

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5142

УДК 674.81

Обзор

Аспекты исследования взаимодействия гусеничного движителя вездеходных машин со слабонесущим почвогрунтом

Бурмистрова Ольга Николаевна

доктор технических наук, профессор, Ухтинский государственный технический университет (Российская Федерация), oburmistrova@ugtu.net

Чемшикова Юлия Михайловна

заведующая лабораторией, Ухтинский государственный технический университет (Российская Федерация), chemshikova79@mail.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Якутская государственная сельскохозяйственная академия (Российская Федерация), silver73@inbox1.ru

Рудов Сергей Евгеньевич

кандидат технических наук, старший преподаватель, Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого (Российская Федерация), 89213093250@mail.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

доктор технических наук, доцент, Якутская государственная сельскохозяйственная академия (Российская Федерация), ola.ola@mail.ru

Получена: 1 февраля 2020 / Принята: 22 марта 2020 / Опубликовано: 11 апреля 2020

Аннотация: Лесной фонд Российской Федерации характеризуется очень большими площадями, слабой развитостью дорожной сети, преобладанием тяжёлых почвенно-грунтовых и рельефных условий. Большие расстояния и бездорожье не отменяют необходимости проведения комплекса лесохозяйственных работ, патрулирования, борьбы с лесными пожарами, доставки персонала и различных грузов, включая персонал и грузы для вахтовых посёлков. Кроме лесничеств и лесопромышленных предприятий, гусеничные вездеходы на территории лесного фонда активно используют так называемые «майнинговые» компании — предприятия нефтегазовой отрасли, строители, а также частные лица для туризма, охоты, рыбалки и т. д. Для решения этих задач наиболее эффективны гусеничные

вездеходы, которые обладают нужной проходимостью, при необходимости — плавучестью, а также грузоподъёмностью. Однако при перемещении гусеничных вездеходов по лесным почвогрунтам они оказывают на них негативное воздействие, в виде разрушения верхних (плодородных) горизонтов — сдирания и перемешивания. Особенно вредно это воздействие для северных лесов, тундры, лесотундры. В условиях особо охраняемых природных территорий лесозаготовительные работы не ведутся, однако патрулирование и доставка грузов различного назначения там также необходимы, а негативное воздействие на лесные почвогрунты должно быть сведено к минимуму. В последние годы подготовлены и защищены более десятка работ, посвящённых вопросу снижения негативного воздействия колёсных и гусеничных лесных машин на почвогрунты лесосек. Вместе с тем ряд вопросов нуждается в дальнейшей проработке. В статье приведён анализ физико-механических свойств почвогрунтов как поверхностей движения гусеничных вездеходных машин и подходов к оценке параметров взаимодействия гусеничного движителя с почвогрунтом. Анализ литературных источников показал, что основными параметрами опорной поверхности, учёт которых необходим для разработки адекватной математической модели взаимодействия вездеходного гусеничного движителя с почвогрунтом волока, являются модуль общей деформации, удельное сцепление, угол внутреннего трения, несущая способность и сопротивление почвогрунта срезу. В результате обработки расчётных данных установлено, что сопротивление срезу и модуль общей деформации связаны линейными уравнениями.

Ключевые слова: гусеничные вездеходные машины, почвогрунты, уплотнение, колеобразование.

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5142

Review

Aspects of research into the interaction of the crawler drive of all-terrain vehicles with weak soil

Olga Burmistrova

*doctor of technical Sciences, Professor, Ukhta state technical University (Russian Federation),
oburmistrova@ugtu.net*

Julia Chemshikova

head of laboratory, Ukhta state technical University (Russian Federation), chemshikova79@mail.ru

Igor Grigorev

*doctor of technical Sciences, Professor, Yakut state agricultural Academy (Russian Federation),
silver73@inboxl.ru*

Sergey Rudov

*candidate of technical Sciences, senior lecturer, Military Academy of communications named after
Marshal of the Soviet Union S. M. Budyonny (Russian Federation), 89213093250@mail.ru*

Olga Kunitskaya

*doctor of technical Sciences, associate Professor, Yakut state agricultural Academy (Russian
Federation), ola.ola@mail.ru*

Received: 1 February 2020 / Accepted: 22 March 2020 / Published: 11 April 2020

Abstract: The forest resources of the Russian Federation are characterized by very large areas, an underdeveloped road network, and the predominance of heavy soil and terrain conditions. Long distances and off-road terrain do not eliminate the need for a complex of forestry operations, patrolling, fighting forest fires, delivery of personnel and various cargo, including personnel and cargo for shift settlements. In addition to the forestry and lumber industry, caterpillar trucks are widely used by the so-called "mining" companies – oil and gas companies, builders and some individuals for hunting, fishing, and tourism. Caterpillar trucks characterized by required floatation, buoyancy and load capacity are the most effective transportation means in these conditions. However, caterpillar trucks have a negative impact on forest soils by destructing the upper (fertile) horizons. This effect is especially harmful in the conditions of northern forests, tundra, and forest tundra. Although logging operations are not carried out in specially protected natural areas (SPNA), patrolling and delivery of goods for various purposes are also performed there,

and the negative impact on forest soils should be minimized. In recent years, more than a dozen studies have been conducted to reduce the negative impact of wheeled and tracked forest vehicles on the soils of logging areas. However, a number of issues need to be further studied. The article analyzes the physical and mechanical properties of soils as surfaces of movement of tracked all-terrain vehicles and approaches to assessing the parameters of interaction between the crawler and the soil. The analysis of literary sources showed that the main parameters of the reference surface taken into consideration in order to develop adequate mathematical models of all-terrain caterpillar tracks interaction with soils are the modulus of total deformation, the unit adhesion, angle of internal friction, bearing capacity and resistance of the soil slice. As a result of processing the calculated data, it was found that the shear resistance and the modulus of general deformation are related by linear equations.

Keywords: tracked all-terrain vehicles, soils, compaction, rutting.

1. Введение

Для работы в наиболее тяжёлых природно-производственных условиях (резко континентальный климат, сильные морозы и жара, сложные почвенно-грунтовые и рельефные условия) преимущество имеют гусеничные вездеходы. Благодаря специфике конструкции, эти транспортно-технологические машины способны преодолевать самые сложные природные преграды, включая болота, озёра и реки [1].

В настоящее время гусеничные вездеходы является наиболее предпочтительным видом техники, как по технико-экономическим, так и по экологическим приоритетам, способным передвигаться и решать различные задачи в самых труднодоступных участках местности [2]. Практика любителей экстремальных путешествий, охотников, туристов, спасателей, лесников показала, что сфера применения гусеничных вездеходов практически не ограничена. Их используют в поисковых и спасательных работах, при тушении лесных пожаров, для исследовательских работ, при рекреационном пользовании лесов, для отводов лесосек и патрулировании, решения военных задач. Гусеничные вездеходы отлично справляются с перемещением людей и технологического оборудования в условиях полного бездорожья.

Помимо высокой проходимости гусеничные вездеходы могут быть оснащены различными модулями: для людей, грузов, оборудования, работающего от вала отбора мощности самого вездехода — буровой установки, пожарного гидранта, небольшой мобильной мастерской, подъёмника, который, например, можно использовать для сбора семенного материала с растущих деревьев. Это делает возможным, в случае необходимости, делать из гусеничных вездеходов кратковременные вахтовые посёлки, например, для лесоустроительных партий — в лесном хозяйстве или геологов [3].

На вездеходах гусеничного типа можно передвигаться по болотистым местностям, глубокой грязи и снегу, и даже по открытым водоёмам.

Практически все современные модели гусеничных вездеходов имеют прочный металлический корпус рамы, не боящийся внешнего механического воздействия и сделанный по принципу подводной лодки, когда в герметичном корпусе рамы установлены переборки, разделяющие корпус на отсеки, заполненные воздухом. Корпус кабины (или кабин) вездехода делается из очень прочного пластика, способного выдержать прямое падение дерева на него или переворот. То есть можно говорить о том, что такие вездеходы соответствуют требованиям основных нормативных документов в области безопасности для самоходных лесных машин: ГОСТ Р ИСО 8082-1-2012, ГОСТ Р ИСО 8083-2008, ГОСТ Р ИСО 8084-2005, а также ГОСТ Р ИСО 3164-2002.

Из-за низкого удельного давления на поверхность почвогрунта они способны оказывать минимальное негативное воздействие на лесные почвогрунты, с их помощью можно эффективно передвигаться и по заснеженному лесу.

За рубежом распространены так называемые средства малой механизации лесного хозяйства [4]. Они используются для самых разных лесохозяйственных работ, включая

проведение рубок ухода за лесом в молодняках, что является важнейшим мероприятием для выращивания качественных, с большой товарной ценностью, древостоев [5].

Предварительный анализ рынка гусеничных вездеходов в России показал, что наиболее оптимальным для решения вышеописанных задач является вездеход-амфибия BV 206 «Восток», который имеет грузоподъёмность 2,5 т (даже до 3 т в специальной версии) при весе 4,5 т. Например, для доставки бригады для оперативного тушения природного пожара или выполнения работ по лесоустройству он вмещает до 17 чел. С точки зрения его эксплуатации в различных климатических условиях вездеход имеет рабочий диапазон температур от +40 до -60 °С. Его крейсерская скорость достигает до 55 км/ч, а преодолеваемый уклон — до 55°. Кроме того, важно то, что он плавает с полной загрузкой, а также способен минимально повреждать верхний растительный слой из-за низкого удельного давления на лесной почвогрунт. В вездеходе использован модульный принцип компоновки, поэтому из него можно сделать практически любую транспортно-технологическую машину. Это становится возможным благодаря универсальным решениям на базе заднего модуля.

Нужно также отметить вездеход ГАЗ-34039 «Ирбис», который выпускает Заволжский завод гусеничных тягачей. Эта машина оснащена двигателем мощностью 122 л. с., имеет объёмный монокузов и комфортабельный салон, хорошую эргономику рабочего места водителя. Благодаря установке двигателя в салоне вездехода его намного проще обслуживать, особенно зимой и в непогоду. Грузоподъёмность этого вездехода составляет 2 т. Он может транспортировать прицеп массой до 2 т, преодолевать уклоны до 35°, развивает максимальную скорость до 60 км/ч, плавает со скоростью до 5 км/ч.

2. Сравнительный анализ вездеходов для лесного комплекса

Лесной комплекс объединяет лесное хозяйство и лесную промышленность, которая, в свою очередь, подразделяется на лесозаготовительное производство и деревоперерабатывающую промышленность.

В данном подразделе речь пойдёт о сравнении достоинств и недостатков колёсных и гусеничных вездеходов, которые можно использовать для нужд лесничеств и лесопарков, а также для решения задач лесопромышленных предприятий, занимающихся заготовкой древесины и лесовосстановлением.

Основным отечественным нормативным документом для вездеходов является Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 50943-2011 «Снегоболотоходы. Технические требования и методы испытаний», утверждённый и введённый в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 1176-ст от 13.12.2011. Данный стандарт заменил ранее действующий ГОСТ Р 50943-96.

Его действие распространяется на самоходные внедорожные транспортные средства с колёсными и гусеничными движителями и прицепы к ним, сконструированные и предназначенные для использования вне дорог общей сети и имеющие возможность

движения по глубокому снежному покрову, а также (при отсутствии точек опоры на опорную поверхность в виде лыж) по грунтам со слабой несущей способностью, в т. ч. по болотам.

Он не распространяется на транспортные средства, приводимые в движение воздушным винтом (азросани, транспортные средства на воздушной подушке), а также шнековыми движителями.

Также данный ГОСТ не распространяется на конструкции колёсных вездеходов, имеющих менее четырёх точек опоры на поверхность движения или имеющих точки опоры, располагающиеся по схеме ромба или треугольника, а также на прицепы, имеющие в сцеплённом с буксирующим вездеходом состоянии точки опоры на опорную поверхность, располагающиеся по схеме ромба или треугольника. Требования этого ГОСТа не распространяются и на средства мототранспортные четырёхколёсные внедорожные, регулируемые требованиями ГОСТ Р 52008, а также на снегоходы, которым посвящён ГОСТ Р 50944, и на вездеходы, изготовленные в порядке индивидуального технического творчества.

К последним стандарт относит транспортные средства, у которых изготовление составных частей, всех или основной части, а также сборку осуществляло физическое лицо по индивидуальному проекту для персонального использования.

ГОСТ Р 50943-96 трактует вездеходы (снегоболотоходы) как самодвижущееся транспортное средство, сконструированное и предназначенное для перевозки пассажиров и/или грузов преимущественно в условиях снежного и/или заболоченного бездорожья вне дорог общей сети и оснащённое колёсными или гусеничными движителями.

Согласно требованиям ГОСТ Р 50943-96, угол поперечной статической устойчивости вездеходов должен быть не менее 35° . При этом предельное значение угла определяется при максимальной конструктивной массе с учётом наиболее неблагоприятного в отношении высоты центра тяжести расположения полезной нагрузки, допускаемого изготовителем (включая багаж на крыше, если конструкцией крыши предусматривается его перевозка).

Работоспособность вездехода должна обеспечиваться в диапазоне температур от -60 до $+40$ °С. Габаритная высота вездеходов не должна превышать 4 м, ширина — 2,55 м, а длина одиночных несочленённых вездеходов — 12 м, сочленённых — 20 м.

Сравнительный анализ преимуществ и недостатков колёсных и гусеничных вездеходов позволяет утверждать, что поскольку гусеницы сложнее в изготовлении и более материалоемки, гусеничные вездеходы дороже колёсных. Кроме того, они имеют больший вес и, соответственно, меньшую энергонасыщенность при прочих равных условиях [6], [7]. С другой стороны, как показывает практика, ресурс гусениц, как правило, больше, чем у колёс низкого и сверхнизкого давления, особенно в условиях перемещения по лесу.

Кроме того, гусеничные вездеходы, как и большинство гусеничных машин, имеют лучшую устойчивость на склонах, поэтому более удобны, эффективны и безопасны при работе на пересечённой местности.

Изучение истории создания вездеходов говорит о том, что традиционно на вездеходы устанавливались металлические или резиновые гусеницы, которые будут рассмотрены далее. Но в настоящее время гусеничные вездеходы все чаще заменяют на модели на шинах низкого и сверхнизкого давления. Причина этого в следующих основных преимуществах колёсных вездеходов по сравнению моделями на гусеничном ходу: увеличение пятна контакта с почвой колёс низкого и сверхнизкого давления снижает её повреждение и увеличивает проходимость вездехода до уровня гусеничного, а минимальное повреждение почвы очень важно, особенно при движении по природоохранной зоне; колёсные вездеходы имеют возможность развить большую скорость в тяжёлых условиях за счёт меньшего погружения в снег, трясину и т. п.; меньшая масса позволяет сократить удельный расход топлива.

С другой стороны, гусеничные вездеходы остаются более предпочтительными при движении по глинистой почве, особенно после дождя, в период весенней или осенней распутицы.

Кроме того, если говорить именно о транспортно-технологической машине для лесного хозяйства и лесозаготовок, а не просто транспортной, например, для патрулирования участков лесного фонда, то здесь следует рассматривать именно гусеничные вездеходы, которые позволяют транспортировать грузы значительной массы, более 10 чел. персонала, устанавливать различное технологическое оборудование.

3. Сохранение почвенного покрова от разрушения при воздействии движителей гусеничных вездеходов

В Российской Федерации традиционно уделяется много внимания сохранению средообразующих функций лесных массивов. Наша страна имеет огромные площади, занятые особо охраняемыми природными территориями (ООПТ) — заповедники, заказники, памятники природы и т. д., а также защитными лесами, которые, прежде всего, выполняют средообразующие, водоохранные, защитные, санитарно-гигиенические, оздоровительные и другие экологически важные функции.

Во многих субъектах РФ проводится постоянный мониторинг площадей ООПТ и защитных лесов, выделяются новые площади под заповедники и заказники. На данных территориях хозяйственная деятельность человека практически прекращается. Иногда исключением является рекреационное пользование (экологический туризм), который и в России развивается быстрыми темпами [8].

Но, как уже отмечалось, сколько бы охраняемой природной территорией не являлся, например, заповедник или заказник, отвечающим за него лицам приходится по этой территории перемещаться. Цели эти могут быть различны, например, подкормка и учёт животных, патрулирование территории от браконьеров и лесных пожаров, доставка туристов, собственно тушение возникающих природных, в т. ч. и лесных, пожаров.

При этом возникает двойственная ситуация: с одной стороны, необходимо достаточно грузоподъёмное и хорошо проходимое транспортное средство, а с другой — оно должно

практически не влиять на экосистему, в частности на поверхность движения. Например, никоим образом нельзя повреждать верхние горизонты в тундрах и притундровых лесах.

Живой напочвенный покров, особенно в экосистемах с повышенной ранимостью, возобновляется очень медленно [9], а, как мы помним, идея создания ООПТ — сохранение естественной среды обитания для множества организмов без признаков воздействия человека.

Наиболее ранимым является поверхностный слой в криолитозоне — на мерзлотных почвогрунтах. В этих условиях его нарушение чрезвычайно быстро вызывает практически необратимые последствия — развитие карстовых процессов. Следовательно, необходимо иметь такую транспортную (транспортно-технологическую) систему, которая могла бы эффективно перевозить грузы и людей и при этом не повреждать поверхность движения.

Очевидно, что таким требованиям соответствует гусеничная машина [10]. Но работники лесного хозяйства и лесозаготовители хорошо знают, как выглядит лесосека после работы на ней тяжёлой гусеничной техники на металлических гусеницах, особенно в тёплый период года.

Для уменьшения колееобразования, снижения негативного воздействия на лесные почвогрунты на колёсные лесные машины (харвестеры и форвардеры) надевают моногусеницы, конструкций которых известно достаточно много. Но, по опыту, нельзя сказать, что они полностью решают проблему минимизации отрицательного воздействия на почвогрунты лесосек.

Также известно, что от режима работы движителя сильно зависит степень его влияния на поверхность движения при прочих равных условиях. Неоптимальный режим движения, в отличие от, например, колёсного вездехода на пневматиках сверхнизкого движения, у гусеничного вездехода приведёт к сдиранию живого напочвенного покрова от касательной силы тяги, эффекту пробуксовки.

На ходовую систему гусеничной машины, работающей в условиях бездорожья, на больших скоростях, воздействует широкий спектр силовых возбуждений. В этой связи в теории рассматривают три типа нагрузок: постоянные или медленно изменяющиеся, максимальные кратковременные и постоянно действующие переменные по величине нагрузки.

К постоянно действующим или медленно изменяющимся нагрузкам относятся вес машины с грузом; средние значения сил сопротивления движению машины; силы, возникающие в конструкции при монтаже, и т. д. Такие постоянные нагрузки являются статическим уровнем, на котором формируется динамическая составляющая процесса.

Кратковременными нагрузками можно считать такие, у которых длительность воздействия меньше или соизмерима с периодом собственных колебаний колебательной системы. В деталях и узлах машин максимальный уровень нагрузки меняется с изменением условий эксплуатации и рабочих режимов. Поэтому для каждой детали принято выделять наиболее тяжёлые, определяющие нагрузки или нагрузочные режимы с точки зрения прочности. Нагрузки, вероятность возникновения которых меньше 10^{-5} за весь срок службы машины, принято называть перегрузочными или максимальными кратковременными. Такие нагрузки

часто оцениваются коэффициентом динамичности, характеризующим отношение максимальной амплитуды к статическому или среднему уровню нагрузки, и применяются для расчёта максимальных кратковременных ускорений (перемещений) и напряжений.

Силовое возбуждающее воздействие такого характера создаёт гусеничное зацепление и взаимодействие опорных катков с гусеницей.

Переменные по величине, постоянно действующие нагрузки возникают в деталях ходовой части при движении или выполнении технологических операций машиной, они зависят от случайных факторов, предопределяемых условиями эксплуатации. Циклы ускорений или напряжений меняются по уровню и длительности. Основными причинами возникновения постоянно действующих динамических нагрузок являются микронеровности пути и изменчивость сил сопротивления движению.

Большое влияние на тягово-цепные свойства гусеничной машины, её проходимость и повреждение почвы оказывают равномерность распределения давления на опорную поверхность, которое определяется многими факторами, включая число и диаметр опорных катков, шаг звена, угол съезда движителя, число зубьев ведущего колеса. Особенно всё это проявляется при движении транспортной системы большой массы по заболоченным грунтам с плотной дерновиной и слабым основанием.

На мягких почвогрунтах, вследствие их большой деформации под опорными катками, часть нагрузки воспринимается гусеницами между катками. Распределение давления при этом более равномерное. Значительное влияние на тягово-цепные свойства и динамику касательной силы тяги оказывают шаг звеньев и число зубьев.

Следует отметить значительное снижение динамики гусеничного движителя, а следовательно, и отрицательного воздействия на почвогрунт при внедрении эластичных гусениц и в ещё большей мере гусениц из синтетических материалов.

Технологическая эффективность вездеходных машин во многом определяется их проходимостью, под которой понимается способность машины перемещаться по маршруту с заданной скоростью (опорная проходимость), а также преодолевать препятствия, как естественные, так и искусственные (профильная проходимость) [11], [12]. Проходимость машин определяется комплексом параметров движителя (геометрические параметры, приведённая нагрузка, мощность двигателя), грунта — опорной поверхности (физико-механические и прочностные параметры, мощность мягкого слоя) и их взаимодействия (сопротивление грунта движению машины, сцепление движителя с опорной поверхностью, буксование) [13]—[18]. В практических расчётах для оценки опорной проходимости пользуются коэффициентами сопротивления, сцепления и тяги, которые зависят от указанных выше параметров и определяются теоретически либо экспериментально [19]—[21].

Экологическая безопасность лесных вездеходных машин связана с сохранением лесных почв, подвергающихся воздействию движителей [22], [23]. Основными показателями воздействия движителей на лесные почвогрунты являются глубина образующейся колеи, уплотнение почвогрунта, срез слоёв почвогрунта по причине буксования техники [22]—[25].

Оценка указанных показателей проводится также теоретическими и экспериментальными методами [22]—[25]. Показатели воздействия техники на почвогрунт зависят как от свойств движителей (геометрические параметры, приведённая нагрузка, мощность двигателя), так и почвогрунта (физико-механические и прочностные параметры, мощность мягкого слоя) и их взаимодействия (сопротивление грунта движению машины и скорость движения, определяющая время воздействия движителя на почвогрунт, буксование) [25]—[28].

Отметим, что вопросы оценки проходимости и экологичности лесных машин формируют актуальную область исследований науки о лесозаготовительном производстве, содержащую несколько проблем, до настоящего времени не разрешённых в полной мере [29], например:

1. Обоснование оптимальных параметров движителей, обеспечивающих наилучшие показатели опорной и профильной проходимости на местности.
2. Разработка средоохраняющих технологий заготовки и транспорта леса.
3. Разработка систем поддержки принятия решений по выбору типов машин для заготовки древесины, синтеза их систем, обеспечивающих производительность технологии заготовки.
4. Разработка методов составления почвенно-грунтовой картины лесосеки, сбора актуальных данных о свойствах опорных поверхностей лесосеки.

Таким образом, очевидна значимость вопросов исследования свойств поверхностей для движения лесных и лесозаготовительных машин. Лесной почвогрунт представляет собой многокомпонентную систему, состоящую из мягкого плодородного слоя, почвы — смеси органического вещества с минеральными частицами и подстилающего слоя (либо слоёв) неорганического грунта, причём граница слоёв может быть размыва, они могут быть перемешаны [25], [30]. Кроме того, техника работает на слабонесущих задернованных поверхностях, верхний (дерновый) слой которых прочнее подстилающего слоя [31].

Грунты, в свою очередь классифицируют по гранулометрическому составу, в зависимости от процентного содержания глинистых частиц выделяют несвязные (пески) и связные грунты (таблица 1) [32].

Таблица 1. Классификация грунтов в зависимости от гранулометрического состава и свойств твёрдых частиц [32]

Table 1. Classification of soils depending on the granulometric composition and properties of solid particles [32]

Грунт	Содержание глинистых частиц, %	Число пластичности
Лёгкий суглинистый	3—12	0—7
Суглинистый	12—18	7—10
Тяжёлый суглинистый	18—25	10—15
Глинистый	> 25	> 15

Физические свойства грунта, такие как влажность и плотность, пористость, а также содержание глинистых частиц, определяют его механические свойства, используемые как

характеристики сопротивления грунта внешнему воздействию [32], [33]. Накоплены сведения по свойствам задернованных поверхностей (таблица 2), заболоченных грунтов (таблица 3) и лесных почвогрунтов (таблица 4).

Таблица 2. Свойства дернового покрова слабонесущих опорных поверхностей [20], [34]

Table 2. Properties of the turf cover of low-weight support surfaces [20], [34]

Характеристика дернового покрова	Толщина дернового покрова, см	Удельное сопротивление грунта срезу, кПа	Модуль деформации, кПа
Сфагновые мхи: без кустарника	33,5—38,5	25—28	260—290
с кустарником	35—36	35—42	360—430
Гипновые мхи: без кустарника	27—28	18—21	186—215
с кустарником	27	28—34	290—340
Осоковый с развитыми осоковыми кочками	35—42	103—145	1050—1580
С межкочечными понижениями	10—11	14—24	143—244
Берёзово-лесной в межкочечных понижениях	5—5,5	14—60	86—143
Сфагновый торф (степень разложения 35—40 %, влажность 180 %)	—	54	544
Гипново-осоково-лесной	38—42	63—100	650—1430
Осоково-лесной торф	—	67	670

В таблицах 3, 4 использованы обозначения: E — модуль общей деформации почвогрунта, ν — коэффициент Пуассона, C — удельное сцепление частиц почвогрунта, φ — угол внутреннего трения почвогрунта, ρ_0 — плотность почвогрунта ненарушенной структуры, H — мощность деформируемого слоя почвогрунта (глубина распространения деформаций сжатия).

Модуль общей деформации является одной из главных характеристик грунта при расчёте показателей колеобразования под воздействием нормальной нагрузки [25], [39], [40]. Максимальное сопротивление грунта срезу является важнейшим показателем повреждаемости опорной поверхности под воздействием касательной нагрузки [41]—[43]. Проанализируем связи сопротивления срезу и модуля общей деформации для дернового покрова, заболоченного грунта и лесного почвогрунта.

Таблица 3. Свойства заболоченных грунтов [20], [31], [34]

Table 3. Properties of wetlands [20], [31], [34]

Вид болота	Характеристика дернового покрова	$\varphi, ^\circ$	$C, \text{кПа}$	$E, \text{МПа}$
Моховое	Преобладают сфагновые мхи без кустарника	12—14	5—8	0,26—0,29
	Преобладают сфагновые мхи с кустарником	13—16	10—17	0,36—0,43
	Преобладают гипновые мхи с кустарником	11—15	8—14	0,29—0,34
Травяное	Осоковый покров с развитыми осоковыми кочками	18—20	26—45	1,05—1,58
	Осоковый покров с межкочечными понижениями	3—8	4—14	0,14—0,24
Лесное	Берёзово-лесной в межкочечных понижениях	5—7	4—10	0,09—0,14
Осушенное	Гипново-осоково-лесной	16—20	30—50	0,65—1,4

Таблица 4. Классификация лесных почвогрунтов по механическим свойствам [25], [35]—[39]

Table 4. Classification of forest soils by mechanical properties [25], [35]—[39]

Параметры	Категории почвогрунта		
	Слабый почвогрунт (III категория)	Почвогрунт средней прочности (II категория)	Прочный почвогрунт (I категория)
$E, \text{МПа}$	0,4	1	3
ν	0,35	0,25	0,15
$C, \text{кПа}$	5	12	24
$\varphi, \text{град}$	11	15	16
$\rho_o, \text{кг/м}^3$	750	850	950
$H, \text{м}$	0,8	0,4	0,3

Расчёт максимального сопротивления срезу выполним по формуле [31]

$$\tau_{\max} = C + p \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где p — нормальное давление, в расчётах $p = 35 \text{ кПа}$.

Результаты представлены на рисунке 1.

В результате обработки расчётных данных устанавливаем, что сопротивление срезу τ_{\max} [кПа] и модуль общей деформации E [МПа] связаны линейными уравнениями, для дернового покрова, заболоченного грунта и лесного почвогрунта соответственно:

$$\tau_{\max} = 36,839E + 5,3098, \quad (2)$$

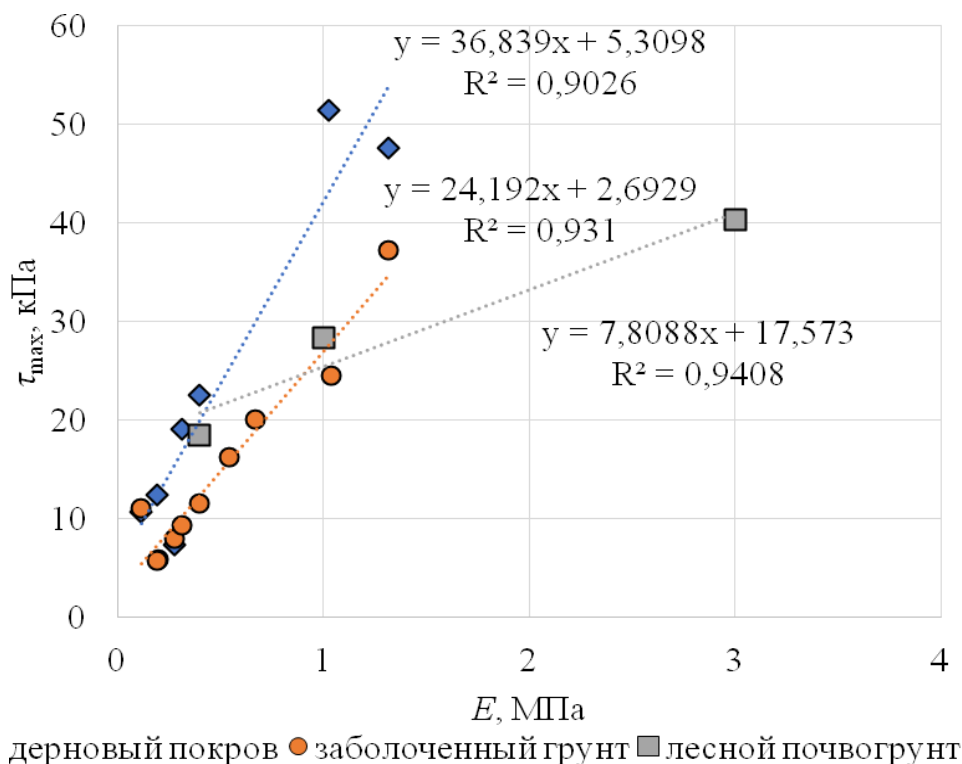


Рисунок 1. Связь сопротивления срезу и модуля общей деформации для дернового покрова, заболоченного грунта и лесного почвогрунта

Figure 1. Relationship of shear resistance and modulus of general deformation for turf cover, swampy ground and forest soil

$$\tau_{\max} = 24,192E + 2,6929, \quad (3)$$

$$\tau_{\max} = 7,8088E + 17,573. \quad (4)$$

Уравнения (2)—(4) дополняют систему формул [25], [35]—[39] для определения механических и прочностных свойств опорных поверхностей при разработке и реализации математической модели взаимодействия движителя гусеничного вездехода с опорной поверхностью.

Картина взаимодействия движителя с опорной поверхностью строится на основе зависимостей осадки полупространства (модели деформируемой поверхности, грунта) от

давления штампа (модели движителя) [13], [20], [34]. В зависимости от свойств опорной поверхности и давления со стороны движителя кривые осадки имеют различный характер. Некоторые примеры экспериментальных кривых осадки в зависимости от давления представлены на рисунке 2 [13], [20], [34].

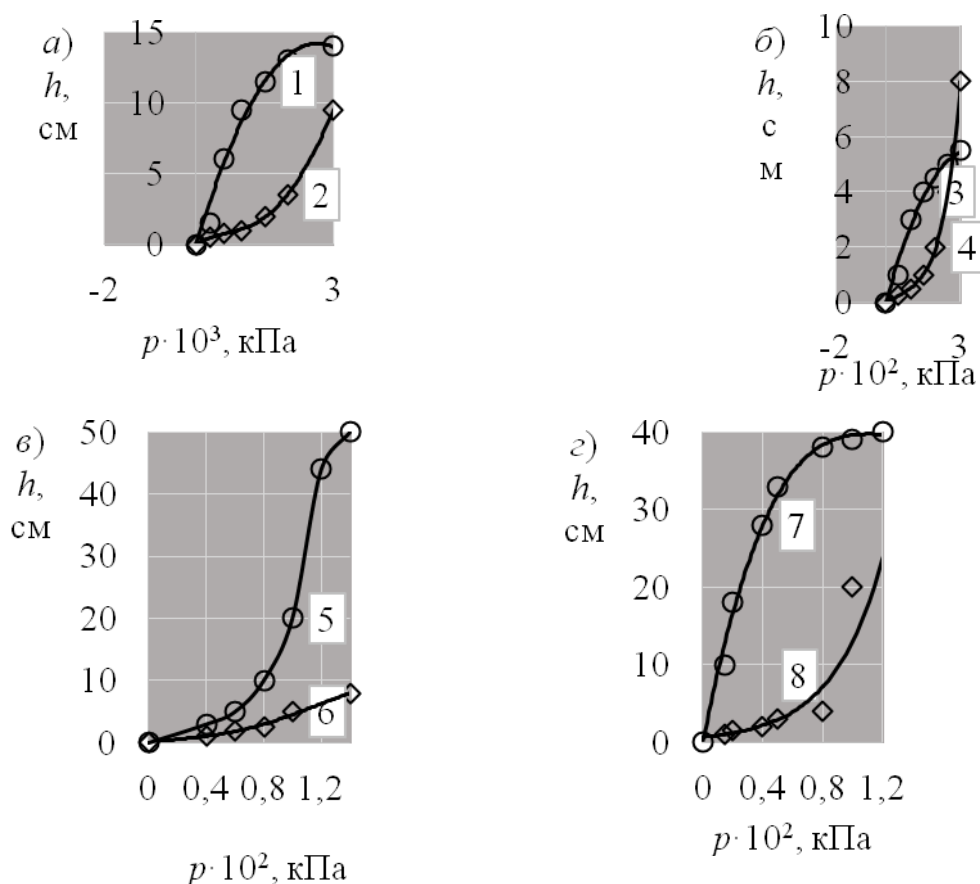


Рисунок 2. Результаты экспериментов по вдавливаю штампов в грунт: а) — связный грунт, б) — песок, в) — торф, г) — снег; 1 — грунт переувлажнён на глубину 16—20 см, 2 — грунт в пластичном состоянии, 3 — грунт разрыхлён на глубину 15—20 см, 4 — грунт уплотнён, 5 — площадь штампа 3,6 м², 6 — площадь штампа 0,4 м², 7 — плотность 0,15 г/см³, 8 — плотность 0,20 г/см³ [13], [20], [34]

Figure 2. The results of experiments on a stamp indentation into the soil: a) cohesive soil, б) sand, в) peat, г) — snow; 1 — the soil is too wet to a depth of 16 – 20 cm, 2 – clay in a plastic condition, 3 – soil loosened to a depth of 15 – 20 cm, 4 – soil compacted, 5 – stamp area of 3.6 m², 6 – stamp area of 0.4 m², 7 – density of 0.15 g/cm³, 8 – density of 0.20 g/cm³ [13], [20], [34]

Осадка грунта зависит не только от давления p , но и от площади штампа F (рисунок 3) [13], [20], [34].

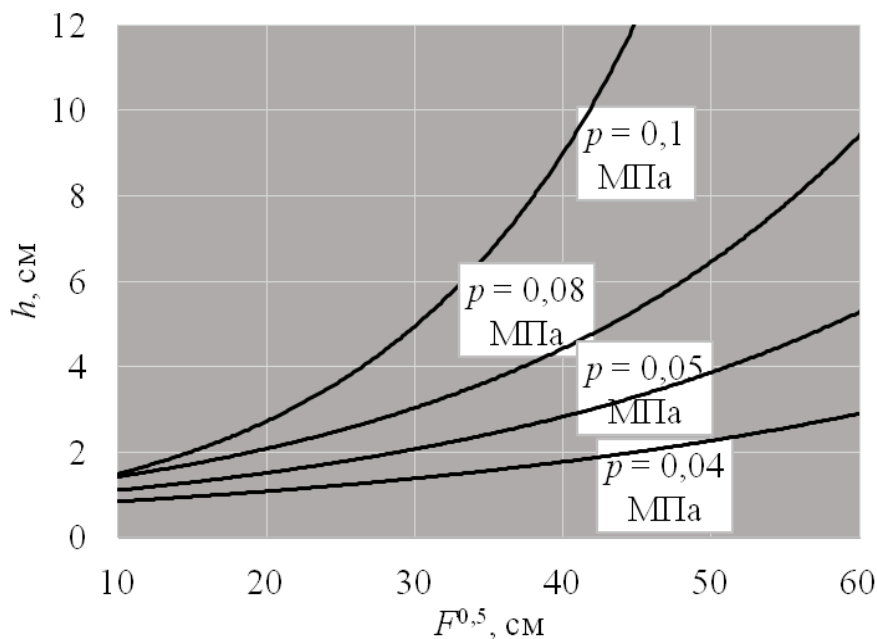


Рисунок 3. Влияние площади штампа на осадку торфяных грунтов [13], [20], [34]

Figure 3. Impact of the stamp area on the planting of peat soils [13], [20], [34]

Для заболоченных грунтов существенно влияние соотношения сторон штампа, на практике — длины l и ширины b пятна контакта движителя с опорной поверхностью, определяющейся жёсткостью и типом движителя (колёсный, гусеничный), свойствами грунта [13], [20], [31], [34].

Были предложены различные зависимости осадки штампа от давления, кратко рассмотрим основные из них. Известна зависимость Бернштейна [44]—[46]:

$$p = kh^\mu, \quad (5)$$

где p — нормальное давление движителя на опорную поверхность, k , μ — эмпирические коэффициенты, определяемые типом и состоянием грунта, а также геометрическими параметрами штампа, h — осадка грунта, совпадающая с глубиной колеи.

Для использования уравнения (5) необходима развитая эмпирическая база, поскольку коэффициенты k , μ зависят от разнообразных параметров движителя и грунта [44]—[46].

Была предложена формула [47]

$$q = k_b \cdot (h/b)^\mu, \quad (6)$$

где b — ширина штампа, k_b , μ — эмпирические коэффициенты.

По сравнению с уравнением (5) объём эмпирической базы несколько уменьшается (за счёт выделения одного независимого входного параметра — ширины штампа), но накопленных сведений всё ещё недостаточно для практических расчётов.

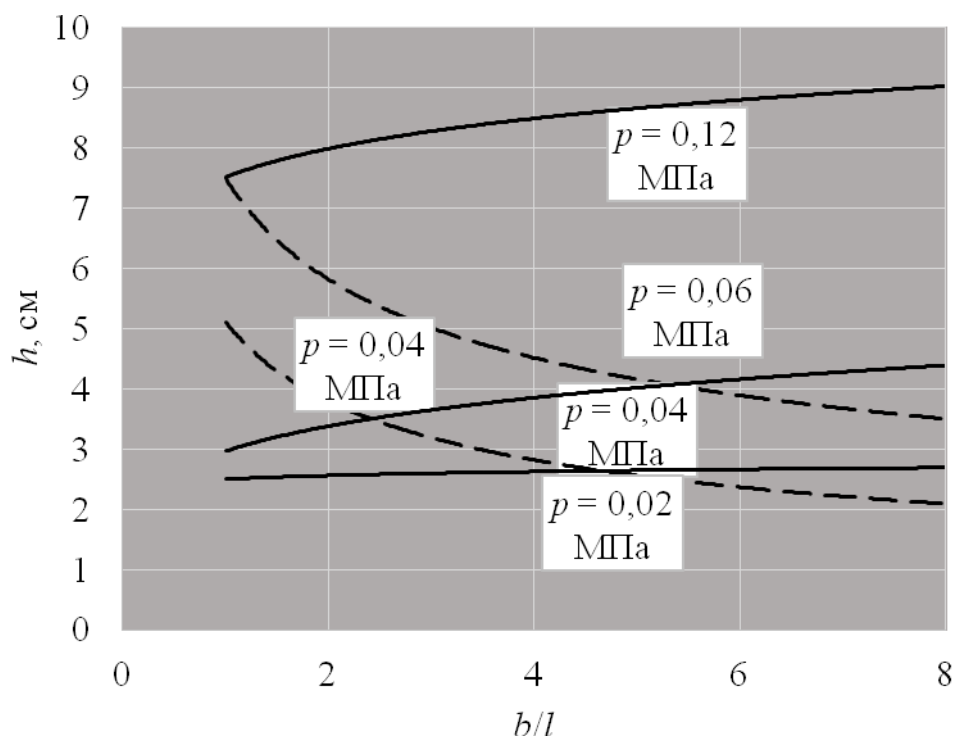


Рисунок 4. Глубина погружения штампа в грунт в зависимости от соотношения сторон пятна контакта [13], [20], [34]

Figure 4. The depth of immersion of the stamp in the ground depending on the aspect ratio of the contact spot [13], [20], [34]

Более практичным представляется уравнение Беккера, в котором коэффициент деформации грунта разделён на составляющие, ответственные за сдвиговые и сцепные свойства [48], [49]:

$$p = \left(C_1 + \frac{C_2}{b} \right) \cdot h^u, \quad (7)$$

где C_1 , C_2 — коэффициенты, характеризующие сдвиговые и сцепные свойства опорной поверхности.

Общим недостатком зависимостей (5)—(7) является сугубо эмпирический характер и отсутствие стандартизованных методик определения эмпирических коэффициентов.

Впоследствии были представлены математические модели, использующие параметры грунта, независимые от параметров штампа-двигателя. Например, для грунтов, у которых сопротивление сдвигу выражено сравнительно сильнее сопротивления сжатию (таких как, например, задернованный грунт), предложено уравнение [50], [51]

$$p = S_B h + Q_B, \quad (8)$$

где [50], [51]:

$$S_B = \gamma \cdot \tan^{-4}(0,25\pi - 0,5\varphi), \quad (9)$$

$$Q_B = 0,25b\gamma \cdot \sin \varphi \sin^{-4}(0,25\pi - 0,5\varphi) \operatorname{tg}^{-1}(0,25\pi - 0,5\varphi) + C \operatorname{tg}^{-1}(0,25\pi - 0,5\varphi) \sin^{-2}(0,25\pi - 0,5\varphi), \quad (10)$$

где γ — удельный вес грунта, φ — угол внутреннего трения грунта, C — удельное сцепление грунта.

Развитием уравнения (8) является формула [20], [34], [52], [53]

$$h = \frac{b}{C} \ln \frac{(p + p_0) \cdot (S_B h + Q_B)}{p_0 \cdot (S_B h + Q_B - p)}. \quad (11)$$

Формулы (8)—(11) используют параметры грунта, имеющие физический смысл и стандартизованные методики их определения, однако уравнения предназначены для грунтов с преобладающим сопротивлением сдвигу и не учитывают сопротивление нормальной нагрузке и мощность деформируемого слоя.

Более универсальные математические модели строятся на положениях теории [20], [34], [54], [55]. Рассматривается схема вдавливания штампа в деформируемое полупространство (рисунок 5).

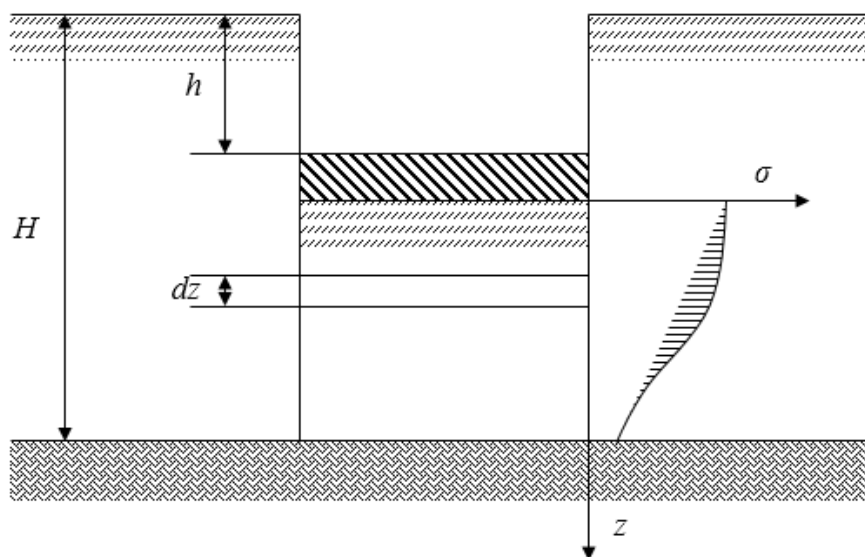


Рисунок 5. Схема к расчёту осадки грунта под воздействием штампа-двигателя

Figure 5. Scheme for calculating soil precipitation under the influence of a stamp-mover

В науке о лесозаготовительном производстве подход использовался в работах [13], [31], [38], [56]—[75]. В публикациях [29], [71], [73], [76], [77] рассмотрены вопросы взаимодействия движителей с неоднородными опорными поверхностями. Взаимодействие движителей с мёрзлыми грунтами и снегом изучалось в работах [78]—[81].

Нормальные напряжения, от воздействия движителя, задаются функцией сжимающего напряжения по глубине деформируемого массива грунта, согласующейся с экспериментальными данными, например [20], [34]:

$$\sigma = \frac{Jp}{1+(Az)^2}, \quad (12)$$

где J — параметр, учитывающий соотношение длины и ширины штампа (средняя длина и ширина площадки контакта движителя с почвогрунтом), A — коэффициент, учитывающий влияние близлежащего твёрдого слоя на распространение деформаций.

Коэффициенты J , A можно рассчитать по уравнениям [18], [20], [34]

$$J = \frac{0,03 + l/b}{0,6 + 0,43l/b}, \quad (13)$$

$$A = \frac{1}{0,64 \cdot b \cdot (1 + b/H)}. \quad (14)$$

Для гусеничного движителя длина пятна контакта может считаться входной величиной, характеристикой движителя. Для колёсного движителя длина l определяется расчётным путём, например [20], [29], [34]:

$$l_1 = 2\sqrt{Dh_z - h_z^2}, \quad (15)$$

$$l_2 = \sqrt{D \cdot (h_z + h) - (h_z - h)^2}, \quad (16)$$

$$l = l_1 + l_2 = 2\sqrt{Dh_z - h_z^2} + \sqrt{D \cdot (h_z + h) - (h_z - h)^2}, \quad (17)$$

где D — диаметр колеса, h_z — радиальная деформация колеса.

Далее рассматривается сжатие элементарных слоёв грунта под воздействием напряжения σ , переменного по глубине деформируемого полупространства в соответствии с зависимостью (12) [20], [24], [29], [34]

$$dh^* = \frac{\sigma}{E - \sigma} dz, \quad (18)$$

причём общая деформация сжатия грунта определяется интегрированием [20], [24], [29], [34]:

$$h^* = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\sigma}{E - \sigma} dz, \quad (19)$$

где z_1 , z_2 — вертикальные координаты зоны распространения сжимающего напряжения.

Действительную осадку грунта определяют с учётом воздействия сдвиговых напряжений, влияние которых на осадку учитывают коэффициентом потери несущей способности [24], [34]:

$$h = k_p h^*, \quad (20)$$

где k_p — коэффициент учёта потери несущей способности [20], [24], [29], [34]:

$$k_p = \frac{p_s}{p_s - p}, \quad (21)$$

где p_s — несущая способность грунта.

В результате интегрирования выражения (20) получено [24], [29]:

$$h = \frac{Jpk_d k_p \arctg \left(\frac{AEz}{\sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}} \right) \Big|_{z=z_1}^{z=z_2}}{A\sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}}. \quad (22)$$

Согласно схеме на рисунке 5, пределы интегрирования z_2 и z_1 равны соответственно $H - h$ и 0, таким образом [24], [29],

$$h = \frac{Jpk_d k_p \arctg \left(\frac{AE(H - h)}{\sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}} \right)}{A\sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}}. \quad (23)$$

Для расчёта несущей способности грунта пользуются уравнением [20], [34]

$$p_s = \frac{\pi}{2} p_{s0} \alpha \arctg \frac{\pi \cdot (H - h)}{2b}, \quad (24)$$

где p_{s0} — несущая способность слоя грунта неограниченной толщины, α — коэффициент, учитывающий ограниченную толщину деформируемого слоя грунта.

Коэффициент α рассчитывают по формуле [20], [34]

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \arctg \frac{\pi \cdot (H - h)}{2b}. \quad (25)$$

Согласно результатам экспериментов, несущая способность грунта определяется не только его сдвиговыми свойствами, но и типом, и направлением результирующей внешней нагрузки (рисунок 6).

Для учёта влияния геометрических параметров штампа-двигателя и угла приложения нагрузки в уравнение для определения несущей способности вводятся поправочные коэффициенты [20], [34]:

$$p_{s0} = K_{\beta 1} I_1 X_1 b + K_{\beta 2} I_2 X_2 + X_3 h, \quad (26)$$

где X_1, X_2, X_3 — коэффициенты учёта влияния физико-механических свойств грунта, I_1, I_2 — коэффициенты учёта геометрических параметров пятна контакта, $K_{\beta 1}, K_{\beta 2}$ — коэффициенты учёта угла приложения нагрузки.

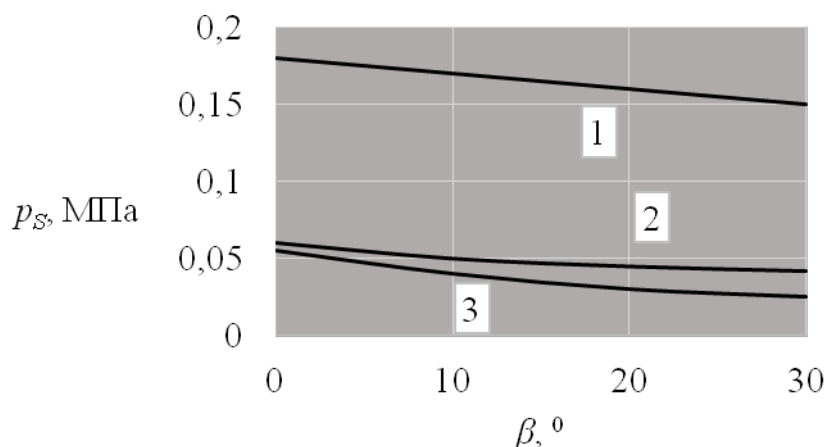


Рисунок 6. Зависимость несущей способности грунта от направления приложенной нагрузки: 1 — суглинистый грунт, 2 — глинистый грунт, 3 — песчаный грунт

Figure 6. Dependence of the bearing capacity of the soil on the direction of the applied load: 1 — loamy soil, 2 — clay soil, 3 — sandy soil

Для расчёта коэффициентов $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$ получены уравнения [20], [34], [82], [83]

$$K_{\beta 1} = \frac{\pi - 4\beta \operatorname{tg} \varphi}{\pi + 4\beta \operatorname{tg} \varphi}, \quad (27)$$

$$K_{\beta 2} = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta}, \quad (28)$$

где β — отклонение угла приложения результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности [20], [29], [82], [83]:

$$\beta = \arccos \frac{P}{\sqrt{P^2 + \tau^2}}, \quad (29)$$

где τ — касательное напряжение.

В отличие от уравнения (11) формула (23) учитывает сопротивление нормальной нагрузке, характеристиками которого являются модуль общей деформации E и мощность деформируемого слоя H . Сопротивление сдвигу характеризуется несущей способностью p_s .

Для учёта времени воздействия движителя на грунт, связанного с числом проходов вездехода по трассе и его скоростью, пользуются поправочным коэффициентом динамичности к давлению движителя на грунт [13], [24], [84]:

$$p = p_0 k_d, \quad (30)$$

где p_0 — статическое давление движителя на грунт (частное приведённой нагрузки и площади пятна контакта), k_d — коэффициент динамичности, учитывающий время действия нагрузки.

Коэффициент динамичности рассчитывают с учётом принятой реологической модели грунта, в качестве которой чаще всего используется модель Кельвина — Фойгта [24], [29], [85], [86]. Тогда

$$k_o \approx t / (t + t_p), \quad (31)$$

где t — суммарное время воздействия на грунт [24], [29]:

$$t = n \frac{l}{v}, \quad (32)$$

где n — число проходов движителя по следу, v — скорость машины, t_p — время релаксации напряжений в грунте (экспериментальная величина, зависящая от типа и состояния грунта [87]—[90]).

4. Обсуждение и заключение

В результате вышеприведённого анализа установлено:

1. Гусеничные вездеходы являются перспективной базой для транспортно-технологических машин различного назначения для лесного хозяйства и лесозаготовок.

2. Экологическая безопасность лесных вездеходных машин связана с сохранением лесных почв, подвергающихся воздействию движителей. Основными показателями воздействия движителей на лесные почвогрунты являются глубина образующейся колеи, уплотнение почвогрунта, срез слоёв почвогрунта по причине буксования техники. Оценка указанных показателей проводится также теоретическими и экспериментальными методами. Показатели воздействия техники на почвогрунт зависят как от свойств движителей (геометрические параметры, приведённая нагрузка, мощность двигателя), так и почвогрунта (физико-механические и прочностные параметры, мощность мягкого слоя) и их взаимодействия (сопротивление грунта движению машины и скорость движения, определяющая время воздействия движителя на почвогрунт, буксование).

3. Анализ литературных источников показал, что основными параметрами опорной поверхности, учёт которых необходим для разработки адекватной математической модели взаимодействия вездеходного гусеничного движителя с почвогрунтом волока, являются модуль общей деформации, удельное сцепление, угол внутреннего трения, несущая способность и сопротивление почвогрунта срезу. В результате обработки расчётных данных установлено, что сопротивление срезу и модуль общей деформации связаны линейными уравнениями (2)—(4).

4. Математическую модель взаимодействия движителя гусеничного вездехода с лесным почвогрунтом, позволяющую учитывать суммарное напряжение, вызванное сжатием и сдвигом поверхностных слоёв почвогрунта, целесообразно разрабатывать на основе отечественной теории движения автотранспорта в условиях бездорожья, базирующейся на положениях механики грунтов, а именно — на решении задачи о вдавливании штампа в деформируемое полупространство. Преимущество теоретического подхода состоит

в возможности учесть все основные параметры почвогрунта и вездеходного движителя как входные величины модели, имеющие физический смысл.

Список литературы

1. Бурмистрова О. Н., Чемшикова Ю. М., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Тамби А. А. Теоретическое обоснование параметров средооадающего движителя гусеничного вездехода // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 81—88.
2. Добрецов Р. Ю., Григорьев И. В., Рудов С. Е., Тетеревлева Е. В., Чемшикова Ю. М. Увеличение подвижности гусеничных и колёсных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 4—10.
3. Григорьев И. В., Григорьева О. И., Цыгарова М. В. Вахтовые лесозаготовки. Теория и практика // Леспроминформ. 2016. № 1. С. 60—65.
4. Григорьев И. В., Редькин А. К., Валяжонков В. Д., Матросов А. В. Технология и оборудование лесопромышленных производств. Технология и машины лесосечных работ: учебное пособие. СПб.: ЛТА, 2010. 330 с.
5. Григорьева О. И. Перспективные направления повышения эффективности проведения рубок ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Третьей Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Петрозаводск, 2017. С. 56—58.
6. Бурмистрова О. Н., Тетеревлева Е. В. Лёгкие вездеходы для лесного хозяйства и лесозаготовок // Материалы Международной научно-технической конференции «Транспортные и транспортно-технологические системы» / под ред. Н. С. Захарова. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. С. 34—37.
7. Чемшикова Ю. М. Гусеничные вездеходы для лесного хозяйства // Материалы Пятой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности лесного комплекса». Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2019. С. 116—118.
8. Бурмистрова О. Н., Чемшикова Ю. М. Сохранение почвенного покрова от разрушения при воздействии гусеничных движителей // Материалы Международной научно-технической конференции «Транспортные и транспортно-технологические системы» / под ред. Н. С. Захарова. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2019. С. 38—41.
9. Корпачев В. П., Пережилин А. И. Экология лесозаготовок и транспорта леса: учебное пособие. 2-е изд, перераб. и доп. СПб.: Лань, 2018. 308 с.
10. Чемшикова Ю. М., Тетеревлева Е. В. Сравнительный анализ колёсных и гусеничных вездеходов для лесной отрасли // Материалы Пятой Всероссийской национальной научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности лесного комплекса». Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2019. С. 118—119.
11. Анисимов Г. М. Магистральные направления научно-технического прогресса лесозаготовительной промышленности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2003. № 169. С. 129—140.
12. Анисимов Г. М. Методика прогнозирования технического уровня лесосечных машин // Известия СПб ГЛТА. 2005. № 178. С. 4—10.
13. Божбов В. Е. Повышение эффективности процесса трелёвки путём обоснования рейсовой нагрузки форвардеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: САФУ, 2015. 20 с.
14. Григорьев И. В., Рудов С. Е. Особенности эксплуатации колёсных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях // Forest Engineering: материалы научно-практической конференции с международным участием. Якутск, 2018. С. 67—71.

15. Григорьев И. В., Чураков А. А. Российское лесное машиностроение — перспективы есть! // Лесозаготовка. Бизнес и профессия. 2017. № 4 (9). С. 54—57.
16. Григорьев И. В., Чураков А. А., Григорьева О. И. Перспективная конструкция вездехода для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Международной научно-технической конференции. Тюмень, 2017. С. 136—139.
17. Григорьев И. В., Чураков А. А., Григорьева О. И. Перспективная конструкция гусеничного форвардера // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы международной научно-технической конференции. Тюмень, 2017. С. 140—144.
18. Лухминский В. А. Совершенствование моделей и методов прогнозирования проходимости гусеничных лесных машин: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: С(А)ФУ, 2018. 179 с.
19. Анисимов Г. М., Большаков Б. М. Новые концепции теории лесосечных машин. СПб.: ЛТА, 1998. 114 с.
20. Агейкин Я. С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
21. Saarilahti M. Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Soil interaction model. Helsinki: University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. 39 p.
22. Анисимов Г. М., Большаков Б. М. Основы минимизации уплотнения почвы трелёвочными системами. СПб.: ЛТА, 1998. 106 с.
23. Анисимов Г. М., Григорьев И. В., Шкрум В. Д. Определение площади почвогрунта лесосеки, уплотняемой трелёвочными системами // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2006. № 177. С. 36—42.
24. Песков В. Б. Совершенствование моделей для оценки колеобразования и уплотнения почвогрунтов под воздействием движителей колёсных лесных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: С(А)ФУ, 2018. 20 с.
25. Григорьев И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колёсных трелёвочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: Санкт-Петербургская лесотехническая академия, 2006. 235 с.
26. Бартенев И. М., Драпалюк М. В. Снижение вредного воздействия лесных тракторов и лесосечных машин на почву и насаждения // Лесотехнический журнал. 2012. № 1 (5). С. 61—66.
27. Герасимов Ю. Ю., Сюнёв В. С. Экологическая оптимизация технологических машин для лесозаготовок. Йоэнсуу: Университет Йоэнсуу, 1998. 178 с.
28. Герасимов Ю. Ю., Сюнёв В. С. Лесосечные машины для рубок ухода: комплексная система принятия решений. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. 235 с.
29. Хахина А. М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колёсных лесных машин: дис. ... д-ра техн. наук. Архангельск: С(А)ФУ, 2018. 318 с.
30. Григорьев И. В., Иванов В. А., Жукова А. И., Иванов А. В., Рудов М. Е., Свойкин Ф. В. Математическая модель влияния маневрирования трелюемой пачки древесины на почву лесосек // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 4 (12). С. 92—96.
31. Дмитриева М. Н. Моделирование взаимодействия колёсного движителя малогабаритных лесных машин со слабонесущим грунтом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: С(А)ФУ, 2018. 20 с.
32. Цытович Н. А. Механика грунтов. М.: Высш. шк., 1983. 288 с.
33. Калистратов А. В., Хахина А. М. О дальнейших исследованиях в области взаимодействия лесных машин с почвогрунтом // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 65-летию высшего лесного образования в Республике Карелия. Петрозаводск, 2016. С. 126—129.

34. Агейкин Я. С. Вездеходные колёсные и комбинированные движители. Теория и расчёт. М.: Машиностроение, 1972. 184 с.
35. Григорьев И. В., Былев А. Б., Хахина А. М., Никифорова А. И. Математическая модель уплотняющего воздействия динамики поворота лесозаготовительной машины на боковые полосы трелёвочного волокна // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2012. № 8-1 (129). С. 72—77.
36. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V., Ivanov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 2014. S. 407—414.
37. Григорьев И. В., Макуев В. А., Былев А. Б., Хахина А. М., Григорьева О. И., Калинин С. Ю. Оценка уплотнения почвогрунта при ударных воздействиях на расстоянии от места удара // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2014. Т. 18, № S2. С. 30—35.
38. Хитров Е. Г. Повышение эффективности трелёвки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова, 2015. 20 с.
39. Хитров Е. Г., Григорьев И. В., Хахина А. М. Повышение эффективности трелёвки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 146 с.
40. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Особенности контактного взаимодействия трелёвочной системы с мёрзлым почвогрунтом // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 1 (367). С. 106—119.
41. Григорьев И. В., Макуев В. А., Никифорова А. И., Хитров Е. Г., Устинов В. В., Калинин С. Ю. Исследование коэффициента сопротивления передвижению колёсных лесных машин // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2014. Т. 18, № S2. С. 36—41.
42. Григорьев И. В., Макуев В. А., Шапиро В. Я., Рудов С. Е., Никифорова А. И. Расчёт показателей процесса уплотнения почвогрунта при трелёвке пачки хлыстов // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2013. № 2. С. 112—118.
43. Дмитриева М. Н., Григорьев И. В., Рудов С. Е. Анализ исследований взаимодействия колёсного движителя лесных машин со слабонесущим почвогрунтом // Resources and Technology. 2019. Т. 1, № 16. С. 10—39.
44. Cuong D. M., Zhu S., Ngoc N. T. Study on the variation characteristics of vertical equivalent damping ratio of tire-soil system using semi-empirical model // Journal Terramech. 2014. Vol. 51. P. 67—80. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.10.002>.
45. Ding L., Gao H., Deng Z., Li Y., Liu G. New perspective on characterizing pressure-sinkage relationship of terrains for estimating interaction mechanic // Journal Terramech. 2014. T. 52. P. 57—76. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2014.03.001>.
46. Ding L., Yang H., Gao H., Li Y., Deng Z., Guo J. et al. Terramechanics-based modeling of sinkage and moment for in-situ steering wheels of mobile robots on deformable terrain // Mech. Mach. Theory. 2017. T. 116. P. 14—33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.05.011>.
47. Беккер М. Г. Введение в теорию систем «местность — машина»: пер. с англ. / под ред. В. В. Гуськова. М.: Машиностроение, 1973. 520 с.
48. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles. John Wiley & Sons, 2008.
49. Wong J. Y. Terramechanics and Off-road Vehicle Engineering: Terrain Behaviour, Off-road Vehicle Performance and Design. Oxford: Butterworth — Heinemann, 2009.

50. Ксеневиц И. П., Скотников В. А., Ляско М. И. *Ходовая система «почва — урожай»*. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
51. Русанов В. А. *Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути её решения*. М.: Изд-во ВИМ, 1998. 360 с.
52. Котиков В. М. *Теория и конструкция машин и оборудования отрасли (колёсные и гусеничные машины)*. М.: МГУЛ, 2007. Т. 1. 353 с.
53. Grigorev I., Ivanov V., Stepanishcheva M., Burmistrova O. *Validation of ecological efficiency assessment for forest management methodology // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 2014. P. 521—528.*
54. Агейкин Я. С., Вольская Н. С. *Проблемы представления характеристик грунтов в математических моделях движения колёсных машин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2005. № 1. С. 44—53.*
55. Агейкин Я. С. *Проходимость автомобиля*. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
56. Grigorev I., Burmistrova O., Stepanishcheva M., Gasparian G. *The way to reduce ecological impact on forest soils caused by wood skidding // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 2014. P. 501—508.*
57. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. *Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 18. 2018. P. 997—1003.*
58. Ivanov V. A., Grigorev I. V., Gasparyan G. D., Manukovsky A. Y., Zhuk A. Yu., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I. *Environment-friendly logging in the context of water logged soil and knob-and-ridge terrain // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. Т. 41, № 2. P. 22—27.*
59. Kochnev A., Khitrov E. *Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel Passover // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 18. 2018. P. 1005—1012.*
60. Manukovsky A. Y., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Gasparyan G. D., Lapshina M. L., Makarova Yu. A., Chetverikova I. V., Yakovlev K. A., Afonichev D. N., Kunitskaya O. A. *Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. Т. 41, № 2. P. 35—41.*
61. Лисов В. Ю. *Повышение работоспособности трасс трелёвки путём снижения интенсивности колеобразования: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: С(А)ФУ, 2014. 179 с.*
62. Шапиро В. Я., Григорьева О. И., Григорьев И. В., Григорьев М. Ф. *Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 1 (361). С. 61—69.*
63. Калистратов А. В. *Моделирование циклического уплотнения в задачах снижения негативного воздействия лесных машин на почвогрунт: автореф. ... дис. канд. техн. наук. Архангельск: САФУ, 2016. 20 с.*
64. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. *Вариационный метод расчёта параметров взаимодействия трелёвочной системы с массивом мёрзлых и оттаивающих почвогрунтов // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 1 (41). С. 68—77.*
65. Хахина А. М., Григорьев И. В. *Анализ зарубежных математических моделей взаимодействия движителей лесных машин с поверхностью движения // Актуальные*

- направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, №10 (36). С. 548—551.
66. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Лепилин Д. В., Жукова А. И. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелёвочного волока с учётом изменчивости трассы движения // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2010. № 6 (111). С. 61—64.
67. Котенев Е. В., Песков В. Б., Хитров Е. Г. Нормы выработки комплексов машин сортиментной заготовки древесины // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы Третьей международной научно-технической конференции. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. С. 187—189.
68. Grigorev I., Nikiforova A., Khitrov A., Ivanov V., Gasparian G. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 2014. P. 443—446.
69. Дмитриева М. Н., Григорьев И. В., Лухминский В. А., Казаков Д. П., Хахина А. М. Экспериментальные исследования конусного индекса и физико-механических свойств заболоченного грунта // Лесотехнический журнал. 2017. Т. 7, № 4 (28). С. 167—174.
70. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I., Kunitskaya O., Druzyanova V., Kokieva G., Filatov A., Sleptsova M., Bondarenko A., Radnaed D. Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019. Т. 10, № 1. P. 2052—2071.
71. Zhuk A. Yu., Nahina A. M., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Gasparyan G. D., Manukovsky A. Y., Kunitskaya O. A., Danilenko O. K., Grigoreva O. I. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Т. 13, № S8. P. 6419—6430.
72. Лепилин Д. В. Оценка влияния поворотов трелёвочного трактора на уплотнение почвогрунтов лесосеки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2011. 22 с.
73. Никифорова А. И., Хитров Е. Г., Пельмский А. А., Григорьева О. И. Определение осадки при движении лесозаготовительной машины по двуслойному основанию // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2014. № 2 (139). С. 87—91.
74. Рудов М. Е. Оценка влияния трелюемой пачки лесоматериалов на уплотнение лесного почвогрунта: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2015. 20 с.
75. Устинов В. В. Оценка тягово-цепных свойств колёсных движителей лесных машин методами теории движения автотранспорта по бездорожью: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Архангельск: САФУ, 2016. 20 с.
76. Grigorev M. F., Grigoreva A. I., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Stepanova D. I., Savvinova M. S., Sidorov M. N., Tomashevskaya E. P., Burtseva I. A., Zakharova O. I. Experimental findings in forest soil mechanics // EurAsian Journal of BioSciences. 2018. Т. 12, № 2. P. 277—287.
77. Хитров Е. Г., Песков В. Б., Казаков Д. П., Божбов В. Е., Степанищева М. В. Метод решения задачи о вдавлении штампа-двигателя в неоднородный массив грунта // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 116—120.
78. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Оценка несущей способности мёрзлого и оттаявшего грунта при неполной информации о состоянии его взаимодействия с трелёвочной системой // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 2 (42). С. 80—86.
79. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Математическое моделирование процесса уплотнения мёрзлого почвогрунта под

воздействием лесных машин и трелёвочных систем // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 3 (39). С. 73—78.

80. Рудов С. Е., Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Куницкая О. А., Григорьева О. И. Особенности взаимодействия трелёвочной системы с оттаивающим почвогрунтом // Лесной вестник. *Forestry Bulletin*. 2019. Т. 23, № 1. С. 52—61.
81. Зайчик М. И., Орлов С. Ф. Проектирование и расчёт специальных лесных машин. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 208 с.
82. Хитров Е. Г., Бартенев И. М. Влияние угла поперечного наклона поверхности качения на тягово-сцепные свойства колёсного движителя // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6, № 4 (24). С. 225—232.
83. Хитров Е. Г., Бартенев И. М. Расчёт глубины колеи колёсного движителя лесных тракторов на склонах // Лесотехнический журнал. 2016. Т. 6, № 4 (24). С. 233—239.
84. Григорьев И. В., Шапиро В. Я., Рудов М. Е., Никифорова А. И. Математическая модель уплотнения почвы комлями пачки хлыстов при их трелёвке // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2012. № 6 (127). С. 65—69.
85. Бленд Д. Теория линейной вязко-упругости. М.: Мир, 1965. 200 с.
86. Irani R. A., Bauer R. J., Warkentin A. A dynamic terramechanic model for small lightweight vehicles with rigid wheels and grousers operating in sandy soil // *Journal Terramech*. 2011. Т. 48. P. 307—318. URL: <https://doi.org/10.1016/jjterra.20n.05.001>.
87. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Stepanishcheva M. Dependence of filtration coefficient of forest soils to its density // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 2014*. P. 339—344.
88. Бобжов В. Е., Калистратов А. В., Степанищева М. В. Исследование модуля деформации лесной почвы в сосновых древостоях с учётом действия боковых корней // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 187—190.
89. Григорьев И. В., Никифорова А. И., Пельмский А. А., Хитров Е. Г., Хахина А. М. Экспериментальное определение времени релаксации напряжений лесного грунта // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2013. № 8 (137). С. 77—80.
90. Шапиро В. Я., Григорьев И. В., Жукова А. И., Иванов В. А. Исследование механических процессов циклического уплотнения почвогрунта при динамических нагрузках // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2008. № 1. С. 163—175.

References

1. Burmistrova O. N., Chemshikova Yu. M., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Tambi A. A. Theoretical substantiation of parameters of the medium-range engine of a tracked all-terrain vehicle // *Systems. Methods. Technologies*. 2019. No. 2 (42). Pp. 81—88. (In Russ.)
2. Dobretsov R. Yu., Grigorev I. V., Rudov S. E., Teterevleva E. V., Chemshikova Yu. M. Increased mobility of tracked and wheeled vehicles // *Repair. Recovery. Modernization*. 2019. No. 11. Pp. 4—10. (In Russ.)
3. Grigoriev I. V., Grigorieva O. I., Tsygarova M. V. Shift logging. Theory and practice // *LesPromInform*. 2016. No. 1. Pp. 60—65. (In Russ.)
4. Grigoriev I. V., Redkin A. K., Valyazhonkov V. D., Matrosov A. V. Technology and equipment of timber production. Technology and machines of logging operations. Training manual. St. Petersburg: LTA, 2010. 330 p. (In Russ.)
5. Grigoreva O. I. Perspective directions of increase of efficiency of carrying out felling of care of the wood // Increase of efficiency of a forest complex: Materials of the third all-Russian scientific and practical conference with the international participation. 2017. Pp. 56—58. (In Russ.)

6. *Burmistrova O. N., Teterevleva O. N.* Light all-terrain vehicles for forestry and logging // Materials of the International scientific and technical conference «Transport and transport-technological systems» / edited by N. S. Zakharov-Tyumen: Tyumen industrial University, 2019. Pp. 34—37. (In Russ.)
7. *Chemshikova Yu. M.* Tracked all-terrain vehicles for forestry // Materials of the Fifth all-Russian national scientific-practical conference with international participation «Improvement of efficiency of forest complex». Petrozavodsk: Petrozavodsk State University. 2019. Pp. 116—118. (In Russ.)
8. *Burmistrova O. N., Chemshikova Yu. M.* Preservation of soil cover from destruction under the influence of caterpillar engines // Materials of the International scientific and technical conference «Transport and transport-technological systems» / edited by N. S. Zakharov-Tyumen: Tyumen industrial University, 2019. Pp. 38—41. (In Russ.)
9. *Korpachev V. P., Peregrin V. P.* Ecology of logging and forest transport: Textbook. 2nd ed., Rev. and add. St. Petersburg: Publishing House «Fallow Deer», 2018. 308 p. (In Russ.)
10. *Chemshikova Y. M., Teterevleva O. N.* Comparative analysis of wheeled and tracked all-terrain vehicles for the forest industry // Materials of the Fifth all-Russian national scientific-practical conference with international participation «Improvement of efficiency of forest complex». Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2019. Pp. 118—119. (In Russ.)
11. *Anisimov G. M.* Main directions of scientific and technical progress of the logging industry // Izvestiya Saint-Petersburg forestry Academy. 2003. No. 169. Pp. 129—140. (In Russ.)
12. *Anisimov G. M.* Method of forecasting the technical level of cutting machines // Izvestiya SPb glta. 2005. No. 178. Pp. 4—10. (In Russ.)
13. *Bozhbov V. E.* Improving the efficiency of the skidding process by justifying the flight load of forwarders. The author's abstract Diss. ... Cand. Techn. sciences'. Arkhangelsk: NARFU, 2015. 20 p. (In Russ.)
14. *Grigorev I. V., Rudov S. E.* Features of operation of wheeled forest machines in complex soil-ground and relief conditions // In the collection: Forest Engineering materials of scientific and practical conference with international participation. 2018. Pp. 67—71. (In Russ.)
15. *Grigorev I. V., Churakov A. A.* Russian forest engineering-there are prospects! // Logging. Business and profession. 2017. No. 4 (9). Pp. 54—57. (In Russ.)
16. *Grigorev I. V., Churakov A. A., Grigoreva O. I.* Perspective design of all-terrain vehicle for forestry // in the collection: Transport and transport-technological systems materials of the international scientific and technical conference. 2017. Pp. 136—139. (In Russ.)
17. *Grigorev I. V., Churakov A. A., Grigoreva O. I.* Perspective design of tracked forwarder // In the collection: Transport and transport-technological systems materials of the international scientific and technical conference. 2017. Pp. 140—144. (In Russ.)
18. *Luhminskij V. A.* Improvement of models and methods for predicting the patency of the tracked forestry machines. Dis. ... Cand. Techn. sciences'. Arkhangelsk: (A)FU, 2018. 179 p. (In Russ.)
19. *Anisimov G. M., Bolshakov B. M.* New concepts of the theory of cutting machines. St. Petersburg: LTA, 1998. 114 p. (In Russ.)
20. *Ageikin Ya. S.* Passability of cars. Moscow: Mechanical engineering, 1981. 232 p. (In Russ.)
21. *Saarilahti M.* Development of a protocol for ecoefficient wood harvesting on sensitive sites (Ecowood). Soil interaction model. Helsinki: University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002. 39 p.
22. *Anisimov G. M., Bolshakov B. M.* Basics of minimization of soil compaction by skidding systems/ St. Petersburg: LTA, 1998 106 p. (In Russ.)
23. *Anisimov G. M., Grigorev I. V., Shkrum V. D.* Determination of the area of the soil of the cutting area compacted by skidding systems // Izvestiya Saint-Petersburg forestry Academy. 2006. No. 177. Pp. 36—42. (In Russ.)

24. *Peskov V. B.* Improvement of models for estimation of ruts and compaction of soils under the influence of movers of wheeled forest machines. The author's abstract Dis. ... Cand. Techn. sciences'. Arkhangelsk: S (A)FU, 2018. 20 p. (In Russ.)
25. *Grigorev I. V.* Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidding tractors by justifying their movement modes and technological equipment. St. Petersburg: St. Petersburg forestry Academy 2006. 235 p. (In Russ.)
26. *Bartenev I. M., Drapalyuk M. V.* Reduction of harmful effects of forest tractors and cutting machines on soil and plantings // Forest Engineering journal. 2012. No. 1 (5). Pp. 61—66. (In Russ.)
27. *Gerasimov Yu. Yu., Syunev V. S.* Ecological optimization of technological machines for logging. Joensuu: Joensuu University, 1998. 178 p. (In Russ.)
28. *Gerasimov Yu. Yu., Syunev V. S.* Cutting machines for logging: complex decision-making system. Petrozavodsk: Ed. PetrSU, 1998. 235 p. (In Russ.)
29. *Chahina A. M.* Methods to predict and improve cross-wheeled forest machines. Diss. doctor. Techn. sciences'. Arkhangelsk: WITH (A)FU, 2018. 318 p. (In Russ.)
30. *Grigoriev I. V., Ivanov V. A., Zhukova A. I., Ivanov A. V., Rudov M. E., Svoykin F. V.* Mathematical model of the effect of maneuvering a trellised pack of wood on the soil of logging sites // Systems. Methods. Technologies. 2011. No. 4 (12). Pp. 92—96. (In Russ.)
31. *Dmitrieva M. N.* Modeling of interaction of the wheel mover of small-sized forest machines with weakly-bearing soil. The author's abstract Dis. ... Cand. Techn. sciences'. Arkhangelsk: S (A)FU, 2018. 20 p. (In Russ.)
32. *Tsytovich N. A.* Mechanics of soils. Moscow: Higher school, 1983. 288 p. (In Russ.)
33. *Kalistratov A. V., Chahina A. M.* On further research in the field of interaction of forest machines with soil // In the collection: Improving the efficiency of the forest complex Materials of the Second all-Russian scientific and practical conference with international participation, dedicated to the 65th anniversary of higher forest education in the Republic of Karelia. 2016. Pp. 126—129. (In Russ.)
34. *Ageikin Ya. S.* Off-road wheeled and combined propulsion. Theory and calculation. Moscow: Mechanical engineering, 1972. 184 p. (In Russ.)
35. *Grigoriev I. V., Balev A. B., Chahine A. M., Nikiforov A. I.* Mathematical model of the condensing impact the dynamics of the rotation of the logging cars on side of strip skidding track // Scientific notes of Petrozavodsk state University. 2012. No. 8-1 (129). Pp. 72—77. (In Russ.)
36. *Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V., Ivanov V.* New approach for forest production stocktaking based on energy cost // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 2014. S. 407—414.
37. *Grigoriev I. V., Makuev V. A., Pulev A. B., Chahina A. M., Grigorieva O. I., Kalinin S. Yu.* Assessment of soil compaction under impact impacts at a distance from the impact site // Bulletin of the Moscow state University of forest-Forest Bulletin. 2014. Vol. 18. No. S2. Pp. 30—35. (In Russ.)
38. *Khitrov E. G.* Improving the efficiency of skidding by justifying the performance of forest machines in the operational control of soil properties. The author's abstract Dis. ... Cand. Techn. sciences'. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University. M. V. Lomonosov, 2015. 20 p. (In Russ.)
39. *Khitrov E. G., Grigoriev I. V., Chahina A. M.* Improving the efficiency of skidding by justifying the performance of forest machines in the operational control of soil properties. Scientific publication . St. Petersburg: SpbFTU, 2015. 146 p. (In Russ.)

40. Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigoriev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorieva O. I. Features of contact interaction of the skidding system with frozen soil // News of higher educational institutions. Forest magazine. 2019. No. 1 (367). Pp. 106—119. (In Russ.)
41. Grigoriev I. V., Makuev V. A., Nikiforova A. I., Khitrov E. G., Ustinov V. V., Kalinin S. Yu. Study of the coefficient of resistance to the movement of wheeled forest machines // Bulletin of the Moscow state University of forest-Forest Bulletin. 2014. Vol. 18. No. S2. Pp. 36—41. (In Russ.)
42. Grigorev I. V., Makuev V. A., Shapiro V. Ya., Rudov S. E., Nikiforova A. I. Calculation of indicators of soil compaction process when skidding a pack of whips // Bulletin of the Moscow state University of forest — Forest Bulletin. 2013. No. 2. Pp. 112—118. (In Russ.)
43. Dmitrieva M. N., Grigoriev I. V., Rudov S. E. Analysis of research on the interaction of the wheel drive of forest machines with low-weight soil // Resources and Technology. 2019. Vol. 1, No. 16. Pp. 10—39. (In Russ.)
44. Cuong D. M., Zhu S., Ngoc N. T. Study on the variation characteristics of vertical equivalent damping ratio of tire-soil system using semi-empirical model // Journal Terramech. 2014. Vol. 51. P. 67—80. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2013.10.002>.
45. Ding L., Gao H., Deng Z., Li Y., Liu G. New perspective on characterizing pressure-sinkage relationship of terrains for estimating interaction mechanic // Journal Terramech. 2014. T. 52. P. 57—76. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2014.03.001>.
46. Ding L., Yang H., Gao H., Li Y., Deng Z., Guo J. et al. Terramechanics-based modeling of sinkage and moment for in-situ steering wheels of mobile robots on deformable terrain // Mech. Mach. Theory. 2017. T. 116. Pp. 14—33. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2017.05.011>
47. Becker M. G. Introduction to the theory of systems and machines: TRANS / ed. Moscow: Mashinostroenie, 1973. 520 p. (In Russ.)
48. Wong J. Y. Theory of Ground Vehicles. John Wiley & Sons, 2008.
49. Wong J. Y. Terramechanics and Off-road Vehicle Engineering: Terrain Behaviour, Off-road Vehicle Performance and Design. Oxford: Butterworth — Heinemann, 2009.
50. Ksenevich I. P., Skotnikov V. A., Lyasko M. I. Running system soil-harvest. Moscow: Agropromizdat, 1985. 304 p. (In Russ.)
51. Rusanov V. A. Problems of soil compaction by movers and effective ways of its solution. Moscow: Vim publishing House. 1998. 360 p. (In Russ.)
52. Kotikov V. M. Theory and construction of machinery and equipment in the industry (wheeled and tracked vehicles). Moscow: MGUL, 2007. Vol. 1. 353 p. (In Russ.)
53. Grigorev I., Ivanov V., Stepanishcheva M., Burmistrova O. Validation of ecological efficiency assessment for forest management methodology // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 2014. P. 521—528.
54. Ageikin Ya. S., Volskaya N. S. Problems of representation of soil characteristics in mathematical models of movement of wheeled vehicles // Bulletin of the Moscow state technical University N. E. Bauman. Series: Mechanical Engineering. 2005. No. 1. Pp. 44—53. (In Russ.)
55. Ageikin Ya. S. Passability of the car. Moscow: Mechanical engineering, 1981. 232 p. (In Russ.)
56. Grigorev I., Burmistrova O., Stepanishcheva M., Gasparian G. The way to reduce ecological impact on forest soils caused by wood skidding // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 2014. P. 501—508.
57. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 18. 2018. P. 997—1003.

58. *Ivanov V. A., Grigorev I. V., Gasparyan G. D., Manukovsky A. Y., Zhuk A. Yu., Kunitskaya O. A., Grigoreva O. I.* Environment-friendly logging in the context of water logged soil and knob-and-ridge terrain // *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. 2018. T. 41, № 2. P. 22—27.
59. *Kochnev A., Khitrov E.* Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel Passover // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 18*. 2018. Pp. 1005—1012.
60. *Manukovsky A. Y., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Gasparyan G. D., Lapshina M. L., Makarova Yu. A., Chetverikova I. V., Yakovlev K. A., Afonichev D. N., Kunitskaya O. A.* Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical // *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*. 2018. T. 41, № 2. Pp. 35—41.
61. *Lisov V. Yu.* Improving the efficiency of skidding tracks by reducing the intensity of track formation: Diss. ... Cand. Techn. sciences'. Arkhangelsk: WITH (A)FU, 2014. 179 p. (In Russ.)
62. *Shapiro V. Ya., Grigorieva O. I., Grigoriev I. V., Grigoriev M. F.* Theoretical study of the process of destruction of the soil mass with spherical knives when using combined structures of soil meters to extinguish forest fires // *Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine*. 2018. No. 1 (361). Pp. 61—69. (In Russ.)
63. *Kalistratov A. V.* Modeling of cyclic compaction in problems of reducing the negative impact of forest machines on the soil soil. The author's abstract Dis. ... Cand. Techn. sciences'. Arkhangelsk: SAFU, 2016. 20 p. (In Russ.)
64. *Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigoriev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorieva O. I.* Variational method for calculating parameters of interaction of the skidding system with an array of frozen and thawing soils // *Systems. Methods. Technologies*. 2019. No. 1 (41). Pp. 68—77. (In Russ.)
65. *Chahina A. M., Grigoriev I. V.* Analysis of foreign mathematical models of interaction of forest machine movers with the surface of movement // *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2017. Vol. 5, No. 10 (36). Pp. 548—551. (In Russ.)
66. *Shapiro V. Ya., Grigoriev I. V., Lepilin D. V., Zhukova A. I.* Modeling of soil compaction in the side lanes of the skidding portage taking into account the variability of the route // *Scientific notes of the Petrozavodsk state University*. 2010. No. 6 (111). Pp. 61—64. (In Russ.)
67. *Kotenev E. V., Peskov V. B., Khitrov E. G.* Norms of development of complexes of machines of assortment preparation of wood // *Forests of Russia: politics, industry, science, education Materials of the third international scientific and technical conference*. St. Petersburg: SpbFTU, 2018. Pp. 187—189. (In Russ.)
68. *Grigorev I., Nikiforova A., Khitrov A., Ivanov V., Gasparian G.* Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 2014*. P. 443—446.
69. *Dmitrieva M. N., Grigoriev I. V., Lukhminsky V. A., Kazakov D. P., Chahina A. M.* Experimental studies of the cone index and physical and mechanical properties of swampy soil // *Forest Engineering journal*. 2017. Vol. 7, No. 4 (28). Pp. 167—174. (In Russ.)
70. *Rudov S., Shapiro V., Grigorev I., Kunitskaya O., Druzyanova V., Kokieva G., Filatov A., Sleptsova M., Bondarenko A., Radnaed D.* Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019. T. 10, № 1. Pp. 2052—2071.
71. *Zhuk A. Yu., Hahina A. M., Grigorev I. V., Ivanov V. A., Gasparyan G. D., Manukovsky A. Y., Kunitskaya O. A., Danilenko O. K., Grigoreva O. I.* Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. T. 13, № S8. P. 6419—6430.

72. *Lepilin D. V.* Assessment of the influence of skidding tractor turns on the compaction of soils in the cutting area. The author's abstract Dis. ... Cand. Techn. sciences'. Petrozavodsk: PetrSU, 2011. 22 p. (In Russ.)
73. *Nikiforova A. I., Khitrov E. G., Pelymsky A. A., Grigorieva O. I.* Determination of precipitation when moving a logging machine on a two-layer base // Scientific notes of Petrozavodsk state University. 2014. No. 2 (139). Pp. 87—91. (In Russ.)
74. *Rudov M. E.* Assessment of the influence of the trellis pack of timber on the compaction of forest soil. The author's abstract Dis. ... Cand. Techn. sciences'. Petrozavodsk: PetrSU, 2015. 20 p. (In Russ.)
75. *Ustinov V. V.* Evaluation of traction and coupling properties of wheel movers of forest vehicles by methods of the theory of off-road traffic. The author's abstract Dis. ... Cand. Techn. sciences'. Arkhangelsk: SAFU, 2016. 20 p. (In Russ.)
76. *Grigorev M. F., Grigoreva A. I., Grigorev I. V., Kunitskaya O. A., Stepanova D. I., Savvinova M. S., Sidorov M. N., Tomashevskaya E. P., Burtseva I. A., Zakharova O. I.* Experimental findings in forest soil mechanics // EurAsian Journal of BioSciences. 2018. T. 12, № 2. Pp. 277—287.
77. *Khitrov E. G., Peskov V. B., Kazakov D. P., Bozhbov V. E., Stepanishcheva M. V.* Method for solving the problem of pressing a stamp-mover into a non-uniform array of soil // Systems. Methods. Technologies. 2018. No. 2 (38). Pp. 116—120. (In Russ.)
78. *Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigoriev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorieva O. I.* Assessment of the bearing capacity of frozen and thawed soil with incomplete information about the state of its interaction with the skidding system // Systems. Methods. Technologies. 2019. No. 2 (42). Pp. 80—86. (In Russ.)
79. *Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigoriev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorieva O. I.* Mathematical modeling of the process of compaction of frozen soil under the influence of forest machines and skidding systems // Systems. Methods. Technologies. 2018. No. 3 (39). Pp. 73—78. (In Russ.)
80. *Rudov S. E., Shapiro V. Ya., Grigoriev I. V., Kunitskaya O. A., Grigorieva O. I.* Features of interaction of the skidding system with thawing soil // Forest Bulletin. Forest Bulletin. 2019. Vol. 23, No. 1. Pp. 52—61. (In Russ.)
81. *Zaychik M. I., Orlov S. F.* Design and calculation of special forest machines Moscow: Lesn. prom-st, 1976. 208 p. (In Russ.)
82. *Khitrov E. G., Bartenev I. M.* Influence of the angle of the transverse slope of the rolling surface on the traction properties of the wheel mover // Forest Engineering journal. 2016. Vol. 6, No. 4 (24). Pp. 225—232. (In Russ.)
83. *Khitrov E. G., Bartenev I. M.* Calculation of the depth of the track of the wheel mover of forest tractors on the slopes // Forest Engineering journal. 2016. Vol. 6, No. 4 (24). Pp. 233—239. (In Russ.)
84. *Grigoriev I. V., Shapiro V. Ya., Rudov M. E., Nikiforova A. I.* Mathematical model of soil compaction by clods of a pack of whips at their skidding // Scientific notes of Petrozavodsk state University. 2012. No. 6 (127). Pp. 65—69. (In Russ.)
85. *Blend D.* Theory of linear visco-elasticity. Moscow: Mir, 1965. 200 p. (In Russ.)
86. *Irani R. A., Bauer R. J., Warkentin A.* A dynamic terramechanic model for small lightweight vehicles with rigid wheels and grousers operating in sandy soil // Journal Terramech. 2011. T. 48. P. 307—318. URL: <https://doi.org/10.1016/jjterra.20n.05.001>.
87. *Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Stepanishcheva M.* Dependence of filtration coefficient of forest soils to its density // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management. SGEM 2014. Pp. 339—344.

88. *Bobzhov V. E., Kalistratov A. V., Stepanishcheva M.* Study of the modulus of deformation of forest soil in pine stands taking into account the action of lateral roots // *Systems. Methods. Technologies.* 2014. No. 2 (22). Pp. 187—190. (In Russ.)
89. *Grigoriev I. V., Nikiforova A. I., Pelymsky A. A., Khitrov E. G., Chahina A. M.* Experimental determination of the relaxation time of forest soil stresses // *Scientific notes of Petrozavodsk state University.* 2013. No. 8 (137). Pp. 77—80. (In Russ.)
90. *Shapiro V. Ya., Grigoriev I. V., Zhukova A. I., Ivanov V. A.* Research of mechanical processes of cyclic compaction of soil under dynamic loads // *Bulletin of the Krasnoyarsk state agrarian University.* 2008. No. 1. Pp. 163—175. (In Russ.)

© Бурмистрова О. Н., Чемшикова Ю. М., Григорьев И. В., Рудов С. Е., Куницкая О. А., 2020