

Решая совместно уравнения (7) и (8) при $P_{\varphi} > F_c$, получим:

$$m < \frac{m \nu}{J} [(1 + \nu)(\varphi - f) + \nu\varphi]. \quad (9)$$

Таким образом, при импульсном движении системы масса тяговой единицы должна быть, по возможности, меньшей. Мощность двигателя при дискретном движении системы принципиально может быть весьма малой, так как в данном случае легко выполняется «золотое» правило механики: «проиграл в скорости — выиграл в силе».

Масса транспортируемого груза теоретически не ограничена, в чем легко убедиться с помощью основного закона механики:

$$m_{\text{гр}} = \frac{F_u - m(a + f_1g)}{(1 + \nu)(a + fg)}, \quad (10)$$

где F_u — усилие в гидроцилиндрах;
 a — ускорение в движении груза.

Предлагаемая нами транспортная система с успехом может быть использована для прямой вывозки леса без веток и усов в условиях делянки, для перевозки крупногабаритных грузов в условиях пустынь и полупустынь, тундры, а также при движении по ледяному и снежному покрытию. При движении по бездорожью колеса можно оборудовать гусеницей, при движении по снежной целине — санными полозьями.

Тяговые усилия в гидроцилиндрах и скорость движения системы регулируются автоматически в зависимости от качества опорной поверхности.

Поступила 8 января 1990 г.

УДК 630*383.2.001.2

О РАСЧЕТЕ НА ПРОЧНОСТЬ ОСНОВАНИЙ ЗИМНИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА БОЛОТАХ

В. С. МОРОЗОВ

СевНИИП

Участки зимних лесовозных автомобильных дорог, проходящие по болотам, имеют в основании слой мерзлого торфа, на который может быть уложен бревенчатый настил (сплошной или прореженный) и устроена насыпь из минерального грунта. Методы расчета таких оснований приведены в работах [2—4] и ряде других. Они рассматривают основание как плиту (балку), лежащую на упругом полупространстве, обладающем винклеровскими свойствами.

Существенной особенностью слоя мерзлого торфа является то, что его физико-механические свойства (в частности модуль упругости) зависят от температуры торфа [1] и вида деформации (сжатие или растяжение). Модуль упругости по глубине основания изменяется от некоторого максимального значения до величины модуля упругости талого торфа. В существующих методах расчета эта особенность учитывается приблизительно, что отражается на их точности.

Для исследования напряженно-деформированного состояния изгиба плиты (балки) с переменным модулем упругости по ее толщине необходимо знать положение нейтральной оси и характер распределения напряжений в поперечном сечении. Методика решения такой задачи рассмотрена в настоящей статье с учетом анизотропных свойств мерзлого торфа на сжатие и растяжение. При составлении расчетных зависимостей использована общепринятая гипотеза плоских сечений.

Схема поперечного сечения плиты приведена на рис. 1. Нейтральная ось $x-x$ делит сечение толщиной H на две части высотой H_1 и H_2 . Примем далее, что верхняя часть сжата, нижняя растянута. Модуль упругости сжатой части обозначим E , растянутой E' . Так же будем различать (без штриха или со штрихом) остальные характеристики для этих частей.

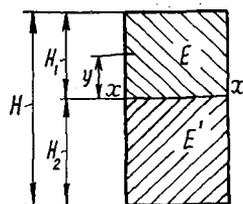


Рис. 1. Схема поперечного сечения плиты

Для линейной (по напряжениям) задачи

$$\sigma_x = E \frac{y}{\rho}, \quad (1)$$

где ρ — радиус кривизны;
 y — расстояние от нейтральной оси до произвольного волокна сечения.

Положение нейтральной оси находим из условия

$$\int_F \sigma dF = 0, \quad (2)$$

где интегрирование выполняется по всей площади поперечного сечения.

Рассмотрим общий случай, когда модуль упругости материала основания изменяется по высоте сечения по произвольному закону $E = E(v)$, который устанавливается экспериментально (рис. 2, а). Такой закон присущ мерзлым торфам в основании зимних лесовозных дорог [1]. Фактическую эпюру $E = E(v)$ аппроксимируем выражением, удобным для математического решения задачи.

В общем случае применим алгебраический полином четвертой степени вида

$$E = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3 + a_4 v^4, \quad (3)$$

где v — расстояние от волокна на поверхности балки (плиты) до произвольной точки сечения, $v = H_1 - y$;
 a_0, \dots, a_4 — коэффициенты аппроксимации.

В статье рассмотрены также линейная (рис. 2, б) и ступенчатая (рис. 2, в) аппроксимация зависимости $E = E(v)$.

Рассмотрим каждый из приведенных способов и сравним их точность на частном примере.

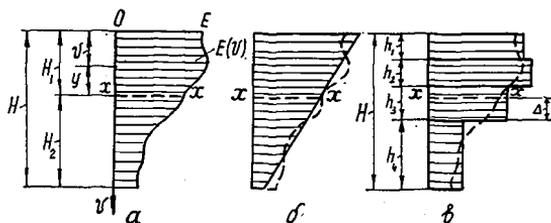


Рис. 2. Эпюры $E(v)$: а — фактическая; б — линейная аппроксимация; в — ступенчатая аппроксимация

Аппроксимация полиномом. Заменяем в выражении (3) $v = H_1 - y$ и запишем его по отдельности для сжатой и растянутой части поперечного сечения:

$$E = A_0 + A_1 y + A_2 y^2 - A_3 y^3 + A_4 y^4, \quad (4a)$$

$$E' = A'_0 - A'_1 y + A'_2 y^2 - A'_3 y^3 + A'_4 y^4, \quad (46)$$

где для сжатой части

$$A_0 = a_0 + a_1 H_1 + a_2 H_1^2 + a_3 H_1^3 + a_4 H_1^4;$$

$$A_1 = a_1 + 2a_2 H_1 + 3a_3 H_1^2 + 4a_4 H_1^3;$$

$$A_2 = a_2 + 3a_3 H_1 + 6a_4 H_1^2;$$

$$A_3 = a_3 + 4a_4 H_1^2, \quad A_4 = a_4.$$

Для растянутой части коэффициенты A'_0, \dots, A'_4 определяют по аналогичным выражениям, используя значения a'_0, \dots, a'_4 в зоне растяжений. На основании уравнения (1) имеем

$$\sigma = \frac{1}{\rho} (A_0 y - A_1 y^2 + A_2 y^3 - A_3 y^4 + A_4 y^5); \quad (5a)$$

$$\sigma' = \frac{1}{\rho} (A'_0 y - A'_1 y^2 + A'_2 y^3 - A'_3 y^4 + A'_4 y^5). \quad (5б)$$

Ввиду анизотропии уравнение (2), используемое для определения положения нейтральной оси, имеет вид

$$\int_F \sigma dF - \int_{F'} \sigma' dF' = 0,$$

а с учетом (5а) и (5б) получаем (выделяя слагаемые для сжатой и растянутой части)

$$\left(A_0 \int_0^{H_1} y dF - A_1 \int_0^{H_1} y^2 dF + A_2 \int_0^{H_1} y^3 dF - A_3 \int_0^{H_1} y^4 dF + A_4 \int_0^{H_1} y^5 dF \right) - \\ - \left(A'_0 \int_0^{H_2} y dF - A'_1 \int_0^{H_2} y^2 dF + A'_2 \int_0^{H_2} y^3 dF - A'_3 \int_0^{H_2} y^4 dF + A'_4 \int_0^{H_2} y^5 dF \right) = 0. \quad (6)$$

Интегралы, входящие в уравнение (6), представляют собой геометрические характеристики поперечного сечения. Первые два интеграла определяют статический момент и момент инерции сжатой или растянутой части сечения относительно нейтральной оси. Обозначим их соответственно S_x, S'_x, I_x и I'_x . Остальные интегралы являются новыми геометрическими характеристиками сечения. Обозначим их по порядку B_{1x}, B_{2x}, B_{3x} и, соответственно, $B'_{1x}, B'_{2x}, B'_{3x}$. При вычислении интегралов для растянутой части сечения значение H_2 должно быть отрицательным.

С учетом изложенного уравнение (6) примет вид

$$(A_0 S_x - A_1 I_x + A_2 B_{1x} - A_3 B_{2x} + A_4 B_{3x}) - \\ - (A'_0 S'_x - A'_1 I'_x + A'_2 B'_{1x} - A'_3 B'_{2x} + A'_4 B'_{3x}) = 0. \quad (7)$$

После определения положения нейтральной оси, т. е. H_1 и H_2 , с помощью уравнений (5а) и (5б) легко построить эпюры распределения напряжений по глубине основания.

Линейная аппроксимация является частным случаем параболической, поэтому расчетные выражения имеют вид: для определения напряжений

$$\sigma = \frac{1}{\rho} (A_0 y - A_1 y^2); \quad (8a)$$

$$\sigma' = \frac{1}{\rho} (A'_0 y - A'_1 y^2); \quad (8б)$$

для определения положения нейтральной оси

$$(A_0 S_x - A_1 I_x) - (A'_0 S'_x - A'_1 I'_x) = 0. \quad (9)$$

Ступенчатая аппроксимация. Расчетные зависимости для определения положения нейтральной оси зависят от значений модулей упругости отдельных слоев. Нейтральная ось может проходить по любому слою. Определяя ее положение в слое с помощью величины Δ , которая отсчитывается от его нижней границы, для схемы на рис. 2, в получим:

нейтральная ось проходит по первому слою ($0 \leq \Delta \leq h_1$):

$$(E_1 - E'_1) \Delta^2 - 2(E'_1 h_1 + E'_2 h_2 + E'_3 h_3 + E'_4 h_4) \Delta + E_1 h_1^2 - E'_2 h_2^2 - E'_3 h_3^2 - E'_4 h_4^2 - 2E'_2 h_2 h_3 - 2E'_3 h_3 h_4 = 0; \quad (10a)$$

нейтральная ось проходит по второму слою ($0 \leq \Delta \leq h_2$):

$$(E_2 - E'_2) \Delta^2 - 2(E_1 h_1 + E_2 h_2 + E'_3 h_3 + E'_4 h_4) \Delta + E_1 h_1^2 + E_2 h_2^2 - E'_3 h_3^2 - E'_4 h_4^2 + 2E_1 h_1 h_2 - 2E'_3 h_3 h_4 = 0; \quad (10б)$$

нейтральная ось проходит по третьему слою ($0 \leq \Delta \leq h_3$):

$$(E_3 - E'_3) \Delta^2 - 2(E_1 h_1 + E_2 h_2 + E_3 h_3 + E'_4 h_4) \Delta + E_1 h_1^2 + E_2 h_2^2 + E_3 h_3^2 - E'_4 h_4^2 + 2E_1 h_1 (h_2 + h_3) + 2E_2 h_2 h_3 = 0; \quad (10в)$$

нейтральная ось проходит по четвертому слою ($0 \leq \Delta \leq h_4$):

$$(E_4 - E'_4) \Delta^2 - 2(E_1 h_1 + E_2 h_2 + E_3 h_3 + E_4 h_4) \Delta + E_1 h_1^2 + E_2 h_2^2 + E_3 h_3^2 + E_4 h_4^2 + 2E_1 h_1 (h_2 + h_3 + h_4) + 2E_2 h_2 (h_3 + h_4) + 2E_3 h_3 h_4 = 0. \quad (10г)$$

Положение нейтральной оси по уравнениям (10) определяют последовательным их решением, начиная с уравнения (10а). Если значение Δ выйдет за границы диапазона $0 \leq \Delta \leq h_1$, то решают уравнение (10б) и т. д.

Напряжения в каждом слое вычисляют по уравнению (1), используя значения E для соответствующего слоя и отсчитывая координату y от нейтральной оси.

Таким образом, получены аналитические выражения, с помощью которых находят положение нейтральной оси и нормальные напряжения в поперечном сечении основания зимней дороги. Аналогично можно рассчитать касательные напряжения, но эта задача в данной статье не рассматривается.

Для слоистого дорожного основания (например минеральный грунт, настил из древесины, слой мерзлого торфа) при определении положения нейтральной оси допустимо сочетание различных способов аппроксимации эпюры $E = E(v)$.

Пример расчета. Основание зимней лесовозной дороги состоит из слоя мерзлого торфа прямоугольного поперечного сечения толщиной $H = 90$ см. Схема разбивки основания на слои с указанием их модулей упругости показана на рис. 3. Для простоты предположим, что мерзлый торф является изотропным, т. е. $E = E'$. Коэффициенты аппроксимирующих уравнений: для уравнения (3) $a_0 = 0,5472$, $a_1 = 114,0371$, $a_2 = -4,2920$, $a_3 = 0,0554$, $a_4 = -0,00024$; для линейного уравнения $a_0 = 948,7030$, $a_1 = -10,5411$.

Результаты решения: при аппроксимации уравнением (3) $H_1 = 33,53$ см, при линейном уравнении $H_1 = 30,00$ см. Для ступенчатой аппроксимации получено: по уравнению (10а) $\Delta = -10,25$ см, по уравнению (10б) $\Delta = -0,59$ см, по уравнению (10в) $\Delta = 19,41$ см. Так как в последнем случае условие $0 \leq \Delta \leq 20$ см выполняется, то нейтральная ось проходит в третьем слое и $H_1 = 30,59$ см.

Таким образом, для всех трех способов аппроксимации результаты определения H_1 близки, и можно считать, что они практически сов-

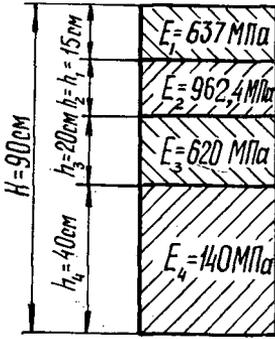


Рис. 3. Схема разбивки грунтового основания на слои

(МКЭ) с учетом зависимости модуля упругости торфа от его температуры. Этот метод не требует применения каких-либо гипотез относительно особенностей деформаций грунтового массива.

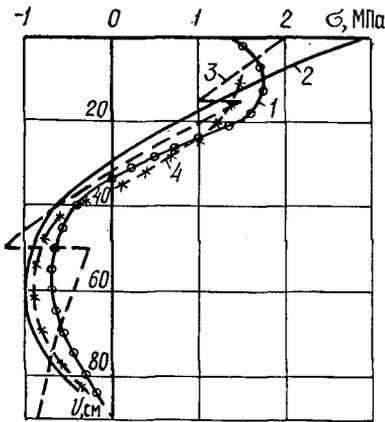


Рис. 4. Эпюры напряжений: 1 — аппроксимация полиномом; 2 — линейная аппроксимация; 3 — ступенчатая аппроксимация; 4 — метод конечных элементов

падают. Эпюры напряжений, построенные для условного радиуса кривизны $\rho = 1000$ см, приведены на рис. 4. В целом для всех способов аппроксимации эпюры имеют одинаковый качественный характер и обладают общей закономерностью. Отметим, что эпюры напряжений являются криволинейными (в одном случае ломаной), т. е. гипотеза плоских сечений в данном случае выполняется не полностью.

Напряженно-деформированное состояние оснований зимних дорог из мерзлого торфа нами было исследовано и с помощью метода конечных элементов

показали, что массив мерзлого торфа деформируется как плита (балка) на упругом основании, так как значения осадок по вертикали отдельных слоев в пределах точности расчета совпадают. На рис. 4 кривая 4 изображает эпюру напряжения σ , построенную с помощью МКЭ. Она соответствует эпюрам, полученным для модели основания дороги в виде плиты. Это также подтверждает допустимость применения постулированной выше гипотезы плоских сечений при исследовании напряженно-деформированного основания из мерзлого торфа.

Изменение деформационного состояния. Так как момент в любом поперечном сечении

$$M = \int_F y \sigma dF \quad (11)$$

или (для анизотропного материала)

$$M = \int_F y \sigma dF - \int_{F'} y' \sigma' dF', \quad (12)$$

то, используя, например, выражения (5), получим для прямоугольного поперечного сечения шириной b :

$$M = \frac{b}{\rho} \int_0^{H_1} (A_0 y + \dots + A_4 y^5) dy - \int_0^{-H_2} (A'_0 y + \dots + A'_4 y^5) dy. \quad (13)$$

Если вынести постоянные множители за знак интеграла

$$M = \frac{b}{\rho} \left[A_0 \int_0^{H_1} y dy + \dots + A_4 \int_0^{H_1} y^5 dy - A'_0 \int_0^{-H_2} y dy - \dots - A'_4 \int_0^{-H_2} y^5 dy \right], \quad (14)$$

то каждый из них будет являться определенной геометрической характеристикой поперечного сечения и может быть сравнительно просто вычислен.

Назовем выражение

$$b \left[A_0 \int_0^{H_1} y dy + \dots + A_4 \int_0^{H_1} y^5 dy - A'_0 \int_0^{-H_2} y dy - \dots - A'_4 \int_0^{-H_2} y^5 dy \right] = \\ = (EI)_{об}$$

обобщенной жесткостью поперечного сечения плиты (балки), тогда:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{(EI)_{об}}. \quad (15)$$

Таким образом, исследование деформационного состояния анизотропной (на растяжение и сжатие) плиты (балки) на упругом основании выполняется по обычным методам строительной механики с использованием обобщенной жесткости поперечного сечения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Морозов В. С. Промерзание зимних дорог на болотах // Лесн. журн.— 1989.— № 4.— С. 51—56.— (Изв. высш. учеб. заведений). [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). [4]. Уваров Б. В., Щелкунов В. В. Расчет на прочность основания зимних автомобильных дорог на болотах с поперечным настилом // Лесн. журн.— 1986.— № 3.— С. 43—47.— (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 4 июля 1989 г.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.04

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВЛИЯНИИ ИСПАРЕНИЯ
НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ

(на примере древесины)

Г. С. ШУБИН, А. В. ЧЕМОДАНОВ

Московский лесотехнический институт

Известно, что при взаимодействии тела со средой их температура в принципе неодинакова. Изменение температуры и других параметров происходит в тонком поверхностном слое, называемом пограничным. При сушке одновременно возникают гидродинамический (скоростной), тепловой и диффузионный пограничные слои, толщины которых изменяются вдоль пластины, взаимосвязаны и зависят одна от другой; вследствие этого решение уравнения любого из пограничных слоев связано с решением всей системы уравнений.

Для практических целей сушки использовать уравнения пограничного слоя затруднительно. Поэтому экспериментальные данные по теплообмену, в том числе и при сушке, обрабатывают по правилам теории подобия.

Коэффициент теплообмена α при вынужденном движении газа получают из числа Нуссельта Nu на основании критериального уравнения

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (1)$$

Здесь $Nu = \frac{\alpha}{\lambda} l$ (λ — коэффициент теплопроводности в пограничном слое; l — размер тела в направлении движения газа);

$Re = \frac{\omega l}{\nu}$ — критерий Рейнольдса (ω — скорость движения газа; ν — кинематическая вязкость газа в пограничном слое);

$Pr = \frac{\nu}{a}$ — число Прандтля (a — коэффициент теплопроводности в пограничном слое).

Для определенного газа (например, воздуха) число Прандтля постоянно, и зависимость (1) принимает вид:

$$Nu = c Re^n. \quad (2)$$

Результаты работ по теплообмену при сушке публиковались одним из авторов данной статьи [20—23], начиная с 1958 г. (в 1969 г. появилась работа В. А. Кныша по теплообмену при сушке шпона).

Практически все экспериментальные данные удовлетворительно описываются уравнением

$$Nu = 0,072 Re^{0,8}, \quad (3)$$

на основании которого построены графики зависимости $\alpha = f(\omega, t_c)$ [4].

В процессе сушки образуется поперечный поток массы, влияние которого на теплообмен оценивают в литературе по-разному. В соот-