

---

---

И. И. ЛЕОНОВИЧ

ассистент

---

## К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ АВТОЛЕЖНЕВЫХ ДОРОГ

В лесной промышленности СССР автомобильная лесовывозка занимает видное место. Около 60% заготовленной древесины в настоящее время вывозится автомашинами.

Внедрение автомашин на лесотранспорте требует улучшения строительства и содержания лесовозных автомобильных дорог, так как правильная организация дорожного хозяйства является основным условием эффективного использования автомобилей на лесовывозке.

В системе лесной промышленности вывозка леса автомашинами осуществляется в основном по грунтовым дорогам. В заболоченных местах и на слабых почвогрунтах лесовозные дороги укрепляют чаще всего лесными материалами. Укрепление это осуществляется в виде гатей, фашинных настилов, накатника и облежневанием. Из перечисленных видов укреплений лесовозных дорог наибольшее распространение имеет облежневание. Облежневание трудно проходимых участков дороги производится путем устройства деревянно-лежневых панелей. Во многих случаях при освоении заболоченных лесосек деревянное покрытие строится на всем протяжении автомобильной дороги, образуя так называемую лежневую дорогу.

Лежневые дороги до настоящего времени изучены слабо. Применяемые конструкции их почти совершенно не обоснованы. Имеющаяся научная литература не исчерпывает глубины вопроса по расчету верхнего строения лежневых дорог, а лишь поверхностно и схематично рассматривает работу отдельных элементов и всего деревянного покрытия.

Проектные организации лесной промышленности в проектах автолежневых дорог приводят ориентировочные соображения о прочности лежней, рассматривая их как разрезную балку, свободно лежащую на двух жестких опорах, на которую действует нагрузка

$P$  от колеса подвижного состава, равномерно распределенная по длине отпечатка колеса.

Влияние динамического воздействия при этом учитывается коэффициентом динамичности, величина которого  $1,2 \div 1,6$  принимается без достаточного обоснования.

Таким образом, согласно этой расчетной схеме, максимальный изгибающий момент определяется по формуле:

$$M_{\text{изг}} = \frac{P_{\text{ст}} \eta}{4} \left( L_0 - \frac{l}{2} \right) [\text{кгсм}], \quad (1)$$

где:  $P_{\text{ст}}$  — статическая нагрузка на колесо в кг;

$\eta$  — коэффициент динамичности, который принимается равным  $1,2 \div 1,6$ ;

$L_0$  — расстояние между осями шпал в см;

$l$  — длина площадки контакта колеса с лежнем в см.

Значение  $l$  определяется из выражения:

$$l = 2 \sqrt{R^2 - (R - h)^2} [\text{см}], \quad (2)$$

где:  $R$  — радиус колеса в см;

$h$  — величина деформации пневматического колеса, которая при нормальных условиях работы составляет  $5 \div 6\%$  от радиуса колеса.

Расчет элементов верхнего строения автолежневых дорог этим методом содержит много предположений и условностей, которые не отражают действительную схему работы, а следовательно, приводят к приближенным и неточным результатам.

В самом деле, рассматривать лежни колесопроводов как разрезную балку, свободно лежащую на двух жестких опорах, принципиально неправильно, так как продольные лежни представляют собой многопролетную балку, лежащую на отдельных упругих опорах. В то же время по этой схеме расчета учитывается только одиночная сила, передаваемая посредством пневматического колеса на лежень, и не учитывается влияние смежных колес (системы грузов). Однако относительное расположение грузов оказывает большое влияние на величину напряжения и деформации в элементах верхнего строения, и поэтому оно должно учитываться при расчете.

Рассматривая вопрос расчета верхнего строения автолежневых дорог, многие исследователи, а также проф. Попов Д. В. и Буверт В. В., в своих книгах по сухопутному лесотранспорту не дают расчета шпал на прочность. Они приводят лишь следующую формулу для определения удельного давления шпалы на грунт:

$$K_{\text{макс}} = \frac{Q_{\text{ст}} \eta (1 - \alpha)}{d_{\text{ш}}^3}, \quad (3)$$

где:  $K_{\text{макс}}$  — удельное давление на грунт от шпал лежневых дорог в  $\text{кг/см}^2$ ;

$Q_{\text{ст}}$  — статическая нагрузка на ось машины в кг,

- $\alpha$  — коэффициент влияния соседних шпал, принимаемый 0,3 — 0,2;
- $\beta$  — коэффициент неравномерности давления на грунт, равный 0,95 — 0,90;
- $l_{ш}$  — длина шпалы в см;
- $d$  — ширина шпалы в см.

В действительности же шпалы необходимо всегда рассчитывать на прочность, так как появление остаточных деформаций шпал часто приводит к преждевременному расстройству и поломкам всего верхнего строения дорог.

Таким образом, применяемый метод расчета автолежневых дорог не удовлетворяет требованиям и особенно при расчете лежневого покрытия под машины большой грузоподъемности.

Вот почему возникает необходимость в отыскании более совершенного метода расчета автолежневых дорог.

Правильный расчет элементов верхнего строения — определение напряжений и деформации их под действием внешней нагрузки позволит создать дорожные конструкции, которые бы обеспечивали более равномерную передачу давления на поверхность грунта и совместную работу покрытия и основания, что позволит облегчить конструкцию и уменьшить ее стоимость, не уменьшая прочности и надежности ее в работе.

Подвижной состав при движении по автолежневой дороге воздействует на верхнее строение посредством пневматических колес. В контакте колес с путевым покрытием появляются силы. Эти силы по своей величине и по характеру неодинаковы и зависят от многих факторов, в том числе от грузоподъемности подвижного состава, конструкции подвески, жесткости шины, скорости движения машины и т. д.

Силы, действующие на путь, подразделяются на три группы: вертикальные, горизонтальные поперечные и горизонтальные продольные.

Вертикальные силы можно выразить следующим образом:

$$P_g = P_{см} + ЖZ + Z_c + Z_n + Z_g \text{ [кг]}, \quad (4)$$

где:  $P_g$  — вертикальная динамическая сила, действующая на путь;

$P_{см}$  — статическое давление колеса на лежень;

$ЖZ$  — вертикальная составляющая усилия, передаваемого рессорой при колебании подрессорной части машины;

$Z_c$  — вертикальная составляющая от сил инерции возвратно поступательного движения масс;

$Z_n$  — вертикальная составляющая сил инерции неподрессорных масс;

$Z_g$  — вертикальная составляющая динамических сил, вызванных дорожными неровностями.

Горизонтальные поперечные силы, передаваемые на верхнее строение колесами подвижного состава при влиянии его

на прямом участке пути и движении на закруглении, можно представить в виде:

$$H = H_{\text{вил}} \pm H_{\text{ц}} \pm H_{\text{н}} \pm H_{\text{г}} [\text{кг}], \quad (5)$$

где:  $H_{\text{вил}}$  — горизонтальные силы, возникающие вследствие виляния подвижного состава;

$H_{\text{ц}}$  — горизонтальное усилие, возникающее вследствие центробежной (центростремительной) силы на кривых участках пути;

$H_{\text{н}}$  — горизонтальная составляющая сил инерции неподдрессорных масс;

$H_{\text{г}}$  — горизонтальная составляющая сил, возникающих в результате наличия неровностей пути и неупругого основания.

Горизонтальные продольные силы возникают в результате трения между колесами и поверхностью дороги, в результате ударов на стыках и на других неровностях колесопроводов, а также в результате наличия уклонов.

Значительная величина горизонтальной продольной силы возникает при торможении автомашины.

Величина этой силы определяется по формуле:

$$P_{\text{г}} = Q_{\text{м}} \mu [\text{кг}], \quad (6)$$

где:  $Q_{\text{м}}$  — нагрузка на тормозное колесо;

$\mu$  — коэффициент сцепления шины с лежнем, равный  $0,45 \div 0,60$ .

Кроме рассмотренных активных сил, на дорожное покрытие действуют реактивные силы — реакции упругого основания, зависящие в основном от вертикального перемещения дорожной конструкции.

Таким образом, при расчете автолежневых дорог мы всегда будем иметь дело с двумя видами нагрузок: активной и реактивной, которые действуют на многопролетную балку, лежащую на упругих опорах. Аналогичные расчетные модели можно встретить при решении многих задач строительной механики, в железнодорожном транспорте и других сооружениях. В большинстве принятых расчетных схем предполагается, что реактивная сила является некоторой прямолинейной функцией прогиба балки. В действительности же могут возникнуть довольно разнообразные зависимости между перемещениями и реакциями. В литературе по расчету конструкций на упругом основании достаточно подробно рассматривается сравнительно небольшое число моделей на упругом основании. Одной из них является теория расчета балок с применением гипотезы Винклера-Циммермана, так называемой моделью коэффициента постели.

Последнее время значительное развитие получила теория расчета конструкции на упругом основании без применения гипотезы Винклера-Циммермана.

Виднейшими учеными этого направления являются В. И. Кузнецов, Н. М. Герсевич, В. П. Жемочкин, М. И. Горбунов-Посадов и др.

Хотя эта теория более точно учитывает совместную работу балки и упругого основания, тем не менее она недостаточно еще разработана для решения частных задач расчета конструкции на упругом основании, тем более для расчета верхнего строения автолежневых дорог, обладающих особой спецификой работы.

Поэтому при расчете лежневых дорог придется остановиться на гипотезе Винклера-Циммермана, как наиболее детально разработанной для практического применения ее к расчетам.

Таким образом, положив в основу расчета верхнего строения автолежневых дорог теорию упругости с применением гипотезы Винклера-Циммермана, мы можем использовать теоретические соображения, которые имеются по этому вопросу, и, базируясь на них, установить порядок расчета автолежневых дорог. Но, применяя гипотезу прямой пропорциональности к расчету автолежневых дорог, придется сделать некоторые допущения, которые приводят к следующим двум возможным схемам расчета деревянных лежневых панелей:

1) лежневая панель, как балка, лежащая на сплошном упругом основании;

2) лежневая панель, как балка, лежащая на отдельных упругих опорах.

Что касается шпалы, то ее как при первой, так и при второй схемах расчета колесопроводов следует рассматривать как балку, лежащую на сплошном упругом основании и находящуюся под действием двух симметрично расположенных сил, зачастую неравных по величине.

## 1. РАСЧЕТ ЛЕЖНЕЙ ПО ПЕРВОЙ СХЕМЕ

Рассматривая работу лежня, как балку на сплошном упругом основании, порядок решения задачи будет следующий.

Напряжение в лежнях, как известно, определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{M_{изг}}{W} \quad [кг/см^2]. \quad (7)$$

Принимая во внимание, что момент сопротивления  $W$  — величина известная, перейдем к определению изгибающего момента —  $M_{изг}$ . С этой целью воспользуемся уравнением упругой линии:

$$EJ \frac{d^2y}{dx^2} = \pm M, \quad (8)$$

где:  $E$  — модуль упругости деревянной балки в  $кг/см^2$ ;

$J$  — момент инерции балки в  $см^4$ ;

$y$  — прогиб балки в  $см$ ;

$x$  — расстояние от рассматриваемого сечения до точки приложения грузов в  $см$ .

Уравнение (8) статически неопределимое, а поэтому вводим дополнительное условие, воспользовавшись вышеупомянутой гипотезой прямой пропорциональности:

$$p = cyg, \quad (9)$$

где:  $p$  — давление на единицу площади постели в  $кг/см^2$ ;

$c$  — коэффициент постели в  $кг/см^3$ ;

$y_g$  — величина осадки грунта в  $см$ ;

зная, что

$$\frac{dM}{dx} = Q \text{ и } \frac{dQ}{dx} = bp, \quad (10)$$

где:  $Q$  — вертикальная сила в  $кг$ ;

$b$  — опорная ширина балки в  $см$ ;

можем написать

$$\frac{d^2M}{dx^2} = bcy. \quad (11)$$

В то же время

$$M = -EJ \frac{d^2y}{dx^2}. \quad (12)$$

Из уравнений (11) и (12) имеем:

$$EJ \frac{d^4y}{dx^4} = -bcy. \quad (13)$$

В уравнении (13) произведем замену:

$$\kappa = \sqrt[4]{\frac{cb}{4EJ}} \left[ \frac{1}{см} \right] \quad (14)$$

и тогда получим:

$$\frac{d^4y}{dx^4} = -4\kappa^4 y, \quad (15)$$

где:  $k$  — коэффициент относительной жесткости балки и основания.

Решая это дифференциальное уравнение изогнутой оси балки (15), получим:

$$y = c_1 e^{\kappa x} \cos kx + c_2 e^{\kappa x} \sin kx + c_3 e^{-\kappa x} \cos kx + c_4 e^{-\kappa x} \sin kx. \quad (16)$$

Если рассматривать лежни колесопроводов как неразрезную балку бесконечной длины, то в уравнении (16) первый и второй члены правой части обратятся в нуль. Уравнение после преобразования получит вид:

$$y = \frac{Pb}{2cb} e^{-\kappa x} (\cos kx + \sin kx). \quad (17)$$

Уравнение изгибающего момента при этом будет равно:

$$M_{изг} = \frac{P}{4k} e^{-\kappa x} (\cos kx - \sin kx), \quad (18)$$

и давление шпалы на постель

$$Q = \frac{Pkl}{2} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx), \quad (19)$$

где:  $P$  — статическое давление колеса машины на лежень в кг;  
 $e$  — основание натуральных логарифмов;  
 $l$  — расстояние между осями шпал в см.

В формулах (17), (18) и (19) произведем замену:

$$\left. \begin{aligned} e^{-kx} (\cos kx + \sin kx) &= \eta \\ e^{-kx} (\cos kx - \sin kx) &= \mu \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

и тогда, учитывая влияние системы грузов, получим:

а) прогиб лежня

$$y = \frac{1}{2} \frac{k}{cb} \Sigma P\eta; \quad (21)$$

б) изгибающий момент

$$M_{\text{изг}} = \frac{1}{4k} \Sigma P\mu; \quad (22)$$

в) поперечная сила

$$Q = \frac{1}{2} kl \Sigma P\eta. \quad (23)$$

Решая эти уравнения, можем получить искомые величины, необходимые для определения прочных размеров конструкций лежневого покрытия.

Решение значительно упрощается, если для определения  $\eta$  и  $\mu$  (ординаты линий влияния) будут использованы линии влияния или таблицы, в которых  $\eta$  и  $\mu$  находятся в зависимости от произведения  $kx$ .

Если же принять, что лежень является балкой конечной длины, лежащей на упругом основании, а это так и есть в действительности, то для решения уравнения (16) можно использовать метод начальных параметров проф. Н. П. Пузыревского. Этот метод значительно упрощает решение указанного уравнения и становится вполне приемлемым для расчета лежневых покрытий. Окончательными формулами в общем виде для определения прогиба лежня  $y_x$ , угла поворота  $\theta_x$ , изгибающего момента  $M_x$  и поперечной силы  $Q_x$  по этой расчетной схеме будут:

$$\left. \begin{aligned} y_x &= y_0 A_x + \frac{\theta_0}{k} B_x - \frac{4k^2}{cb} \Sigma MC_x + \frac{4k}{cb} \Sigma PD_x; \\ \theta_x &= \theta_0 A_x - \frac{4k^3}{cb} \Sigma MB_x + \frac{4k^2}{cb} \Sigma PC_x - 4ky_0 D_x; \\ M_x &= \Sigma MA_x - \frac{1}{k} \Sigma PB_x + \frac{cby_0}{k^2} C_x + \frac{cb\theta_0}{k^3} D_x; \\ Q_x &= - \Sigma PA_x + \frac{cby_0}{k} B_x + \frac{cb\theta_0}{k^2} C_x - 4k \Sigma MD_x, \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

где:  $P$  — внешние сосредоточенные силы, действующие на лежень в кг;

$\Sigma M$  — внешние моменты, приложенные к балке в кгсм;

$k$  — коэффициент относительной жесткости;

$c$  — коэффициент постели;

$b$  — приведенная ширина колесопроводов;

$A_x B_x C_x D_x$  — гиперболо-тригонометрические функции.

Величина их определяется из уравнений:

$$\left. \begin{aligned} A_x &= chkx \cos kx; \\ B_x &= \frac{1}{2} (chkx \sin kx + shkx \cos kx); \\ C_x &= \frac{1}{2} shkx \sin kx; \\ D_x &= \frac{1}{4} (chkx \sin kx - shkx \cos kx), \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

где  $y_0, \Theta_0$  — начальные параметры, которые можно определить непосредственно на конце балки.

Общий вид уравнений для определения начальных параметров следующий:

$$y_0 = \frac{kC_I f''(l) - D_I f'''(l)}{4k^3(C_I^2 - B_I D_I)}; \quad (26)$$

$$\Theta_0 = \frac{C_I f'''(l) - kB_I f''(l)}{4k^2(C_I^2 - B_I D_I)}, \quad (27)$$

где  $f''(l), f'''(l)$  — вторая и третья производные, взятые от функции внешних сил.

Для определения гиперболо-тригонометрических функций существуют таблицы, в которых  $A_x, B_x, C_x$  и  $D_x$  определяются в зависимости от величины  $kx$ .

## II. РАСЧЕТ ЛЕЖНЯ ПО ВТОРОЙ СХЕМЕ

Принимая за расчетную схему продольного лежня многопролетную неразрезную балку постоянного сечения на отдельных упругих опорах и воспользовавшись уравнением трех моментов, можно также решить задачу расчета верхнего строения автолежневых дорог.

Эта задача значительно упрощается, если применить частные случаи. Вместо неограниченного количества упругих опор предположить, что балка имеет ограниченное количество упругих опор, а взамен системы грузов на балку действует одиночная сосредоточенная сила.

Простое и быстрое решение поставленного вопроса получается и для системы грузов, но для этого необходимо воспользоваться таблицами ординат линий влияния инж. В. В. Григорьева. Эти таблицы составлены на основании теоремы о взаимности пере-

мещения для схемы одиннадцатипролетной неразрезной балки на отдельных упругих опорах. По этой расчетной схеме изгибающий момент определяется по формуле:

$$M_{\text{изг}} = l \Sigma P \mu, \quad (28)$$

где:  $l$  — расстояние между осями шпал в *см*;  
 $P$  — давление колеса на лежень в *кг*;  
 $\mu$  — ординаты линий влияния для изгибающего момента.  
 Поперечная сила будет равна:

$$Q = \Sigma P \eta, \quad (29)$$

где:  $\eta$  — ординаты линий влияния для поперечной силы.

В таблицах Григорьева  $\mu$  и  $\eta$  определяются в зависимости от коэффициента  $\gamma$  и отношения  $\frac{x}{l}$ ,

где:

$$\gamma = \frac{12EJ}{c \alpha a b l^3} \quad (30)$$

$EJ$  — жесткость лежня (балки);

$c$  — коэффициент постели шпалы в *кг/см<sup>3</sup>*;

$\alpha$  — коэффициент изгиба шпалы;

$a$  — длина шпалы в *см*;

$b$  — ширина шпалы в *см*;

$x$  — расстояние от рассматриваемого сечения до приложенной силы в *см*.

Рассмотренные схемы расчета верхнего строения автолежневых дорог относятся к средней части лежней. Концы лежней работают по иному закону и фактически являются наиболее слабым местом лежневого покрытия. Для их расчета нужно дополнительно разработать практическое приложение теории упругости к этому частному случаю. Теоретические обоснования работы концевой части лежня и стыка необходимо тесно увязать с данными экспериментов. Это поможет вскрыть действительные условия работы стыковой части лежней, а следовательно, позволит улучшить конструкцию стыка и всего дорожного покрытия в целом.