное полотно железных дорог [Текст] / Г.М. Шахуняни. – М.: Трансжелдориздат, 1963. – 327 с.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 04.02.03

V.S. Morozov

Wood Deck Effect on Bearing Capacity of Winter Motor Roads

Effect of lengthwise and cross wood decks settled in the winter motor roads' base and enhancing their bearing capacity and operation life is considered.

