Модель позволяет воспроизводить на ЭВМ основные режимы процесса движения из условия обеспечения максимальной производительности и торможения, а также выполнять расчеты нагрузочных режимов трансмиссии. На рис. 3 приведены примеры расчета процесса разгона колесного трелевочного трактора 4×4 при трелевке пачки деревьев в полупогруженном (*а*) и погруженном (*б*) положениях. Сравнительный анализ полученных данных подтверждает преимущества второго способа. Работа буксования уменьшается в среднем на 10 %, максимальные значения моментов в трансмиссии — на 24 %, время и путь разгона — соответственно на 14 и 11 %, полезная нагрузка на рейс возрастает в 1,5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Безбородова Г. Б., Галушко В. Г. Моделирование движения автомобиля.— Киев: Выща шк., 1978.— 168 с. [2]. Гришкевич А. И. Автомобили. Теория: Учеб. для вузов.— Мн.: Вышэйш. шк., 1986.— 208 с. [3]. Кутьков Г. М. Тяговая динамика трактора.— М.: Машиностроение, 1980.— 215 с. [4]. Проектирование трансмиссий автомобилей: Справочник / Под ред. А. И. Гришкевича.— М.: Машиностроение, 1984.— 272 с. [5]. Цитович И. С., Альгин В. Б. Динамика автомобиля.— Мн.: Наука и техника, 1981.— 191 с.

Поступила 31 октября 1990 г.

УДК 624.275.001.24

МЕТОД РАСЧЕТА МОСТОВЫХ КЛЕЕНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК, РАБОТАЮЩИХ СОВМЕСТНО С ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТОЙ

В. П. СТУКОВ

Архангельский лесотехнический институт

Сокращение, а в будущем и повсеместный отказ от молевого лесосплава приведут к максимальному использованию автотранспорта, что, в свою очередь, потребует расширения строительства лесовозных дорог, мостов и различных транспортных сооружений.

В условиях Северо-Западного региона страны при наличии соответствующей производственной базы целесообразно применять мостовые балки из клееной древесины. Экспериментальные исследования [1, 3] и практика мостостроения показывают, что для повышения капитальности и сроков службы транспортного сооружения следует использовать комбинированные сечения, в которых клееная деревянная балка соединена с железобетонной плитой. В силу конструктивных особенностей таких сечений связь между ребром балки и плитой можно рассматривать как упругоподатливую. Эта связь обусловливает сдвиг по плоскости контакта и перераспределение напряжений в частях сечения балки.

Исследования, в том числе наши, показывают, что в балках комбинированного сечения с такими связями под нагрузкой имеют место деформации отрыва плиты от ребра и горизонтальный сдвиг в плоскости их контакта.

В балках комбинированного сечения широко распространены нагельные соединения ребра и плиты. Согласно рис. 1, *а* нагель рассматривается как балка, лежащая на упругом основании и загруженная на конце сдвигающей силой $T_н$ и неизвестным изгибающим моментом M [6]. Линейные деформации сдвига Δ складываются из упругих деформаций бетона плиты, древесины ребра и деформаций обмятия древесины. Деформации сдвига, соответствующие расчетному значению несущей способности связи [3, 4], зависят от типа связующего элемента.

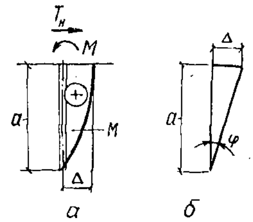

Рис. 1. Нагельное соединение:
а — расчетная схема; *б* — схема деформаций

Эпюра реактивного давления упругого основания (древесины) тем ближе к треугольной, чем жестче нагель (рис. 2,*б*).

Угол поворота нагеля φ относительно нулевой точки моментов, т. е. его конца, в силу малости может быть определен по формуле

$$\varphi = \operatorname{tg} \varphi = \Delta/(a m_0 [t]), \qquad (1)$$

где a — глубина заделки нагеля в древесину балки;
m_0 — число связей на единицу длины шва;
$[t]$ — расчетная несущая жесткость связи.

Напряженно-деформированное состояние связи аналогично подобному состоянию упругоповорачивающейся опоры, развивающей реактивный момент, пропорциональный жесткости на кручение и углу поворота. Жесткость на кручение μ может быть определена по формуле

$$\mu = 1/\varphi = a m_0 [t]/\Delta, \qquad (2)$$

где φ — угол поворота (закручивания) нагеля при $M = 1$ кН · м.

В работе [2] автор отмечает, что силы трения между ребром и плитой влияют на податливость соединения только в начальный период при сдвигающей силе, составляющей 20...25 % от расчетного значения. При расчетном сдвигающем усилии перемещения связи с учетом и без учета трения различаются на 4,0...4,7 %. Уменьшение, а затем исчезновение влияния сил трения объясняются весьма значительными деформациями отрыва между ребром и плитой. В диапазоне эксплуатационных нагрузок (и в предельном состоянии) между ребром и плитой существуют только упругоподатливые связи.

В расчетах балки комбинированного сечения можно выделить два этапа:

1) рассчитывают балку комбинированного сечения как неразрезную многопролетную балку на упругоповорачивающихся опорах, которыми являются связи сдвига между ребром и плитой;

2) рассчитывают ребро из клееной древесины и железобетонную плиту как самостоятельные элементы на усилия, возникающие в ветвях балки вследствие упругой податливости связей сдвига между ними.

На первом этапе балку комбинированного сечения с абсолютно жесткими поперечными связями и упругоподатливыми связями сдвига рассчитывают методом начальных параметров в матричной форме. Определяют прогиб y, угол поворота φ, изгибающий момент M, поперечную силу Q в балке и крутящие моменты $M_{кр}$ в связях. Расчетная схема приведена на рис. 2.

В случае единичных воздействий ($P = 1$, $M = 1$, $\Theta = 1$, $\Delta = 1$) общее решение линейного дифференциального уравнения четвертого порядка изгиба неразрезной балки постоянного сечения на упругоповорачивающихся опорах может быть представлено в виде, приведенном в таблице [5].

В таблице приняты следующие обозначения:

y_{ki}, φ_{ki}, M_{ki}, Q_{ki} — соответственно прогиб, угол поворота, изгибающий момент и поперечная сила на опоре K от внешних воздейст-

Общая часть уравнений	Влияние сосредоточенных воздействий			
	$P = 1$	$M = 1$	$\Theta = 1$	$\Delta = 1$
1	2	3	4	5
$y_{ki} = y_{0i}A_k + \varphi_{0i}B_k + M_{0i}C_k - Q_{0i}D_k$	$+\sum_{i=0}^{n} D_{k-i}$	$-\sum_{i=0}^{n} C_{k-i}$	$-\sum_{i=0}^{n} B_{k-i}$	$+\sum_{i=0}^{n} A_{k-i}$
$\varphi_{ki} = \varphi_{0i}A'_k - M_{0i}B'_k - Q_{0i}C'_k - y_{0i}D'_k$	$+\sum_{i=0}^{n} C'_{k-i}$	$-\sum_{i=0}^{n} B'_{k-i}$	$-\sum_{i=0}^{n} A'_{k-i}$	$-\sum_{i=0}^{n} D'_{k-i}$
$M_{ki} = -M_{0i}A''_k + Q_{0i}B''_k + y_{0i}C''_k + \varphi_{0i}D''_k$	$-\sum_{i=0}^{n} B''_{k-i}$	$+\sum_{i=0}^{n} A''_{k-i}$	$-\sum_{i=0}^{n} D''_{k-i}$	$+\sum_{i=0}^{n} C''_{k-i}$
$Q_{ki} = Q_{0i}A'''_k + y_{0i}B'''_k + \varphi_{0i}C'''_k + M_{0i}D'''_k$	$-\sum_{i=0}^{n} A'''_{k-i}$	$-\sum_{i=0}^{n} D'''_{k-i}$	$-\sum_{i=0}^{n} C'''_{k-i}$	$+\sum_{i=0}^{n} B'''_{k-i}$

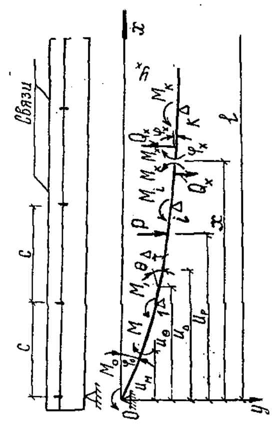

Рис. 2. Расчетная схема балки комбинированного сечения с упругоподатливыми связями между ветвями как многопролетной неразрезной балки на упругоповорачивающихся опорах

вий $P = 1$, $M = 1$, $\Theta = 1$, $\Delta = 1$ на опоре i;

y_{0i}, φ_{0i}, M_{0i}, Q_{0i} — те же величины на опоре 0, принимаемой за начальную; т. е. начальные параметры, играющие роль постоянных интегрирования в общем интеграле;

A, B, C, D (с индексами) — функции влияния начальных параметров и сосредоточенных воздействий на прогиб y, угол поворота φ, изгибающий момент M и поперечную силу Q на опорах $K - i$ и K.

Выражения для функций влияния приведены в работе [5] и программе «COMBY LV».

Уравнения для y, φ, M, Q для единичных усилий и воздействий в матричной форме имеют вид ($n = K$)

$$\vec{y}_n = \begin{vmatrix} y_{ni} \\ \varphi_{ni} \\ M_{ni} \\ Q_{ni} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_n & B_n & C_n & -D_n \\ -D'_n & A'_n & B'_n & -C'_n \\ C''_n & D''_n & -A''_n & B''_n \\ B'''_n & C'''_n & D'''_n & A'''_n \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} y_{0i} \\ \varphi_{0i} \\ M_{0i} \\ Q_{0i} \end{vmatrix} +$$

$$+ \begin{vmatrix} D_n & D_{n-1} & \dots & D_1 & D_0 \\ C'_n & C'_{n-1} & \dots & C'_1 & C'_0 \\ -B''_n & -B''_{n-1} & \dots & -B''_1 & -B''_0 \\ -A'''_n & -A'''_{n-1} & \dots & -A'''_1 & -A'''_0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -C_n & -C_{n-1} & \dots & -C_1 & -C_0 \\ -B'_n & -B'_{n-1} & \dots & -B'_1 & -B'_0 \\ A''_n & A''_{n-1} & \dots & A''_1 & A''_0 \\ -D'''_n & -D'''_{n-1} & \dots & -D'''_1 & -D'''_0 \end{vmatrix} +$$

$$+ \begin{vmatrix} -B_n & -B_{n-1} & \dots & -B_1 & -B_0 \\ -A'_n & -A'_{n-1} & \dots & -A'_1 & -A'_0 \\ -D''_n & -D''_{n-1} & \dots & -D''_1 & -D''_0 \\ -C'''_n & -C'''_{n-1} & \dots & -C'''_1 & -C'''_0 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} A_n & A_{n-1} & \dots & A_1 & A_0 \\ -D'_n & -D'_{n-1} & \dots & -D'_1 & -D'_0 \\ C''_n & C''_{n-1} & \dots & C''_1 & C''_0 \\ B'''_n & B'''_{n-1} & \dots & B'''_1 & B'''_0 \end{vmatrix} =$$

$$= \Phi \vec{y}_0 + \Delta_P + \Delta_M + \Delta_\theta + \Delta_\Delta, \qquad (3)$$

где $\vec{y}_n$ — вектор, определяющий параметры балки на n-й опоре;

Φ — матрица функций влияния начальных параметров на величины y, φ, M, Q;

$\vec{y}_0$ — вектор начальных параметров для n-й опоры;

Δ_P, Δ_M, Δ_θ, Δ_Δ — матрицы Δ функций влияния сосредоточенных воздействий на величины y, φ, M, Q при $P = 1$, $M = 1$, $\Theta = 1$, $\Delta = 1$ соответственно.

Для одного единичного усилия и воздействия

$$\vec{y}_n = \Phi \vec{y}_0 + \Delta. \qquad (3')$$

Рассмотрим балку комбинированного сечения с $n+1$ нагельными соединениями. Начало поместим на левом конце неразрезной балки, тогда два из четырех начальных параметров будут заранее известны:

$$M_{0i} = -\mu\varphi_{0i}; \quad y_{0i} = 0. \qquad (4)$$

Два других начальных параметра определим из условий для правого конца балки

$$M_{ni} = \mu\varphi_{ni}; \quad y_{ni} = 0, \qquad (5)$$

где μ — жесткость на кручение опоры (связи).

В практике расчетов возможны четыре случая воздействий на балку.

1. Груз $P = 1$. На основании таблицы (гр. 1 + гр. 2) и уравнений (3)—(5) имеем

$$\begin{vmatrix} M_{ni} \\ \\ y_{ni} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D''_n - A''_n & B''_n \\ \\ B_n & C_n - D_n \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \varphi_{0i} \\ \mu\varphi_{0i} \\ Q_{0i} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -B''_n & -B''_{n-1} & \dots & -B''_1 & -B''_0 \\ \\ D_n & D_{n-1} & \dots & D_1 & D_0 \end{vmatrix} =$$

$$=\begin{vmatrix}\mu & 0\\ & \\ 0 & 1\end{vmatrix}\times\left\{\begin{vmatrix}A'_n & B'_n & -C'_n\\ & & \\ 0 & 0 & 0\end{vmatrix}\times\begin{vmatrix}\varphi_{0i}\\ \mu\varphi_{0i}\\ Q_{0i}\end{vmatrix}+\begin{vmatrix}C'_n & C'_{n-1} & \ldots & C'_1 & C'_0\\ & & & & \\ 0 & 0 & \ldots & 0 & 0\end{vmatrix}\right\}. \quad (6)$$

В работе [5] приведены для функций влияния

$$B''_n=B_n;\quad C'_n=C_n;\quad A''_n=A'_n;\quad C'''_n=C''_n;\quad D'''_n=D'_n;\quad A'''_n=A_n. \quad (7)$$

Проведя ряд преобразований уравнений (6) с учетом соотношений (7), получим выражения для определения начальных параметров φ_0 и Q_0

$$\begin{vmatrix}(D''_n-2\mu A_n-\mu^2B'_n) & (B_n+\mu C_n)\\ (B_n+\mu C_n) & -D_n\end{vmatrix}\times\begin{vmatrix}\varphi_{0i}\\ Q_{0i}\end{vmatrix}=$$

$$=\begin{vmatrix}(B_n+\mu C_n) & (B_{n-1}+\mu C_{n-1}) & \ldots & (B_1+\mu C_1) & (B_0+\mu C_0)\\ -D_n & -D_{n-1} & \ldots & -D_1 & -D_0\end{vmatrix} \quad (8)$$

или

$$A\vec{y}_0=\Delta^*_P. \quad (8')$$

В общем случае матрица неизвестных может иметь произвольный размер. Для случая груза $P=1$ обозначим ее через Λ_{0P}. Тогда выражение (8) примет вид

$$A\Lambda_{0P}=\Delta^*_P. \quad (8'')$$

Отсюда

$$\Lambda_{0P}=A^{-1}\Delta^*_P. \quad (9)$$

Здесь

$$A^{-1}=\begin{vmatrix}(D''_n-2\mu A'_n-\mu^2B'_n) & (B_n+\mu C_n)\\ (B_n+\mu C_n) & -D_n\end{vmatrix}^{-1}. \quad (10)$$

2. Нагрузка $M=1$. Вывод расчетных формул аналогичен случаю 1. Решение системы уравнений для матриц линий влияния начальных параметров y_0 и φ_0 имеет вид

$$\Lambda_{0M}=A^{-1}\Delta_M. \quad (11)$$

Здесь

$$\Delta_M=\begin{vmatrix}(-A'_n-\mu B'_n) & (-A'_{n-1}-\mu B'_{n-1}) & \ldots & (-A'_1-\mu B'_1) & (-A'_0-\mu B^1_0)\\ C_n & C_{n-1} & \ldots & C_1 & C_0\end{vmatrix}. \quad (12)$$

3. Воздействие $\Theta=1$. Вывод расчетных формул аналогичен случаю 1. Решение системы:

$$\Lambda_{0\Theta}=A^{-1}\Delta_\Theta. \quad (13)$$

Здесь

$$\Delta_\theta = \begin{vmatrix} (D''_n - \mu A'_n)(D''_{n-1} - \mu A'_{n-1}) \ldots (D''_1 - \mu A'_1)(D''_0 - \mu A'_0) \\ B_n \quad B_{n-1} \quad \ldots \quad B_1 \quad B_0 \end{vmatrix}. \tag{14}$$

4. Воздействие $\Delta = 1$. Вывод расчетных формул аналогичен случаю 1. Решение системы:

$$\Lambda_{0\Delta} = A^{-1}\Delta_\Delta. \tag{15}$$

Здесь

$$\Delta_\Delta = \begin{vmatrix} (C''_n - \mu D'_n)(-C''_{n-1} - \mu D'_{n-1}) \ldots (-C''_1 - \mu D'_1)(-C''_0 - \mu D'_0) \\ -A_n \quad -A_{n-1} \quad \ldots \quad -A_1 \quad -A_0 \end{vmatrix}. \tag{16}$$

Ординаты линий влияния прогибов найдем из таблицы (гр. $1+2$), выражений (3) — (5) и теоремы о взаимности перемещений $y_{ik} = y_{ki}$:

$$y_{ni} = \varphi_{0i}B_n + \mu\varphi_{0i}C_n - Q_{0i}D_n + \sum_{i=0}^{n} D_{n-i} \tag{17}$$

или

$$y_{ni} = \varphi_{0i}(B_n + \mu C_n) - Q_{0i}D_n + \sum_{i=0}^{n} D_{n-i}. \tag{17'}$$

Матрица линий влияния прогибов имеет вид

$$\Lambda_y = \begin{vmatrix} (B_0 + \mu C_0) & -D_0 \\ (B_1 + \mu C_1) & -D_1 \\ (B_2 + \mu C_2) & -D_2 \\ \cdots & \cdots \\ (B_{n-1} + \mu C_{n-1}) & -D_{n-1} \\ (B_n + \mu C_n) & -D_n \end{vmatrix} \times \Lambda_{0P} + \begin{vmatrix} D_0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 \\ D_1 & D_0 & 0 & \ldots & 0 & 0 \\ D_2 & D_1 & D_0 & \ldots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ D_{n-1} & D_{n-2} & D_{n-3} & \ldots & D_0 & 0 \\ D_n & D_{n-1} & D_{n-2} & \ldots & D_1 & D_0 \end{vmatrix} =$$

$$= \Phi_y\Lambda_{0P} + \Delta_{yP}. \tag{18}$$

Ординаты линий влияния углов поворота получим из таблицы (гр. $1+3$), выражений (3) — (5) и теоремы о взаимности работ $\varphi_{ik} = y_{ki,M}$:

$$\varphi_{ni} = \varphi_{0i}B_n + \mu\varphi_{0i}C_n - Q_{0i}D_n - \sum_{i=0}^{n} C_{n-i} \tag{19}$$

или

$$\varphi_{ni} = \varphi_{0i}(B_n + \mu C_n) - Q_{0i}D_n - \sum_{i=0}^{n} C_{n-i}. \tag{19'}$$

Матрица линий влияния углов поворота имеет вид

$$\Lambda_\varphi = \begin{vmatrix} (B_0 + \mu C_0) & -D_0 \\ (B_1 + \mu C_1) & -D_1 \\ (B_2 + \mu C_2) & -D_2 \\ \cdots & \cdots \\ (B_{n-1} + \mu C_{n-1}) & -D_{n-1} \\ (B_n + \mu C_n) & -D_n \end{vmatrix} \times \Lambda_{0M} - \begin{vmatrix} C_0 & 0 & 0 & \ldots & 0 & 0 \\ C_1 & C_0 & 0 & \ldots & 0 & 0 \\ C_2 & C_1 & C_0 & \ldots & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_{n-1} & C_{n-2} & C_{n-3} & \ldots & C_0 & 0 \\ C_n & C_{n-1} & C_{n-2} & \ldots & C_1 & C_0 \end{vmatrix} =$$

$$= \Phi_y\Lambda_{0M} - \Delta_{yM}. \tag{20}$$

Ординаты линий влияния опорных моментов в опорах-связях найдем из таблицы (гр. 1 + гр. 4), выражений (3) — (5) и зависимости $M_{\text{оп},\,ki} = y_{M,\,\Theta}$:

$$M_{\text{оп},\,ni} = \varphi_{0i}B_n + \mu\varphi_{0i}C_n - Q_{0i}D_n - \sum_{i=0}^{n} B_{n-i} \tag{21}$$

или

$$M_{\text{оп},\,ni} = \varphi_{0i}(B_n + \mu C_n) - Q_{0i}D_n - \sum_{i=0}^{n} B_{n-i}. \tag{21'}$$

Матрица линий влияния опорных моментов имеет вид

$$\Lambda_M = \begin{vmatrix} (B_0 + \mu C_0) & -D_0 \\ (B_1 + \mu C_1) & -D_1 \\ (B_2 + \mu C_2) & -D_2 \\ \dots & \dots \\ (B_{n-1} + \mu C_{n-1}) & -D_{n-1} \\ (B_n + \mu C_n) & -D_n \end{vmatrix} \times \Lambda_{0\Theta} - \begin{vmatrix} B_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ B_1 & B_0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ B_2 & B_1 & B_0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ B_{n-1} & B_{n-2} & B_{n-3} & \dots & B_0 & 0 \\ B_n & B_{n-1} & B_{n-2} & \dots & B_1 & B_0 \end{vmatrix} =$$

$$= \Phi_y \Lambda_{0\Theta} - \Delta_{y\Theta}. \tag{22}$$

Ординаты линий влияния поперечных сил в сечениях на опорах-связях получим из таблицы (гр. 1 + гр. 5), выражений (3) — (5) и зависимости $Q_{\text{оп},\,ki} = y_{ki,\,\Delta}$:

$$Q_{\text{оп},\,ni} = \varphi_{0i}B_n + \mu\varphi C_n - Q_{0i}D_n + \sum_{i=0}^{n} A_{n-i} \tag{23}$$

или

$$Q_{\text{оп},\,ni} = \varphi_{0i}(B_n + \mu C_n) - Q_{0i}D_n + \sum_{i=0}^{n} A_{n-i}. \tag{23'}$$

Матрица линий поперечных сил для сечений на опорах имеет вид

$$\Lambda_\Theta = \begin{vmatrix} (B_0 + \mu C_0) & -D_0 \\ (B_1 + \mu C_1) & -D_1 \\ (B_2 + \mu C_2) & -D_2 \\ \dots & \dots \\ (B_{n-1} + \mu C_{n-1}) & -D_{n-1} \\ (B_n + \mu C_n) & -D_n \end{vmatrix} \times \Lambda_{0\Delta} + \begin{vmatrix} A_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ A_1 & A_0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ A_2 & A_1 & A_0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n-1} & A_{n-2} & A_{n-3} & \dots & A_0 & 0 \\ A_n & A_{n-1} & A_{n-2} & \dots & A_1 & A_0 \end{vmatrix} =$$

$$= \Phi_y \Lambda_{0\Delta} + \Delta_{y\Delta}. \tag{24}$$

Выражение (24) позволяет определить ординаты правой ветви линии влияния поперечной силы для расчетного сечения. Матрицу для левой ветви Λ'_Θ получим, вычтя из ординат поперечной силы в выражении (24) единичную матрицу E:

$$\Lambda'_\Theta = \Lambda_\Theta - E. \tag{25}$$

Ординаты линий влияния крутящих моментов в связях найдем из зависимости $M_{\text{кр},\,ki} = \mu y_{ki,\,M}$ (μ — жесткость опор-связей на кручение).