



ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 625.711.84:539.43

А.С. Миляев

С.-Петербургская государственная лесотехническая академия

Миляев Александр Сергеевич родился в 1936 г., окончил в 1959 г. Ленинградское высшее военное инженерно-техническое училище ВМФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительной механики С.-Петербургской государственной лесотехнической академии, заслуженный работник высшей школы РФ. Имеет более 150 научных работ в области механики деформируемого твердого тела, в том числе по механике силового взаимодействия конструкций и сооружений с грунтом при статических и динамических нагрузках.
E-mail: icffi@home.ru

**ПРОЧНОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ КОНСТРУКЦИЙ
ЗИМНИХ ЛЕСОВОЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Предложен новый метод расчета конструкций зимних лесовозных автомобильных дорог, базирующийся на концепции, принятой в СНиПах, и численном методе конечных элементов.

Ключевые слова: зимние лесовозные дороги, прочностные и теплотехнический расчеты, метод конечных элементов.

В соответствии с инструкцией [3] вывозку леса в зимний период, где позволяют климатические условия, следует проектировать по зимним снежным или ледяным дорогам, намечаемым для освоения участков лесного массива с неустойчивыми грунтами и болотами. В настоящее время нет нормативных документов по расчету конструкций зимних лесовозных автомобильных дорог.

В работе В.С. Морозова [6] предпринята попытка применить метод конечных элементов (МКЭ) к прочностным расчетам оснований зимних автодорог на болотах. При этом конструкция дороги представлена многослойной балкой неограниченной длины, лежащей на линейно-деформируемом основании (Винклера) и характеризуемой специально определяемым эквивалентным модулем упругости.

Мы предлагаем при проектировании и расчете конструкций зимних лесовозных автодорог использовать общепринятую в строительных нормах методологию расчета инженерных сооружений, с учетом особенностей мерзлого естественного основания, с помощью программного комплекса, реализующего МКЭ на современных персональных компьютерах [4].

Метод расчета базируется на следующей концепции [5]. Проектирование зимних дорог представляет собой единый процесс конструирования и расчета всех ее элементов, включая естественное (земляное) основание, на прочность, деформативность (жесткость) и устойчивость; расчетные схемы должны учитывать слоистость конструкции дороги, неравномерное распределение температур по глубине конструкции, возможность армирования древесными материалами; расчеты должны быть автоматизированы. Конструкции зимних автомобильных дорог по характеру деформирования и математическим моделям разделяют на две группы:

1) из слоя уплотненного снега, снегольда или льда на естественном основании из мерзлого минерального грунта, жесткость которого сравнима с жесткостью верхнего слоя. Такие конструкции рассчитывают как плиты на упругом слоистом основании (полупространстве);

2) на слабых грунтах, ледяном покрове или болотах. Конструкции таких дорог состоят из слоев мерзлого торфа, снега и льда, лежащих на поверхности воды, талого торфа или слабых грунтов, жесткость которых существенно ниже жесткости верхних слоев. Слабыми считают грунты, модуль упругости которых не превышает 5 МПа. В этом случае покрытие можно рассматривать как тонкую плиту, лежащую на линейно-деформируемом основании (Винклера).

Расчет конструкции зимней дороги объединяет две взаимосвязанные задачи:

теплотехнический расчет распределения температур по толщине конструкции, включая земляное полотно;

расчеты на прочность, жесткость (по деформациям) и устойчивость.

Основные временные подвижные и длительные статические нагрузки на покрытия зимних дорог возникают от лесовозных автопоездов и лесных гусеничных машин.

Процесс конструирования и расчета состоит из следующих этапов:

в зависимости от геолого-гидрологических и природно-климатических условий, а также конструкции дороги выбирают предельные состояния, определяющие работоспособность дороги (критерии прочности, жесткости и устойчивости);

рассчитывают силовые нагрузки, действующие на конструкцию дороги;

строят дискретную математическую модель конструкции дороги и численным методом на персональном компьютере находят параметры напряженно-деформированного состояния ее элементов при действии расчетных нагрузок;

результаты расчета сравнивают с параметрами предельных состояний конструкции дороги и в случае их несоответствия корректируют и повторяют расчеты. При этом рассматривают альтернативные варианты конструкций с их технико-экономическим обоснованием и выбирают наилучший.

Схема алгоритма расчета представлена на рис. 1.

Критерии прочности, жесткости и устойчивости конструкций зимних автодорог могут быть найдены следующим образом.

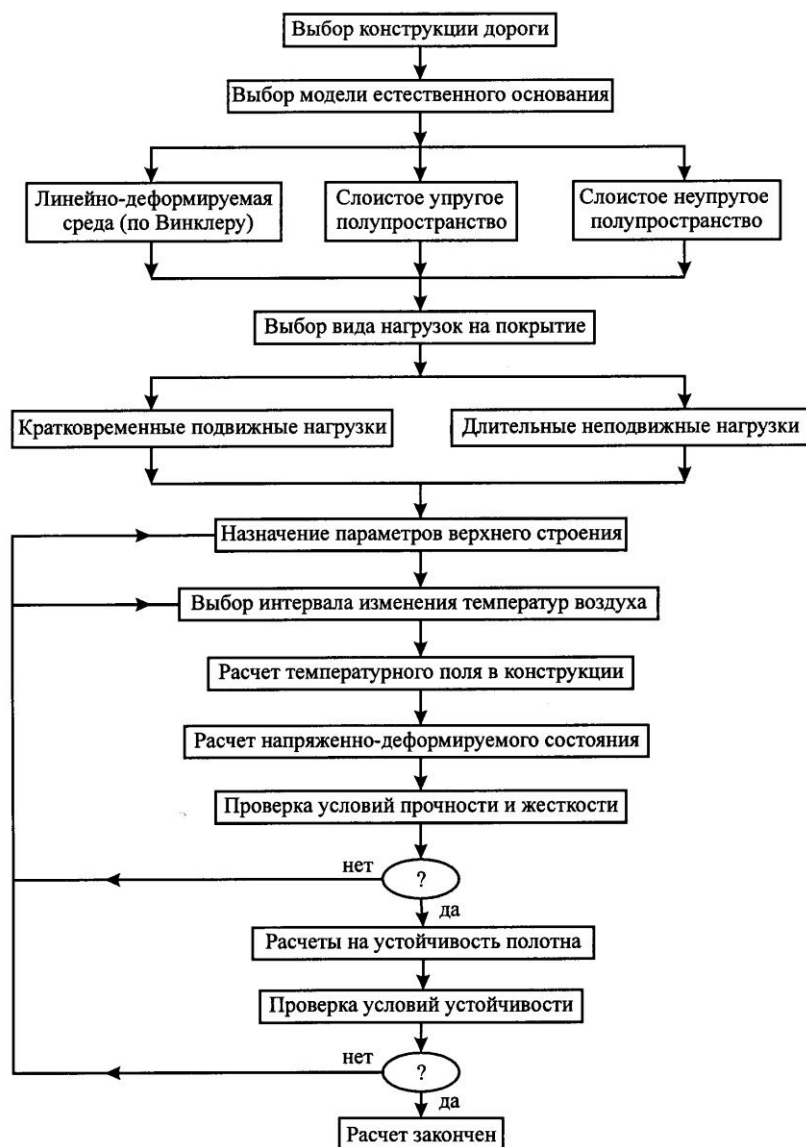


Рис. 1. Схема расчета конструкций зимних дорог

Механические характеристики (в том числе расчетные сопротивления) снега, льда и мерзлых минеральных и биогенных грунтов, служащих строительными материалами для зимних лесовозных дорог, должны быть определены в зависимости от их отрицательной температуры, полученной теплотехническим расчетом конструкции дороги.

Критерий жесткости устанавливают по данным ведомственных и отраслевых норм [1, 2, 7].

Основное аналитическое выражение, на базе которого построены нормы [1, 2, 7], связывает максимальный упругий прогиб Δ_{\max} поверхности упругого полупространства с давлением p по площади круга диаметром D и имеет вид: $\Delta_{\max} = pD(1 - \nu^2)/E$, где E , ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона полупространства. При этом неявно предполагают, что максимальный упругий прогиб Δ_{\max} заведомо меньше предельного значения для выбранного материала покрытия.

Формула для Δ_{\max} построена интегрированием по площади круга диаметром D решения задачи Буссинеска (1885г.) о напряженно-деформированном состоянии упругого полупространства при действии сосредоточенной силы на его поверхности.

Поскольку согласно нормам [1, 2, 7] давление p в шинах автотранспорта не должно превышать 0,6 МПа, а диаметр эквивалентного круга отпечатка колеса D обычно не более 0,4 м, максимальное произведение pD равно 0,24 МН/м. Тогда из формулы для Δ_{\max} вытекает однозначная связь между максимальным упругим прогибом и модулем упругости E .

В нормах [1, 2, 7] рекомендуется принимать предельные числовые значения требуемых общих модулей упругости конструкции дороги $E_{\text{тр}}$, соответствующих расчетной нагрузке от любых проходящих транспортных средств, в зависимости от категории дороги и типа покрытия, а весь расчет сводится к подбору приведенного (эквивалентного) общего модуля упругости $E_{\text{об}}$ конструкции дороги, превышающего $E_{\text{тр}}$.

В частности, для дорог V категории с переходным типом покрытия в нормах [7] рекомендуют принимать $E_{\text{тр}} = 50$ МПа. С учетом динамичности нагрузки произведение pD надо умножить на коэффициент динамичности k_d ($k_d \leq 1,3$). Тогда модулю упругости $E_{\text{тр}} = 50$ МПа при $\nu = 0,3$ соответствует максимальный упругий прогиб $\Delta_{\max} = 1,3 \cdot 0,24 \cdot 10^6 \cdot 0,91 / 50 \cdot 10^6 = 5,68$ мм, который можно принять в качестве допустимого Δ_{adm} для дорог V категории независимо от вида транспортных средств, воздействующих на покрытие дороги.

Критерий устойчивости конструкции дороги определяется предельным (разрушающим) сопротивлением мерзлых грунтов плоскостному сдвигу. Как показывают опыты, предельное сопротивление мерзлых грунтов сдвигу τ_{lim} обусловлено силами сцепления $c(-T, t)$ и внутреннего трения $\text{tg}\varphi(-T, t)p$ и при давлениях до 0,15 МПа может быть описано уравнением Кулона с переменными параметрами, зависящими от отрицательной температуры T и времени действия нагрузки t :

$$\tau_{\text{lim}} = c(-T, t) + \text{tg}\varphi(-T, t)p. \quad (1)$$

При этом чем ниже температура мерзлого грунта, тем больше его сопротивление сдвигу, возрастающее с ростом угла внутреннего трения $\varphi(-T, t)$ и сцепления $c(-T, t)$. Так, для мерзлой глины при влажности $W_{\text{sum}} = 33\%$ и температуре $T = -1$ °С угол внутреннего трения $\varphi = 14$ °, а при $T = -2$ °С имеем $\varphi = 22$ °. При температуре, близкой к 0 °С, углы внутреннего трения мерзлых и немерзлых грунтов практически равны, сцепление же значительно больше у мерзлых.

В общем сопротивлении сдвигу мерзлых грунтов сцепление составляет 60 ... 95 %, что позволяет в расчетах учитывать лишь сцепление.

Пример расчета. В качестве примера рассмотрим конструкцию зимней дороги на естественном биогенном грунте (на торфяной залежи), поперечный разрез которой представлен на рис. 2; биогенный грунт опирается на слой грунта достаточной толщины с модулем деформации более 100 МПа, так что, согласно СНиП [8], для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) биогенного грунта при действии статических нагрузок можно использовать модель линейно-деформируемого слоя (модель Винклера). По ледяному покрытию дороги движется гусеничная машина НГ-60, вызывающая наиболее опасное НДС конструкции зимней ледяной дороги.

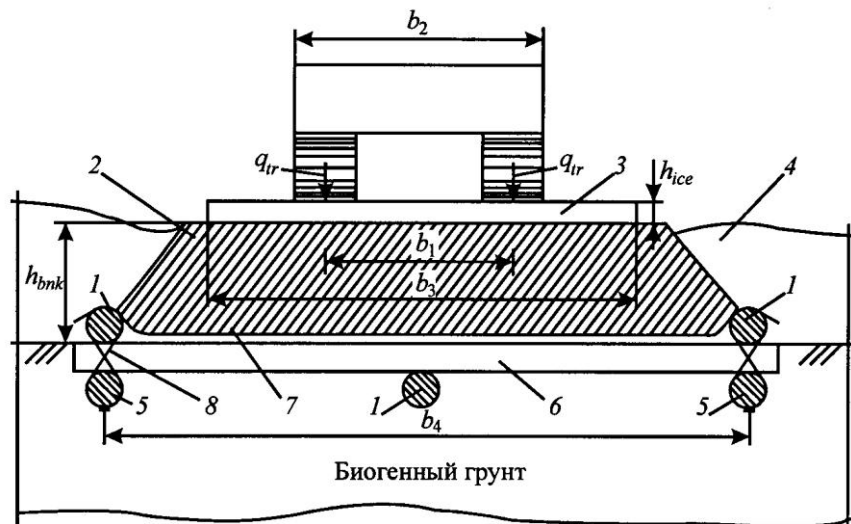


Рис. 2. Расчетная схема зимней дороги на биогенном грунте: 1 – продольные лаги-ограничители; 2 – насыпь из минерального грунта; 3 – снежно-ледяное покрытие; 4 – уплотненный снег; 5 – нижние продольные лаги; 6 – прореженный поперечный настил; 7 – геотекстильная прослойка; 8 – проволочная скрутка

На рис. 2 обозначено: q_{tr} – нагрузка от гусениц машины НГ-60, $q_{tr} = 59$ кН/м; b_1 – расстояние между гусеницами поперек дороги, $b_1 = 2,6$ м; b_2 – ширина кузова, $b_2 = 3,3$ м; b_3 – ширина снежно-ледяного покрытия, $b_3 = 6$ м; b_4 – ширина основания насыпи, $b_4 = 10$ м; h_{ice} – толщина снежно-ледяного покрытия; h_{bnk} – толщина насыпи.

Распределение температур по толщине конструкции зимней дороги на естественном биогенном грунте в период промерзания найдем из теплотехнического расчета при следующих исходных данных.

Естественное основание – заторфованный грунт, плотность в талом и мерзлом состояниях $\rho_{fnd,th} = 400$ кг/м³, суммарная влажность $W_{fnd,tot} = 200$ %,

коэффициент теплопроводности в талом состоянии $\lambda_{fnd,th} = 0,93$, мерзлом $\lambda_{fnd,fr} = 1,39$ Вт/(м·град), удельная теплоемкость в талом состоянии $c_{fnd,th} = 3,15$, мерзлом $c_{fnd,fr} = 2,28$ кДж/(кг·град); толщина слоя грунта $h_{fnd} \approx 1,5$ м.

Насыпь – песок, плотность $\rho_{bnk} = 1600$ кг/м³, суммарная влажность $W_{bnk,tot} = 20$ %, коэффициент теплопроводности в талом грунте $\lambda_{bnk,th} = 2,15$, мерзлом $\lambda_{bnk,fr} = 1,39$ Вт/(м·град), удельная теплоемкость талого грунта $c_{bnk,th} = 1,44$, мерзлого $c_{bnk,fr} = 1,34$ кДж/(кг·град); толщина насыпи $h_{bnk} \approx 0,3$ м.

Зависимость температуры воздуха от времени в течение последних пяти суток примем по графику рис. 3; глубину промерзания грунта h_{fr} на данном участке дороги будем считать равной 1,9 м; температуру грунта на этой глубине – нулю.

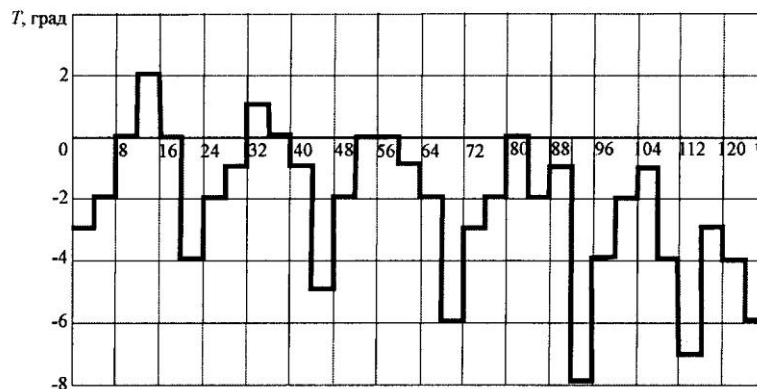


Рис. 3. Температура воздуха в течение последних пяти суток

Температура воздуха над поверхностью грунта изменяется со временем по заданному на рис. 3 закону $T_{air} = T_{air}(t)$, в среднем переходя к отрицательным значениям и вызывая замерзание слоя грунта переменной толщины $\xi = \xi(t)$, которая зависит от времени. Нижняя подвижная граница промерзшего слоя грунта S_{fr} всегда имеет температуру замерзания T_{fr} . Здесь происходит фазовое превращение поровой воды в лед, сопровождающееся выделением скрытой теплоты кристаллизации (плавления) Q_{fr} , удельное значение которой равно 335 кДж/кг. В результате на поверхности S_{fr} возникают внутренние источники тепла интенсивностью $q_V = \rho Q_{fr} W_{gr} (d\xi/dt)$, где W_{gr} – влажность грунта, $d\xi/dt$ – скорость перемещения границы S_{fr} . На поверхности S_{fr} в силу закона сохранения энергии должно быть выполнено условие сопряжения тепловых потоков:

$$A \left(\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n_1} + \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n_2} \right) = A (\rho Q_{fr} W_{gr} \frac{d\xi}{dt}), \quad (2)$$

где A – площадь поверхности S_{fr} ;

n – внешняя нормаль к этой поверхности;

1 и 2 – индексы, относящиеся к мерзлому и незамерзшему грунту.

Дифференцирование выполняют вдоль нормалей к поверхности раздела, проведенных в обе среды. На глубине $x = H$ температура грунта остается неизменной: $T(H, t) = T_H$. Распределение температуры по глубине массива $T = T(x, t)$ в любой момент времени t при известном q_V можно получить численным решением одномерного дифференциального уравнения нестационарной задачи теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q_V \quad (3)$$

в области $0 < x < H$, $0 < t < \infty$, где c , ρ , λ – коэффициенты, зависящие от координаты точки x .

Приближенно скорость перемещения $d\xi/dt$ границы S_{fr} находим из решения задачи (3), рассматривая положение границы S_{fr} в соседние моменты времени t_{i-1} и t_i способом последовательных приближений следующим образом. В нулевом приближении принимаем $q_V = 0$ и из решения уравнения (3) определяем координату ξ_0 положения поверхности S_{fr} . Тепловой поток от внутренних источников q_V через поверхность S_{fr} можно найти, используя левую часть уравнения (2):

$$q_V = A \left(\lambda_1 \frac{\Delta T_1}{\Delta x_1} - \lambda_2 \frac{\Delta T_2}{\Delta x_2} \right), \quad (4)$$

где ΔT_1 , ΔT_2 – разности температур в слоях мерзлого и незамерзшего грунта, примыкающих к поверхности S_{fr} ;

Δx_1 , Δx_2 – толщины слоев мерзлого и незамерзшего грунта.

Подставляя полученное значение q_V в уравнение (3) и решая его, определяем координату ξ_1 положения поверхности S_{fr} по истечении промежутка времени $\Delta t = t_i - t_{i-1}$; скорость перемещения $d\xi/dt$ границы S_{fr} приближенно равна $(\xi_1 - \xi_0)/\Delta t$. Тепловой поток q_V через поверхность S_{fr} далее можно найти, используя правую часть уравнения (2):

$$q_V = A[\rho Q_{fr} W_{gr} (d\xi/dt)]. \quad (5)$$

Таким же путем получаем координату ξ_2 положения поверхности S_{fr} и скорость ее перемещения $d\xi/dt$; по уравнению (5) определяем q_V и подставляем его в уравнение (3); находим координату ξ_3 и повторяем процедуру до тех пор, пока не остановится поверхность S_{fr} , т. е. не будет выполнено равенство $\xi_i = \xi_{i-1}$.

По программе ЗЕНИТ-95 [3] выполнен расчет распределения температуры по толщине конструкции зимней дороги в период ее промерзания, согласно которому грунт насыпи замерзает приблизительно к концу четвертых суток. Толщина мерзлого слоя грунта основания составляет около 0,8 м.

В качестве конечных элементов (КЭ) использован шестигранный объемный элемент с восьмью узлами. В нулевом приближении принимали, что насыпь и естественное основание находятся в талом состоянии.

При выполнении прочностных расчетов использовали следующие исходные данные. Температура воздуха над поверхностью покрытия $T_{air} = -4$ °С; насыпь – замерзшая, $T = -2$ °С; биогенный грунт основания –

замерзший на глубину 1,5 м, $T = -2$ °С. Толщина снежно-ледяного покрытия $h_{ice} = 0,1$ м; плотность $\rho_{ice} = 600$ кг/м³, модуль упругости при сжатии $E = 4700$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,5$; модуль сдвига $G = 580$ МПа; расчетные сопротивления: на растяжение при изгибе $R_{d,bi} = 1,35$ МПа, на сжатие $R_{d,c} = 2,25$ МПа, на срез $R_{d,sh} = 0,55$ МПа. Толщина мерзлой песчаной насыпи $h_{bnk} = 0,3$ м; плотность $\rho_{bnk} = 1600$ кг/м³, модуль упругости при сжатии $E = 9200$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,15$; модуль сдвига $G = 3600$ МПа; расчетные сопротивления: на растяжение при изгибе $R_{d,bi} = 0,8$ МПа, на сжатие $R_{d,c} = 9,6$ МПа, на срез $R_{d,sh} = 0,55$ МПа. Толщина слоя мерзлого биогенного грунта основания $h_{fnd} = 1,5$ м; плотность $\rho_{fnd} = 400$ кг/м³, общая влажность $W_{tot} = 400$ %, расчетные сопротивления: на растяжение $R_{dt} = 1,3$ МПа, на сжатие $R_{dc} = 2,3$ МПа.

Поперечный прореженный настил и продольные лаги изготовлены из бревен сосны диаметром 10 ... 12 см с шагом 1 м. Механические характеристики древесины: плотность $\rho_{wd} = 850$ кг/м³, модуль упругости вдоль волокон $E = 10\,000$ МПа, поперек волокон $E_{0,90} = 400$ МПа; коэффициент Пуассона поперек волокон при напряжениях, направленных вдоль волокон, $\nu_{90,0} = 0,5$, вдоль волокон при напряжениях, направленных поперек волокон, $\nu_{0,90} = 0,02$; модуль сдвига $G = 500$ МПа; расчетные сопротивления древесины 3-го сорта: на растяжение при изгибе $R_{d,b} = 10$ МПа, на сжатие $R_{d,c} = 10$ МПа, на срез $R_{d,sh} = 0,6$ МПа.

Нагрузки, действующие на конструкцию дороги: $q_{g,ice}$, $q_{g,bnk}$ – равномерно распределенная нагрузка от собственного веса покрытия и насыпи; v_{lng} – полосовая равномерно распределенная нагрузка на гусеницу машины НГ-60, равная 59 кН/м; машина располагалась посередине рассматриваемого участка дороги.

Коэффициент постели мерзлого биогенного грунта основания χ определим по закону Гука: $\chi = E_{fnd}A/h_{fnd} = 45 \cdot 1/1,5 = 30$ МН/м, где E_{fnd} – модуль упругости мерзлого торфа на сжатие при температуре -1 °С и влажности 400 %, равный 45 МПа; A – площадь участка основания насыпи, приходящейся на один узел КЭ-модели.

КЭ-модель участка дороги длиной 23 м принята состоящей из следующих элементов: снежно-ледяное покрытие – прямоугольные изгибаемые пластины; насыпь – восьмиузловые объемные элементы; естественное основание – упругие элементы; бревна поперечного и продольного настила – балочные элементы.

По программе ЗЕНИТ-95 выполнен расчет распределения перемещений, усилий и напряжений в элементах конструкции зимней дороги на биогенном грунте при статическом действии гусеничной нагрузки.

Деформированная КЭ-модель верхней части конструкции зимней дороги на биогенном грунте при действии НГ-60 представлена на рис. 4. Вертикальные перемещения s узловых точек отмечены черными квадратами, нагрузка на узлы КЭ-модели показана стрелками. Максимальное по абсолютному значению вертикальное перемещение покрытия дороги

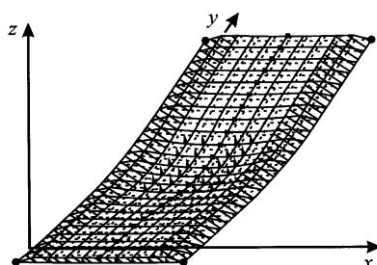


Рис. 4. Деформирование верхней части конструкции зимней дороги

$s = 0,39$ мм, что меньше допустимого упругого прогиба для дорог V категории с переходным типом покрытия $\Delta_{adm} = 5,68$ мм, следовательно, рассматриваемая конструкция зимней дороги обладает достаточной жесткостью.

Максимальные по модулю усилия и напряжения в элементах конструкции дороги и расчетные сопротивления имеют следующие значения:

снежно-ледяное покрытие (прямоугольные изгибаемые пластины): главное растягивающее напряжение $\sigma_I = 1,14$ кПа, сжимающее $\sigma_{III} = 22$ кПа; расчетные сопротивления льда на растяжение при изгибе $R_{d,bt} = 1,35$ МПа, на сжатие $R_{d,c} = 2,25$ МПа;

насыпь (восьмиузловые объемные элементы): $\sigma_I = 44$ кПа, $\sigma_{III} = 62$ кПа; расчетные сопротивления мерзлого песка на растяжение при изгибе $R_{d,bt} = 0,8$ МПа, на сжатие $R_{d,c} = 9,6$ МПа;

бревна продольного настила (балочные элементы): $N_t = 245$ Н, $N_c = 164$ Н; напряжения: $\sigma_t = 245/(3,14 \cdot 0,12^2) = 5,42$ кПа, $\sigma_c = 164/(3,14 \cdot 0,12^2) = 3,63$ кПа; расчетные сопротивления древесины на растяжение при изгибе $R_{d,bt} = 10$ МПа, на сжатие $R_{d,c} = 10$ МПа;

бревна поперечного настила (балочные элементы): наибольшая растягивающая продольная сила $N_t = 232$ Н, сжимающая $N_c = 101$ Н; напряжения: $\sigma_t = 232/(3,14 \cdot 0,12^2) = 5,13$ кПа, $\sigma_c = 101/(3,14 \cdot 0,12^2) = 2,23$ кПа; расчетные сопротивления древесины те же, что для бревен продольного настила.

Сравнивая наибольшие вычисленные напряжения в элементах конструкции дороги с расчетными сопротивлениями, заключаем, что прочность конструкции дороги обеспечена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВСН 46–83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 157 с.
2. ВСН 197–91. Инструкция по проектированию жестких дорожных одежд [Текст]. – М.: Транспорт, 1992. – 56 с.
3. ВСН 01–85. Инструкция по проектированию лесозаготовительных предприятий [Текст]. – М.: Минлесбумпром СССР, 1986. – 135 с.
4. Курков, С.В. Метод конечных элементов в задачах динамики механизмов и приводов [Текст] / С.В. Курков. – СПб.: Политехника, 1992. – 224 с.
5. Миляев, А.С. Автоматизированный расчет конструкций зимних лесовозных дорог [Текст]: учеб. пособие / А.С. Миляев. – СПб.: СПбЛТА, 2006. – 302 с.

6. Морозов, В.С. Расчет и проектирование оснований зимних дорог на болотах [Текст]: учеб. пособие / В.С. Морозов. – Архангельск: АГТУ, 1999. – 235 с.
7. ОДН 218.046–01. Проектирование нежестких дорожных одежд [Текст]. – М.: Гос. служба дорожного хозяйства Мин-ва транспорта РФ, 2001.
8. СНиП 2.02.01–83*. Основания зданий и сооружений [Текст]/ Госстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1999. – 48 с.

Поступила 04.06.07

A.S. Milyaev
Saint-Petersburg Forest-Technical Academy

Strength Design Calculations for Winter Wood Tracks by Finite Element Method

A new method of design calculation for winter wood tracks is offered based on the concept accepted by the Construction Norms and Rules and finite element method.

Keywords: winter wood tracks, strength and heat engineering calculations, finite element method.
