

АЛГОРИТМ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОЛЕСНОГО И КОМБИНИРОВАННОГО ДВИЖИТЕЛЕЙ НА ЛЕСНЫЕ ПОЧВОГРУНТЫ

Протас П. А., доц., к.т.н., Мисуно Ю. И., асп.

Белорусский государственный технологический университет
(Минск, Республика Беларусь), e-mail: protas@belstu.by; julia.misuno@yandex.ru

ALGORITHM FOR A COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE IMPACT OF WHEELED AND COMBINED MOVERS ON FOREST SOILS

Protas P. A., Assoc. Prof., Misuno Yu. I., PhD stud.

Belorussian State Technological University
(Minsk, Belarus)

Аннотация. Ужесточение требований к проведению лесозаготовительных работ с учетом обеспечения экологической безопасности лесных экосистем ведет к повышению требований к лесным машинам, их конструктивным и технологическим параметрам. При оценке и выборе лесозаготовительных машин значительное внимание должно уделяться характеру воздействия их на почвогрунт, которое характеризуется давлением движителя на опорное основание, а также состоянием лесного почвогрунта после разработки лесосеки.

В то же время на предприятиях лесозаготовительного профиля за частую такая оценка не проводится из-за отсутствия простой и достаточно точной методики. В соответствии с этим, в данной работе были предложены оценочные показатели и алгоритм сравнительной оценки воздействия колесного и комбинированного движителей на лесные почвогрунты. В последующих исследованиях результаты этой работы позволят разработать расчетную методику, которая даст возможность принимать решения по выбору типа и параметров движителя для обеспечения ведения экологически безопасных лесозаготовок.

Ключевые слова: воздействие; лесной почвогрунт; движитель; алгоритм; критерии; уплотнение; колеобразование

Abstract. The tightening of the requirements for harvesting, taking into account the environmental safety of forest ecosystems, leads to increased requirements for forest machines, their design and technological parameters. When assessing and choosing forestry machines, considerable attention should be paid to the nature of their impact on the soil, which is characterized by the pressure of the propeller on the support base, as well as the state of the forest soil after the cutting of the cutting area.

At the same time, at the enterprises of the logging profile, such an assessment is often not carried out due to the lack of a simple and sufficiently accurate methodology. In accordance with this, in this work, estimated indicators and an algorithm for the comparative assessment of the impact of the wheeled and combined propellers on forest soils were proposed. In subsequent studies, the results of this work will allow the development of a computational methodology that will make it possible to make decisions on the choice of the type and parameters of the propulsion unit to ensure the conduct of environmentally friendly logging.

Key words: impact; forest soil; mover; algorithm; indicators; compaction; rutting

Введение. Сегодня основное применение в Беларуси при заготовке древесины находят колесный и комбинированный типы движителей. Причем одной из особенностей их использования заключается в том, что одна и та же машина, которая имеется на балансе предприятия, может работать как с колесным, так и с комбинированным (колесно-гусеничным) движителем в зависимости от того, в каких условиях будет работать машина и какое воздействие оно при этом окажет. В то же время, на данный момент границы или пределы природно-производственных условий использования данных типов движителей пока четко не определены, что обусловило необходимость их сопоставления.

Конструкции и параметры движителей современных лесозаготовительных машин могут отличаться в зависимости от общей конструкции машины, условий эксплуатации, требований, предъявляемых к лесной технике и др. Основные конструктивные параметры изучаемых движителей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры движителей лесных машин

Колесный движитель	Комбинированный движитель
	
<ul style="list-style-type: none"> – типоразмер шины: диаметр, ширина и высота профиля; – конструкция: радиальная, диагональная; – допустимое минимальное и максимальное внутреннее давление воздуха в шинах; – норма слойности; – параметры грунтозацепов. 	<ul style="list-style-type: none"> – ширина и длина плещ; – шаг между плещами; – тип профиля плещ; – параметры грунтозацепов; – масса.

При выборе системы машин в процессе проектирования технологического процесса лесосечных работ, в том числе, необходимо осуществлять и сравнение движителей рассматриваемых лесных по нескольким направлениям: по показателям проходимости; по экономической эффективности; по экологическому воздействию.

Оценка по экологическому воздействию является важной составляющей при определении эффективности работы лесных машин. Однако на предприятиях, как правило, такую оценку не проводят в виду отсутствия соответствующей методики. Поэтому целью данного исследования является определение оценочных показателей экологического воздействия движителей на почвогрунт и разработка алгоритма по их определению с последующим проведением сравнительного анализа и принятия окончательного решения по выбору типа движителя с учетом условий эксплуатации.

Вопросами исследования и оценки воздействия движителей на почвогрунт занимаются не одно десятилетие. Имеющиеся в настоящее время результаты этих исследований дают необходимое представление о процессах, происходящих по ходу движения лесной техники по грунтам с различными свойствами и параметрами. Основное воздействие, которое оказывает движитель на деформируемую поверхность почвогрунта, ведет к частичному или полному повреждению его структуры, потере несущей способности, уплотнению и деформации почвогрунта. Это в свою очередь негативно сказывается на способности почвогрунта к последующему лесовозобновлению.

Для оценки и сравнения движителей с точки зрения их экологического воздействия на почвогрунт был предложен ряд критериев или показателей. Эти показатели дают возможность не только оценить воздействие, но и охарактеризовать состояние почвогрунта после прохода техники. Далее приводится перечень предлагаемых оценочных показателей: среднее давление движителя на почвогрунт; уплотнения почвогрунта; глубины колеи; деформации сдвига.

Материалы и методы. Как показывает анализ литературных источников, для теоретического рассмотрения процесса деформации почвогрунта при воздействии на нее могут быть использованы два подхода. Первый подход основан на определении эпюр нормальных и касательных давлений в контакте, их интегрировании и приравнении силам, приложен-

ным к оси колеса [1], второй – на рассмотрении лишь характерных зон поверхности контакта, параметры которых аналитически выражаются через деформацию шины и грунта [2].

В дальнейших исследованиях предложено объединить данные подходы, так как они включают в себя два взаимозависимых показателя, которые характерны при воздействии движителя на почвогрунт: напряжения, которые возникают в почвогрунте в результате действия нормальных и тангенциальных сил от движителя, и деформация, как результат воздействия этих сил. В целом, уже можно сказать, что описание процесса воздействия движителя лесной машины на почвогрунт будет осуществляться на основании теорий механики сплошной среды, а описание характера изменения состояния почвогрунта – в соответствии с его реологическими свойствами.

Результаты. Согласно ранее проведенным исследованиям [3, 4] характер деформации при погружении движителя в массив почвогрунт существенно зависит от его состояния (влажности для связного грунта, плотности для песка и снега), от толщины деформируемого слоя почвогрунта, а также модулей деформации и упругости. Со стороны движителя существенное влияние будет оказывать нагрузка, которая передается от движителя на опорное основание, параметры движителя, а также соотношение его длины и ширины. Соответственно данные показатели могут выступать в качестве исходных данных для расчета оценочных показателей воздействия движителя на почвогрунт.

В процессе воздействия движителя на лесной почвогрунт происходит уплотнение и сдвиг почвогрунта, а его непосредственную деформацию в результате прохода машины отображает глубина колеи. Эти процессы обусловлены несколькими составляющими:

- воздействием нормального давления;
- касательной нагрузкой в массиве почвогрунта, возникающей при вдавливании движителя в почвогрунт;
- касательной нагрузкой по пятну контакта, возникающей при буксовании движителя [5].

Нормальной составляющей деформации почвогрунта является действие вертикальной нагрузки от движителя на единицу площади опорной поверхности или давление движителя. Это одна из основных характеристик, которая используется для оценки экологической эффективности лесной машины.

Общая формула среднего давления движителя на опорное основание имеет простой вид, но сложность в ней заключается в определении контактной площади. Здесь необходимо учитывать, что деформации подвергается как лесной почвогрунт, так и пневматическое колесо, за счет чего увеличивается площадь воздействия. На данный момент применяется большое количество расчетных формул для определения этого параметра, однако получаемые результаты в значительной степени отличаются друг от друга [6]. Потому есть необходимость в том, что подготовить достаточно точную и простую формулу для определения давления колесного движителя на лесной почвогрунт. Что касается комбинированного движителя, то в данном случае могут быть использованы методики расчета для гусеничного движителя [7].

Следствием действия нагрузок от движителя является уплотнение почвогрунта, которое и приводит к осадке или погружению движителя на определенную глубину. В механике грунтов для упрощенного описания зависимости между относительной осадкой движителя и нагрузкой на почвогрунт используют линейный закон Гука [8]:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad (1)$$

где ε – относительная линейная деформация; σ – нормальное напряжение почвогрунта; E – модуль деформации почвогрунта.

Соответственно можно принять, что существует связь между относительной деформацией и уплотнением почвогрунта. Одной из наиболее простых зависимостей для описания этой связи является следующее уравнение [9]:

$$\Delta\rho = \varepsilon \cdot \rho_0, \quad (2)$$

где $\Delta\rho$ – увеличения плотности почвогрунта после оказания нагрузки; ρ_0 – первоначальная плотность почвогрунта.

В то же время необходимо отметить, что использование данных зависимостей в чистом виде не обеспечит достоверного результата. Для математического описания процесса деформации почвогрунта и определения значения относительной линейной деформации необходимо определить какими свойствами обладает почвогрунт в результате действия внешних нагрузок. Согласно ранее проведенным исследованиям [10] было установлено, что под движущейся машиной процесс осадки почвогрунта и его сдвиг движителем происходят быстро, почти без релаксационных явлений, т.е. практически сразу после упругой возникает пластическая деформация (необратимая остаточная). Данное явление означает понижение с течением времени в деформированном материале предела упругости, иными словами, расслабление за счет снижения сил сцепления грунта [11].

В то же время при движении машин по связным грунтам восстановление либо не происходит, либо оно частично. Во втором случае деформация почвогрунта включает в себя как упругую, так и пластическую части, т.е.

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^e + \varepsilon_i^p, \quad (3)$$

где $\varepsilon_i^e = \sigma_i / E$, а $\varepsilon_i^p = f(\sigma_i)$. Такое деформирование иногда называют пластическим деформированием с упрочнением [11].

При этом пластичные, вязкоразрушающиеся грунты (в частности, пластичные глины) могут не разрушаться в процессе сжатия, а лишь сплющиваться. Диаграмма деформирования таких материалов не имеет экстремальной точки, а характеризуется непрерывным возрастанием напряжений. В таких случаях пользуются понятием условного предела прочности, принимая под последним напряжением, при котором деформация достигла какой-либо определенной, достаточной большой величины. Например, предела текучести.

Влияние горизонтальной деформации от приложенных сдвигающих (тангенциальных) усилий в механике грунтов принято описывать уравнением Кулона:

$$\tau = c + p \cdot \operatorname{tg}\varphi, \quad (4)$$

где τ – сопротивление сдвигу; p (σ) – нормальное напряжение (давление); φ – угол внутреннего трения грунта; $\operatorname{tg}\varphi$ – коэффициент внутреннего трения; c – сцепление грунта.

На глубину колеи существенное влияние оказывает буксование движителя лесной машины, способствующее разрушению структуры почвогрунта. Для того чтобы учесть влияние буксования машины в работе [12] предложена следующая зависимость:

$$\tau = (c + p \cdot \operatorname{tg}\varphi) \left(1 - e^{-\frac{\gamma}{\delta}} \right), \quad (5)$$

где γ – величина деформации сдвига; δ – коэффициент буксования.

На основании всего вышеописанного, при определении деформации почвогрунта необходимо учитывать совместное воздействие нормальных и касательных напряжений, соответственно, результирующая нагрузка от движителя будет определяться по следующей формуле [5]:

$$p = \sqrt{q^2 + \tau^2}. \quad (6)$$

Данные теоретические исследования необходимы для определения направления дальнейшей работы по созданию расчетной методики оценки экологического воздействия движителей лесных машин на почвогрунт. Данная методика станет одной из основных составляющих алгоритма сравнительного анализа типов движителей, а последовательность этапов данного алгоритма можно представить в виде схемы, которая показана на рисунке.



Рисунок 1 – Схема алгоритма сравнительного анализа движителей лесных машин

Согласно приведенной схеме алгоритма одним из заключительных этапов является сравнительный анализ полученных результатов, т.е. полученные в результате расчетов оценочные показатели воздействия колесного и комбинированного движителя сравниваются между собой. Результаты данного сравнения должны быть учтены на этапе принятия решения и выбора типа движителя с точки зрения обеспечения необходимого уровня экологической безопасности лесозаготовок.

Обсуждение. В разработанной схеме алгоритма сравнительного анализа движителей лесных машин включен промежуточный этап. Для принятия решения по выбору типа и параметра движителя зачастую требуется введение изменений или дополнительных условий в случае, если ни один из рассматриваемых вариантов не обеспечивает допустимых значений по оценочным показателям. Например, предварительные расчеты могут не включать в себя проведение дополнительных мероприятий по снижению воздействия на почвогрунт: армирование волока порубочными остатками, сезонное проведение лесозаготовок, изменение параметров и расположения технологических элементов лесосеки и др.

При расчетах также могут быть скорректированы параметры движителя. Для комбинированного типа движителя можно рассмотреть установку съемных гусениц с другими параметрами. В настоящее время производители съемных гусениц специализируются на выпуске как универсальных, так и специализированных гусениц, которые обеспечивают низкое давление на почвогрунт или высокие показатели проходимости. При расчете воздействия колесного движителя могут быть дополнительно введены изменения в значениях внутреннего давления воздуха в шинах или в целом параметров колеса лесной машины.

В целом изменение параметров движителя может осуществляться на основании значения допустимого давления на почвогрунт, который зависит от несущей способности почвогрунта [13]. В этом случае задача решается от обратного. В то же время при прове-

дении лесосечных работ на слабых грунтах предусматривается ряд технологических и организационных мер, а именно укрепление трелевочного волокна порубочными остатками и организация работ преимущественно в зимний период или в сухое лето. И тогда допустимое давление движителя на почву можно принять выше с учетом этих мероприятий [13].

Заключение. Следует отметить, что помимо сравнения экологического воздействия движителей не менее важным критерием их оценки является показатель проходимости, так как от него зависит эффективность выполняемых транспортно-переместительных операций на лесосеке и всего технологического процесса в целом. Только на основании комплексного анализа и сравнения движителей по экологическим, эксплуатационным и экономическим показателям может приниматься решение при проектировании технологического процесса лесосечных работ.

Полученные оценочные показатели и алгоритм для определения и сравнительного анализа воздействия колесного и комбинированного типов движителей на лесной почвогрунт представляет собой основу для разработки методологии оценки эксплуатационно-экологической совместимости движителей лесных машин с почвогрунтами, которая в дальнейшем должна найти применение на предприятиях лесозаготовительного и машиностроительного профилей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агейкин, Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
2. Минаев, А.Н. Математическая модель процесса образования колеи под воздействием колесных лесных машин / А.Н. Минаев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2013. – №5. – С. 142–149.
3. Мисуно, Ю.И. Влияние показателей взаимодействия движителей с лесными почвогрунтами на параметры технологических элементов лесосеки / Ю.И. Мисуно, П.А. Протас // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2019. – № 2. – С. 197–203.
4. Протас, П.А. Структурная схема и критерии оценки эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами / П.А. Протас, Ю.И. Мисуно // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2016. – № 2. – С. 248–253.
5. Хитров, Е.Г. Анализ составляющих глубины колеи, образующейся под воздействием движителя лесной машины на почвогрунт / Е.Г. Хитров // Resources and Technology. – 2019. – №16. – С. 77–93.
6. Saarilahti, M. Tyre / soil models for predicting rut formation and soil compaction. Survey on soil deformation for studying the mobility of forest tractors: Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (Ecowood). Appendix No. 7. Forest Soil Properties. – University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. – 19 p.
7. Poršinsky, T. Ecoefficient timber forwarding based on nominal ground pressure analysis / T. Poršinsky, I. Stankić, A. Bosner // Croatian Journal of Forest Engineering. – 2011. – №31. – P. 345–356.
8. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобилей. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
9. Анисимов Г. М. Большаков Б. М. Основы минимизации уплотнения почвы трелевочными системами /ЛТА. СПб., 1998. 108 с.
10. Беккер, М.Г. Введение в теорию систем местность – машина / М.Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
11. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов: учеб. пособие / С.С. Вялов. – М.: Высш. школа, 1978. – 447 с.
12. Агейкин, Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.
13. Мисуно, Ю. И. Повышение работоспособности трелевочных волоков на заболоченных участках лесосечного фонда / Ю. И. Мисуно, П. А. Протас // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения: материалы международной научно-технической конференции, Минск, 26-28 апреля 2017. – Минск: БГТУ, 2017. – С. 25–28.