

УДК 625.731.001.24

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.128

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПОПЕРЕЧНОГО ИЗГИБА ОСНОВАНИЙ ЗИМНИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ЗАБОЛОЧЕННЫХ ГРУНТАХ

В.С. Морозов, д-р техн. наук, проф.

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 22, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: v.morozov@narfu.ru

На обширных северных территориях Европейской России и Западной Сибири располагается значительная часть природных ресурсов: лес, нефть, газ и др. Освоение этих территорий затруднено в связи со слабым развитием транспортной сети и сильной степенью заболоченности, достигающей 55...70 %. Поэтому при освоении этих регионов особое внимание уделяется зимним автомобильным дорогам. Соблюдение определенных правил и технологии строительства дает возможность реализовать преимущества зимних дорог. Ввод их в эксплуатацию осенью сдерживается наличием незамерзших участков на переувлажненных заболоченных грунтах и болотах. Правильный выбор конструкции дорожной одежды и технико-экономическая обоснованность позволяют увеличить срок службы зимних дорог на болотах в соответствии с запланированными объемами вывозки древесины и улучшить их состояние. С помощью данных мероприятий и использования специальных методов расчета на прочность можно определить наименьшую толщину дорожного покрытия (слоя мерзлого торфа) для проезда транспортных средств и повысить сохранность дорог. Показано, что напряженно-деформированное состояние дорожной одежды зимних дорог и грунтовых массивов существенно отличаются. Зависимость механических свойств массива мерзлого торфа от температуры и изменение его размеров в основании дороги приводит к возникновению разных показателей механических свойств в отдельных точках массива. Слой мерзлого торфа на слое талого торфа прогибается как единое целое и в этом смысле аналогичен тонкой плоской плите. Установлено, что при симметричной нагрузке эпюры прогибов и напряжений в поперечном сечении дороги также симметричны, но при асимметричной нагрузке имеет место перекося полотна дороги. Для учета поперечного изгиба в расчеты введен коэффициент поперечного изгиба α . Приведены методика его определения и пример расчета.

Ключевые слова: напряжения, деформации, болото, торф, расчеты на прочность, поперечный изгиб.

Введение

Мерзлый торф (МТ) в качестве дорожно-строительного материала обладает двумя основными особенностями, которые отличают его от других распространенных материалов (супесь, песок, глина и др.). Первая заключается в том, что основные механические характеристики деформационных

Для цитирования: Морозов В.С. Особенности расчета поперечного изгиба оснований зимних автомобильных дорог на заболоченных грунтах // Лесн. журн. 2018. № 6. С. 128–137. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.128

свойств МТ (модуль упругости и прочность) существенно зависят от его температуры, влажности и продолжительности действия внешней (подвижной) нагрузки. Еще одна его особенность – МТ является разномодульным телом, которое во время сжатия проявляет свойства, присущие пластичному телу, при растяжении – хрупкому. Следовательно, при разработке методики расчета оснований зимних дорог на прочность и оценки их несущей способности необходимо учитывать основные механические характеристики деформационных свойств МТ, которые, в свою очередь, зависят от вида нагружения (растяжения или сжатия).

Известно, что процессы ползучести МТ при воздействии на дорогу кратковременной подвижной нагрузки (автопоезд) выражены слабо. Следовательно, МТ можно рассматривать как упругое тело [5]. В большинстве расчетов на прочность допускается использовать методы теории упругости. В этом случае механические свойства будут характеризоваться модулем упругости и коэффициентом Пуассона (коэффициентом поперечной деформации α).

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является основание автомобильной дороги из МТ.

В настоящее время для оценки проезжаемости зимних автомобильных дорог на болотах в осенне-весенний период не существует достаточно полной методики расчета.

За основу расчетной схемы можно взять основание зимних дорог, проложенных на болотах, и представить его длинной плитой из МТ, лежащей на линейно-деформируемом основании из талого торфа (рис. 1).

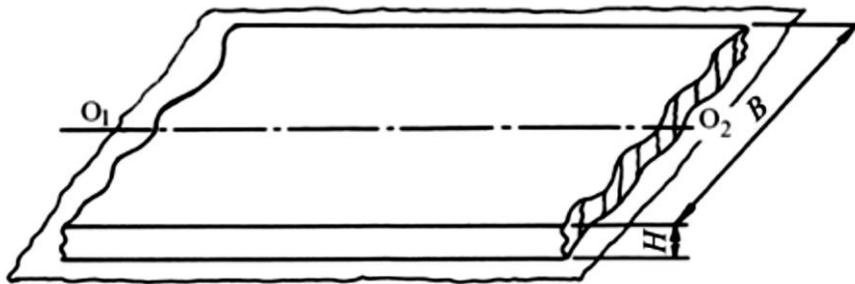


Рис. 1. Основание дороги из МТ в качестве плиты: B – ширина; H – толщина

Fig. 1. Road base made of frozen peat as a slab: B – width; H – thickness

Действие внешней нагрузки от автопоездов оказывает на плиту продольные и поперечные деформации (рис. 2).

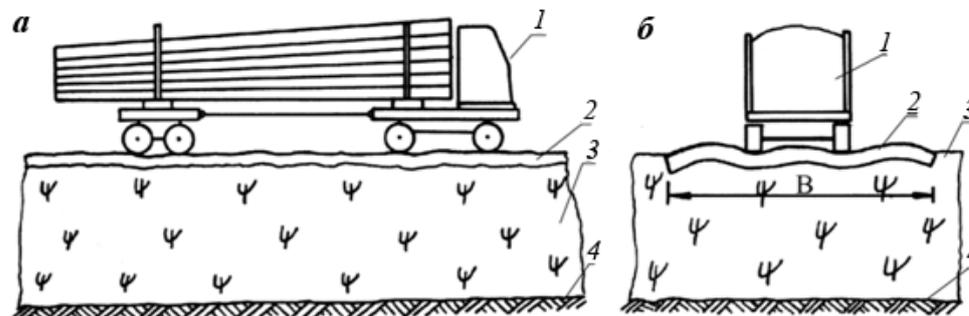


Рис. 2. Изгиб плиты при движении автомобиля по зимней дороге в продольном (а) в поперечном (б) направлениях: 1 – автопоезд; 2 – нагруженная плита из МТ; 3 – талый торф; 4 – дно болота, представленное минеральным основанием

Fig. 2. Slab bending during vehicle moving on a winter road in the longitudinal (a) and cross (b) directions; 1 – road train; 2 – loaded slab made of frozen peat; 3 – thawed peat; 4 – swamp floor represented by mineral base

На переходах через болота и на заболоченных участках прочность основания зимних дорог во многом зависит от его деформации. При движении транспортного средства происходит изгиб плиты в продольном и поперечном направлениях. Поперечный изгиб плиты не учитывается.

Основание зимних дорог на болотах состоит в большинстве случаев из слоя МТ на слое талого торфа. Для повышения несущей способности дорожную одежду усиливают укладкой сплошного поперечного и продольного настила из хлыстов или бревен. Поверх настила насыпают слой минерального грунта, укладывают порубочные остатки и т. д.

В случае движения автомобиля вдоль оси дороги с симметричной загрузкой колес по обеим сторонам изгиб плиты в поперечном направлении будет одинаковым [11]. При смещении автопоезда к краю дороги наблюдается скручивание плиты, что делает ее напряженно-деформированное состояние еще более сложным (рис. 3).

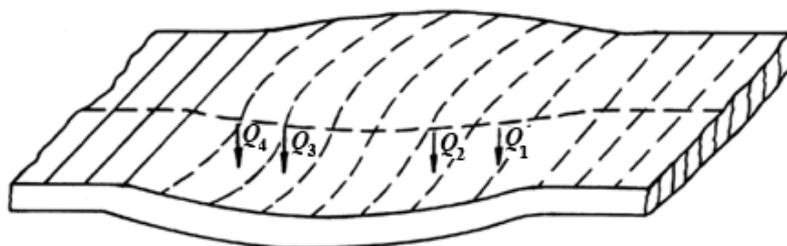


Рис. 3. Схема скручивания плиты от движения автопоезда при смещении от оси дороги

Fig. 3. Scheme of slab twisting from road train movement off a road baseline

Прочностные свойства оснований зимних дорог в условиях болотистой местности зависят от наименьшей толщины слоя МТ, который обеспечивает движение транспортных средств.

При построении расчетной схемы дороги произведем замену плиты балкой высотой H и шириной B эквивалентной жесткости (E_3), лежащей на

линейно-деформируемом основании из талого торфа и воспринимающей внешнюю нагрузку от транспортных средств [7, 12]. Тогда от двухосной (плоской) задачи можно перейти к одноосной (линейной). Использование коэффициента поперечного изгиба α позволяет учесть влияние поперечного изгиба плиты. В этом случае становится возможным одновременно рассматривать продольный и поперечный изгибы.

Для лесовозных дорог внешней нагрузкой является автопоезд (рис. 4, *a*).

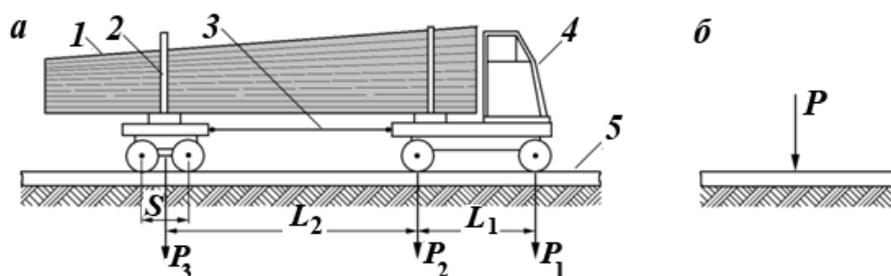


Рис. 4. Схема расчета внешней нагрузки: *a* – автопоезд; *b* – схема приложения силы; 1 – груз; 2 – полуприцеп-ропуск; 3 – дышло; 4 – автомобиль-тягач; 5 – дорога

Fig. 4. Scheme for calculation of external load: *a* – road train; *b* – scheme of calculated force application; 1 – cargo; 2 – semitrailer pole carriage; 3 – draft pole; 4 – towing truck; 5 – road

Из представленной схемы видно, что на дорогу в вертикальном направлении воздействуют следующие нагрузки: P_1 и P_2 – оказывают давление на задний и передний мосты автомобиля; P_3 – на мост прицепа-ропуска. Так как нагрузки P_1 и P_2 существенно меньше P_3 , а расстояние L_2 достаточно велико по сравнению с базой автомобиля-тягача L_1 , то за расчетную нагрузку принимаем силу P , которая будет равна P_3 (рис. 4, *b*). Сила P оказывает прямое воздействие на балку, которая лежит на линейно-деформируемом основании.

Если основание охарактеризовать с помощью коэффициента постели C , то решение данной задачи, связанное с изгибом балки, будет известно [1, 2, 10]. Таким образом можно определить параметры напряжения и деформации балки, требуемые поперечные размеры плиты при заданных допустимых напряжениях на растяжение для МТ.

Однако данная расчетная схема является условной. Представленная плита не является балкой и может испытывать изгиб как вдоль, так и поперек оси дороги (см. рис. 2). Пренебрежение поперечным изгибом может привести к большим погрешностям и ошибкам в расчетах. Воспользуемся методикой решения задачи по расчету, аналогичному расчету железнодорожного пути [3, 4, 8].

Выполняя расчет нужно учитывать продольный (рельсы) и поперечный (шпалы) изгиб, т. е. рельсо-шпальная решетка изгибается в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Аналогичную деформацию испытывает и плита из МТ, поэтому при ее расчете применим ту же методику, что и для рельсо-шпальной решетки [9].

При расчете на прочность поперечный изгиб рельсо-шпальной решетки учитывается коэффициентом поперечного изгиба α , который определяется

как отношение среднего прогиба по длине балки $\omega_{\text{ср}}$ к его максимальному значению ω_{max} :

$$\alpha = \omega_{\text{ср}} / \omega_{\text{max}}.$$

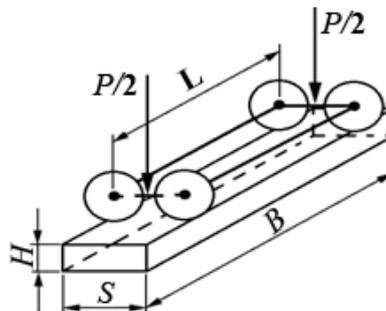
За расчетный элемент, который имитирует шпалу (брус) при расчете плиты из МТ, принимаем участок дороги, расположенный между колесами прицепа (рис. 5) и имеющий следующие размеры: B – длина бруса, равная ширине проезжей части дороги; H – толщина бруса, равная толщине слоя МТ; S – поперечная ширина, равная расстоянию между осями тележки прицепа (для заднего моста, состоящего из одной оси) [9].

Поперечную ширину находим по формуле

$$S = D = 1,08\sqrt{P/P_0},$$

где D – диаметр круга, равный площади отпечатка колеса; P – прилагаемая к колесу нагрузка; P_0 – внутреннее давление, возникающее в шине.

Рис. 5. Расчетный брус
Fig. 5. Calculated beam



На брус действуют две силы $P = P_3/2$, расстояние между которыми составляет L (ширина колеи полуприцепа). Методика расчета прогибов бруса конечной длины, лежащего на линейно-деформируемом основании с коэффициентом постели C , для расчетной схемы на рис. 6 приведена в [6].

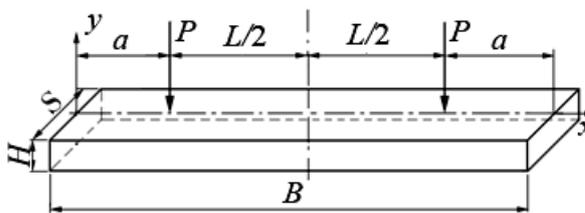


Рис. 6. Расчетный брус (где $a = (B - L)/2$)
Fig. 6. Calculated beam (where $a = (B - L)/2$)

Результаты исследования и их обсуждение

Для снижения трудоемкости вычислений на ЭВМ при расчете коэффициента α была составлена программа, состоящая из следующих блоков:

1. Вычисление основных расчетных величин:

$$U = CS; \quad k = \sqrt[4]{\frac{3C}{EH^3}}; \quad I = \frac{SH^3}{12},$$

где U – модуль упругости основания; C – коэффициент постели основания; S – расчетная ширина балки; k – коэффициент относительной жесткости плиты и основания балки; E – эквивалентный модуль упругости основания; H – толщина балки; I – момент инерции поперечного сечения бруса при его изгибе.

2. Вычисление гиперболических функций:

$$\begin{aligned} sh\left(\frac{kB}{2}\right) &= \frac{\left(e^{\frac{kB}{2}} - e^{-\frac{kB}{2}}\right)}{2}; \\ sh\left(\frac{kL}{2}\right) &= \frac{\left(e^{\frac{kL}{2}} - e^{-\frac{kL}{2}}\right)}{2}; \\ ch\left(\frac{kB}{2}\right) &= \frac{\left(e^{\frac{kB}{2}} + e^{-\frac{kB}{2}}\right)}{2}; \\ ch\left(\frac{kL}{2}\right) &= \frac{\left(e^{\frac{kL}{2}} + e^{-\frac{kL}{2}}\right)}{2}. \end{aligned}$$

3. Вычисление фундаментальных функций:

$$\begin{aligned} Y_1 &= \cos\left(\frac{kB}{2}\right) ch\left(\frac{kB}{2}\right); \quad V_1 = \cos\left(\frac{kL}{2}\right) sh\left(\frac{kL}{2}\right); \\ Y_2 &= \left[\sin\left(\frac{kB}{2}\right) ch\left(\frac{kB}{2}\right) + \cos\left(\frac{kB}{2}\right) sh\left(\frac{kB}{2}\right)\right] / 2; \\ Y_3 &= \sin\left(\frac{kB}{2}\right) sh\left(\frac{kB}{2}\right); \quad V_1 = \sin\left(\frac{kL}{2}\right) sh\left(\frac{kL}{2}\right); \\ Y_4 &= \frac{\left[\sin\left(\frac{kB}{2}\right) ch\left(\frac{kB}{2}\right) - \cos\left(\frac{kB}{2}\right) sh\left(\frac{kB}{2}\right)\right]}{4}. \end{aligned}$$

4. Вычисление прогибов $y(0)$ и углов поворота $y'(0)$ на левом конце балки (начальные условия):

$$\begin{aligned} y(0) &= -\frac{kP}{U} \frac{Y_1 V_1 + 4Y_3 V_3}{Y_1 Y_2 + 4Y_3 Y_3}; \\ y'(0) &= -\frac{4k^2 P}{U} \frac{Y_2 V_3 - Y_4 V_1}{Y_1 Y_2 + 4Y_3 Y_3}. \end{aligned}$$

5. Вычисление прогибов балки в отдельных ее сечениях:

$$y(kx) = Y_1(kx)y(0) + Y_2(kx)\frac{y'(0)}{k} - \frac{P}{k^3 EI} Y_4[k(x-a)].$$

Начальное значение x равно нулю, конечное – B , шаг вычислений ординат $y - \Delta x$. По мере вычисления $y(x)$ ЭВМ формирует массив значений y , находит максимальное значение ординаты прогибов y_{\max} , среднее значение $y_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n y_i/n$ (где n – число ординат) и значения α .

Результаты вычисления коэффициента α для частных случаев приведены в таблице и проиллюстрированы на рис. 7.

Для составления таблицы необходимо было знать изменение температуры (Θ) МТ на поверхности проезжей части, коэффициент постели (C) и ширину проезжей части (B).

Зависимость коэффициента поперечного изгиба α от различных факторов

Θ , °C	E_3 , МПа	Значения α при ширине дороги B , см			
		300	500	700	900
$C = 5 \text{ Н/см}^3$					
-1	258,0	0,530	0,391	0,253	0,200
-5	294,5	0,625	0,436	0,310	0,244
-10	284,4	0,654	0,462	0,330	0,259
$C = 3 \text{ Н/см}^3$					
-1	258,0	0,418	0,274	0,193	0,154
-5	294,5	0,499	0,334	0,236	0,186
-10	284,4	0,526	0,356	0,251	0,199
$C = 1 \text{ Н/см}^3$					
-1	258,0	0,380	0,243	0,173	0,138
-5	294,5	0,446	0,294	0,208	0,165
-10	284,4	0,470	0,313	0,221	0,175

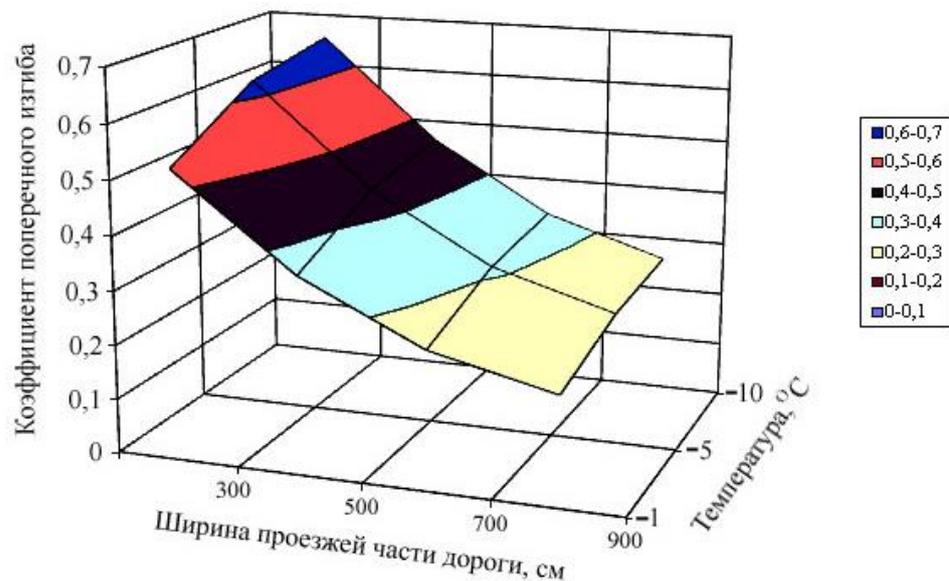


Рис. 7. График распределения коэффициентов поперечного изгиба α при коэффициенте постели $C = 5 \text{ Н/см}^3$

Fig. 7. Distribution graph of cross bending coefficients α at coefficient of soil reaction $C = 5 \text{ Н/см}^3$

Коэффициент постели зависит от типа болота [3]. Для первого типа болота $C = 5 \text{ Н/см}^3$; для второго – 3 Н/см^3 ; для третьего – 1 Н/см^3 .

Значения эквивалентного модуля упругости E_3 определяли по методике, приведенной в работе [6].

Выводы

Прочность дорожной одежды повышается в зависимости от коэффициента поперечного изгиба α . Он максимален при $C = 5 \text{ Н/см}^3$ (для болота первого типа), $\Theta = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ и ниже, $B = 300 \text{ см}$ (см. таблицу).

Значения коэффициента α снижаются по мере увеличения ширины дороги B (при прочих равных условиях).

Знание коэффициента поперечного изгиба α позволяет определить коэффициент относительной жесткости дорожной одежды и основания дороги:

$$k = \sqrt[4]{\frac{0,3C\alpha}{E_3 H^3}},$$

где C – коэффициент постели основания дорожной одежды, зависящий от типа болота, Н/см^3 ; α – коэффициент поперечного изгиба; E_3 – эквивалентный модуль упругости дорожной одежды, МПа; H – толщина дорожной одежды, см.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вайнгольц А.И.* Прогноз несущей способности двухслойного основания на основе результатов анализа его напряженного состояния: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2014. 24 с.
2. *Микеладзе Ш.Е.* Некоторые задачи строительной механики. М.; Л.: Гостехиздат, 1948. 268 с.
3. *Морозов С.И.* О расчете устойчивости рельсо-шпальной решетки // Лесн. журн. 1974. № 2. С. 45–50. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. *Морозов С.И.* О критерии устойчивости железнодорожного пути // Тр. АЛТИ. Вып. XXVIII: Исследования по механизации лесоразработок и транспорту леса. Архангельск, 1971. С. 60–67.
5. *Морозов В.С.* Расчет и проектирование оснований зимних дорог на болотах: учеб. пособие. Архангельск: АГТУ, 1999. 235 с.
6. *Морозов В.С.* Расчет на прочность оснований зимних дорог на заболоченных грунтах // Лесн. журн. 2012. № 6. С. 58–65. (Изв. высш. учеб. заведений).
7. *Шапошников Н.А.* Вероятностный расчет балки на неоднородно деформируемом основании на действие динамической нагрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2013. 25 с.
8. *Шахуньянц Г.М.* Путь и путевое хозяйство: учеб. пособие. М.: Трансжелдориздат, 1949. 632 с.
9. *Шахуньянц Г.М.* Железнодорожный путь: учеб. для студентов и аспирантов вузов железнодорожного транспорта. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Транспорт, 1987. 479 с.
10. *Янковский Л.А.* К расчету круглой плиты на двухслойном упругом основании // Строительная механика и расчет сооружений. 1963. № 1. С. 44–45.
11. *Frejaques J.L.* Construction de routes sur terrains compressibles // Revue générale des routes et des aérodromes. 1977. N. 535. Pp. 11–15, 85–86.
12. *Lutz E.* Dammbau ohne Beseitigung weicher Bodenschichten // Straßenbau – Techn. 1973. В. 26, N. 19. S. 32–34.

UDC 625.731.001.24.128

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.128

Aspects of Cross Bending Calculation for Winter Road Bases on Boggy Grounds*V.S. Morozov, Doctor of Engineering Sciences, Professor*

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

Severnoy Dviny, 22, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;

e-mail: v.morozov@narfu.ru

There is a significant part of natural resources such as forest, oil, gas, etc. in the vast northern territories of European Russia and Western Siberia. Invasion of these territories is difficult due to the poor development of the traffic network and a high degree of swampiness reaching 55–70 %. Therefore, special attention in the development of these regions is paid to winter roads. Observance of certain rules and construction technology allows realization of winter roads advantages. Putting them into operation in autumn is constrained by the presence of unfrozen road sections on water-logged boggy grounds and swamps. The right choice of road topping and technical and economic validity allow increasing lifetime of the winter roads on swamps according to the planned volumes of wood removal and improving them. It is possible to determine the smallest thickness of road pavement (layer of frozen peat) for the passage of vehicles and increase the duration of road life with the help of these measures and the use of special methods of structural analysis. It is shown that the stress-strain behavior of the winter road topping significantly differs from the soil body road topping. Dependence of mechanical properties of the frozen peat area on the temperature and change of its dimensions in the road base leads to the generation of various indicators of mechanical properties in discrete points of the area. A frozen peat layer on a thawed peat layer bends in block and in this sense it is similar to a thin flat plate. It was determined that eures of deflection and tension in the cross section of the road under the symmetrical load are also symmetrical, however, there is a roadway bowing under the asymmetrical load. Cross bending coefficient α is added into the calculations in order to take into account cross bending. Method of coefficient determination and an example of calculation are given.

Keywords: tension, deformations, swamp, peat, structural analysis, cross bending.

REFERENCES

1. Vayngol'ts A.I. *Prognoz nesushchey sposobnosti dvukhsloynogo osnovaniya na osnove rezul'tatov analiza ego napryazhennogo sostoyaniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Forecast of Load-Carrying Capability of a Double-Layer Base on the Basis of Analysis Results of Its Tension: Cand. Tech. Sci. Abs.]. Volgograd, 2014. 24 p.
2. Mikeladze Sh.E. *Nekotoryye zadachi stroitel'noy mekhaniki* [Some Tasks of Structural Mechanics]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1958. 268 p. (In Russ.)
3. Morozov S.I. O raschete ustoychivosti rel'so-shpal'noy reshetki [Buckling Analysis of a Track Panel]. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 1974, no. 2, pp. 45–50.
4. Morozov S.I. O kriterii ustoychivosti zheleznodorozhnogo puti [Criteria of Stability of a Railway Track]. *Tr. ALTI. Vyp. XXVIII: Issledovaniya po mekhanizatsii lesorazrabotok i transportu lesa* [Academic Papers of Arkhangelsk Forest Engineering Institute named after V.V. Kuibyshev. Iss. XXVIII: Research on Mechanization of Forest Exploitation and Forest Transportation]. Arkhangelsk, ALTI Publ., 1971, pp. 60–67.

For citation: Morozov V.S. Aspects of Cross Bending Calculation for Winter Road Bases on Boggy Grounds. *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2018, no. 6, pp. 128–137. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.128

5. Morozov V.S. *Raschet i proyektirovaniye osnovaniy zimnikh dorog na bolotakh: ucheb. posobiye* [Calculation and Design of Winter Road Bases on Wetlands: Educational Textbook]. Arkhangelsk, ASTU Publ., 1999. 235 p. (In Russ.)

6. Morozov V.S. Raschet na prochnost' osnovaniy zimnikh dorog na zabolochennykh gruntakh [Strength Analysis of Winter Road Bases on Boggy Grounds], *Lesnoy Zhurnal* [Forestry Journal], 2012, no. 6, pp. 58–65.

7. Shaposhnikov N.A. *Veroyatnostnyy raschet balki na neodnorodno deformiruemom osnovanii na deystviye dinamicheskoy nagruzki: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Probability Calculation of a Beam on a Heterogeneous Deforming Base to Dynamic Load: Cand. Tech. Sci. Abs.]. Volgograd, 2013. 25 p.

8. Shakhun'yants G.M. *Put' i putevoye khozyaystvo: ucheb. posobiye* [Railway Track and Track Facilities: Educational Textbook]. Moscow, Transzheldorizdat Publ., 1949. 632 p. (In Russ.)

9. Shakhun'yants G.M. *Zheleznodorozhnyy put': ucheb. dlya studentov i aspirantov vuzov zheleznodorozhnogo transporta* [Railway Track: Textbook for Students and Postgraduate Students of Higher Educational Institutions of Railway Transport]. Moscow, Transport Publ., 1987. 479 p. (In Russ.)

10. Yankovskiy L.A. K raschetu krugloy plity na dvukhsloynnom uprugom osnovanii [Calculation of a Round Plate on a Two-Layer Elastic Cushion]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Analysis of Constructions], 1963, no. 1, pp. 44–45.

11. Frejacques J.L. Construction de routes sur terrains compressibles. *Revue générale des routes et des aérodromes*, 1977, no. 535, pp. 11–15, 85–86.

12. Lutz E. Dammbau ohne Beseitigung weicher Bodenschichten. *Straßenbau – Techn.*, 1973, B. 26, N. 19, S. 32–34.

Received on June 21, 2018
