

УДК 625.711.84

**П. А. Протас, Ю. И. Мисуно**

Белорусский государственный технологический университет

**СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СОВМЕСТИМОСТИ  
ЛЕСНЫХ МАШИН С ПОЧВОГРУНТАМИ**

Заготовка древесного сырья осуществляется различными системами машин в сложных эксплуатационных условиях. Значительная площадь лесосечного фонда Республики Беларусь находится на заболоченных участках, где сложно обеспечить эффективную работу лесных (лесозаготовительных) машин в течение года. Однако освоение таких участков необходимо ввиду значительного запаса на них древесного сырья и растущей потребности в древесине. Для обеспечения эффективной работы лесозаготовительных машин необходимо выполнить комплексную оценку их эксплуатационно-экологической совместимости с почвогрунтами, что позволит разработать рекомендации по усовершенствованию конструкций ходовых систем.

В статье дано описание структурной схемы, которая позволяет учесть в комплексе влияние почвенно-грунтовых условий, параметров движителя и технологического процесса на проходимость машин, а также на последующее лесовосстановление. Также приводятся основные показатели, характеризующие степень взаимодействия движителя лесозаготовительной машины с почвогрунтами. Данные показатели приняты в качестве критериев оценки эксплуатационно-экологической совместимости машин с почвогрунтами, на основании которой можно делать обоснованный выбор систем машин для конкретных условий эксплуатации.

**Ключевые слова:** заготовка древесины, почвогрунты, движитель, технологический процесс, совместимость, критерии.

**P. A. Protas, Yu. I. Misuno**

Belarusian State Technological University

**STRUCTURAL SCHEME AND THE CRITERIA FOR ASSESSING  
THE OPERATIONAL AND ENVIRONMENTAL FOREST MACHINES  
COMPATIBLE WITH SOILS**

Harvesting of wood material is carried out by different systems of machines in difficult operating conditions. A large area of timber-cutting fund of the Republic of Belarus is on the wetlands, where it is difficult to ensure the effective operation of forest (logging) machines during the year. However, the development of such areas is necessary in view of the considerable stock of raw wood on them and the growing demand for timber. To ensure the efficient operation of forest machines is necessary to perform a comprehensive assessment of their operational and environmental compatibility with soils that will develop recommendations for improving the designs of running systems.

The article describes the structural scheme, which allows to take into account the complex influence of soil conditions, propulsion parameters and process for the passage bridge machines, as well as on the subsequent reforestation. It also provides the main indicators characterizing the degree of interaction between propeller harvesting machine soils. These indicators are taken as criteria for assessing the exploitation operational and environmental compatibility of machines with the soils upon which you can make an informed choice of machine systems for the specific operating conditions.

**Key words:** logging, soils, mover, technological process, compatibility, criteria.

**Введение.** Лесозаготовительные машины, в том числе многооперационные, в благоприятных природно-производственных условиях обеспечивают высокие показатели производительности. Однако в процессе разработки труднодоступного заболоченного лесосечного фонда эффективная эксплуатация машин в первую очередь ограничивается несущей способностью почвогрунтов. Современное машиностроение способно решить эту проблему, создавая движители, которые обладают повышенными тяго-

выми и опорно-сцепными свойствами. При этом следует отметить, что при создании машин ученые и специалисты должны исходить не только из принципа технологической эффективности, но и из условия максимального удовлетворения требованиям экологической безопасности, так как последствия повреждений почвогрунта при проведении рубок имеют долгосрочный характер и проявляются в снижении продуктивности будущих древостоев на протяжении нескольких десятилетий.

В этом случае задача состоит в решении двух вопросов: обеспечение эффективной работы машин за счет улучшения эксплуатационных показателей (проходимости, технологической скорости движения, рейсовой нагрузки, маневренности), которые позволяют достичь высокой производительности, а также выполнение лесоводственно-экологических требований.

На сегодняшний день ведущие производители выпускают разнообразные типы лесных машин, которые позволяют осуществлять лесозаготовительную деятельность в различных условиях, в том числе и на заболоченных лесосеках. Лесопользователям, в свою очередь, необходимо иметь рекомендации по обоснованному выбору машин для конкретных условий эксплуатации. Такие рекомендации могут быть получены путем разработки системы оценки эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами.

**Основная часть.** Обоснованные технические решения, обеспечивающие эксплуатационно-экологическую совместимость лесных машин с почвогрунтами, должны базироваться на математическом моделировании, которое уже на стадии проектирования машин, а также при организации лесосечных работ позволит рассчитать и оценить последствия применения лесных машин. В этом случае математическая модель может быть разработана на основе упрощенных схем, которые отражают принцип работы движителей, и последующего их уточнения с учетом особенностей протекания реальных процессов. Эти уточнения будут, в свою очередь, зависеть от конструкции движителей и условий работы машины.

Разработанная структурная схема эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами (рисунок) позволяет учесть в комплексе влияние почвенно-грунтовых условий, параметров движителя и технологического процесса на показатели проходимости машин, а также на последующее лесовосстановление. Кроме того, выполненные на основе данной схемы расчеты позволяют определить степень совместимости (возможности применения) различных типов движителей в тех или иных природно-производственных условиях.

На рисунке приняты следующие обозначения:  $G_m$  – вес машины;  $G_{гр}$  – вес груза;  $F_{оп}$  – площадь опорной поверхности движителя;  $v_{дв}$  – скорость движения;  $P_{\psi}$  – суммарная сила сопротивления движению;  $P_k$  – касательная сила тяги;  $P_{\phi}$  – сила сцепления;  $i$  – интенсивность рубки;  $M$  – запас древесины на 1 га;  $Q_{ср}$  – средний объем вывозимой пачки лесоматериалов;

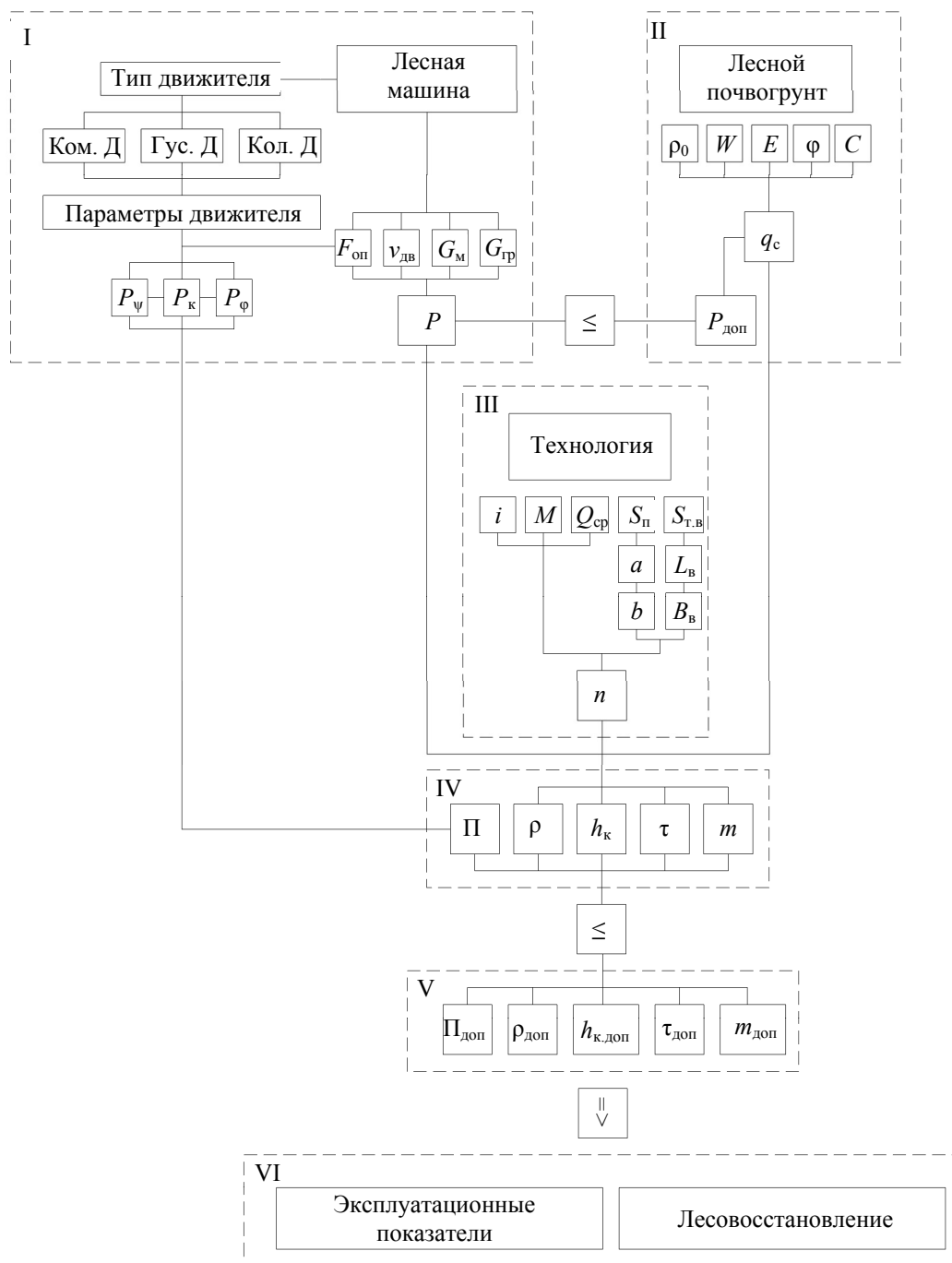
$S_{п}$  – площадь пачки (ленты);  $S_{т.в}$  – площадь трелевочного волока;  $a$  – длина пачки (ленты);  $b$  – ширина пачки (ленты);  $B_v$  – ширина волока;  $L_v$  – длина волока;  $\rho_0$  – начальная плотность почвы;  $W$  – влажность почвы;  $E$  – модуль деформации почвы;  $\phi$  – угол внутреннего трения частиц грунта;  $C$  – коэффициент сцепления;  $q_c$  – несущая способность почвогрунта;  $P$  – давление движителя на почвогрунт;  $P_{доп}$  – допустимое давление движителя на почвогрунт;  $n$  – количество проходов по одному следу;  $\Pi$  – проходимость;  $\rho$  – плотность почвы после нагрузки;  $h_k$  – глубина колеи;  $\tau$  – сопротивление сдвигу;  $m$  – степень минерализации.

В качестве входных данных здесь используются основные характеристики трех составляющих системы «Лесная машина – Технология – Почвогрунт». Каждую составляющую можно рассматривать как отдельную подсистему с более подробным описанием и характеристиками. Так, например, определение площади опорной поверхности движителя будет отличаться в зависимости от его типа. Для гусеничного движителя (Гус. Д) необходимо знать ширину гусеницы, длину участка гусеницы, находящегося в контакте с почвогрунтом, шаг гусеницы. Для колесного движителя (Кол. Д) – тип шины, ширину профиля и диаметр шины, давление воздуха в шине, норму слойности и др. Для комбинированного движителя (Ком. Д) применяются те же параметры, что и для колесного, а также с учетом использования съёмных гусениц – шаг и размерные характеристики плиц.

Все принятые характеристики каждой подсистемы применяются для получения промежуточных значений, которые позволят упростить последующие расчеты, т. е. вместо нескольких значений возможно оперирование только одним.

Одним из основных этапов проектирования технологического процесса лесосечных работ является выбор системы машин. Чтобы система машин была эффективной, она должна формироваться с учетом соответствия конструктивных и технологических параметров каждой машины заданным условиям эксплуатации, что также позволит свести к минимуму их отрицательные воздействия на окружающую среду.

С целью определения возможности применения лесной машины на заболоченной лесосеке необходимо провести оценку эксплуатационно-экологической совместимости движителя и почвогрунта. Осуществить это можно через систему критериев, которые определяются из необходимости соблюдения условий по обеспечению эффективной работы лесной машины с минимальным ущербом для почвогрунта.



Структурная схема эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами:  
 I – подсистема «Лесная машина»; II – подсистема «Лесной почвогрунт»; III – подсистема «Технология»;  
 IV – критерии оценки эксплуатационно-экологической совместимости; V – ограничения;  
 VI – выходные показатели

Состояние почвы после разработки лесосеки должно обеспечивать благоприятные условия для лесовосстановления. Полностью исключить повреждение почвы (уплотнение, колееобразование, разрушение структуры почвы и минерализацию) от воздействия двигателя невозможно, поэтому задача состоит в том, чтобы свести их к минимуму.

Каждому из этих повреждений можно дать количественную характеристику, которую в

последующем можно применять для оценки воздействия двигателя на почвогрунт.

В качестве критериев оценки эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами рекомендуется использовать следующие:

- несущая способность почвогрунта  $q_c$ ;
- давление двигателя  $P$ ;
- проходимость  $\Pi$ ;
- плотность почвы после нагрузки  $\rho$ ;

- глубина колеи (деформация грунта)  $h_k$ ;
- напряжение сдвига  $\sigma_s$ ;
- степень минерализации  $m$ .

Сущность оценки эксплуатационно-экологической совместимости сводится к сравнению фактических значений критериев с допустимыми.

Допустимые значения могут быть сформированы, например, исходя из ограничений, которые устанавливаются соответствующими нормативно-правовыми актами. Так, например, согласно СТБ 1342-2002 предельные значения среднего удельного давления двигателей машин, предназначенных для применения на рубках главного пользования, принимаются в зависимости от типа грунта и двигателя в пределах 30–180 кПа.

Для определения допустимых значений критериев оценки могут быть использованы значения, которые были установлены в результате ранее проведенных исследований или полученные расчетным путем.

*Несущая способность почвогрунта* – это характеристика, которая показывает какую нагрузку может выдержать единица площади почвы. Этот показатель влияет на выбор двигателя, скорость передвижения лесной техники, рейсовую нагрузку, а следовательно, и на производительность и эффективность работы машины. Несущая способность зависит от трех параметров почвогрунта: его типа, плотности и влажности. Она варьируется от 20 кПа для торфяно-болотных до 200 кПа и более для песчаных почв. Большинство специализированных лесных машин оказывает давление на почву в пределах 50–300 кПа [1]. Повреждение почвогрунта происходит в таких случаях, когда давление единичных машин превышает его несущую способность.

Таким образом, на первом этапе оценки совместимости машин с почвогрунтами по определению возможности применения лесной машины основным критерием станет несущая способность почвогрунта  $q_s$ . А основной характеристикой лесной машины в данном случае является давление двигателя  $P$  (кПа) – характеристика, которая показывает, какую нагрузку оказывает машина на единицу площади опорной поверхности. Два этих показателя взаимосвязаны друг с другом. Зная несущую способность, можно определить значение допустимого давления двигателя. В то же время при проведении 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. В этом случае допустимое давление двигателя на почву принима-

ется с учетом соответствующих коэффициентов  $k_{укр}$  и  $k_{сез}$ . Тогда  $P_{доп} = q_s k_{укр} k_{сез}$ .

При не выполнении условия  $P \leq P_{доп}$  требуются изменения показателей подсистемы «Лесная машина» – тип и параметры двигателя, скорость передвижения, вес груза. При выполнении данного условия для принятой лесной машины продолжается расчет по другим критериям.

*Проходимость* – совокупность свойств, определяющих возможность движения транспортной системы в ухудшенных дорожных условиях, по бездорожью и при преодолении различных препятствий. Это один из важнейших показателей, тесно связанный с воздействием двигателей лесных машин на почвогрунты и характеризующий эффективную работу лесных машин на местности. Для определения данного критерия необходимо учитывать физико-механические свойства почвы, конструктивные параметры двигателя и технические характеристики машин [2].

Проходимость характеризуется профильными и опорно-цепными показателями. Профильная проходимость характеризует способность преодолевать препятствия, неровности пути и вписываться в требуемую полосу движения. Сюда относятся такие параметры, как дорожный просвет, радиусы продольной и поперечной проходимости, углы переднего и заднего свеса и др.

Опорно-цепная проходимость характеризует способность преодолевать участки с низкой несущей способностью. Этот показатель включает в себя коэффициент сцепления, касательную силу, сопротивление движению и др.

В общем случае условие движения транспортной системы по сцеплению и сопротивлению (при детерминированном подходе) выражается неравенством:  $P_{\psi} \leq P_k \leq P_{\phi}$ . Невыполнение левой части неравенства – полная потеря проходимости. Невыполнение правой части неравенства – частичная потеря проходимости.

*Плотность почвогрунта после нагрузки.* Интегрирующим показателем воздействия лесных машин на почву целесообразно принять ее уплотнение, т. к. оно является основной агрофизической характеристикой почвы, ее плодородия и лесовосстановления.

Многочисленными исследованиями установлено, что уплотнение почвы, возникающее в процессе работы лесных машин, – наиболее негативный показатель в развитии корней деревьев. Установлено, что статическое давление машины на почву более 80 кПа препятствует развитию мелких корней, а при давлении на почву 30–50 кПа их рост может быть затруднен. Прекращается рост корней при плотности почвы более, г/см<sup>3</sup>: дуба – 1,89; березы – 1,80;

сосны – 1,72; ели – 1,61. При давлении на почву 90 кПа прирост молодых деревьев уменьшается на 15% в течение первых 4–5 лет [3].

*Глубина колеи.* На влажных почвах при многократных проходах по волоку лесных машин образуется значительная колея. Уплотнение почвы в зоне колеи затрудняет процесс проникновения влаги в глубинные слои, способствует застою воды в углублениях или усиленному поверхностному стоку. Возникает опасность водной эрозии и трудности восстановления леса.

Кроме того, значительное колееобразование приводит к увеличению сопротивления движению машины и снижению ее проходимости. В плане возможности эффективной работы лесных машин максимально допустимое значение глубины колеи будет устанавливаться в соответствии с величиной клиренса.

При проведении несплошных рубок глубокая колея приводит к разрушению большей части корневой системы, попадающей на волок.

Прямое повреждение машинами даже небольших участков корневой системы делает обнажившиеся ткани восприимчивыми к заражению грибковыми инфекциями, что отрицательно отражается на развитии древостоев. Повышенную восприимчивость имеют корни, расположенные в верхнем слое почвогрунта глубиной до 0,20–0,25 м [4].

*Напряжение сдвига.* Под действием передаваемых движителем лесной машины вертикальных или наклонных сил в массиве почвогрунта возникают нормальные и касательные напряжения, которые приводят к деформации грунтов. Под действием нормальных напряжений происходит деформация уплотнения почвы, а при воздействии касательных напряжений – деформации сдвига. Разрушение грунтов происходит всегда в виде сдвига одной части массива относительно другой. При этом по некоторым площадкам касательные напряжения достигают значений, превышающих сопротивление грунта сдвигу. Поэтому допустимое значение величины касательного напряжения будет равно величине сопротивления почвогрунта сдвигу [5].

Предельное сопротивление грунтов сдвигу есть функция первой степени нормального напряжения:  $\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c$ , где  $\tau$  – сопротивление сдвигу;  $\sigma$  – нормальное напряжение (давление);  $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта, определяет прочность грунта;  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент внутреннего трения;  $c$  – сцепление грунта.

*Степень минерализации.* Минерализацией почвогрунтов, как правило, называют перемешивание нижних и верхних слоев лесной почвы и грунтов движителем машины и (или) пачкой древесины в комплексе и различных сочетаниях с деформацией почвогрунтов. Минерализация

может быть поверхностной (перемешивание надпочвенной растительности с верхним горизонтом почвы) и глубинной (разрушение морфологического строения почвы, перемешивание ее с материнской горной породой). Рядом исследователей доказывается возможность положительного влияния минерализации лесной почвы на естественное лесовозобновление. Отмечается, что увеличение процента минерализации почвы, хотя и приводит к уменьшению сохранности подроста, но препятствует задержанию почвы и способствует образованию большого количества самосева, т. е. способствует успешному последующему естественному лесовозобновлению. В то же время значительное колееобразование и перемешивание минеральных горизонтов почвогрунтов на большой глубине сводит к минимуму этот положительный эффект [6].

Воздействие лесозаготовительной техники на лесной покров оценивается степенью минерализации, т. е. отношением минерализованной поверхности к общей площади лесосеки. В основном минерализация почвы происходит на технологических элементах лесосеки, допустимые значения которых по площади устанавливаются в СТБ 1360-2002 и СТБ 1361-2002.

**Заключение.** Оценка эксплуатационно-экологической совместимости движителей лесных машин с почвогрунтами может быть проведена на основании сравнительного анализа каждого полученного расчетным путем критерия с допустимыми значениями. Причем такой анализ подразумевает ранжирование всех критериев по значимости. Для простоты оценки анализ может производиться не по всем, а по наиболее значимым критериям в конкретных эксплуатационных условиях. Можно также использовать все критерии для получения единого комплексного (интегрального) показателя. Такой показатель дает возможность не рассматривать весь перечень частных значений, а по его количественному значению оценить совместимость движителей машин с заданным типом почвогрунта.

При соблюдении условий эксплуатационно-экологической совместимости лесных машин с почвогрунтами будут выполняться задачи по обеспечению эффективной работы машин на лесосеке и сохранению продуктивности и благоприятных условий для последующего лесовосстановления.

Расчетная методика, разработанная по приведенной схеме, позволит решать и обратные задачи. Например, зная параметры почвогрунта и допустимые значения критериев совместимости, можно определить допустимый размер рейсовой нагрузки форвардера, допустимое количество проходов форвардера по волоку, сделать выбор типа движителя для заданных условий и др.

### Литература

1. Porter B. Proekologiczne problemy w użytkowaniu lasu. Kierunki ochrony przyrody w lasach zagospodarowanych. Opracowanie zbiorowe. Warszawa: SGGW, 1995.
2. Баженов Е. Е., Кручинин И. Н., Буйначев С. К. Теория сочлененных транспортных и технологических систем: монография. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 256 с.
3. Федоренчик А. С., Герман А. А., Протас П. А. Лесные машины «Амкодор»: учеб.-метод. пособие. Минск: БГТУ, 2013. 240 с.
4. Андронов А. В., Валяжонков В. Д., Добрынин Ю. А. Снижение воздействия машин на почвы при проведении рубок ухода // Вестник КрасГАУ. 2014. № 7 (94). С. 151–157.
5. Пьянков С. А., Азизов З. К. Механика грунтов: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2014. 169 с.
6. Кузнецов А. В. Совершенствование процессов лесотранспорта путем рациональной взаимосвязи параметров транспортной сети: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Петрозаводск, 2015. 282 с.

### References

1. Porter B. Proekologiczne problemy w użytkowaniu lasu. Kierunki ochrony przyrody w lasach zagospodarowanych. Opracowanie zbiorowe. Warszawa, SGGW, 1995.
2. Bazhenov E. E., Kruchinin I. N., Buynachev S. K. *Teoriya sochlenennynkh transportnykh i tekhnologicheskikh sistem: monografiya* [The theory of articulated vehicles and technological systems. Monograph]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2010. 256 p.
3. Fedorenchik A. S., German A. A., Protas P. A. *Lesnye mashiny "Amkodor": ucheb.-metod. posobie* [Forest machines "Amkodor". Textbook]. Minsk, BGTU Publ., 2013. 240 p.
4. Andronov A. V., Valyazhonkov V. D., Dobrynin Yu. A. Reducing the impact of cars on the soils during thinning. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University], 2014, no. 7 (94), pp. 151–157 (In Russian).
5. P'yankov S. A., Azizov Z. K. *Mekhanika gruntov: ucheb. posobie* [Soil Mechanics. Tutorial]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2014. 169 p.
6. Kuznetsov A. V. *Sovershenstvovanie protsessov lesotransporta putem ratsional'noy vzaimosvyazi parametrov transportnoy seti. Dis. dokt. tekhn. nauk* [Improving processes of forest transport through the rational relationship between parameters of the transport network. Doct. Diss.]. Petrozavodsk, 2015. 282 p.

### Информация об авторах

**Протас Павел Александрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Protas77@rambler.ru

**Мисуно Юлия Игоревна** – магистрант кафедры лесных машин и технологии лесозаготовок. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Julia.misuno@yandex.ru

### Information about the authors

**Protas Pavel Alexandrovich** – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Logging Machinery and Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Protas77@rambler.ru

**Misuno Yuliya Igorevna** – Master's degree student, the Department of Logging Machinery and Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Julia.misuno@yandex.ru

Поступила 20.02.2016