УДК 630.*375.4

Ю. О. СТИРАНІВСЬКИЙ, здобувач, НЛТУ України, Львів

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТУ І КОЛІЄУТВОРЕННЯ РУШІЯМИ ЛІСОВИХ МАШИН

Наведено огляд підходів до моделювання процесу багаторазового ущільнення ґрунтової поверхні мобільними машинами. За характеристику деформованості лісової ґрунтової поверхні прийнято еквівалентний модуль деформації з урахуванням ефекту зміцнення корінням, дерном чи лісосічними рештками. Для оцінки точності моделювання здійснено порівняння розрахункових і експериментальних даних. Наведено результати польових випробувань колісних лісопромислових тракторів LKT 81 і TAF 657 та розрахунок глибини колії від кількості проїздів лісових машин.

Ключові слова: ущільнення лісової ґрунтової поверхні, колієутворення, багаторазовий рух лісових машин.

Вступ. Робота лісових машин викликає цілу низку потенційних екологічних ризиків. Найвагоміші із них пов’язані з пошкодженням ґрунтової поверхні, зокрема ущільнення і колієутворення. Як наслідок це може призводити до посилення ерозійних процесів, зниження продуктивності лісового масиву, погіршення стану водних потоків та інших екологічних проблем. Метою даної роботи є обґрунтування методів розрахункового визначення ущільнювального впливу і показників колієутворення під час руху лісових машин деформованими ґрунтовими поверхнями.

Стан проблеми ущільнення ґрунту рушіями лісових машин. Під час дії рушія на ґрунт в останньому виникають деформації, які вважаються пружними, якщо після усунення зовнішньої дії частинки ґрунту вернуться в початкове положення, залишковими, коли положення частинок після зняття навантаження відрізняється від початкового, і пластичними, коли залишкова деформація дорівнює загальній деформації. Унаслідок багатократної дії рушія відбувається накопичення деформацій ущільнення ґрунту та утворення колій, одночасно з цим виникає інтенсивне руйнування структури ґрунту.

Базовими дослідженнями у вивченні змін, що відбуваються у ґрунтах під дією навантаження є роботи В.Ф. Бабкова і М.А. Цитовича [1, 2]. Загалом процес ущільнення ґрунту рушіями лісових, сільськогосподарських чи інших мобільних машин відбувається за подібними закономірностями. Тому цій проблемі присвячені роботи як науковців у галузі сільськогосподарського виробництва, зокрема Я. С. Агейкіна, В. В. Гуськова, В. В. Кацигіна, М. Г. Беккера та інших, а також лісогосподарського спрямування Г. М. Анісімова, В. М. Котикова, Н. І. Библюка, F. Seixas, M. Saarilahti, I. Wästerlund та інших.

Згідно результатів цих досліджень фізична модель ущільнення ґрунтової поверхні і утворення колії подібна до втискання штампа у ґрунт. Загалом процес утворення колії складається з трьох фаз (рис.1) [3].

У першій фазі (ділянка I) відбувається тільки ущільнення ґрунту. Друга фаза (ділянка II) характеризується формуванням ядра ущільненого ґрунту, яке ніби клин не тільки ущільнює нижчі шари ґрунту, але й розсуває їх у боки. У третій фазі (ділянка III) деформація ґрунту відбувається переважно унаслідок зсування і руйнування ґрунту на так званих поверхнях ковзання, що обмежують зони II та III знизу. А частинки ґрунту зміщуються у напрямках менш напружених зон, про що свідчать місцеві випирання на краях рушія.

© Ю. О. Стиранівський, 2014

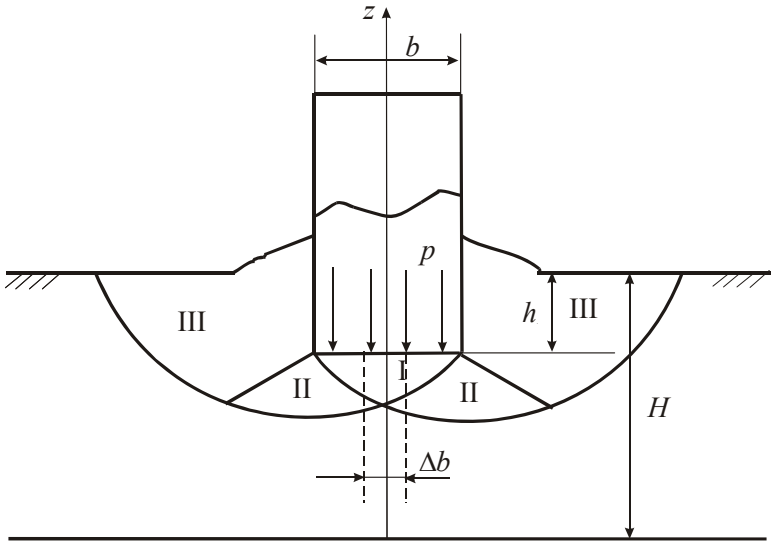

Рисунок 1 − Схема руйнування ґрунту під рушієм мобільної машини

Моделювання процесу колієутворення рушіями лісових машин. Залежність між тиском *p* і осадкою штампа *h* під час зминання реального ґрунту виражається графіком (рис.2) [4].

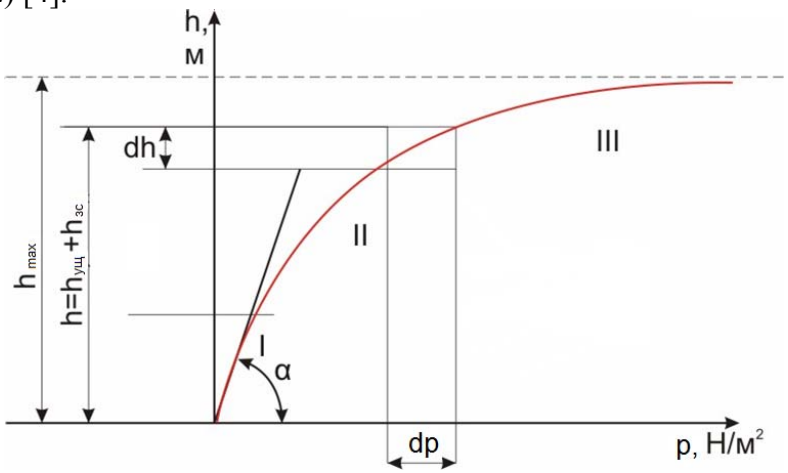

Рисунок 2 − Залежність осідання штампа від тиску

На кривій *h=f(p)* (див. рис. 2) можна виділити ті ж три фази (рис. 1), які по-різному відображають залежність між тиском і величиною деформації. На початковій фазі стискання (ділянка I) деформація пропорційна тиску. На ділянці II залежність має нелінійний характер – крім ущільнення у ґрунті виникають деформації зсування. На ділянці III ущільнення ґрунту припиняється і починається пластичне переміщення: ґрунт досягає межі міцності або межі витримувальної здатності.

Для математичного виразу залежності *h=f(p)* у механіці ґрунтів пропонувалися різні формули. Однією із найточніших вважається формула В.В. Кацигіна, яка підпорядковується закону гіперболічного тангенса [5]

$$h = \frac{\sigma_0}{k} \frac{1}{1 - p / \sigma_0} arcth \frac{p}{\sigma_0}. \qquad (1)$$

Наведена формула достатньо складна і потребує визначення великої кількості емпіричних коефіцієнтів. У роботі [4] наведено дещо зручніші для практичних

розрахунків залежності, які базуються на застосуванні диференціального підходу до визначення деформації однорідного ґрунту.

$$h=\frac{\alpha\cdot p}{1-\frac{p}{p_в}}+\frac{\alpha^2\cdot p^2}{h_{\max}+\alpha\cdot p}, \tag{2}$$

де α – коефіцієнт лінійної деформації однорідного масиву ґрунту; p_s – витримувальна здатність ґрунтової поверхні, h_{max} – максимальна деформація ґрунту.

Коефіцієнт α визначають виходячи із формули для розрахунку деформації однорідного ґрунту на ділянці I (рис. 2)

$$h=\alpha\cdot p=\frac{1-\mu^2}{E_0}\cdot\omega\cdot b\cdot p, \tag{3}$$

де: E_0 – сумарний модуль деформації ґрунту у фазі ущільнення, що враховує як пружні, так і залишкові деформації; μ – коефіцієнт поперечного розширення ґрунту; b і ω – відповідно ширина і коефіцієнт форми деформатора.

Витримувальна здатність ґрунтової поверхні у значній мірі залежить від початкових значень щільності ρ_0 і вологості W ґрунту (за даними наших експериментальних досліджень міняється у декілька разів). Тому максимальну деформацію ущільнення ґрунту доцільно визначити за методом еквівалентного шару, запропонованого М. Цитовичом [2]

$$h_{max}=H_0\left(1-\frac{\rho_0}{(1-W)\,\rho_m}\right), \tag{4}$$

де H_0 – товщина еквівалентного шару ґрунту; ρ_0 – початкова щільність; ρ_m – щільність ґрунту в стані найщільнішого упакування частинок; W – вологість ґрунту.

Для тягового режиму унаслідок буксування рушія характерне додаткове зсування ґрунту у горизонтальному напрямі [5], для цього випадку вираз для визначення глибини колії після проїзду поодинокого рушія потрібно множити на величину

$$\Delta=\frac{1+\delta}{1-\delta/2}, \tag{4}$$

де δ – коефіцієнт буксування рушія.

Багаторазові проїзди лісових машин призводять до збільшення глибини колії та зростання щільності ґрунту через накопичення деформацій. Крім цього загальна деформація (глибина колії) представляє суму деформацій ущільнення і зсування. Для визначення ступеня ущільнення ґрунту під дією трелювальної машини В. Котіков [6] запропонував підхід, за якого лісові ґрунти з відносно малою пружністю розглядаються як пластичні матеріали. Для таких ґрунтів показники механічних властивостей змінюються тільки під час прикладення навантаження і залишаються постійними після розвантаження, а деформації ущільнення змінюються пропорційно тискові. Характер накопичення деформацій ущільнення ілюструється графіком (рис.3).

У рамках цих припущень та з урахуванням підходу [3] накопичення деформацій ущільнення ґрунту під час багаторазових проїздів машини трелювальним волоком описується виразом

$$\sum\Delta h=\frac{\alpha\cdot p\cdot n}{1+\frac{\alpha\cdot p\cdot n}{h_{\max}}}+\frac{\alpha\cdot p^2}{p_в-p}\cdot\frac{1-\chi^n}{1-\chi}, \tag{5}$$

де n – кількість проїздів; $p_в$ – витримувальна здатність ґрунтової поверхні; χ – коефіцієнт накоплення деформації.

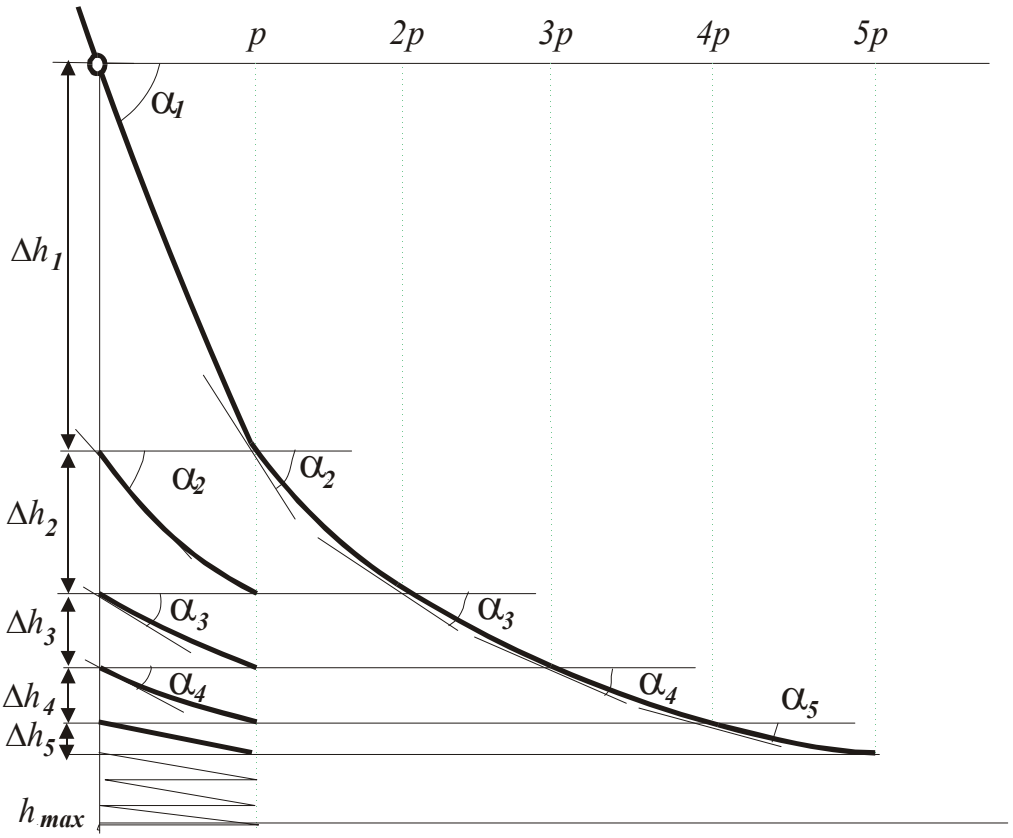

Рисунок 3 − Схема накопичення деформацій ущільнення під час багаторазових проїздів лісової машини

Розрахунок глибини колії за вищенаведеними залежностями для багаторазових ущільнень дають добре співпадання розрахункових та експериментальних даних для сільськогосподарських угідь [4], тобто ґрунтових поверхонь попередньо розпушених з низькою витримувальною здатністю.

Експериментальні дослідження виконані нами [7], а також результати наведені у роботі [8] свідчать про значний вплив наявності дернового покриву та коріння дерев на деформацію ґрунтової поверхні лісових деревостанів. Крім цього для зменшення інтенсивності колієутворення трелювальні волоки часто покривають шаром лісосічних решток. Тому у роботі [9] за характеристику деформованості лісової ґрунтової поверхні рекомендовано прийняти еквівалентний модуль деформації $E_{екв}$ і розраховувати глибину колії за багаторазового проїзду лісової машини за залежністю

$$H_n = \frac{\omega \cdot p \cdot b \cdot (1-\mu^2) \cdot (1+\chi \cdot \lg n)}{E_{екв}}; \qquad (6)$$

$$E_{екв}=\frac{E_{гр}\cdot k_к}{1-\frac{2}{\pi}\cdot\left(1-\frac{1}{\left(\frac{E_{решт}}{E_{гр}\cdot k_к}\right)^{n-1}}\right)\cdot arctg\left(\frac{h_{решт}}{D}\cdot\left(\frac{E_{решт}}{E_{гр}\cdot k_к}\right)^{n}\right)}, \quad (7)$$

де $E_{гр}$ – модуль деформації ґрунту без коріння; $k_к$ – емпіричний коефіцієнт, який характеризує зміцнення ґрунтової поверхні корінням дерев; $E_{решт}$ і $h_{решт}$ – відповідно модуль деформації і товщина шару лісосічних решток.

Однак за нашими експериментальними даними [7] модуль деформації шару лісосічних решток у значній мірі залежить від багатьох факторів (виду і вологості решток, щільності і товщини шару тощо), які у процесі руху лісових машин міняються і це викликає певні труднощі у достатньо точному визначенні величини $E_{решт}$. Ефект зміцнення лісової ґрунтової поверхні корінням, дерновим покриттям чи шаром лісосічних решток із задовільною для подальших розрахунків точністю може бути враховано емпіричними коефіцієнтами $k_к$, $k_д$ і $k_{решт}$, максимальні значення яких визначають експериментальним шляхом, а поточні розраховують за формулами

$$k_{к,д,решт}=1+\alpha_{к,д,решт}\frac{H_{к,д,решт}-H_{n-1}}{H_{к,д,решт}} \text{ за умови } H_{к,д,решт}<H_{n-1};$$
$$k_{к,д,решт}=1 \qquad \text{за умови } H_{к,д,решт}\geq H_{n-1}, \quad (8)$$

де $\alpha_{к,д,решт}$ – коефіцієнт збільшення модуля деформації ґрунтової поверхні за рахунок зміцнення відповідно корінням, дерном і лісосічними рештками; $H_{к,д,решт}$ – товщина ґрунтового шару відповідно з корінням, дерном і лісосічними рештками.

У цьому випадку залежність для визначення $E_{екв}$ матиме вигляд

$$E_{екв}=E_{гр}\cdot k_к\cdot k_д\cdot k_{решт}. \quad (9)$$

За даними роботи [9] $\alpha_к$=0,64 і $H_к$=0,3 м для змішаних і ялинових деревостанів на суглинистих ґрунтах, нами встановлено [7], що $\alpha_д$=1,5 і $H_д$=0,05 м.

Збільшення щільності ґрунтової поверхні за багаторазових проїздів лісової машини розраховують за залежністю

$$\rho_n=\rho_0+\frac{\rho_0\cdot H_n}{H_0-H_n}, \quad (10)$$

де ρ_0 і ρ_n – щільність ґрунту відповідно початкова і після n-го проїзду лісової машини; H_0 – глибина поширення деформації.

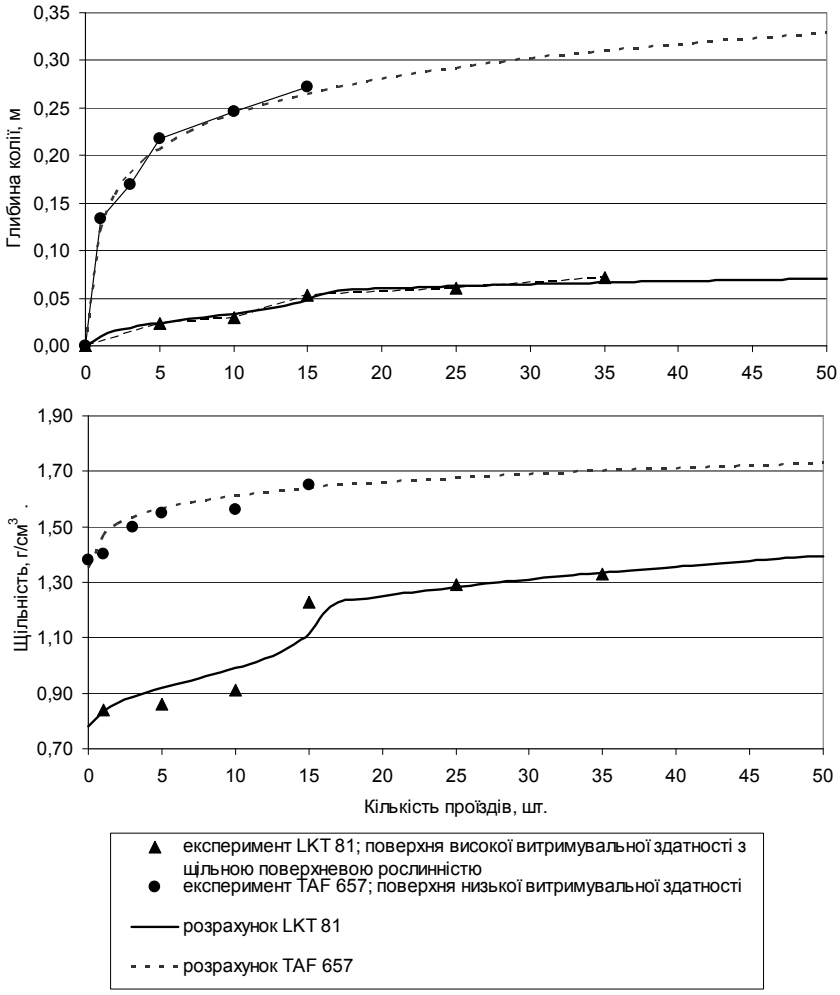

Рисунок 4 − Порівняння розрахункових і експериментальних даних зміни глибини колії від кількості проїздів лісових машин

Висновки. Для оцінки точності моделювання процесу колієутворення на рис. 4. наведено результати польових випробувань колісних лісопромислових тракторів LKT 81 і TAF 657 та розрахунку глибини колії від кількості проїздів лісових машин за умови, що колесо вважається абсолютно жорстким з плямою контакту шириною *b* (ширина колеса) і довжиною *r* (радіус колеса) [10].

Деякі розбіжності між розрахунковими і експериментальними даними (рис. 4) можуть бути пояснені низкою причин, однією з яких є непостійність фізико-механічних властивостей ґрунту на шляху руху машини та у процесі багаторазового навантаження. Виявлено також суттєвий вплив поверхневої рослинності (експеримент LKT 81, рис. 4.) на витримувальну здатність ґрунтової поверхні до моменту пошкодження цього шару. Тим не менш, як показала статистична обробка експериментальних даних, залежність (6) у достатній мірі відображає загальну тенденцію і характер збільшення глибини колії залежно від накопичення деформацій ущільнення при багаторазових проїздах лісової машини. Розбіжність між експериментальними і розрахунковими даними становить 2,6-11,5 % для глибини колії і 0,7-10,2 % для щільності ґрунту.

Список літератури: 1. *Бабков В.Ф., Безрук В.М.* Основы грунтоведения и механики грунтов. – М.: Высшая школа, 1986. – 307 с. **2.** *Бойко М. М.* Теоретичні та експериментальні дослідження взаємодії тракторного колісного рушія з ґрунтовою поверхнею лісовозної дороги // Лісова інженерія : техніка, технологія і довкілля. Науковий вісник : Збірник науково-технічних праць. – Львів : УкрДЛТУ. – 2004, вип. 14.3. – С. 166-171. **3.** Тракторы: теория. Учебник для студентов вузов по спец. «Автомобили и тракторы» / Под общей редакцией *В. В. Гуськова*. – М.: Машиностроение, 1988. – 376 с. **4.** *Карапетян М. А.* Повышение эффективности технологических процессов путём уменьшения уплотнения почв ходовыми системами сельскохозяйственных тракторов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МГУП, 2010. – 49 с. **5.** *Библюк Н. І.* Лісотранспортні засоби: теорія. - Львів, Панорама, 2004. – 453 с. **6.** *Котиков В. М.* Воздействие лесозаготовительных машин на лесные грунты. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МТУЛ, 1995. – 37 с. **7.** *Стиранівський О. А., Стиранівський Ю. О.* Природоохоронні засади транспортного освоєння гірських лісових територій: монографія. – Львів: РВВ НЛТУ України, 2010. – 208 с. **8.** *Wästerlund I.* Strength components in the forest floor restricting maximum tolerable machine forces. Journal. Terramechanics, 26(2), 1989. – P. 177-182. **9.** *Катаров В. К.* Обоснование применимости технологических процессов лесосечных работ по степени воздействия на пути первичного транспорта леса. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Петрозаводск.: ПетрГУ, 2009. – 20 с. **10.** Operations protocol for Eco-efficient Wood Harvesting on Sensitive Sites. / *Owende P. M. O., Lyons J., Haarlaa R., [and oth.]*. - Project ECOWOOD. Contract No. QLK5-1999-00991, 2002. – 74 p.

Надійшла до редколегії 05.03.2014

УДК 630.*375.4

Моделювання процесу ущільнення ґрунту і колієутворення рушіями лісових машин / Ю. О. Стиранівський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автомобіле- та тракторобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 8 (1051). – С. 129-135. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-6840.

Приведен обзор подходов к моделированию процесса многократного уплотнения грунтовой поверхности мобильными машинами. За характеристику деформируемости лесной грунтовой поверхности принято эквивалентный модуль деформации с учетом эффекта укрепления корнями, дерном или лесосечными отходами. Для оценки точности моделирования проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: уплотнение лесной грунтовой поверхности, колееобразование, многократный проезд лесных машин.

Modeling of the soil compaction process and rutting by timber transport machines / U. O. Styranivsky // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Car- and tractorbuilding. – Kharkiv : NTU «KhPI», 2014. – № 8 (1051). – P. 129-135. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2078-6840.

An overview of approaches to the modeling of multiple surface compactions by mobile machines is given. The equivalent deformation modulus was taken for the characteristic of the forest soil surface deformity with an allowance for the stabilization with roots, turf or logging waste. Calculated and experimental data were compared to evaluate the modeling accuracy.

Keywords: forest soil compaction, rutting, repeated timber transport machines passages.