

8. ЛІСОВА ІНЖЕНЕРІЯ: ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ДОВКІЛЛЯ



Наукові праці Лісівничої академії наук України
Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.15421/411942>
Article received 2019.08.24
Article accepted 2019.12.26

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
@ ✉ Correspondence author
Oleg Machuga
oleg_mach@ukr.net

General Chuprynka st., 103, Lviv, 79057, Ukraine

УДК 630*377.4:531.8

Науково-методичні підходи до обґрунтування енергоощадних та екологобезпечних параметрів лісових машин

М. М. Борис¹, О. С. Мачуга², Н. В. Шевченко³, Н. І. Библюк⁴

Досконалість конструкції лісових машин залежить від вдалого вибору їхніх енергетичних, вагових, геометричних та експлуатаційних параметрів, вплив яких виявляється безпосередньо в процесі роботи машин у реальних виробничих умовах. Під час проектування лісової машини необхідно таким чином обґрунтувати її параметри, щоб в процесі експлуатації машини питомі енерговитрати на одиницю виконаної роботи, а також негативний вплив на довкілля були мінімальними. З'ясовано, що наявні науково-методичні підходи до проектування лісових машин не повною мірою дають змогу всебічно обґрунтувати їхні параметри, які б забезпечували можливість ефективних режимів їхньої роботи з огляду не тільки енергоощадності, але й екологобезпечності. Тому відповідне обґрунтування параметрів лісових машин потребує розроблення нових та вдосконалення відомих математичних моделей і методів їх руху.

Розвинуто науково-методичні засади енергетичного підходу у формі варіаційних нерівностей стосовно енергії та анергії системи для проектування лісових машин. Побудовано метод аналізу механічної поведінки лісових машин у взаємодії з робочим середовищем та виконано оцінювання параметрів колієутворення внаслідок руху лісової машини ґрунтовою опорною поверхнею. Систематизовано параметри, що впливають на енергоощадність та екологобезпечність машини. Із застосуванням методу енергетичних, вагових і геометричних аналогій отримано графічні залежності для різних типів лісових машин, за якими встановлюють раціональні

¹ Борис Микола Михайлович – член-кореспондент Лісівничої академії наук України, кандидат технічних наук, доцент, проректор з науково-педагогічної виховної роботи та міжнародних зв'язків. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-237-21-22, +38-098-964-39-33. E-mail: borysmm@ukr.net ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3107-7938>

² Мачуга Олег Степанович – член-кореспондент Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, доцент кафедри лісових машин. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-239-27-69, +38-067-670-19-06. E-mail: oleg_mach@ukr.net ORCID <http://orcid.org/0000-0002-9151-8854>

³ Шевченко Наталія Василівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри лісових машин. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-239-27-69, +38-067-664-39-88. E-mail: shenatalka@ukr.net ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4004-891X>

⁴ Библюк Нестор Іванович – академік Лісівничої академії наук України, доктор технічних наук, професор кафедри лісових машин. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. Тел.: 032-239-27-69, +38-097-306-61-38. E-mail: oleg_mach@ukr.net

значення експлуатаційних параметрів. Розвинуто метод обґрунтування, розрахунку характеристик та аналізу вибору гідромеханічної трансмісії лісової машини.

Використання запропонованого підходу дасть змогу проектувати лісові машини, які би забезпечували вигоди енергоощадності та екологобезпеки.

Ключові слова: енергетичний підхід; ексергія системи; екологічна безпека; енерговитрати; кореляційні криві; колієутворення; гідромеханічна трансмісія.

Вступ. Під час проектування лісових машин однією із визначальних умов є встановлення раціональних параметрів конструкції, які забезпечували б її досконалість, повною мірою враховували особливості взаємодії машини з опорною поверхнею, якою вона рухається, предметом праці, а також із навколишнім середовищем. З цього погляду, важливим завданням є всебічне удосконалення наявних науково-методичних, теоретичних і практичних підходів до проектування лісових машин з метою ощадливого використання енергоносіїв та дотримання вимог екологічної безпеки упродовж їх експлуатації.

У процесі руху лісової машини її взаємодія з робочим середовищем, зокрема ґрунтовою опорною поверхнею, пакетом деревини тощо характеризується взаємним впливом складників такої динамічної системи. Діючи на ґрунт, лісова машина зумовлює в ньому низку зворотних та незворотних змін: пружне деформування, ущільнення, зумовлене зміною структури скелету ґрунтових мас, в'язке течіння, спричинене зміною структури насиченості ґрунту водою, відривання рушійними машинами частинок ґрунту тощо. З іншого боку, на машину діє пакет деревини, який може зумовити в її елементах складні коливні процеси та напружений стан, перенавантаження двигуна й трансмісії.

Такі чинники взаємодії машини з робочим середовищем можуть призвести до негативних екологічних наслідків: понад допустиме ущільнення ґрунту, формування колії, знищення поверхневого родючого шару ґрунту, а також спровокувати ерозійні процеси ґрунтових мас. Формування вказаних змін ґрунту здійснюється за рахунок поглинання енергетичного ресурсу двигуна машини, що, своєю чергою, призводить до підвищення витрати паливно-змашувальних матеріалів.

Традиційним є підхід до компонування конструкції (Byblyuk, 2004a) та вибору експлуатаційних параметрів (Bilyk & Adamovskyj, 2004), які забезпечили б можливість мінімізації питомих енерговитрат щодо одиниці виконуваної роботи (Borys, 2007). Водночас експлуатація лісових машин у технологічних процесах галузі зазвичай призводить до негативних, з огляду сталого розвитку, наслідків, напрями яких охарактеризував Byblyuk (2004b). У такому контексті систематизовано вплив лісотранспорту на стан природного середовища Українських Карпат (Byblyuk, 2004c) та вплив господарської діяльності людини на формування передумов негативних стихійних явищ в Карпатах (Byblyuk, Kovalchuk & Machuga, 2008). Окремим аспектам впливу лісозаготівельних машин на природне та

робоче середовище присвячені дослідження вібрата шумонавантаження харвестерів і форвадерів (Louis, Philip, Owende & Shane, 2004) та лісовозів (Byblyuk, Shevchenko & Freudun, 2013), пошкодження заготовленої стовбурової деревини (Honsa, 2007), пошкодження підросту (Sowa & Szweczyk, 2000), встановлення потенційних ризиків лісозаготівлі (Adamovsky, Styranivsky & Borys, 2017), визначення опорних реакцій, що призводять до колієутворення (Walczyk, 2007), взаємодії машин, їхніх робочих органів із робочим середовищем (Machuga, 2019) тощо.

Незворотні зміни у ґрунтовому середовищі, які виявляються його ущільненням, зумовлені низкою макро- та мікроскопічних деструкційних явищ. Насамперед, це розрив міжмолекулярних та адгезивно-когезивних зв'язків між окремими ґрунтовими часточками, які формують скелет ґрунту. Крім того, окремі часточки ґрунту можуть зазнавати квазіпластичних деформацій та деформацій, зумовлених явищами повзучості (Zotsenko, Vynnykov & Miroshnuchenko, 2019). Попри такі процеси рідина, яка присутня в ґрунтовій масі, в процесі ущільнення скелету ґрунту зазнає в'язкого течіння, перерозподіляючись у порожнинах між окремими часточками ґрунту, що призводить до зміни вологості ґрунту. Такі процеси відбуваються в умовах перетворення механічної енергії в теплову – дисипації енергії, яка за своєю сутністю є мірою незворотності процесу ущільнення ґрунту (Yakhno & Machuga, 2016).

Наукова робота присвячена аспектам розвитку (Byblyuk, Borys, Machuga & Shevchenko, 2019) загальної стратегії вибору раціональних значень параметрів проєктованих машин, які б інтегровано охоплювали і мінімізацію питомих енерговитрат щодо виконуваної роботи, і мінімізацію негативного впливу машини на довкілля. Такий розвиток вбачається у поглибленому аналізі головних складників взаємодії – ґрунту та елементів конструкції машини.

Об'єкти та методика дослідження. Об'єкт дослідження – узагальнені підходи до обґрунтування енергоощадних та екологобезпечних параметрів конструкції лісових машин. Предмет дослідження – науково-методичні та прикладні методи і засоби моделювання, розрахунку й обґрунтування раціональних параметрів конструкції лісових машин. Метою дослідження є розвиток наявних та формування нових підходів до обґрунтування параметрів лісових машин шляхом комплексного застосування засад енергетичних методів, методів аналогій та розрахункових методів.

Основними завданнями є дослідження процесу колієутворення внаслідок неодноразових проїздів лісової машини, систематизація методології енергетичних, вагових і геометричних аналогій для обґрунтування параметрів лісових машин, удосконалення розрахункових схем та методів вибору гідромеханічної трансмісії лісової машини.

Енергетичні методи розвинуто для класу задач, пов'язаних із урахуванням величини дисипації енергії, яка витрачається на розривання міжмолекулярних зв'язків між часточками ґрунту, на подолання зусиль, зумовлених повзучістю та на подолання опору в'язкому течінню в рідинній компоненті ґрунту тощо. Енергетичний баланс у середовищі ґрунтової маси характеризується нагромадженою механічною енергією, тобто енергією пружного стиснення – ексергією. Крім того, для повного аналізу трансформаційних процесів, що відбуваються у механічній системі «машина – ґрунтова опорна поверхня», необхідно залучати до розгляду енергетичний ресурс дисипації, тобто теплову енергію, яка виникає в процесі деструкцій та енергетичних трансформацій, тобто енергію (Yakhno & Machuga, 2017).

Досконалість конструкції лісової машини залежить від ступеня раціональності її характеристик та параметрів, вплив яких виявляється безпосередньо під час роботи машини, залежно від експлуатаційних, виробничих і технологічних умов, зокрема – у стійкості та плавності ходу (Byblyuk, Herys & Borys, 2011), у динамічних навантаженнях трансмісії (Bilyk, Borys & Kusyuj, 2007) та ін. Виходячи з оцінювання параметрів досконалості конструкції, визначено загальні положення щодо ефективності роботи лісової машини (Borys, Herys, Shevchenko & Gromjak, 2013).

Для обґрунтування раціональних параметрів лісових машин зазвичай використовують два головні науково-методичні підходи (Bilyk & Adamovsky, 2004, Styranytsky, Byblyuk, Borys & Herys, 2006): а) фізичне, математичне та комп'ютерне моделювання динамічних процесів руху машини; б) застосування

методології енергетичних, вагових і геометричних аналогій.

Перший підхід дає змогу на підставі сформованих розрахункових моделей, зокрема, коливань лісотранспортної системи та їхнього математичного опису, визначати комплексні (питомі) показники. Застосування ж методів енергетичних, вагових і геометричних аналогій дає змогу будувати графічні залежності, за допомогою яких можна встановити раціональні значення параметрів лісових машин, відповідних до конкретних конструкторських завдань, енергетичних та екологічних вимог.

З погляду енергоощадності важливим є вдалий вибір двигуна лісової машини та її трансмісії (Shevchenko, 2011). Проектуючи гідромеханічну трансмісію, яку широко використовують у лісових машинах, обґрунтовують тип гідротрансформатора (ГТ), після чого за відомими параметрами та безрозмірними характеристиками наявних ГТ вибирають серед них узгоджений, як за потужністю та частотою обертання, так і за параметрами швидкісної характеристики двигуна і навантажувальними характеристиками ГТ (Shevchenko, 2015).

Результати та обговорення. З огляду на те, що в процесі руху лісова машина та опорна поверхня перебувають у взаємозв'язку, для його врахування та адекватного відтворення у математичній моделі побудовано структурну схему взаємодії машини з ґрунтовою опорною поверхнею, яка відображає елементи взаємного впливу цієї складної динамічної системи (рис. 1).

Для розвитку наукових засад енергетичного підходу запропоновано використовувати варіаційні нерівності, як математичний апарат дослідження поведінки неідеалізованих механічних систем із представленням енергії у вигляді суми ексергії та енергії, а також аналізувати механічну поведінку таких об'єктів з урахуванням їхньої здатності до структурних змін (Machuga, 2019):

$$\delta(E_x - A_n) \leq 0, \quad (1)$$

де E_x – ексергія механічної системи, A_n – енергія такої системи, δ – оператор варіювання.

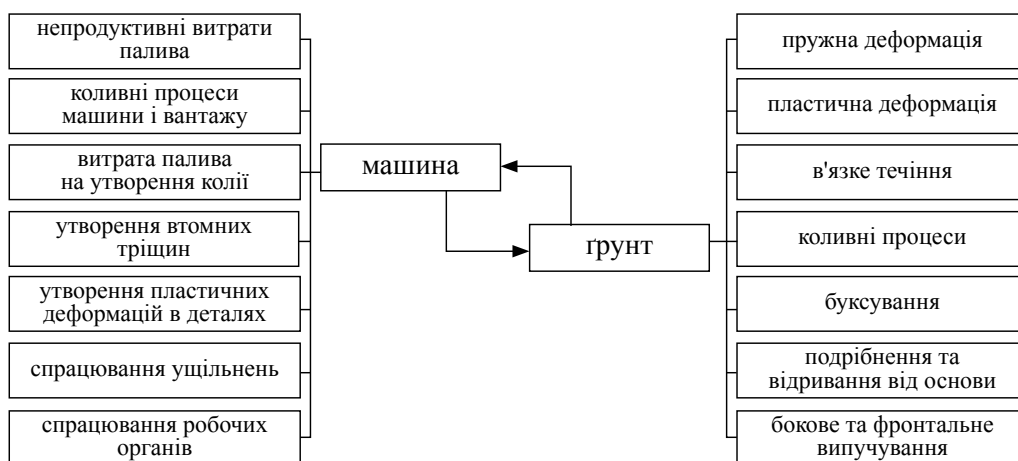


Рис. 1. Структурна схема взаємодії лісової машини з опорною поверхнею

Отже, для забезпечення умов енергетичної ощадливості та екологічної безпеки, проектні розрахунки параметрів елементів конструкцій та вузлів лісових машин повинні базуватися, окрім загальноприйнятих методик, на умові енергетичного балансу (1). Відношення (1) визначає сукупність раціональних параметрів машини, які здатні забезпечити заданий рівень енергетичних затрат машини в процесі виконання нею відповідних технологічних операцій.

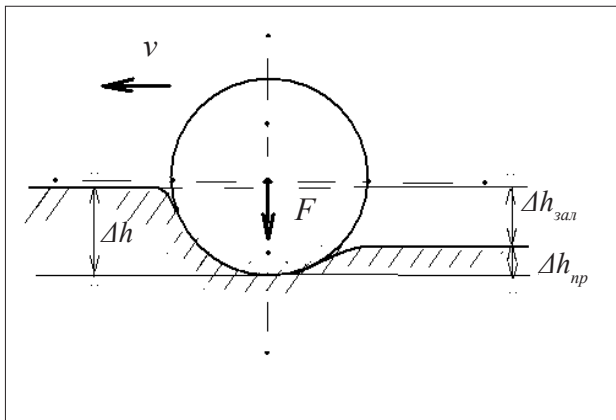
Враховуючи широкий спектр реологічних властивостей ґрунту (пружність, пластичність, здатність до ущільнення, в'язкого течіння та різних деградаційних процесів – зносу, сколу тощо), здійснено дослідження процесу колієутворення внаслідок руху мобільної лісової машини ґрунтовою поверхнею (рис. 2).

Використовуючи у варіаційній нерівності (1) отримані наближені вирази ексєргії (Machuga, 2019) та анергії даної системи, залежність залиш-

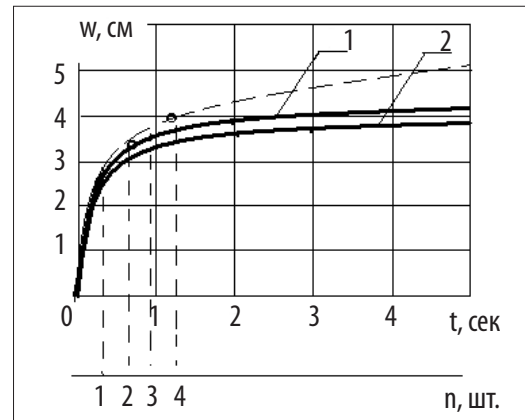
кових деформацій контактної поверхні від часу $w = w(t)$ набуде вигляду:

$$w = w(t) \leq \frac{\frac{F}{S_k} + \sigma_T \cdot 1 + \frac{4k_1^2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt{S_k}}{H}}{\frac{E}{H}(2 - \nu^2) + \frac{2\pi\mu}{t} \cdot k_1^2}, \quad (2)$$

де E , ν – модуль пружності та коефіцієнт поперечного обтиснення ґрунту, H – глибина ґрунту, на якій істотними є пружні деформації, σ_T – границя текучості ґрунту, μ – динамічна в'язкість ґрунту, k_1 – поправочний коефіцієнт, який враховує відхилення реального об'єму в'язкого чи пластичного деформування від тору, t – час, $\pi \approx 3,14$, Δh – повна деформація матеріалу ґрунту, яка складається з суми Δh_{np} , $\Delta h_{зал}$ – відповідно пружної та залишкової (пластичної) деформації, S_k – площа контакту шини і ґрунту.



а



б

Рис. 2. Колієутворення від руху мобільної машини ґрунтовою поверхнею: а – розрахункова схема взаємодії рушія з ґрунтом; б – залежність залишкової деформації точок опорної поверхні від часу t та кількості проїздів n для різних типів ґрунтів: 1 – зволожені ґрунти, 2 – жорсткі ґрунти, штрихпунктирна лінія – перезволожені податливі ґрунти, що відповідають умовам проведення експериментів (точки на рисунку)

Аналізуючи праву частину нерівності (2), відзначимо сповільнення росту залишкової деформації поверхні ґрунту в часі, що може свідчити про поступове ущільнення ґрунту. Істотним чином на залишкову деформацію впливають в'язкість та границя текучості. Отримане відношення може використовуватися для теоретичних й експериментальних досліджень процесу ущільнення та параметрів контактної взаємодії рушія мобільної машини з робочим середовищем, у цьому випадку – ґрунтовою опорною поверхнею.

Величини залишкових деформацій контактної поверхні ґрунту (рис. 2, б) визначено із відношення (2) для трельовального трактора HSM, що рухався зі швидкістю $v = 3,6$ км/год перезволоженою ґрунтовою поверхнею. Отримані результати якісно та кількісно охоплюють відомі експериментальні дані порівняно з іншими теоретичними результатами: відхилення від експерименту отриманих теоретич-

них кривих, поданих на рисунку 2 б, на 30% менше, ніж теоретичні результати інших авторів (Machuga, 2019).

Враховуючи те, що досконалість конструкції лісових машин залежить від різноманітних за природою та значеннями параметрів, в таблиці подано їх узагальнення шляхом об'єднання в окремі групи. Ця систематизація допоможе під час проведення досліджень, залежно від експлуатаційних, виробничих і технологічних умов використання машини, враховувати лише ті параметри, які найбільшою мірою впливають на її енергоощадність та екологічність.

Моделювання динамічних процесів лісотранспортної системи передбачає такі дослідження: крутильних коливань у трансмісії, коливань у вертикальній площині, коливань у вертикальній поздовжній площині, коливань у вертикальній поперечній площині тощо. Реалізація математич-

них моделей дає змогу встановити на підставі розрахунків комплексні (питомі) показники, оптимізація яких дає змогу обґрунтувати раціональні параметри лісових машин, враховуючи реальні умови їхньої експлуатації (рис. 3).

Для порівняльної оцінки лісових машин можна використати комплексний критерій – умовну питому продуктивність:

$$W_Q = M \cdot v_{сep} / Q_W, \quad (3)$$

де M – повна маса машини для транспортування деревини; $v_{сep}$ – середня технічна швидкість руху, км/год; Q_W – середня витрата пального, л/100 км.

З використанням запропонованого методу енергетичних, вагових і геометричних аналогій побудовано кореляційні залежності між головними параметрами для різних типів лісових машин. На рис. 4 подано кореляційні залежності параметрів для форвадерів. Отримані значення коефіцієнтів кореляції свідчать, що для більшості лісових машин спостерігається тісна степенева залежність між їх енергетичними, ваговими і геометричними параметрами. Аналіз цих залежностей дає змогу сформулювати вимоги до головних параметрів перспективних лісових машин, виходячи із завдань, які ставлять перед розробниками.

Таблиця

Класифікація параметрів колісних лісотранспортних засобів, що впливають на досконалість конструкції

Енергетичні	Вагові	Геометричні	Експлуатаційні
- потужність двигуна; - крутний момент двигуна; - тягове зусилля на гаку	- маса тягача; - маса причіпної ланки; - рейсове навантаження; - розподіл власної ваги між осями; - момент інерції тягача відносно поперечної осі	- зміщення коника від задньої осі тягача; - відстань між кониками; - зміщення точки опирання пакета деревини від задньої осі тягача; - відстань від точки опирання пакета деревини до опорної поверхні; - база, колія, ширина коліс; - дорожній просвіт	- пружні властивості та геометричні параметри опорної поверхні; - пружні властивості пакета деревини; - тип і характеристика систем підресорювання; - параметри поворотних і зчіпних пристроїв; - тип шин (діаметр і ширина коліс); - тип трансмісії



Рис. 3. Схема процедури обґрунтування параметрів лісових машин

Раціональний вибір параметрів трансмісії лісової машини потребує ретельного обґрунтування доцільності застосування гідромеханічної передачі. Узагальнений підхід до розв'язку такої задачі ґрунтується на удосконаленні розрахункової моделі лісової машини з гідромеханічною трансмісією (рис. 5). Така зведена модель включає в себе гідротрансформатор (ГТ), три обертові маси, пружну й дисипативну ланки, що моделюють податливість і тертя у шинах коліс.

На підставі розрахункової моделі (рис. 5) складено математичну модель руху лісової машини з гідромеханічною трансмісією.

Зведена жорсткість c_{mpij} на кожній з передач визначається за формулою:

$$c_{mpij} = \frac{I}{\frac{(u_{kni} u_{pkj})^2}{c_{kap}} + \frac{u_{mpij}^2}{c_n} + \frac{u_{mpij}^2}{c_{ui}}}, \quad (4)$$

де i – номер передачі коробки передач; j – номер передачі роздавальної корорбки; u_{mpij} – загальне передатне число на увімкненій передачі; u_{kni} , u_{pkj} – передатні числа увімкнених коробок передач та роздавальної корорбки; c_{kap} , c_n , c_{ui} – коефіцієнти крутильної жорсткості карданних валів, півосей ведучих мостів і шин ведучих коліс.

Зведений кут й кутова швидкість обертової маси J_3 , еквівалентної поступальній масі дісової машини, залежать від передатного числа трансмісії

$$\phi_3 = \phi_k u_{mpij}; \quad \dot{\phi}_3 = \dot{\phi}_k u_{mpij}.$$

Зведений момент опору рухові M_3 визначається з урахуванням передатного числа u_{mpij} на увімкненій передачі та коефіцієнта корисної дії механічної частини трансмісії η_{mp} . Для сортиментовоза його обчислюють за формулою:

$$M_3 = \frac{M_f + M_i}{u_{mpij} \eta_{mp}}, \quad (5)$$

де M_f , M_i – відповідно моменти опору коченню та опору підніманню сортиментовоза.

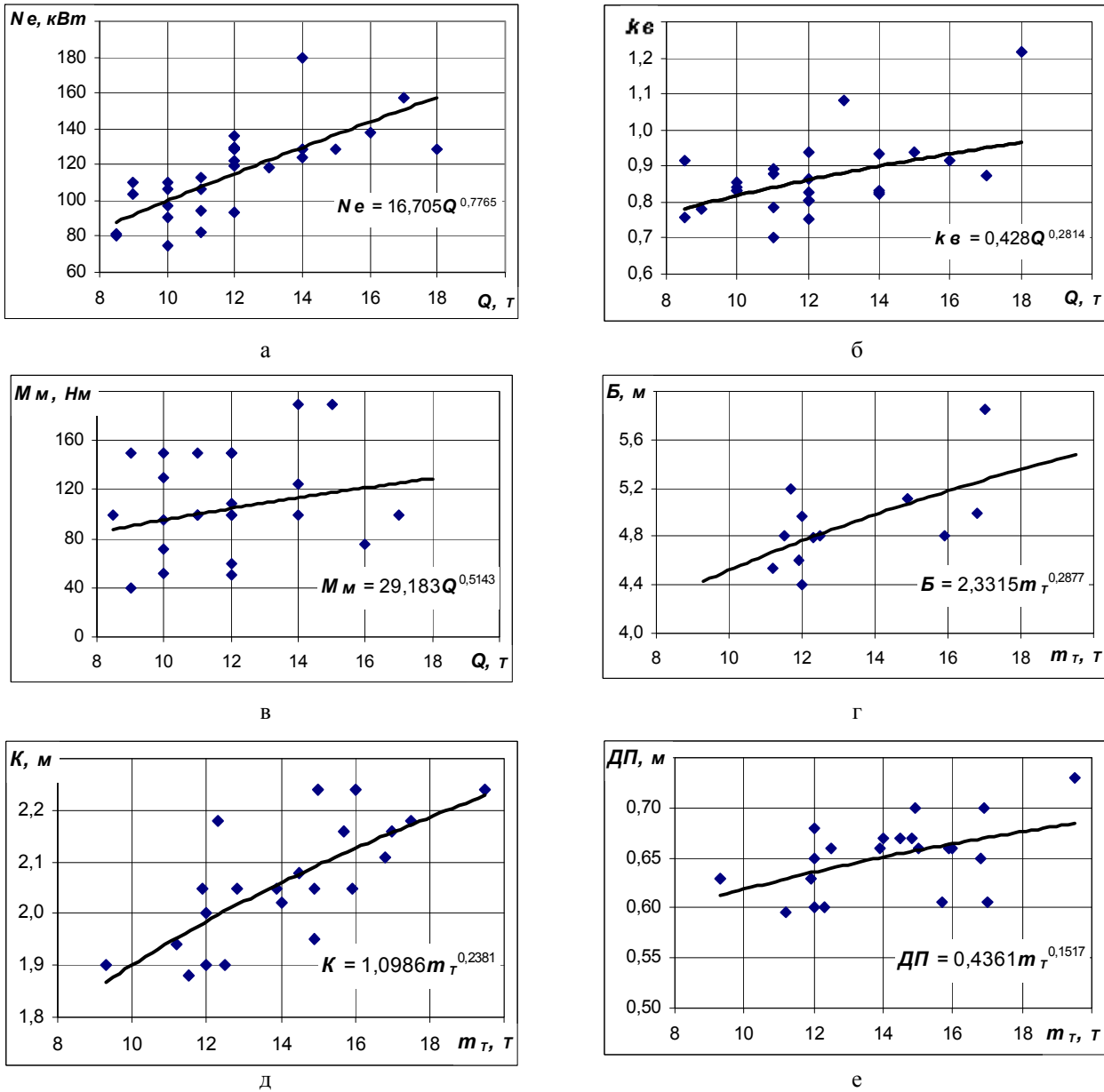


Рис. 4. Залежності потужності (а), коефіцієнта використання маси (б) та вантажного моменту гідроманіпулятора (в) від вантажності форвадера і бази (г), колії (д) й дорожнього просвіту (е) від власної маси форвадера

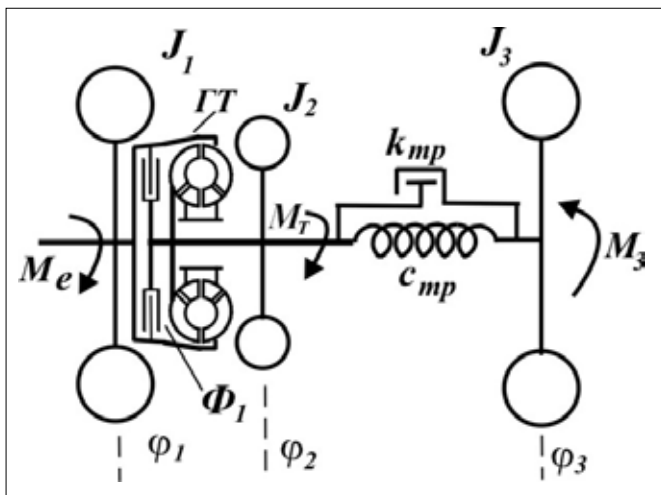


Рис. 5. Схема зведеної розрахункової моделі лісової машини з гідромеханічною трансмісією: M_e – крутний момент двигуна; M_T – момент на турбінному колесі ГТ; M_3 – зведений момент опору рухові; φ_1 – кут обертання маховика двигуна; φ_2 – кут повороту турбінного колеса ГТ; φ_3 – зведений кут повороту мас трансмісії та ведучих коліс; J_1 – момент інерції маховика двигуна з насосним колесом та фрикціоном Φ_1 для блокування ГТ; J_2 – зведений моменти інерції турбінного колеса ГТ з обертовими масами коробки передач і роздавальної коробки; J_3 – зведений момент інерції ведучих коліс і поступальної маси лісової машини з вантажем; c_{mp}, k_{mp} – зведені коефіцієнти крутильної жорсткості та в'язкого опору карданних валів, півосей ведучих мостів і шин ведучих коліс

Формули для визначення зведених моментів інерції обертових мас моделі трансмісії, набудуть вигляду:

$$J_2 = \frac{J_o \eta_{mp}}{(u_{kn} u_{pk})^2}; \quad J_3 = \frac{I}{u_{mp}^2} \left(\frac{G}{9,81} r^2 + \Sigma J_k \right),$$

де J_o – сумарний момент інерції турбінного колеса ГТ з обертовими масами коробки передач і роздавальної коробки; G – вага сортиментовоза з вантажем; r^2 – радіус ведучих коліс; ΣJ_o – сумарний момент інерції усіх коліс колісної машини.

Прийнявши за узагальнені координати кути повороту φ_1, φ_2 і φ_3 обертових мас зведеної розрахункової моделі, можна записати рівняння її руху у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \ddot{\varphi}_1 &= M_e \eta_{ГТ}; \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 + k_{mp}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) + c_{mp}(\varphi_2 - \varphi_3) &= K \cdot M_e; \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 - k_{mp}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - c_{mp}(\varphi_2 - \varphi_3) &= -M_3; \end{aligned} \right\}$$

де $K, \eta_{ГТ}$ – коефіцієнти трансформації та корисної дії ГТ.

Розв’язки рівнянь у вигляді узагальнених координат $\varphi_1(t), \varphi_2(t)$ і $\varphi_3(t)$ і їхніх похідних, як функцій часу t , дають можливість обчислювати основні параметри поступального руху – швидкість СЛМ

$$V(t) = 3,6 \frac{r \varphi_3(t)}{u_{mp}} \text{ і пройдений шлях } S(t) = \varphi_1(t)r.$$

Реалізація математичної моделі у програмному середовищі *Delphi* дала змогу отримати результати розрахунку параметрів розгону та тягово-швидкісні характеристики лісової машини залежно від параметрів ГТ, зокрема густини робочої рідини, частоти обертання насосного колеса, активного діаметра ГТ та коефіцієнта моменту насосного колеса, а також спільної роботи двигуна внутрішнього згорання із гідротрансформаторами різних типів у випадку варіювання активного діаметру ГТ (рис. 6).

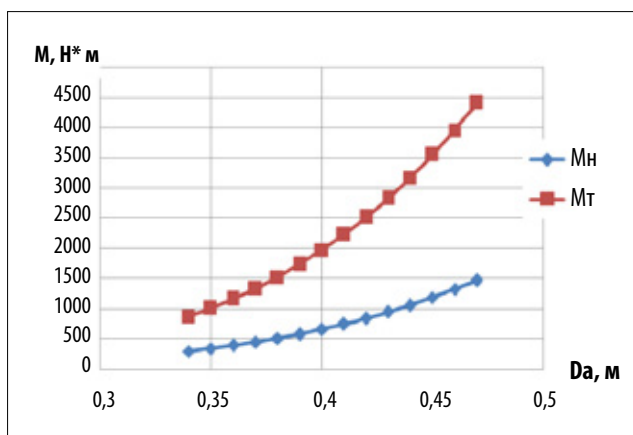


Рис. 6. Залежність моментів на насосному і турбінному колесах від величини активного діаметра гідротрансформатора (за частоти обертання вала двигуна $n = 2200$ об/хв.)

Аналіз отриманих результатів свідчить, що показники ГТ є доволі чутливими до розміру активного діаметра D_a . Збільшення цього діаметра лише на 20% призводить до зростання у 2,5 рази моменту на турбінному колесі M_T .

Висновки. Найвні науково-методичні, теоретичні та практичні підходи до проектування лісових машин удосконалено з комплексною метою ошадливого використання енергоносіїв та дотримання вимог екологічної безпеки впродовж їхньої експлуатації.

Розроблено методологію енергетичного підходу для інженерного оцінювання інтенсивності процесу колієутворення внаслідок неоднократного проїзду лісової машини ґрунтовою поверхнею руху. Отримані результати якісно та кількісно наближені до відомих експериментальних даних: їхні відхилення від експерименту на 30% менші, аніж теоретичні результати інших авторів. Отримані результати у вигляді аналітичної залежності глибини колії від часу, характеристик ґрунту та умов контакту колеса з поверхнею руху, доцільно використовувати для визначення прийнятних з огляду мінімізації деформації ґрунту значень експлуатаційних параметрів, зокрема – тиску повітря в шинах лісової машини, їхнього типорозміру, а відповідно – розмірів поверхні контакту колеса з ґрунтом залежно від експлуатаційних умов.

На стадії ескізного компонування перспективних лісових машин вибір їхніх параметрів доцільно здійснювати на підставі запропонованого в роботі методу енергетичних, вагових і геометричних аналогій. Формування вимог до параметрів лісових машин за отриманими кореляційними залежностями засвідчує їхнє мінімальне відхилення від експериментальних даних, що складає 12-18%.

Використання отриманих результатів з вибору енергетичних, вагових, геометричних та експлуатаційних параметрів, застосування прийнятних типів рушіїв з допустимим тиском повітря в колесах залежно від виду ґрунту, а також результати визначення робочих параметрів гідродинамічних передач, зокрема їхніх активних діаметрів, дасть змогу проектувати лісові машини, які забезпечуватимуть необхідні вимоги енергетичної ошадності та водночас характеризуватимуться мінімальним негативним впливом на довкілля в процесі їхньої експлуатації.

Удосконалено метод обґрунтування раціональних параметрів гідромеханічної трансмісії, розроблено схему розрахункової моделі лісової машини з гідротрансформатором, трьома обертовими масами, пружною та дисипативною ланками, що моделюють податливість і тертя у шинах колісних рушіїв. Порівняльний аналіз тягово-швидкісних показників такої машини з механічною й гідромеханічною трансмісією показав переваги останньої. Гідромеханічна трансмісія дає змогу реалізувати широкий діапазон безступінчастої зміни сили тяги в межах кожної передачі, що істотно зменшує кількість перемикачів передач під час руху, сприяє підвищенню на 10-18% продуктивності транспорт-

ного засобу, зменшенню до 30% показників тяговошвидкісних властивостей – часу і шляху розгону до максимально можливої швидкості, а також зменшенню втомленості водія. Силкові параметри гідро-трансформатора є дуже чутливими до розміру його активного діаметра: його збільшення лише на 20% призводить до зростання моменту на турбінному колесі у 2,5 рази.

References

- Adamovsky, M. G., Styranivsky, O. A., & Borys, M. M. (2017). Spatial modeling of transport development of forest area and their potential environmental risks. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 27 (8), 127-132. <https://doi.org/10.15421/40270814> (in Ukrainian).
- Bilyk, B. W., & Adamovsky, M. G. (2004). *Design of self-driving forestry machines: Parameter selection, layout and traction calculation*. L'viv: ZUKTs (in Ukrainian).
- Bilyk, B. W., Borys, M. M., & Kusyj, A. G. (2007). Influence of gearbox numbers on dynamic loads in the transmission of a wheeled forest tractor. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 17 (8), 127-132. Available at: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2007/17_8/index.htm (in Ukrainian).
- Borys, M. M. (2007). *Substantiation of the parameters of the skidding vehicle to increase its operational properties* (Doctoral dissertation, National Forestry university of Ukraine, L'viv, Ukraine)
- Borys, M. M., Herys, M. I., Shevchenko, N. V., & Gromjak, J. O. (2013). Methods of the multi-operation forestry machines operation efficiency determining. *KhNTUAg. Bulletin: Innovative Technologies of Woodworking Industry*, 143, 178-183 (in Ukrainian).
- Byblyuk, N. I. (2004a). *Forest vehicles. Theory*. L'viv: Publishing house «Panorama» (in Ukrainian).
- Byblyuk, N. I. (2004b). Ecological compatibility of existing logging technologies with the natural environment: European experience and Ukrainian realities. *Scientific works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 3, 118-132 (in Ukrainian).
- Byblyuk, N. I. (2004c). Forest transport in the Ukrainian Carpathians: the main stages and trends of development. *Scientific Bulletin of the Ukrainian State Forestry University: Engineering, Technology and Environment*, 14 (3), 183-194. Available at: <http://nv.nltu.edu.ua/> (in Ukrainian).
- Byblyuk, N., Borys, M., Machuga, O., & Shevchenko, N. (2019). Scientific-methodical, theoretical and practical aspects of the energy-saving, environmental-safely forest machines projecting. In TUZVO (Eds.) *Mobilné energetické prostredky – Hydraulika – Životné prostredie – Ergonómia mobilných strojov: Zborník vedeckých recenzovaných prác*, 33-42. Zvolen. Slovakia: Technická universita vo Zvolenie (in Slovak).
- Byblyuk, N., Herys, M., & Borys, M. (2011). Influence of parameters of the wheeled timber machines on controllability and stability of their motion. In TUZVO (Eds.) *Mobilné energetické prostredky – Hydraulika – Životné prostredie – Ergonómia mobilných strojov: Zborník vedeckých recenzovaných prác*, 25-35. Zvolen. Slovakia: Technická universita vo Zvolenie.
- Byblyuk, N. I., Kovalchuk, I. P., & Machuga, O. S. (2008). Dangerous natural disasters in the Carpathians: the reasons and the ways of their minimization. *Scientific works of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 6, 105-119 (in Ukrainian).
- Byblyuk, N., Shevchenko, N., & Freydu, A. (2013). Design parameters effect on the intensity of log truck heave vibrations. *Polska akademia umiejtnosci prace komisji nauk rolniczych, lesnych i weterynaryjnych PAU*, 18, 305-312.
- Honsa, J., & Neruda, J. (2007). Analysis of damage to logs by functional mechanisms of harvesters. In TUZVO (Eds.) *Mobilné energetické prostredky – Hydraulika – Životné prostredie – Ergonómia mobilných strojov: Zborník vedeckých recenzovaných prác*, 41-50. Zvolen. Slovakia: Technická universita vo Zvolenie.
- Louis, M. S., Philip, M. O., & Owende, J. L. (2004). Assessment of vibration levels in a cut-to-length timber harvester. In Mendel Univ. (Eds.). *Forest and Wood Processing's Technology and the Environment: Proc. of the 2-nd int. sci. conf. Fortechenvi. 2*, 373-382. Brno. Czech Republic: Mendel Univ. of Agric. and Forestry.
- Machuga, O. S. (2019). *The development of the energy approach scientific principles in the solution of the problems of interaction the machines with the working environment*. (Doctoral dissertation, National Forestry university of Ukraine, L'viv, Ukraine). Retrieved from: <https://nltu.edu.ua/index.php/pages/spetsializovani-vcheni-rady/spetsializovana-vchena-rada-d35-072-03/item/294>.
- Shevchenko, N. V. (2011). Analysis logging truck forward motion simulation results and optimization of its basic parameters. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 21 (7), 102-106. Available at: <http://nv.nltu.edu.ua/> (in Ukrainian).
- Shevchenko, N. V. (2015). Application of hydromechanical transmission on logging trucks. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry University*, 25 (4), 161-167. Available at: <http://nv.nltu.edu.ua/> (in Ukrainian).
- Sowa, J. M., & Szewczyk, G. (2000). The dimension of damage caused in fir and spruce growths as a result of cutting and felling trees in spruce forest. *Akta Agraria et Sylvestria. Ser. B. Vol. XXXVIII*, 75-90 (in Polish).
- Styranivsky, O. A., Byblyuk, N. I., Borys, M. M., & Herys, M. I. (2006). Type and main parameters of perspective wheeled timber transport vehicles. *Scientific Bulletin of the Ukrainian National Forestry*

- University, 16 (6), 62-69. Available at: <http://nv.nltu.edu.ua/> (in Ukrainian)
- Walczyk, J. (2007). Analysis of wheel reactions and specific pressures during work of timberjack 1270 B harvester. In CULF (Eds.) *Logging and Wood Processing in Central Europe* (pp. 134-138). Prague: Czech University of Life Science.
- Yahno, O., & Machuga, O. (2016). Exergic analysis and variational inequalities methods in some fluid mechanic's problems. *Bulletin of NTUU «KPI». Mechanical Engineering Series*. 78 (3). 19-25. <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.73382> (in Ukrainian).
- Yahno, O. M., & Machuga, O. S. (2017). Variational formulation of problems for structurally inhomogeneous hydromechanical systems. *Industrial hydraulics and pneumatics*, 2 (56). 26-33. www.pgjournal.vsau.org (in Ukrainian).
- Zotsenko, M. L., Vynnykov, Yu. L., Miroshnichenko, I. V. (2019). *Engineering Geology and Solid Mechanics Starter*. Poltava: PolNTU.

Научно-методические подходы к обоснованию энергосберегающих и экологобезопасных параметров лесных машин

Н. М. Борыс¹, О. С. Мачуга², Н. В. Шевченко³,
Н. И. Быблюк⁴

Работа посвящена систематизации методических, научных, прикладных подходов и принципов построения моделей, методов обоснования характеристик и параметров проектируемых машин. Та-

¹ Борыс Николай Михайлович – член-корреспондент Лесной академии наук Украины, кандидат технических наук, доцент, проректор по научно-педагогической воспитательной работе и международным связям. Национальный лесотехнический университет Украины, ул. Генерала Чупрынки, 103, г. Львов, 79057, Украина. Тел.: 032-237-21-22, + 38-098-964-39-33. E-mail: borysmm@ukr.net ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3107-7938>.

² Мачуга Олег Степанович – член-корреспондент Лесной академии наук Украины, доктор технических наук, доцент кафедры лесных машин. Национальный лесотехнический университет Украины, ул. Генерала Чупрынки, 103, г. Львов, 79057, Украина. Тел.: 032-239-27-69, + 38-067-670-19-06. E-mail: oleg_mach@ukr.net ORCID (<http://orcid.org/>) 0000-0002-9151-8854.

³ Шевченко Наталья Васильевна – кандидат технических наук, доцент кафедры лесных машин. Национальный лесотехнический университет Украины, ул. Генерала Чупрынки, 103, г. Львов, 79057, Украина. Тел.: 032-239-27-69, + 38-067-664-39-88. E-mail: shenatalka@ukr.net ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4004-891X>.

⁴ Быблюк Нестор Иванович – академик Лесной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор кафедры лесных машин. Национальный лесотехнический университет Украины, ул. Генерала Чупрынки, 103, г. Львов, 79057, Украина. Тел.: 032-239-27-69, + 38-097-306-61-38. E-mail: oleg_mach@ukr.net

кие машины должны удовлетворять условиям максимально возможной энергетической бережливости и экологической совместимости с окружающей природной средой.

Совершенство конструкции лесной машины зависит от удачного выбора ее энергетических, весовых, геометрических и эксплуатационных параметров, влияние которых проявляется непосредственно в процессе работы машин в реальных производственных условиях. Учитывая это, при проектировании лесной машины необходимо таким образом обосновать ее параметры, чтобы в процессе эксплуатации этой машины удельные энергозатраты на единицу выполненной работы и негативное влияние на опорную поверхность и окружающую среду были минимальными. Обоснование параметров лесных машин, математических моделей их движения, а также методов реализации таких моделей, выполнено с применением энергетического и силового подходов. Однако имеющиеся научно-методические подходы к проектированию лесных машин не в полной мере позволяют всесторонне обосновывать их параметры.

В исследовании нашли свое развитие научно-методические основы энергетического подхода, который можно применить для проектирования новых лесных машин. С этой целью методология вариационных неравенств использована в качестве математического аппарата исследования механического поведения неидеализированных механических систем. Выполнена оценка параметров колееобразования в результате движения лесной машины грунтовой опорной поверхностью с учетом широкого спектра реологических свойств грунта и его устойчивости к различным деградационным процессам.

Применение метода энергетических, весовых и геометрических аналогий позволило получить графические зависимости для различных типов лесных машин, по которым можно установить рациональные значения их эксплуатационных параметров. Установлено, что во время проектирования лесных машин важен правильный выбор соответствующих узлов и агрегатов с такими параметрами, которые обеспечивали бы эффективные режимы их работы с учетом энергосбережения и экологобезопасности.

Усовершенствован метод обоснования, расчета характеристик и анализа выбора гидромеханической трансмиссии лесных машин.

Дальнейшее развитие получила методология энергетического подхода для инженерной оценки интенсивности процесса колеи вследствие неоднократного проезда лесной машины грунтовой поверхностью движения. Получены результаты, отклонение которых от эксперимента на 30% меньше, чем подобные результаты других исследователей; их целесообразно использовать для определения значений эксплуатационных параметров.

Метод энергетических, весовых и геометрических аналогий позволяет получить корреляционные

зависимости с минимальным (12-18%) отклонением от экспериментальных данных.

Установлено, что силовые параметры гидро-трансформатора достаточно чувствительны к размеру его активного диаметра. Его увеличение лишь на 20% приводит к росту момента на турбинном колесе в 2,5 раза.

Ключевые слова: энергетический подход; эксергия системы; экологическая безопасность; энергозатраты; корреляционные кривые; колееобразование; гидромеханическая трансмиссия.

Scientific and methodological approaches to the substantiation of the forest machines energy-saving and environmentally friendly parameters

M. Borys¹, O. Machuga², N. Shevchenko³,
N. Byblyuk⁴

This paper is devoted to systematization of the methodological, scientific and applied approaches and principles of the characteristics and parameters substantiation models and methods creation for the designed machines. Such machines must satisfy the conditions of maximum energy savings and environmental compatibility.

The excellence of the construction of a forest machine depends on the successful choice of its energy,

weight, geometric and operational parameters, the impact of which is manifested directly in the machines operation in real production conditions. Therefore, when designing a forest machine, it is necessary to substantiate its parameters so that during the operation of this machine the specific energy consumption per unit of the performed work and the negative impact on the environment are minimal. The justification of the forest machines parameters is based on the development of new and improvement of known mathematical models of their movement, as well as methods of implementation of such models, in particular – with the use of energy and power approaches. However, the available scientific and methodological approaches to the design of forestry machines do not fully allow them to substantiate their parameters.

This paper develops the scientific and methodological principles of the energy approach that can be used for new forest machines design. To this end, the methodology of variational inequalities was used as a mathematical apparatus for studying the mechanical behavior of non-idealized mechanical systems. The parameters of rutting formation due to the movement of the forest machine on the soil support surface have been evaluated, taking into account a wide range of rheological properties of the soil and its ability to different degradation processes. Method of energy, weight and geometric analogies usage allowed the graphical dependences for different types of forestry machines obtaining, by which it is possible to set rational values of their operational parameters. It has been found that when designing forestry machines, it is important to choose the right parameters value that would provide them with efficient modes of operation in terms of energy efficiency and environmental friendliness. The substantiation, characteristics calculation and analysis hydro mechanical transmission choice method in timber haulage is developed.

The methodology of energy approach for engineering estimation of the intensity of the process of rutting formation due to repeated passage of the forestry machine with the soil surface has been developed. The results were 30% less deviated from the experiment than the results of other authors; they expediently should be used to determine the values of operational parameters.

The method of energy, weight and geometric analogies according to the obtained correlation dependencies testifies minimal (12-18%) deviation from the experimental data.

It is established that the power parameters of the hydro transformer are quite sensitive to the size of its active diameter, its increase by only 20% leads to a turbine wheel torque increase on the 2.5 times.

Key words: energy approach; exergy of the system; ecological safety; energy costs; correlation curves; rutting formation; hydro mechanical transmission.

¹ *Mykola Borys* – Corresponding Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Scientific and Pedagogical Educational Work and International Relations, National Forestry University of Ukraine, General Chuprynka str., 103, Lviv, 79057, Ukraine. Tel.: 032-237-21-22, + 38-098-964-39-33. E-mail: borysmm@ukr.net ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3107-7938>

² *Oleg Machuga* – Corresponding Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Machines, National Forestry University of Ukraine, General Chuprynka str., 103, Lviv, 79057, Ukraine. Tel.: 032-239-27-69, +38-067-670-19-06. E-mail: oleg_mach@ukr.net ORCID ([http://](http://orcid.org/) orcid.org/) 0000-0002-9151-8854

³ *Natalia Shevchenko* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Machines, National Forestry University of Ukraine, General Chuprynka str., 103, Lviv, 79057, Ukraine. Tel.: 032-239-27-69, +38-067-664-39-88. E-mail: shenatalka@ukr.net ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4004-891X>

⁴ *Nestor Byblyuk* – Full Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Forestry Machines, National Forestry University of Ukraine, General Chuprynka str., 103, Lviv, 79057, Ukraine. Tel.: 032-239-27-69, +38-097-306-61-38. E-mail: oleg_mach@ukr.net