

## ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 630\*383

ОПТИМИЗАЦИЯ РУКОВОДЯЩЕГО ПОДЪЕМА  
НА ЛЕСНЫХ ДОРОГАХ

Б. А. ИЛЬИН

Санкт-Петербургская лесотехническая академия

На лесовозных дорогах с односторонним направлением грузопотока руководящий подъем является одним из важнейших характеристик трассы, от которых зависят затраты как на строительство дорог, так и на вывозку древесины.

В СНиП 2.05.07—85 «Промышленный транспорт» приведены следующие значения наибольших продольных уклонов на лесовозных магистралях: I-л — III-л категорий — 30 ‰, IV-л — 40 ‰. Превышение этих значений допускается при технико-экономическом сравнении вариантов с учетом местных особенностей.

Такое сравнение должно выполняться на предпроектной стадии, еще до начала изысканий, что значительно осложняет его выполнение.

При решении рассматриваемой задачи в качестве базового варианта целесообразно принять значение руководящего подъема  $i_n$  указанное в СНиПе. Оптимальный руководящий подъем  $i_p$  определяется по максимальной экономии приведенных затрат по сравнению с базовым вариантом.

Трасса любой лесовозной или лесовозно-лесохозяйственной дороги состоит из участков вольного хода, где уклоны дороги не превышают уклонов поверхности земли  $i_s \leq i_n$ , и стесненного хода, где  $i_s > i_n$ . Поскольку критерием оптимизации является разность приведенных затрат по вариантам, то участки вольного хода практически исключаются из рассмотрения.

Элементы продольного профиля с  $i_p$  в основном используют на стесненных участках трассы, для ее развития (удлинения) и преодоления высотных препятствий. В таких случаях, при замене уклона  $i_n$  более крутым уклоном  $i_p$  трасса дороги будет короче на  $\Delta L$ , км:

$$\Delta L = \left( \frac{1}{i_n} - \frac{1}{i_p} \right) \Sigma H_{\text{геом}}, \quad (1)$$

где  $\Sigma H_{\text{геом}}$  — сумма высот, преодолеваемых при развитии трассы на всех участках стесненного хода дороги, м.

Кроме того, в холмистой местности, пересеченной поперечными складками (в основном долинами водотоков), часто возникает необходимость в применении руководящего подъема на участках ограниченной длины без развития трассы, при ее выходе из долины на плато (рис. 1). При  $i_p > i_n$  можно получить существенную экономию средств на земляных работах.

Уменьшение объема земляных работ  $V_{\text{ум}}$  при одном пересечении складки местности составит

$$V_{\text{ум}} = V_n - V_p = 0,5L_n \left[ (B + 2b) H_n + \frac{13}{24} mH_n^2 \right] - \\ - 0,5L_p \left[ (B + 2b) H_p + \frac{13}{24} mH_p^2 \right], \quad (2)$$

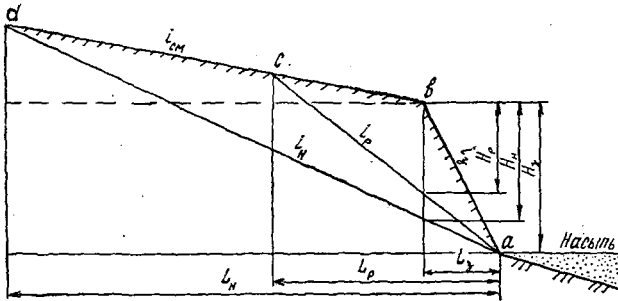


Рис. 1. Расчетная схема для определения разницы объемов земляных работ на пересечениях трассой дороги поперечных складок местности (долин водотоков), при использовании руководящего подъема  $i_p > i_n$

где  $V_n, V_p$  — объемы выемок при использовании уклонов  $i_n$  и  $i_p$ , м<sup>3</sup>;  
 $L_n, L_p$  — длина элемента профиля соответственно с уклонами  $i_n$  и  $i_p$ , м;  
 $B$  — ширина земляного полотна, м;  
 $b$  — ширина кювета по верху, м;  
 $m$  — коэффициент заложения откоса;  
 $H_n, H_p$  — рабочие отметки профиля в точке  $b$  при использовании уклонов  $i_n$  и  $i_p$ , м.

Согласно рис. 1

$$\begin{aligned} H_3 &= 0,001L_3i_3; & H_n &= 0,001L_3(i_3 - i_n); \\ H_p &= 0,001L_3(i_3 - i_p); & L_p &= L_3(i_3 - i_{cm})/(i_p - i_{cm}); \\ L_n &= L_3(i_3 - i_{cm})/(i_n - i_{cm}), \end{aligned}$$

где  $L_3$  — заложение склона местности с уклоном  $i_3$ , м;  
 $H_3$  — превышение точки  $b$  относительно точки  $a$ , м;  
 $i_{cm}$  — уклон смежного элемента профиля (на плато), ‰.

Подставив значения  $L_n, L_p, H_n, H_p$  в (2), получим

$$\begin{aligned} V_{ум} &= \frac{L_3^2(i_3 - i_{cm})}{2000} \left\{ \frac{1}{i_n - i_{cm}} \left[ (B + 2b)(i_3 - i_n) + \frac{13mL_3}{24000} (i_3 - i_n)^2 \right] - \frac{1}{i_p - i_{cm}} \left[ (B + 2b)(i_3 - i_p) + \frac{13mL_3}{24000} (i_3 - i_p)^2 \right] \right\}. \end{aligned} \quad (2a)$$

На плато уклон  $i_{cm}$  невелик и в предпроектных расчетах в ряде случаев может быть принят равным нулю. Для упрощения расчетов суммарной экономии на земляных работах при пересечении трассой нескольких долин можно задаться средними значениями  $L_3$  и  $i_3$  и получить выражение

$$\Sigma V_{ум} = \left[ a_{ср} \left( \frac{1}{i_n} - \frac{1}{i_p} \right) - b_{ср} (i_p - i_n) \right] n_{пер}, \quad (3)$$

где  $n_{пер}$  — число пересечений;

$$a_{ср} = 0,5L_3^2i_3^2 [1000(B + 2b) + 0,54mL_3i_3] \cdot 10^{-6}; \quad (4)$$

$$b_{ср} = 0,27mL_3^3i_3 \cdot 10^{-6}. \quad (5)$$

При необходимости более точных расчетов  $\Sigma V_{ум}$  и наличии подробных карт местности можно пользоваться формулой (2a) с последующим суммированием результатов.

С учетом формулы (3) общая разница в затратах на строительство дороги  $\Delta K_{\text{дор}}$  по вариантам составит

$$\Delta K_{\text{дор}} = K_d \left( \frac{1}{i_n} - \frac{1}{i_p} \right) \Sigma H_{\text{геом}} + c_{\text{з.п}} n_{\text{пер}} \left[ a_{\text{ср}} \left( \frac{1}{i_n} - \frac{1}{i_p} \right) - b_{\text{ср}} (i_p - i_n) \right], \quad (6)$$

где  $K_d$  — стоимость строительства 1 км дороги на участке стесненного хода, р.;  
 $c_{\text{з.п}}$  — стоимость возведения 1 м<sup>3</sup> земляного полотна на участках пересечений складок местности, р.

Дополнительные эксплуатационные расходы на вывозку древесного сырья на участках стесненного хода при  $i_p > i_n$  могут возникнуть по двум причинам: 1) от уменьшения массы поезда-брутто и полезной нагрузки при скорости  $v_n \approx v_p = \text{const}$ ; этот случай характерен для лесовозных УЖД; 2) за счет снижения скорости движения при  $Q_{\text{бр}} = \text{const}$  на данной дороге; этот вариант в большей мере относится к лесным автомобильным дорогам.

В последнем случае можно воспользоваться зависимостью для средней скорости движения  $v_{\text{ср}}$ , м/с:

$$v_{\text{ср}} = \frac{1000 N_e \eta \beta \gamma}{Q_{\text{бр}} (\omega + g i_p)} = \frac{N_{\text{уд}}}{\omega_j + g i_p}, \quad (7)$$

где  $N_e$  — мощность двигателя, кВт;  
 $\eta$  — КПД силовой передачи;  
 $\beta$  — коэффициент учета расхода мощности на привод вспомогательных механизмов;  
 $\gamma$  — коэффициент использования мощности по эксплуатационным условиям;  
 $Q_{\text{бр}}$  — масса поезда брутто, т;  
 $\omega$  — удельное сопротивление движению поезда, Н/т;  
 $N_{\text{уд}}$  — удельная полезная мощность на ведущих колесах, Вт/т, для КамАЗа можно принимать  $N_{\text{уд}} = 3340$ , для КрАЗ-6437  $N_{\text{уд}} = 2870$  Вт/т.

Соответственно увеличение времени хода на один рейс в грузовом направлении  $t_{\text{пор}}$ , ч (разница во времени хода по вариантам в порожняковом направлении незначительна и не учитывается) на участках стесненного хода при  $i_p > i_n$  составит

$$\begin{aligned} t_{\text{пор}} &= \frac{1000 k_{\text{кр}} \Sigma H_{\text{геом}}}{3600 i_p} \left( \frac{1}{V_p} - \frac{1}{V_n} \right) = \frac{k_{\text{кр}} \Sigma H_{\text{геом}}}{3,6 i_p N_{\text{уд}}} (\omega + g i_p - \omega - g i_n) = \\ &= \frac{g k_{\text{кр}} \Sigma H_{\text{геом}}}{3,6 i_p N_{\text{уд}}} (i_p - i_n), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $k_{\text{кр}}$  — коэффициент, учитывающий влияние кривых ограниченного радиуса, применяемых при развитии трассы.

Разница во времени хода на участках пересечения складок местности (долин водотоков) незначительна и не учитывается. Однако стоимость 1 маш.-ч автопоезда на руководящем подъеме зависит от величины последнего и приближенно может быть определена по формуле

$$b_p = b_n \left[ 1 + \delta \left( \frac{i_p}{i_n} - 1 \right) \right], \quad (9)$$

где  $b_p, b_n$  — стоимость 1 маш.-ч поезда с зарплатой водителя и начислениями при движении на подъемах  $i_p$  и  $i_n$ , р.;

$\delta$  — коэффициент пропорциональности дополнительных расходов,  $\delta = 0,6 \dots 0,8$ .

Общую разницу в расходах  $\Delta \mathcal{E}_{\text{выв}}$  на перевозку древесного сырья на участках стесненного хода с подъемом  $i_p > i_n$  можно получить по формуле

$$\begin{aligned} \Delta \mathcal{E}_{\text{выв}} &= \frac{Q_{\text{год}} k_{\text{кр}} g \Sigma H_{\text{геом}}}{3,6 Q_{\text{пол}} N_{\text{уд}}} (i_p - i_n) (b_p - b_n) = \\ &= \frac{g Q_{\text{год}} k_{\text{кр}} \Sigma H_{\text{геом}} b_n \delta}{3,6 i_p Q_{\text{пол}} N_{\text{уд}}} (i_p - i_n) \left( \frac{i_p}{i_n} - 1 \right), \end{aligned} \quad (10)$$

где  $Q_{\text{год}}$  — годовой объем вывозки, м<sup>3</sup>;  
 $Q_{\text{пол}}$  — полезная нагрузка на автопоезд, м<sup>3</sup>.

Расходы на приобретение дополнительного подвижного состава и расширение гаражного хозяйства при использовании  $i_p > i_n$  находим из выражения

$$\Delta K_{\text{п.с}} = \frac{g Q_{\text{год}} k_{\text{кр}} \Sigma H_{\text{геом}} k_{\text{сп}} K_{\text{ав}}}{3,6 i_p Q_{\text{пол}} N_{\text{уд}} T_{\text{год}} m_{\text{с}} l l}, \quad (11)$$

где  $k_{\text{сп}}$  — коэффициент перехода от рабочего парка машин к списочному;  
 $K_{\text{ав}}$  — затраты на приобретение одного комплекта автопоезда и расширение гаражного хозяйства, р.;  
 $T_{\text{год}}$  — расчетное число рабочих дней в году;  
 $m_{\text{с}}$  — число смен в рабочем дне;  
 $l$  — сменная производительность автомобиля (можно принимать по нормам технологического проектирования Гипролестранса).

Используя приведенные зависимости, получаем формулу для определения общей разницы в приведенных затратах  $\Delta R_{\text{пр}}$  по рассматриваемым вариантам применения руководящих подъемов  $i_n$  или  $i_p$ :

$$\begin{aligned} \Delta R_{\text{пр}} &= E_n \left\{ K_d \Sigma H_{\text{геом}} \left( \frac{1}{i_n} - \frac{1}{i_p} \right) + n_{\text{пер}} c_{\text{з.п}} \left[ a_{\text{ср}} \left( \frac{1}{i_n} - \frac{1}{i_p} \right) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - b_{\text{ср}} (i_n - i_p) \right] \right\} - \frac{g Q_{\text{год}} k_{\text{кр}} \Sigma H_{\text{геом}}}{3,6 i_p Q_{\text{пол}} N_{\text{уд}}} (i_p - i_n) \left[ \left( \frac{i_p}{i_n} - 1 \right) b_n \delta + \right. \\ &\quad \left. + \frac{E_n K_{\text{ав}} k_{\text{сп}}}{T_{\text{год}} m_{\text{с}} l l} \right], \end{aligned} \quad (12)$$

где  $E_n$  — нормативный коэффициент приведения.

Из формулы (12) видно, что экономия от использования  $i_p$  вместо  $i_n$  во многом зависит от годового грузооборота дороги, общей суммы преодолеваемых препятствий и числа поперечных складок местности.

Оптимальное значение  $i_p$  соответствует максимуму функции (12). Решая задачу поиска экстремальных значений функций, получаем

$$|i_p|_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{\alpha_0}{\beta_0}}, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= E_n (K_d \Sigma H_{\text{геом}} + n_{\text{пер}} c_{\text{з.п}} a_{\text{ср}}) + \\ &+ \frac{g Q_{\text{год}} k_{\text{кр}} i_n \Sigma H_{\text{геом}}}{3,6 Q_{\text{пол}} N_{\text{уд}}} \left( b_n \delta - \frac{E_n K_{\text{ав}} k_{\text{сп}}}{T_{\text{год}} m_{\text{с}} l l} \right); \end{aligned} \quad (14)$$

$$\beta_0 = E_n n_{\text{пер}} c_{\text{з.п}} b_{\text{ср}} + \frac{g Q_{\text{год}} k_{\text{кр}} \Sigma H_{\text{геом}} \delta b_n}{3,6 Q_{\text{пол}} i_n N_{\text{уд}}}. \quad (15)$$

Пример определения оптимального руководящего подъема. Исходные данные:  $K_d = 80\,000$  р.;  $K_{ав} = 60\,000$  р.;  $\Pi = 61$  м<sup>3</sup> (при среднем расстоянии вывозки 50 км);  $k_{кр} = 1,2$ ;  $\Sigma H_{геом} = 100$  м;  $Q_{год} = 500\,000$  м<sup>3</sup>;  $N_{уд} = 2870$  Вт/т (автопоезд на базе КрАЗ-6437);  $Q_{бр} = 47,2$  т;  $T_{год} = 250$  дн.;  $m_c = 2$  см.;  $b_n = 12$  р./ч;  $\delta = 0,7$ ;  $n_{пер} = 4$ ;  $c_{з.п} = 3$  р./м<sup>3</sup>;  $k_{сп} = 1,5$ ;  $i_n = 30$  ‰. По формулам (4) и (5) вычисляем значения  $a_{ср} = 1\,050\,000$ ;  $b_{ср} = 40,5$ . По формуле (14) находим  $\alpha_0 = 2\,494\,000$ , по формуле (15)  $\beta_0 = 590$ . Средние размеры складки местности приняты равными:  $L_3 = 100$  м;  $i_3 = 100$  ‰, а  $E_n = 0,12$ .

Пользуясь формулой (13), получаем

$$|i_p|_{опт} = \sqrt{\frac{2\,494\,000}{590}} = 65 \text{ ‰}.$$

При отсутствии резко выраженных складок местности, т. е. при  $n_{пер} = 0$ , величины  $\alpha_0 = 982\,000$  и  $\beta_0 = 531,71$ . В этом случае оптимальный руководящий подъем равен 43 ‰.

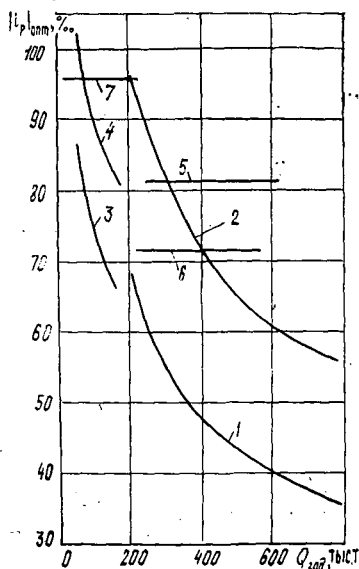
Его предельное значение ограничивается известным условием

$$i_p \leq \frac{1}{g} \left( \frac{F_k}{Q_{бр}} - \psi \right), \quad (16)$$

где  $F_k$  — касательная сила тяги на руководящем подъеме, Н.

На рис. 2 приведены графики зависимости  $|i_p|_{опт} = f(Q_{год})$ , построенные на основании исходных данных, использованных в примере. Ограничения  $i_p$  нанесены согласно формуле (16).

Рис. 2. Примерная зависимость оптимального руководящего подъема от годового грузооборота лесных дорог: 1, 2 — для лесовозных дорог соответственно без пересечений поперечных складок местности и при пересечении четырех складок; 3, 4 — то же для лесохозяйственных дорог; 5 — ограничение руководящего подъема по удельной силе тяги автомобиля КрАЗ-6437 с двухосным роспуском ГКБ-9362 при  $Q_{бр} = 41$  т,  $i_p = 81$  ‰, 6 — то же для автопоезда КрАЗ-6437 + ГКБ-9383 при  $Q_{бр} = 47,2$  т,  $i_p = 72$  ‰; 7 — то же для автопоезда КамАЗ-53212 + ТМЗ-802 при  $Q_{бр} = 25$  т,  $i_p = 96$  ‰



Изложенный метод оптимизации и выбора руководящего подъема на лесовозных дорогах несложен и позволяет решать эти задачи еще на предпроектной стадии, пользуясь имеющимися топокартами в горизонталях масштабами 1 : 25 000 и 1 : 50 000, материалами рекогносцировок и другими данными. С небольшими отмеченными выше изменениями метод оптимизации руководящего подъема может быть использован и при проектировании лесовозных УЖД.