

ПАВЕЛ СЕРГЕЕВИЧ РЫБНИКОВ

аспирант кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии лесопромышленного факультета, Воронежская государственная лесотехническая академия (Воронеж, Российская Федерация)
ribnikovpavels@yandex.ru

ОПТИМАЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ ПОГРУЗОЧНЫХ ПУНКТОВ ВДОЛЬ ЛЕСОВОЗНОГО УСА

Получены аналитические зависимости для расчета оптимального расстояния между погрузочными пунктами на лесосеке при смещении лесовозного уса от равновесного положения по направлению грузопотока по ветке с учетом влияния угла примыкания уса к ветке. Анализ полученных зависимостей показал, что угол примыкания уса к ветке не оказывает существенного влияния на расстояние между погрузочными пунктами. В то же время смещение уса приводит к значительным изменениям расстояний между погрузочными пунктами, располагаемыми по разные стороны от уса.

Ключевые слова: лесовозный ус, погрузочный пункт, расстояние, трелевочный волок, затраты, размещение

Положение лесовозного уса на лесосеке определяет величину затрат на трелевку лесоматериалов и их перевозку по лесовозной ветке. Для снижения себестоимости заготовки древесины в узких лесосеках ус целесообразно прокладывать по краю лесосеки со стороны магистрали, а в широких лесосеках смещать его от середины лесосеки в сторону магистрали на некоторое расстояние, определяемое из условия минимизации затрат на перевозку древесины по ветке и трелевку лесоматериалов.

В работах [5], [6] смещение уса по направлению грузопотока по ветке установлено без учета изменения расстояний между погрузочными пунктами, которое зависит от среднего расстояния трелевки. В работе [6] не рассмотрен вариант примыкания трелевочных волоков длинных и коротких пасек под разными углами. Смещение уса в сторону магистрали приводит к образованию на лесосеке ряда коротких пасек (со стороны магистрали) и ряда длинных пасек (со стороны границы зоны тяготения магистрали). Если ус примыкает к ветке под углом α , то при трелевке лесоматериалов тракторами и валочно-трелевочными машинами целесообразно следующее размещение трелевочных волоков [5], [6]: магистральные волоки расположены вдоль уса, пасечные волоки со стороны магистрали (в коротких пасеках) размещаются перпендикулярно усу, а пасечные волоки со стороны границы зоны тяготения магистрали (в длинных пасеках) размещаются под углом α к усу или параллельно направлению ветки (рис. 1а); пасечные волоки расположены параллельно усу, магистральный волок со стороны магистрали (в коротких пасеках) размещается перпендикулярно усу, а магистральный волок со стороны границы зоны тяготения магистрали (в длинных пасеках) – под углом α к усу или параллельно направлению ветки (рис. 1б).

Предложенное размещение трелевочных волоков в пасеках обусловлено сокращением рас-

ходов на трелевку лесоматериалов. Идеализированная форма лесосеки при таком размещении волоков деформируется, и ее часть со стороны границы зоны тяготения магистрали имеет форму параллелограмма, а со стороны магистрали – прямоугольную. Когда ус примыкает к ветке под прямым углом, пасечные и магистральные волоки в коротких и длинных пасеках размещаются одинаково.

Оптимальное расстояние между погрузочными пунктами определяется по минимуму суммарных удельных затрат z_{CY} (в рублях на кубический метр) на устройство погрузочного пункта и трелевку древесины к этому погрузочному пункту [3], [4], [7]. Целевая функция имеет вид

$$z_{CY} = \frac{c_{ПП} + z_{MB} + z_{ПВ}}{q} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $c_{ПП}$ – затраты на устройство, содержание и ликвидацию погрузочного пункта, руб.; z_{MB} – затраты на устройство магистральных трелевочных волоков и на трелевку древесины по ним, руб.; $z_{ПВ}$ – затраты на устройство пасечных трелевочных волоков и на трелевку древесины по ним, руб.; q – объем заготавливаемой древесины в пасеке – объем вывозки с погрузочного пункта, m^3 .

$$z_{MB} = C_{MB}l_{MB} + l_{CMB}b_{MB}q_o + l_{CM}b_Mq_{П}, \quad (2)$$

где C_{MB} – удельная стоимость устройства магистрального волока, руб./км; l_{MB} – протяженность магистрального волока в пасеке, км; l_{CMB} – среднее расстояние трелевки по магистральному волоку при основных работах, км; b_{MB} – стоимость трелевки по магистральному волоку при основных работах, руб./($m^3 \cdot$ км); q_o – объем трелевки древесины при основных работах, m^3 ; l_{CM} – среднее расстояние трелевки по магистральному волоку при подготовительных работах, км; b_M – стоимость трелевки по магистральному волоку при подготовительных работах, руб./($m^3 \cdot$ км);

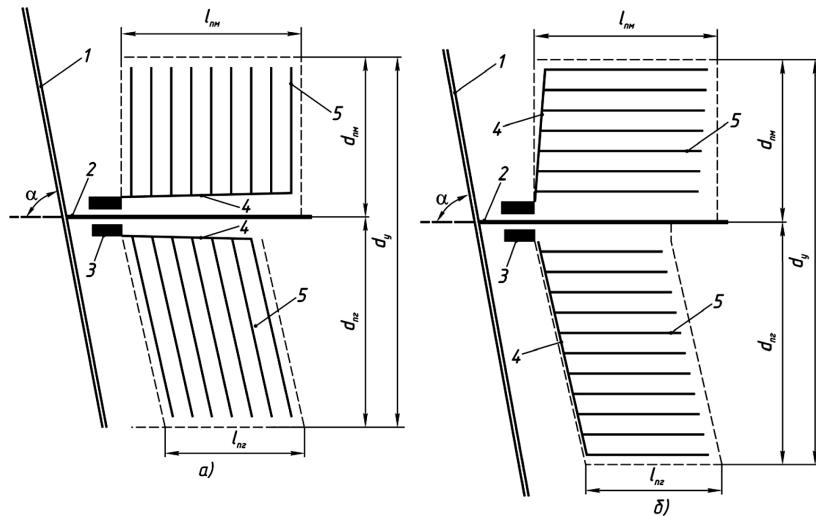


Рис. 1. Схемы размещения трелевочных волоков и погрузочных пунктов относительно лесовозного уса:
1 – лесовозная ветка; 2 – лесовозный ус; 3 – погрузочный пункт; 4 – магистральный трелевочный волок; 5 – пасечный трелевочный волок; а – магистральные волоки расположены вдоль уса; б – пасечные волоки расположены вдоль уса

q_{μ} – объем трелевки древесины при подготовительных работах, м^3 .

$$z_{\mu B} = C_{\mu B} l_{\mu B} + l_{\mu SPB} b_{\mu B} q_O + l_{\mu SP} b_{\mu} q_{\mu}, \quad (3)$$

где $C_{\mu B}$ – удельная стоимость устройства пасечного волока, руб./км; $l_{\mu B}$ – протяженность пасечных волоков в пасеке, км; $l_{\mu SPB}$ – среднее расстояние трелевки по пасечным волокам при основных работах, км; $b_{\mu B}$ – стоимость трелевки по пасечным волокам при основных работах, руб./($\text{м}^3 \cdot \text{км}$); $l_{\mu SP}$ – среднее расстояние трелевки по пасечным волокам при подготовительных работах, км; b_{μ} – стоимость трелевки по пасечным волокам при подготовительных работах, руб./($\text{м}^3 \cdot \text{км}$).

Целевая функция (1) и ее составляющие, определяемые по зависимостям (2) и (3), включают параметры, которые зависят от принятого технологического процесса лесосечных работ ($c_{\mu \mu \mu}$, b_{MB} , $b_{\mu B}$, b_{μ}) и размеров пасеки (l_{MB} , $l_{\mu B}$, q , $l_{\mu SPB}$, $l_{\mu SP}$, q_{μ}). Примем, что пасека имеет следующие размеры (в километрах): l_{μ} – ширина пасеки (расстояние между погрузочными пунктами); d_{μ} – длина (глубина) пасеки – расстояние по нормали от лесовозного уса до границы пасеки.

Для того чтобы найти оптимальную ширину пасеки l_{μ} надо взять производную от z_{CY} по l_{μ} и, приравняв ее к 0, решить полученное уравнение относительно l_{μ} . Найдем производную и приравняем ее к 0. Получаем

$$\frac{dz_{CY}}{dl_{\mu}} = \frac{(c_{\mu \mu \mu} + z_{MB} + z_{\mu B})' q - q'(c_{\mu \mu \mu} + z_{MB} + z_{\mu B})}{q^2} = 0. \quad (4)$$

Так как объем заготовки древесины на пасеке не равен 0, то $q^2 \neq 0$, следовательно,

$$(c_{\mu \mu \mu} + z_{MB} + z_{\mu B})' q = q'(c_{\mu \mu \mu} + z_{MB} + z_{\mu B}). \quad (5)$$

При примыкании уса к ветке под некоторым углом α , как было сказано ранее, пасека име-

ет форму параллелограмма. При равномерном распределении запаса ликвидной древесины по площади лесосеки объем заготовки древесины на пасеке q составит

$$q = 100 \gamma_{\mu} l_{\mu} d_{\mu}, \quad (6)$$

где γ_{μ} – ликвидный запас древесины на лесосеке, $\text{м}^3/\text{га}$.

Из формулы (6) можно найти, что $q' = 100 \gamma_{\mu} d_{\mu}'$. Подставим выражения, определяющие q и q' , в уравнение (5) и, выполнив его преобразование с учетом того, что $c_{\mu \mu \mu} = \text{const}$, получим

$$l_{\mu} \left(\frac{dz_{MB}}{dl_{\mu}} + \frac{dz_{\mu B}}{dl_{\mu}} \right) = c_{\mu \mu \mu} + z_{MB} + z_{\mu B}. \quad (7)$$

Для решения уравнения (7) требуется определить затраты z_{MB} и $z_{\mu B}$ в зависимости от параметров пасеки и технологического процесса лесосечных работ и их производные.

Протяженность трелевочных волоков и средние расстояния трелевки зависят не только от размеров пасеки, но и от расположения волоков. При размещении магистрального волока вдоль уса (рис. 1а) его протяженность в пасеке

$$l_{MB} = k_{PM} \left(a_0 + l_{\mu} - \frac{a_k}{\sin \alpha} \right), \quad (8)$$

где k_{PM} – коэффициент удлинения магистрального волока; a_0 – протяженность магистрального волока за пределами пасеки, км; a_k – расстояние от конца магистрального волока до границы пасеки, км.

Среднее расстояние трелевки по магистральному волоку будет одинаковым как при основных, так и при подготовительных работах, то есть $l_{CMB} = l_{CM}$. Величину l_{CMB} определим из условия равномерного распределения запаса древес-

сины на пасеке и того, что форма пасеки близка к правильной:

$$l_{CMB} = k_{PM} \left[a_0 + 0,5 \left(l_{\pi} - \frac{a_K}{\sin \alpha} \right) \right]. \quad (9)$$

Подставим зависимости (8) и (9) в формулу (2) с учетом, что $q_O = 100\gamma_{\pi}l_{\pi}(d_{\pi}-s)$, $q_{\pi} = 100\gamma_{\pi}l_{\pi}s$, и выполним преобразования

$$z_{MB} = k_{PM} \left\{ \begin{array}{l} C_{MB} \left(a_0 + l_{\pi} - \frac{a_K}{\sin \alpha} \right) + \\ + 50\gamma_{\pi}l_{\pi} \left(2a_0 - \frac{a_K}{\sin \alpha} \right) \left[b_{MB}(d_{\pi}-s) + b_M s \right] + \\ + 50\gamma_{\pi}l_{\pi}^2 \left[b_{MB}(d_{\pi}-s) + b_M s \right] \end{array} \right\}, \quad (10)$$

где s – расстояние от оси уса до бровки магистрального волока, км.

$$\frac{dz_{MB}}{dl_{\pi}} = k_{PM} \left\{ \begin{array}{l} C_{MB} + 50\gamma_{\pi} \left(2a_0 - \frac{a_K}{\sin \alpha} \right) \left[b_{MB}(d_{\pi}-s) + b_M s \right] + \\ + 100\gamma_{\pi}l_{\pi} \left[b_{MB}(d_{\pi}-s) + b_M s \right] \end{array} \right\}. \quad (11)$$

Протяженность пасечных волоков $l_{\pi MB}$ определяется как произведение количества волоков в пасеке, равное $l_{\pi} \sin \alpha / a$, на протяженность волока, которая составляет $(d_{\pi} - a_{\pi} - s) / \sin \alpha$, где a – ширина зоны тяготения к пасечному волоку, км; a_{π} – расстояние от конца пасечного волока до границы пасеки, км. Следует также учесть прокладку пасечных волоков в зоне между лесовозным усом и магистральным волоком; при размещении этих пасечных волоков перпендикулярно магистральному волоку их количество составит l_{π} / a , протяженность волока $(s - s_{MB} - a_s)$, где s_{MB} – ширина магистрального волока, км; a_s – расстояние от конца пасечного волока до оси уса, км. На основе вышеизложенного получаем

$$l_{\pi MB} = \frac{k_{PM}l_{\pi}}{a} (d_{\pi} - a_{\pi} - s_{MB} - a_s), \quad (12)$$

где k_{PM} – коэффициент удлинения пасечного волока.

Среднее расстояние l_{CMB} и объем q_{CMB} трелевки древесины по пасечным волокам равны:

$$l_{CMB} = \frac{k_{PM}(d_{\pi} - a_{\pi} - s)}{2 \sin \alpha}; \quad q_O = 100\gamma_{\pi}l_{\pi}(d_{\pi} - s). \quad (13)$$

Среднее расстояние l_{CMB} и объем q_{CMB} трелевки древесины по пасечным волокам при подготовительных работах составляют:

$$l_{CMB} = 0,5k_{PM}(s - s_{MB} - a_s); \quad q_{\pi} = 100\gamma_{\pi}l_{\pi}(s - s_{MB}). \quad (14)$$

Подставим выражения (12)–(14) в формулу (3):

$$z_{MB} = k_{PM}l_{\pi} \left\{ \begin{array}{l} \frac{C_{MB}(d_{\pi} - a_{\pi} - s_{MB} - a_s)}{a} + \\ + 50\gamma_{\pi} \left[\frac{b_{MB}(d_{\pi} - s)(d_{\pi} - a_{\pi} - s)}{\sin \alpha} + \right. \\ \left. + b_{\pi}(s - s_{MB})(s - s_{MB} - a_s) \right] \end{array} \right\}. \quad (15)$$

Возьмем производную от функции (15):

$$\frac{dz_{MB}}{dl_{\pi}} = k_{PM} \left\{ \begin{array}{l} \frac{C_{MB}(d_{\pi} - a_{\pi} - s_{MB} - a_s)}{a} + \\ + 50\gamma_{\pi} \left[\frac{b_{MB}(d_{\pi} - s)(d_{\pi} - a_{\pi} - s)}{\sin \alpha} + \right. \\ \left. + b_{\pi}(s - s_{MB})(s - s_{MB} - a_s) \right] \end{array} \right\}. \quad (16)$$

Совместный анализ формул (15) и (16) позволил установить, что $z_{MB} = l_{\pi}dz_{MB}/dl_{\pi}$. С учетом этого уравнение (7) можно упростить:

$$l_{\pi} \frac{dz_{MB}}{dl_{\pi}} = c_{\pi\pi} + z_{MB}. \quad (17)$$

Подставим выражения (10) и (11) в уравнение (17) и произведем его преобразование. Решение уравнения (17) при подстановке зависимостей (10) и (11) и с учетом, что $l_{\pi} > 0$, имеет вид

$$l_{\pi} = 0,14 \sqrt{\frac{c_{\pi\pi} \sin \alpha + k_{PM}C_{MB}(a_0 \sin \alpha - a_K)}{\gamma_{\pi}k_{PM}[b_{MB}(d_{\pi} - s) + b_M s] \sin \alpha}}. \quad (18)$$

При примыкании уса к ветке под прямым углом ($\alpha = 90^\circ$), $\sin \alpha = 1$ формула (18) примет вид

$$l_{\pi} = 0,14 \sqrt{\frac{c_{\pi\pi} + k_{PM}C_{MB}(a_0 - a_K)}{\gamma_{\pi}k_{PM}[b_{MB}(d_{\pi} - s) + b_M s]}}. \quad (19)$$

При одинаковых затратах на трелевку при основных и подготовительных работах ($b_{MB} = b_M$) формулы (18) и (19) примут вид

$$l_{\pi} = 0,14 \sqrt{\frac{c_{\pi\pi} \sin \alpha + k_{PM}C_{MB}(a_0 \sin \alpha - a_K)}{\gamma_{\pi}k_{PM}b_{MB}d_{\pi} \sin \alpha}}; \quad (20)$$

$$l_{\pi} = 0,14 \sqrt{\frac{c_{\pi\pi} + k_{PM}C_{MB}(a_0 - a_K)}{\gamma_{\pi}k_{PM}b_{MB}d_{\pi}}}. \quad (21)$$

В известных формулах для определения расстояния между погрузочными пунктами [1], [2], [3], [4], [7] параметры a_0 и a_K не учитывали. Если принять $a_0 = a_K$ или $a_0 = a_K = 0$, то формула (19) еще упростится. Получаем известную зависимость [2], [3], [4], в которой $d_{\pi} = d_y/k_{\pi\pi}$.

На рис. 2 представлены графики зависимостей $l_{\pi} = f(d_{\pi})$ при углах примыкания уса к ветке 60° и 90° . Угол 60° принят из условия, что ус располагается параллельно направлению грузопотока по магистрали, а стоимость вывозки по магистрали b_M составляет половину от стоимости вывозки по ветке b_B . Оптимальный угол примыкания ветки к магистрали [7] составляет $\cos \alpha = b_M / b_B$. При принятом условии, что $b_M = 0,5b_B$, $\cos \alpha = 0,5$ соответственно $\alpha = 60^\circ$.

Из рис. 2 видно, что оптимальное расстояние между погрузочными пунктами l_{π} при размещении магистрального волока вдоль лесовозного уса убывает с возрастанием глубины пасеки d_{π} , причем при небольших значениях глубины пасеки ($d_{\pi} = 100 \dots 200$ м) убывание наиболее

интенсивное. Уменьшение ликвидного запаса древесины приводит к возрастанию расстояния между погрузочными пунктами. Сравнение рис. 2а и 2б показывает, что влияние угла примыкания уса к ветке на расстояние между погрузочными пунктами несущественно. При угле примыкания 60° указанное расстояние больше всего на 2...3 м, чем при угле примыкания 90° . Если к усу примыкают две пасеки глубиной соответственно 200 и 300 м, то разница в расстояниях между погрузочными пунктами, расположаемыми по разные стороны от уса, составит более 30...50 м.

При размещении пасечных волоков вдоль уса (рис. 1б) протяженность магистрального волока в пасеке l_{MB} составит

$$l_{MB} = k_{PM} \left(a_0 + \frac{d_{\pi} - a_K - s}{\sin \alpha} \right), \quad (22)$$

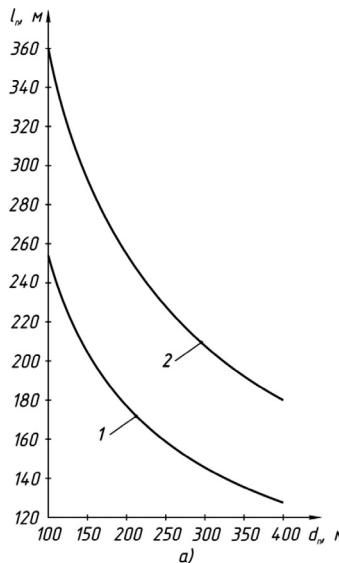
где s – расстояние от оси лесовозного уса до границы зоны безопасности, км.

Среднее расстояние трелевки по магистральному волоку l_{CMB} определим исходя из тех же условий, что и для формулы (9). Оно составляет

$$l_{CMB} = k_{PM} \left(a_0 + \frac{d_{\pi} - a_K - s}{2 \sin \alpha} \right). \quad (23)$$

Подставим полученные зависимости (22) и (23) в формулу (2), при этом учтем, что среднее расстояние трелевки, определяемое по формуле (23), соответствует объему древесины q_O , а объем q_{π} имеет расстояние трелевки a_0 . После преобразований имеем

$$z_{MB} = k_{PM} \left\{ C_{MB} \left(a_0 + \frac{d_{\pi} - a_K - s}{\sin \alpha} \right) + \right. \\ \left. + 100 \gamma_{\pi} b_{MB} l_{\pi} \left[\left(a_0 + \frac{d_{\pi} - a_K - s}{2 \sin \alpha} \right) (d_{\pi} - s) + a_0 s \right] \right\}. \quad (24)$$



$$\frac{dz_{MB}}{dl_{\pi}} = 100 \gamma_{\pi} k_{PM} b_{MB} \left[\left(a_0 + \frac{d_{\pi} - a_K - s}{2 \sin \alpha} \right) (d_{\pi} - s) + a_0 s \right]. \quad (25)$$

Пользуясь формулами (24) и (25), получаем

$$z_{MB} - l_{\pi} \frac{dz_{MB}}{dl_{\pi}} = k_{PM} C_{MB} \left(a_0 + \frac{d_{\pi} - a_K - s}{\sin \alpha} \right). \quad (26)$$

С учетом зависимости (26) уравнение (7) примет вид

$$l_{\pi} \frac{dz_{PB}}{dl_{\pi}} = c_{PB} + z_{PB} + k_{PM} C_{MB} \left(a_0 + \frac{d_{\pi} - a_K - s}{\sin \alpha} \right). \quad (27)$$

Протяженность пасечных волоков l_{PB} зависит от глубины пасеки d_{π} и ее ширины l_{π} . Пользуясь схемой рис. 1б, можно установить, что

$$l_{PB} = \frac{k_{PB} d_{\pi}}{a} (l_{\pi} - a_{\pi} - s_{MB}). \quad (28)$$

Среднее расстояние трелевки по пасечным волокам при основных и подготовительных работах будет одинаковым ($l_{CPB} = l_{SPB}$) и составит

$$l_{CPB} = 0,5 k_{PB} (l_{\pi} - a_{\pi} - s_{MB}). \quad (29)$$

Подставим формулы (28) и (29) в выражение (3). Выполнив преобразование, получим

$$z_{PB} = k_{PB} (l_{\pi} - a_{\pi} - s_{MB}) \left\{ \frac{d_{\pi} C_{PB}}{a} + \right. \\ \left. + 50 \gamma_{\pi} l_{\pi} [b_{PB} (d_{\pi} - s) + b_{\pi} s] \right\}. \quad (30)$$

Производная от функции (30) имеет вид

$$\frac{dz_{PB}}{dl_{\pi}} = k_{PB} \left\{ \frac{d_{\pi} C_{PB}}{a} + 50 \gamma_{\pi} [b_{PB} (d_{\pi} - s) + \right. \\ \left. + b_{\pi} s] (2l_{\pi} - a_{\pi} - s_{MB}) \right\}. \quad (31)$$

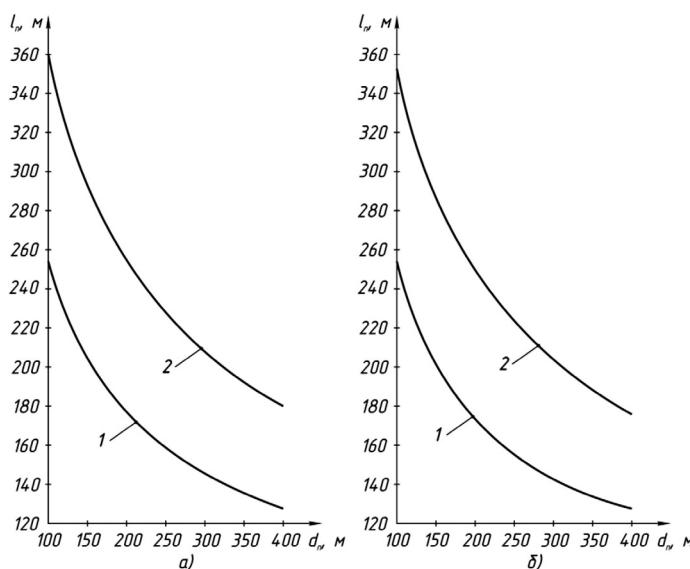


Рис. 2. Графики зависимости оптимального расстояния между погрузочными пунктами от глубины пасеки при размещении магистрального волока вдоль уса: 1 – $\gamma_{\pi} 200 \text{ м}^3/\text{га}$; 2 – $\gamma_{\pi} = 100 \text{ м}^3/\text{га}$; а – $\alpha = 60^\circ$; б – $\alpha = 90^\circ$

Для нахождения зависимости, определяющей оптимальное расстояние между погрузочными пунктами, формулы (30) и (31) подставляем в уравнение (27). Решая полученное уравнение относительно аргумента l_{Π} имеем

$$l_{\Pi} = 0,14 \sqrt{\frac{c_{\Pi\Pi}a - d_{\Pi}C_{\Pi\Pi}k_{\Pi\Pi}(a_{\Pi} + s_{MB}) + l_{MB}C_{MB}a}{\gamma_{\Pi}k_{\Pi\Pi}a[b_{\Pi\Pi}(d_{\Pi} - s) + b_{\Pi}s]}}. \quad (32)$$

В формуле (32) протяженность магистрального волока l_{MB} определяется по зависимости (22), которая при примыкании уса к ветке под прямым углом ($\alpha = 90^\circ, \sin \alpha = 1$) имеет вид

$$l_{MB} = k_{PM}(a_0 + d_{\Pi} - a_K - s). \quad (33)$$

Когда затраты на трелевку при основных и подготовительных работах одинаковые ($b_{\Pi\Pi} = b_{\Pi}$), формула (32) выглядит следующим образом:

$$l_{\Pi} = 0,14 \sqrt{\frac{c_{\Pi\Pi}a - d_{\Pi}C_{\Pi\Pi}k_{\Pi\Pi}(a_{\Pi} + s_{MB}) + l_{MB}C_{MB}a}{\gamma_{\Pi}k_{\Pi\Pi}ab_{\Pi\Pi}d_{\Pi}}}. \quad (34)$$

Формулы (34) и (32) в совокупности с выражениями (22) и (33) показывают сложную зави-

симость оптимального расстояния между погрузочными пунктами от глубины пасеки при размещении пасечных волоков вдоль уса. Для представления указанной зависимости построены графики зависимостей $l_{\Pi} = f(d_{\Pi})$ при углах примыкания уса к ветке 60° и 90° (рис. 3).

Оптимальное расстояние между погрузочными пунктами l_{Π} при размещении пасечных волоков вдоль лесовозного уса убывает с возрастанием глубины пасеки d_{Π} , убывание наиболее интенсивное при небольших значениях глубины пасеки ($d_{\Pi} = 100 \dots 200$ м). Уменьшение ликвидного запаса древесины приводит к возрастанию расстояния между погрузочными пунктами. Сравнение рис. 3а и 3б показывает, что влияние угла примыкания уса к ветке на расстояние между погрузочными пунктами несущественно. При угле примыкания 60° указанное расстояние больше всего на 4...6 м, чем при угле примыкания 90° . Если к усу примыкают две пасеки глубиной 200 и 300 м, разница в расстояниях между погрузочными пунктами, располагаемыми по разные стороны от уса, составит 27...38 м в зависимости от ликвидного запаса древесины, или 16 %.

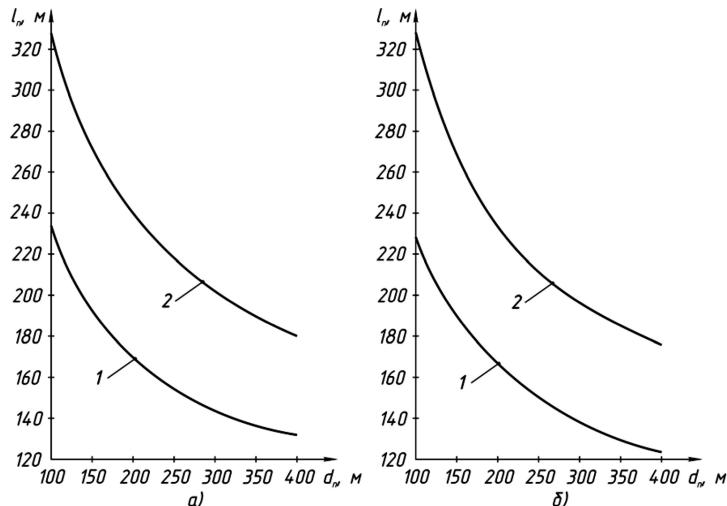


Рис. 3. Графики зависимости оптимального расстояния между погрузочными пунктами от глубины пасеки при размещении пасечных волоков вдоль уса: 1 – $\gamma_{\Pi} = 200 \text{ м}^3/\text{га}$; 2 – $\gamma_{\Pi} = 100 \text{ м}^3/\text{га}$; а – $\alpha = 60^\circ$; б – $\alpha = 90^\circ$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афоничев Д. Н. Оптимизация размещения внутриплощадочных дорог в сырьевых базах лесозаготовительных предприятий // Природопользование: ресурсы, техническое обеспечение. Воронеж, 2007. Вып. 3. С. 36–42.
2. Афоничев Д. Н. Алгоритм расчета в системе автоматизированного проектирования оптимальных параметров размещения лесовозных веток и усов // Вестник МГУЛа – Лесной вестник. 2010. № 5. С. 82–86.
3. Афоничев Д. Н., Пядухов А. В., Рыбников П. С. Размещение погрузочных пунктов вдоль лесовозного уса // Перспективные технологии, транспортные средства и оборудование при производстве, эксплуатации, сервисе и ремонте: Межвуз. сб. науч. тр. / ВГЛТА. Воронеж, 2010. Вып. 5. С. 84–87.
4. Ильин Б. А. Основы размещения лесовозных дорог в сырьевых базах лесозаготовительных предприятий. Л.: ЛТА, 1987. 63 с.
5. Пядухов А. В. Размещение лесовозного уса на лесосеке с учетом направления грузопотока // Ресурсосберегающие и экологически перспективные технологии и машины лесного комплекса будущего. Воронеж, 2009. С. 340–344.
6. Пядухов А. В. Влияние угла примыкания лесовозного уса к ветке на величину смещения уса по направлению грузопотока // Актуальные проблемы лесного комплекса. Воронеж, 2010. Вып. 1. Т. 2. С. 98–103.
7. Сухопутный транспорт леса / В. И. Алябьев, Б. А. Ильин, Б. И. Кувалдин, Г. Ф. Грехов. М., 1990. 416 с.