

На правах рукописи

КОВАЛЕВА НАТАЛЬЯ ВЛАДИМИРОВНА

**ОБОСНОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ
ЛЕСНЫХ ДОРОГ**

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок
и лесного хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Петрозаводск – 2016

Работа выполнена на кафедре транспортных и технологических машин и оборудования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петрозаводский государственный университет»

- Научный руководитель **Сюнёв Владимир Сергеевич**,
доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты **Сушков Сергей Иванович**,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»
- Салминен Эро Ойвович**,
кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного транспорта ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»
- Ведущая организация ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»

Защита диссертации состоится 23 июня 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.190.03 в Петрозаводском государственном университете по адресу: 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Петрозаводского государственного университета и на сайте <http://www.petrstu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Р. В. Воронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Общая лесопокрытая площадь Российской Федерации составляет около 1180 млн. га, что, в свою очередь, занимает почти 70% всей территории страны. При достаточно обширных эксплуатационных запасах лесов на сегодняшний день осваивается менее 50% расчетной лесосеки. Одной из основных причин освоения лесных ресурсов на низком уровне является неразвитая дорожно-транспортная инфраструктура, а также большая удаленность существующих лесных дорог от предприятий лесозаготовительной отрасли.

Формирование густой сети лесных дорог, отвечающих требуемым транспортно-эксплуатационным характеристикам, является благоприятной предпосылкой для высоких показателей оценки эффективности строительства, проведения лесохозяйственных мероприятий, а также для поддержания конкурентоспособности в условиях насыщенного рынка.

Общая протяженность автомобильных дорог в лесном фонде РФ составляет 1617,7 тыс. км, из них 514 тыс. км приходится на лесные дороги временного действия, в частности, на лесовозные ветки и усы. Ветки, назначение которых заключается в сборе лесотранспортных потоков с усов для дальнейшей доставки лесоматериалов к магистралям, являются важнейшим звеном дорожно-транспортной сети при освоении лесосырьевой базы. В то же время характер функционирования веток предполагает ограниченность во времени эксплуатации. Таким образом, конструкция веток должна отвечать определенным прочностным характеристикам, в частности обладать требуемой (но не избыточной) несущей способностью, достаточной для обеспечения бесперебойной вывозки запланированного к заготовке объема леса с наименьшими затратами на проектирование, строительство, содержание и ремонт дороги.

Несмотря на то, что в настоящее время имеется ряд научных, в том числе зарубежных, обоснований и практических рекомендаций в области технологических решений по строительству лесных дорог с учетом ресурсосбережения (трудовые ресурсы, технологии производства работ, дорожно-строительные машины и материалы), конкретные методические указания по проектированию и строительству таких дорог, позволяющие заранее обеспечить заданную несущую способность дорожного полотна, к настоящему времени недостаточно проработаны. Очевидно, что решение задачи по обоснованию показателей несущей способности лесовозных дорог и разработка методики их

проектирования и строительства на основе обеспечения заданной величины этих показателей является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Анализ публикаций по теме диссертации, в том числе Интернет-ресурсов, показал, что в настоящее время выполнен значительный объем исследований в области обоснования и проектирования сетей лесовозных автомобильных дорог, включая магистрали, ветки и усы. При этом вопросы проектирования и строительства магистралей и усов рассмотрены достаточно полно. Превалирующее большинство проанализированных исследований по вопросам проектирования и строительства веток связаны с применением комплексов дорожно-строительной техники на стадии разработки и перемещения грунта, доставляемого из существующих карьеров. В сложившихся условиях хозяйствования, а также развития арендных отношений наиболее остро встает проблема возведения веток из местных материалов при минимальных затратах. Данная проблематика требует решения вопросов, связанных с проектированием и строительством подобных дорог с обеспечением требуемых технико-экономических показателей и срока службы.

Цель работы. Целью работы является обоснование ресурсосберегающей методики проектирования и строительства лесных дорог на основе обеспечения требуемых значений модуля деформации дорожного полотна.

Объекты исследований: лесные дороги (лесовозные ветки), технологические процессы при их возведении и эксплуатации.

Методы исследований. При выполнении работы были использованы методы моделирования процессов функционирования машин, методики моделирования уплотняемого почво-грунта с упрочнением, лабораторные методы определения физико-механических характеристик лесных почво-грунтов по ГОСТ 30416-2012, ГОСТ 12071-2000, ГОСТ 5180-84, ГОСТ 25100-2011, пенетрационный экспресс-метод определения упругих характеристик лесных почво-грунтов, методы статистической обработки результатов испытаний.

Задачи исследований.

1. Провести анализ существующих технологических решений при строительстве лесных дорог, используемой техники и материалов. Определить наиболее перспективный подход к разработке ресурсосберегающего способа строительства лесных дорог.
2. Обосновать номенклатуру показателей несущей способности лесных дорог и их требуемых значений.

3. Разработать методику расчета выбранных показателей несущей способности дорожной конструкции, позволяющую определить требуемые свойства дороги на стадии проектирования.
4. Провести проектирование и строительство экспериментального участка лесной дороги на основе разработанной методики расчета показателей несущей способности почво-грунта.
5. Провести экспериментальные исследования по определению реальных значений показателя несущей способности на участках дороги.
6. Оценить адекватность предложенной методики расчета путем сравнения теоретических (расчетных) и экспериментальных значений.
7. С использованием полученных результатов обосновать практические рекомендации по обеспечению требуемых показателей несущей способности на всем протяжении проектируемой лесной дороги.
8. Сформулировать рекомендации по содержанию и ремонту лесных дорог.

Научная новизна. Экспериментально обосновано применение термина «лесной почво-грунт» как материала при возведении дорожного полотна лесовозных веток. Предложен и обоснован модуль деформации как показатель несущей способности, позволяющий учитывать пошаговое изменение его величины при воздействии дорожно-строительной машины. Предложена методика проектирования и расчета дорожного полотна лесовозных веток на основе обеспечения требуемого модуля деформации. Даны новые практические рекомендации по проектированию и строительству лесовозных веток методом «из канав».

Значимость для теории и практики. Разработана методика проектирования лесных дорог (веток), основанная на определении и оценке модуля деформации почво-грунта на поверхности и в теле дорожного полотна. Предложена модель уплотнения исходного материала дорожного полотна под различными видами нагрузок, вызываемых дорожно-строительной машиной, с последующей естественной консолидацией. Предложен комплекс технологических решений проектирования и строительства лесных дорог способом «из канав», отличающийся расширенным использованием местных почво-грунтов, а также уменьшением требуемых строительных машин и механизмов до одного экскаватора за счет его применения не только для разработки почво-грунта, но и для уплотнения земляного полотна лесных дорог. Возводимое дорожное полотно по данной технологии обладает требуемой несущей способностью, является достаточным для транспортировки необходимых объемов древесины и способствует достижению положительного экономического эффекта.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования характеристик деформируемости лесных дорог.
2. Модель уплотнения почво-грунта в системе «уплотняющее устройство – уплотняемый материал».
3. Комплекс технологических решений проектирования и строительства лесных дорог, технико-экономическая эффективность которого обеспечена использованием местных почво-грунтов, а также использованием экскаватора не только для разработки почво-грунта, но и для его уплотнения в теле земляного полотна.
4. Результаты экспериментальных исследований характеристик деформируемости почво-грунтов земляного полотна опытной лесной дороги.
5. Рекомендации по обеспечению достаточного модуля деформации почво-грунта земляного полотна лесных дорог.

Степень достоверности, апробация и реализация результатов работы. Адекватность теоретических положений, базирующихся на анализе и обобщении известных и новых, полученных в диссертации данных, подтверждена лабораторными экспериментами и полевыми испытаниями почво-грунтов. Предложенные технологические решения и методика проектирования, расчета и строительства лесных дорог реализованы на экспериментальном участке лесной дороги, расположенном на территории Инновационно-технологического кампуса Петрозаводского государственного университета. Достоверность результатов исследований подтверждается данными, полученными в процессе строительства опытной лесной дороги, проведения на ней экспериментальных исследований, а также положительным опытом внедрения разработанных рекомендаций и методики в производство.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 64-й научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (Петрозаводск, 2012); международной научно-технической конференции «Первый Европейский лесопромышленный форум молодёжи» (Воронеж, 2014); международной научной конференции «Современное состояние, тенденции развития, рациональное использование и сохранение биологического разнообразия растительного мира» (Минск – Нарочь, 2014); международном форуме «Классический университет в пространстве трансграничности на Севере Европы: стратегия инновационного развития» (Петрозаводск, 2014); международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития

лесного комплекса» (Вологда, 2014); XV международной интернет-конференции «Лесной комплекс: состояние и перспективы развития» (Брянск, 2015); международной научно-практической конференции «Молодежный форум: технические и математические науки» (Воронеж, 2015).

Результаты исследований используются в практической деятельности ООО «Петрозаводское ДРСУ», а также внедрены в учебный процесс Петрозаводского государственного университета.

Работа выполнена в рамках реализации научных мероприятий Программы стратегического развития ПетрГУ на 2012-2016 гг.

Структура и объем работы. Работа содержит введение, пять глав, заключение. Общий объем работы 199 страниц, включая 60 рисунков, 44 таблицы, библиографию – 160 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость результатов, сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ современного состояния транспортной инфраструктуры лесопромышленного комплекса, а также обзор существующих технологических решений при проектировании и строительстве лесных дорог.

Исследованиями в области развития и совершенствования лесотранспортной сети занимались отечественные и зарубежные ученые: В.И. Алябьев, Д.М. Афоничев, О.Н. Бурмистрова, Ю.Ю. Герасимов, Б.А. Ильин, А.А. Камусин, В.К. Катаров, А.Н. Кочанов, И.Н. Кручинин, В.М. Лукашевич, Л.С. Матвеев, М.Т. Насковец, Ф.А. Павлов, Э.О. Салминен, В.И. Скрышник, А.В. Скрышников, А.П. Соколов, С.И. Сушков, В.С. Сютёв, И.Р. Шегельман, Л.В. Щеголева, Т. Karjalainen, S. Karvinen, E. Väliky, R. Naarla, P. Mönkkönen, T. Nurminen и другие.

При арендно-рыночных отношениях между лесопользователями и лесовладельцами главным показателем оценки эффективности строительства лесных дорог является ресурсосбережение, направленное на экономию денежных средств, дорожно-строительных материалов, техники и трудовых ресурсов. В рамках диссертационной работы выявлено, что одним из наиболее экономичных способов строительства лесных дорог является возведение земляного полотна способом «из канав». Установлено, что в качестве основного показателя несущей способности лесных дорог целесообразно использовать модуль

деформации, характеризующий упругие и остаточные деформации материала дорожной конструкции.

При реализации данного способа строительные работы осуществляются с использованием одной машины – одноковшового экскаватора. Процессы уплотнения рассматриваются в системе «уплотняющее устройство – уплотняемый материал» и представляют собой совокупность следующих составляющих: воздействие тыльной стороной ковша экскаватора на каждый отсыпaeмый слой (трамбование); колебания экскаватора и соответствующие динамические воздействия на почво-грунт в переходных режимах его работы (виброуплотнение); проход экскаватора по следу (укатка); фильтрационная консолидация.

Во второй главе разработана модель уплотнения слоя почво-грунта в системе «уплотняющее устройство – уплотняемый материал», а также методика определения зависимости, связывающей степень уплотнения почво-грунта с изменением его пористости и деформаций.

Анализ элементного состава грунта, отобранного с лесных участков, определенных под строительство опытной лесной дороги, показал наличие органических веществ в структуре материала, что подтверждает целесообразность применения термина «лесной почво-грунт». При исследовании образцов был применен электронный сканирующий микроскоп SU-1510, что позволило установить физический смысл происходящих процессов уплотнения: уплотнение слоя рыхлого почво-грунта достигается за счет уменьшения его пористости, более плотной упаковки частиц и появления остаточных (необратимых) деформаций.

По мере уплотнения почво-грунта определенной влажности возрастает его модуль деформации, уменьшается его пористость и, как следствие, повышается прочность и уменьшаются деформации почво-грунта дорожного полотна.

Разработана модель уплотнения слоя почво-грунта. Чтобы учесть влияние уплотнения почво-грунта на величину модуля деформации, предложен шаговый метод расчета, отличающийся тем, что на каждом шаге корректируется модуль деформации, а именно, с увеличением сжимающей нагрузки модуль возрастает до определенной величины, а при уменьшении нагрузки модуль деформации не изменяется. Появляющиеся при этом остаточные деформации определяют степень уплотнения почво-грунта. Если достигается требуемая степень уплотнения, то изменения модуля деформации прекращаются.

В разработанной математической модели уплотняемого почво-грунта корректировка модуля деформации выполняется соответствующим изменением коэффициента жесткости упругого элемента в модели Фойгта.

Выполнено моделирование влияния пористости на толщину слоя почво-грунта при его уплотнении с помощью компарментального подхода. Получены расчетные формулы:

$$\Delta h = \xi h_0 C_{b0} \left(1 - \frac{1}{\exp \theta}\right), \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0} = \xi C_{b0} \left(1 - \frac{1}{\exp \theta}\right), \quad (2)$$

$$\theta = \frac{p}{\tau}, \quad (3)$$

где Δh – изменение толщины уплотняемого слоя почво-грунта (м);

h_0 – начальная толщина уплотняемого слоя почво-грунта (м);

C_{b0} – пористость почво-грунта до начала уплотнения;

ε – относительное изменение толщины уплотняемого слоя почво-грунта;

θ – безразмерная переменная;

p – давление на почво-грунт (МПа);

τ – параметр модели, зависящий от конструктивно-технологических характеристик уплотняющего устройства и физико-механических свойств уплотняемого почво-грунта (МПа);

ξ – безразмерный эмпирический коэффициент, $0 < \xi < 1$.

Параметры τ и ξ рекомендуется определять по следующей методике:

1. Определить пористость грунта C_{b0} .

2. Создать постоянное давление p на образец или на участок слоя почво-грунта толщиной h_0 и экспериментально определить осадку Δh по истечении достаточно большого времени, когда изменениями напряжений и деформаций вследствие реологических свойств почво-грунта можно пренебречь. Тогда в формуле (1) можно принять $\theta = \infty$, $\frac{1}{\exp \theta} = 0$. Получим $\Delta h = \xi h_0 C_{b0}$, откуда найдем $\xi = \frac{\Delta h}{h_0 C_{b0}}$. При расчетной нагрузке указанными изменениями пренебрегают, если данная нагрузка вызывает изменение относительной деформации не более 1 %.

3. Уменьшить давление p на грунт, например, в два раза и определить осадку Δh (что можно выполнить на втором шаге методики). Затем, используя найденное на втором шаге значение ξ и формулу (1), методом подбора определить такое значение θ , при котором осадка будет равна измеренному значению. В итоге найдем $\tau = \frac{p}{\theta}$.

На рисунке 1 приведена модель одной из технологических ситуаций уплотнения слоя почво-грунта в системе «уплотняющее устройство – уплотняемый материал». Можно показать, что в других случаях давление на почво-грунт будет меньше.

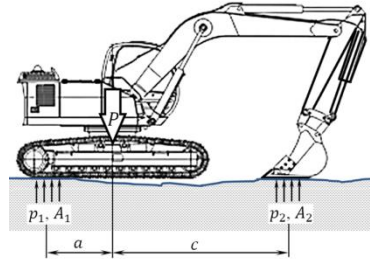


Рисунок 1 – Уплотняющее давление ковша и гусениц экскаватора на уплотняемый почво-грунт

$$p_1 = \frac{P \cdot c}{A_1(a+c)}, \quad p_2 = \frac{P \cdot a}{A_2(a+c)}, \quad (4)$$

где p_1 и A_1 – давление на почво-грунт (МПа) и площадь контакта гусениц (м); p_2 и A_2 – давление на почво-грунт (МПа) и площадь контакта тыльной части ковша (м); P – вес экскаватора, распределяемый на площадки A_1 и A_2 (кг); a и c – расстояния от центра тяжести экскаватора до центров тяжести площадок A_1 и A_2 соответственно (м).

Получено, что при максимальном давлении на почво-грунт гусеницами экскаватора $P = 0,12$ МПа накопленная осадка материала составит 0,110-0,114 м после семи нажатий гусениц на уплотняемый почво-грунт; при давлении на почво-грунт тыльной стороной ковша экскаватора $P = 0,06$ МПа накопленная осадка материала составит 0,049-0,109 м после 4-9 нажатий тыльной стороной ковша экскаватора на уплотняемый почво-грунт.

Установлена взаимосвязь модуля деформации почво-грунта E (МПа), его модуля упругости E_y (МПа) и осадки уплотняемого слоя земляного полотна лесной дороги Δh (м), выраженная зависимостью:

$$E = \frac{ph}{(1,1 \dots 1,2)\Delta h}. \quad (5)$$

Разработана методика определения модуля деформации почво-грунта земляного полотна лесных дорог и оценки полученных результатов:

1. Определение наибольшего изменения толщины уплотняемого слоя почво-грунта $\Delta h_{\text{теор}}$ (м) по формуле (1).

2. Определение границ интервала изменения модуля деформации E (МПа) с использованием эмпирической зависимости, связывающей модуль деформации и модуль упругости E_y (МПа): $E_y = (5 \dots 10)E$.

3. Определение величины модуля деформации $E_{\text{теор}}$ (МПа) на границах заданного интервала.

4. Сравнение величины модуля деформации $E_{\text{теор}}$ (МПа) с экспериментальным значением $E_{\text{экс}}$ (МПа), полученным методом статической пенетрации и (или) при испытаниях в одометре.

5. Определение $\Delta h_{\text{расч}}$ (м) на границах заданного интервала.

6. Сравнение $\Delta h_{\text{теор}}$ (м) и $\Delta h_{\text{расч}}$ (м); оценка результата.

Определена степень уплотнения почво-грунта в процессе фильтрационной консолидации. Установлено, что конструкции из песчаных и супесчаных почво-грунтов могут быть введены в эксплуатацию через один год от начала консолидации, а суглинистые и глинистые конструкции – через один месяц от начала консолидации.

Результирующая осадка может быть получена как сумма осадок, вызванных воздействием экскаватора и фильтрационной консолидации.

В третьей главе приведены основные этапы проектирования и строительства опытной лесной дороги.

Оценка несущей способности проектируемой лесной дороги по методикам, регламентируемым ОДН 218.046-01 и ОДМ 218.5-002-2008, показала, что дорожное полотно, возведенное по обоснованной методике, обладает достаточной несущей способностью.

В качестве расчетной была принята типовая дорожная одежда: 1 слой – покрытие дорожной одежды – C_2 , $E_{\text{П}} = 290$ (МПа), $h_{\text{п}} = 0,10$ (м); 2 слой – основание дорожной одежды – C_7 , $E_{\text{О}} = 260$ (МПа), $h_{\text{о}} = 0,15$ (м); подстилающий слой – песок $E_{\text{песка}} = 75$ (МПа), супесь $E_{\text{супеси}} = 65$ (МПа), суглинок $E_{\text{суглинок}} = 43$ (МПа).

Расчет произведен для типов подстилающих грунтов (песка, супеси и суглинка), которые были выявлены при испытаниях почво-грунтовых образцов, отобранных при шурфовании опытного участка. В таблице 1 приведены сводные расчеты фактических модулей упругости дорожной одежды $E_{\text{ф}}$ (МПа) без укрепления, с армированием георешетками и геотекстилем.

Таблица 1
Сводные расчеты фактических модулей упругости дорожной одежды $E_{\text{ф}}$ (МПа)

Вид укрепления	Значение фактического модуля упругости $E_{\text{ф}}$ (МПа) в зависимости от типа подстилающего почво-грунта		
	песок	супесь	суглинок
1	2	3	4
без укрепления	142,62	132,16	105,20

Окончание таблицы 1

1	2	3	4
армирование георешетками	158,47	167,26	166,65
армирование геотекстилем	143,00	132,16	105,70

Расчет показал, что фактический модуль упругости дорожной одежды на песчаном и супесчаном основаниях значительно выше требуемой величины $E_{ТР} = 92,08$ (МПа), что говорит о нецелесообразности отсыпки слоев дорожной одежды принятой высоты.

В этом случае может быть рекомендована дорожная одежда слоями: покрытие $h_{п} = 0,10$ (м); основание $h_{о} = 0,15$ (м). Тогда фактический модуль упругости составит: $E_{ф} = 115,08$ (МПа) – случай устройства дорожной одежды на песчаном основании; $E_{ф} = 104,05$ (МПа) – случай устройства дорожной одежды на супесчаном основании.

Полученные значения превышают требуемую величину $E_{ТР}$ (МПа), что также удовлетворяет условию.

Использование в конструкции дорожной одежды слоев из георешеток способствует увеличению модуля деформации (упругости): при возведении земляного полотна из песка – на 11 %; при возведении земляного полотна из супеси – на 26 %; при возведении земляного полотна из суглинка – на 58 %.

Трасса опытной лесной дороги, план которой представлен на рисунке 1, проложена по наиболее приближенному направлению к существующим на местности трассам.

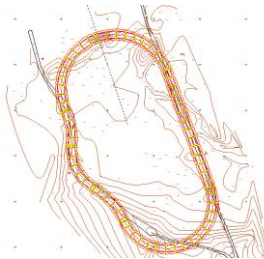


Рисунок 1 – План трассы опытной лесной дороги

На этапе проектирования проведено исследование характеристик исходных почво-грунтов, в качестве которых были приняты естественные почво-грунты, залегающие по направлению оси трассы

будущей лесной дороги в пределах прорубленной полосы отвода. С этой целью из шурфов были отобраны почво-грунтовые образцы ненарушенной структуры естественной влажности. Дислокация точек заложения разведочных шурфов, представленная на рисунке 2, определена по результатам визуальных обследований местности с учетом характера рельефа и типами по увлажнению.

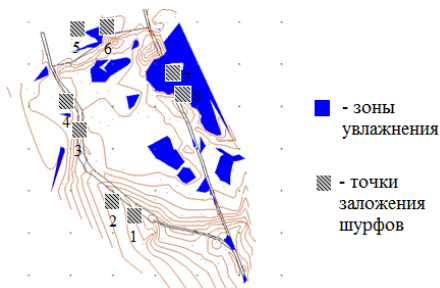


Рисунок 2 – Дислокация точек заложения шурфов

По результатам испытаний образцов, отобранных при шурфовании, выявили: на участках 1 и 2 залегает песок, тип местности по увлажнению – 1; на участках 3 и 4 – супесь, тип местности по увлажнению – 2; участки 5-8 – суглинок, тип местности по увлажнению – 3.

Строительство земляного полотна опытной дороги осуществлялось в летний период. Часть подготовительных и все строительные работы, включая планировку и уплотнение, выполнено экскаватором NEW HOLLAND E135BSR с использованием двух типов ковшей: ковш с зубьями и профилировочный ковш с режущей кромкой. На рисунке 3 представлены этапы строительства опытной лесной дороги.



Рисунок 3 – Возведение земляного полотна способом «из канав» с профилировкой верха земляного полотна и боковых откосов

Сравнительный анализ сметно-финансовых расчетов строительства 1 км лесной дороги способом «из канав» и дороги, возведенной из привозного грунта, той же протяженности показал, что применение первого варианта способствует достижению положительного экономического эффекта до 7,7 % от общей стоимости строительства.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям характеристик деформируемости почво-грунтов опытной лесной дороги. Исследования проводились в летний и осенний (межсезонный) периоды.

Образцы почво-грунтов для испытаний были изготовлены с учетом требований ГОСТ 30416-2012, а их отбор, упаковка, транспортирование, хранение и подготовка – в соответствии с требованиями ГОСТ 12071-2000.

Согласно результатам пробного эксперимента по определению плотности скелета почво-грунта, а также учитывая СП 11-105-97 выявили, что для получения достоверного результата следует брать не менее шести образцов с каждой мерной точки. Мерные точки располагались на четырех характерных участках опытной дороги с шагом 0,5 м в следе от движителя автомобиля-лесовоза.

Физические характеристики почво-грунтов определялись по методике, приведенной в ГОСТ 5180-84. Результаты исследований приведены в таблице 2: в числителе – данные для почво-грунтов, отобранных в летний период; в знаменателе – в межсезонный период. Выявили, что влажность почво-грунта соответствует оптимальной влажности.

Таблица 2

Физические характеристики почво-грунтов опытных участков лесной дороги

Физическая характеристика	Значение			
	I участок	II участок	III участок	IV участок
1	2	3	4	5
Плотность ρ (г/см ³)	<u>1,84</u>	<u>1,72</u>	<u>1,88</u>	<u>1,96</u>
	1,95	1,80	2,00	2,10
Влажность W (%)	<u>12,00</u>	<u>13,93</u>	<u>20,75</u>	<u>20,52</u>
	13,41	14,07	23,37	24,27
Число пластичности I_p (%)	-	<u>4,19</u>	<u>7,82</u>	<u>7,80</u>
		4,19	7,82	7,80

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5
Показатель текучести I_L (д.е.)	-	$\frac{-0,29}{-0,05}$	$\frac{-0,01}{0,32}$	$\frac{-0,04}{0,44}$
Плотность скелета ρ_d (г/см ³)	$\frac{1,64}{1,71}$	$\frac{1,50}{1,57}$	$\frac{1,55}{1,62}$	$\frac{1,62}{1,66}$
Коэффициент пористости e (д.е.)	$\frac{0,10}{0,12}$	$\frac{0,12}{0,12}$	$\frac{0,17}{0,19}$	$\frac{0,20}{0,20}$
Пористость n (д.е.)	$\frac{0,12}{0,14}$	$\frac{0,14}{0,14}$	$\frac{0,21}{0,23}$	$\frac{0,17}{0,17}$
Тип и состояние почво-грунта	песок	супесь твердая	суглинок твердый суглинок тугопластичный	

Испытания почво-грунтов для определения характеристик деформируемости проводились методом компрессионного сжатия по ГОСТ 12248-2010 в приборе – одометре, а также пенетрационным методом статического зондирования прибором – пенетрометром.

Испытания в одометре проводились при нагружении образца ступенями по 0,05 (МПа) на первых двух ступенях и 0,1 (МПа) на третьей ступени с выдержкой по 5 (мин.) с последующей статистической обработкой данных. По результатам испытаний строилась компрессионная зависимость, определялись коэффициент сжимаемости, коэффициент относительной сжимаемости и модуль деформации. В таблице 3 приведены характеристики почво-грунтов, определяемые с помощью одометра, на каждом опытном участке.

Талица 3

Результаты испытаний почво-грунта в одометре

Параметр	Значение			
	I участок	II участок	III участок	IV участок
Коэффициент сжимаемости m_0 (МПа ⁻¹)	0,093	0,060	0,086	0,100
Коэффициент относительной сжимаемости m_v (МПа ⁻¹)	0,083	0,053	0,077	0,089
Модуль деформации E (МПа)	9,63	13,06	5,45	4,71

Для повышения достоверности полученных результатов были проведены также испытания с помощью пенетрометра грунтового марки ПСГ-МГ4. Использовались рабочие наконечники диаметрами 0,8, 11,3 и 22,0 (мм). Было произведено 6 циклов измерений для каждого опытного участка лесной дороги. Один цикл состоял из 3-5 замеров согласно руководству по эксплуатации используемого пенетрометра. По итогам пенетрации определялись удельное сопротивление пенетрации, коэффициент уплотнения, индекс влажности, модуль упругости, угол внутреннего трения и удельное сцепления почво-грунта. Результаты испытаний с использованием пенетрометра приведены в таблице 4. На рисунке 4 представлен общий вид показаний пенетрометра грунтового.

Талица 4

Результаты испытаний почво-грунта пенетрометром грунтовым марки ПСГ-МГ4

Параметр	Значение			
	I участок	II участок	III участок	IV участок
Удельное сопротивление пенетрации P (МПа)	3,12	8,18	3,12	7,10
Коэффициент уплотнения K	1,09	1,10	1,03	1,03
Индекс влажности I	0,95	0,95	0,95	0,95
Модуль упругости E (МПа)	105,00	119,00	63,20	55,40
Угол внутреннего трения f (градусы)	35,70	39,20	22,50	20,05
Удельное сцепление почво-грунта C (МПа)	0,0513	0,0576	0,0278	0,0253
Диаметр основания наконечника (мм)	0,80	11,30	11,30	22,00

Учитывая взаимосвязь модуля упругости и модуля деформации посредством эмпирической зависимости $E_y = (5 \dots 10)E$, можно говорить о соразмерности результатов, полученных экспериментально двумя способами (одометр и пенетрометр).



Рисунок 4 – Показания пенетрометра грунтового марки ПСГ-МГ4

В пятой главе представлен сравнительный анализ результатов, полученных теоретическим и экспериментальным путями. Также даны рекомендации по обеспечению требуемых характеристик деформируемости лесных дорог, по их содержанию и ремонту.

В таблице 5 приведено сравнение модулей деформации (упругости) почво-грунтов на I-IV участках опытной лесной дороги, полученных теоретическим методом с использованием зависимости (5), в лабораторных условиях (с помощью одометра), а также экспресс-методом (с помощью пенетрометра).

Таблица 5
Сравнение модулей деформации E (упругости E_y) почво-грунта на I-IV участках опытной лесной дороги

Участок лесной дороги	Значения модуля деформации (упругости) (МПа)		
	Экспресс-метод E_y (МПа)	Лабораторные испытания E (МПа)	Теоретический метод E (МПа)
I участок	105,00	9,63	9,20
II участок	119,00	13,06	12,94
III участок	59,20	5,45	4,97
IV участок	55,40	5,71	5,82

Отклонение результатов, полученных теоретическим путем, и экспериментальных результатов составило 1-16 %.

В таблице 6 приведено сравнение модулей деформации (упругости) почво-грунтов на I-IV участках опытной лесной дороги, полученных экспериментально, с требуемым значением модуля деформации (упругости), полученным при расчете по нормативной методике ОДМ 218.5-002-2008.

Таблица 6

Сравнение модулей деформации E (упругости E_y) почво-грунта, полученных экспериментально, с требуемым E_{TR}

Участок лесной дороги	Значения модуля деформации (упругости), МПа		
	Лабораторные испытания	Экспресс-метод	Требуемый E_{TR}
I участок	9,63	105,00	92,08
II участок	13,06	119,00	
III участок	5,45	59,20	
IV участок	5,71	55,40	

Исследования показали, что с учетом эмпирической зависимости $E_y = (5 \dots 10)E$, на I и II участках опытной лесной дороги модуль деформации (упругости), полученный экспериментальным путем, выше требуемой величины, что удовлетворяет условию и говорит о достаточности несущей способности возведенной дороги по обоснованной технологии.

На III и IV участках величина модуля деформации (упругости) не достигает требуемой. Это связано с возведением земляного полотна на данных участках из слабых суглинистых почво-грунтов, способных изменять свое состояние с изменением влажности. В этом случае может быть рекомендовано: армирование дорожной одежды современными геосинтетическими материалами (георешетками, геотекстилем); отсыпка щебеночно-гравийно-песчаной смеси.

Содержание и ремонт лесной дороги рекомендуется выполнять согласно нормативным методикам и регламентам.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены следующие научные и практические результаты:

1. Установлено, что наиболее ресурсосберегающим способом строительства лесных дорог, является возведение дорожного полотна путем перемещения земляных масс из боковых канав и резервов, также известный как способ «из канав».

2. Установлено, что в качестве основного показателя несущей способности лесных дорог, целесообразно использовать модуль деформации, характеризующий как упругие, так и остаточные деформации.

3. Подтверждена правомерность применения термина «лесной почво-грунт» к местному дорожно-строительному материалу, используемому при возведении земляного полотна лесных дорог (веток) способом «из канав».

4. Разработана модель уплотнения слоя почво-грунта в системе «уплотняющее устройство – уплотняемый материал». Предложен шаговый метод расчета, отличающийся тем, что на каждом шаге корректируется модуль деформации, а именно, с увеличением сжимающей нагрузки модуль возрастает до определенной величины, а при уменьшении нагрузки модуль деформации не изменяется. Появляющиеся при этом остаточные деформации определяют степень уплотнения почво-грунта. В случае достижения требуемой степени уплотнения, изменения модуля деформации прекращаются. В разработанной математической модели уплотняемого почво-грунта корректировка модуля деформации выполняется соответствующим изменением коэффициента жесткости упругого элемента в модели Фойгта.

5. Выполнено моделирование влияние пористости на толщину слоя почво-грунта при его уплотнении. Получено, что при максимальном давлении на почво-грунт гусеницами экскаватора $P = 0,12$ (МПа) накопленная осадка материала составит 0,110-0,114 (м) после семи нажатий гусениц на уплотняемый почво-грунт; при давлении на почво-грунт тыльной стороной ковша экскаватора $P = 0,06$ (МПа) накопленная осадка материала составит 0,049-0,109 (м) после 4-9 нажатий тыльной стороной ковша экскаватора на уплотняемый почво-грунт.

6. Разработана методика определения зависимости, связывающей степень уплотнения почво-грунта с изменением его пористости и деформаций.

7. Установлена взаимосвязь модуля деформации почво-грунта, его модуля упругости и осадки уплотняемого слоя земляного полотна лесных дорог. Разработана методика определения модуля деформации почво-грунта земляного полотна лесных дорог и оценки полученных результатов.

8. Определена степень уплотнения почво-грунта в процессе фильтрационной консолидации. Установлено, что конструкции из песчаных и супесчаных почво-грунтов могут быть введены в эксплуатацию через один год от начала консолидации, а суглинистые и глинистые конструкции – через один месяц от начала консолидации.

9. Установлено, что результирующая осадка может быть получена как сумма осадок, вызванных воздействием экскаватора и фильтрационной консолидации.

10. Произведено проектирование и строительство опытной лесной дороги на основе разработанной методики. Подтверждено соответствие несущей способности опытной дороги требуемым значениям согласно расчетам по методикам, регламентируемым общепринятыми нормативными документами.

11. Установлено, что дорожная одежда, устроенная на песчаных и супесчаных основаниях, при толщине слоев: покрытие дорожной одежды – C_2 , $E_{II} = 290$ (МПа), $h_{II} = 0,10$ (м); основание дорожной одежды – C_7 , $E_0 = 260$ (МПа), $h_0 = 0,15$ (м) может быть заменена на аналогичную конструкцию меньшей толщиной слоев ($h_{II} = 0,05$ (м); $h_0 = 0,10$ (м)) с обеспечением достаточной несущей способности.

12. Установлено, что использование в конструкции дорожной одежды слоев из георешеток способствует увеличению модуля упругости до 58 %.

13. Установлено, что использование технологии возведения дорожного полотна методом «из канав» способствует достижению положительного экономического эффекта до 7,7 % от общей стоимости в сравнении с вариантом возведения специализированным потоком, предполагающим возведение земляного полотна из резервов и возведение земляного полотна из привозного грунта.

14. Сравнительный анализ модулей деформации (упругости) почво-грунтов на I-IV участках опытной лесной дороги, полученных теоретическим методом с использованием разработанной методики, и экспериментальных значений показал отклонение результатов 1-16 %.

15. Экспериментальные исследования характеристик деформируемости почво-грунтов опытной лесной дороги показали, что на I и II участках условие, согласно которому фактический модуль деформации (упругости) не должен быть ниже требуемого значения, выполняется, что свидетельствует о достаточности несущей способности дороги на данных участках. На III и IV участках величина модуля деформации (упругости) не достигает требуемой. В этом случае может быть рекомендовано армирование дорожной одежды современными геосинтетическими материалами, а также отсыпка щебеночно-гравийно-песчаной смеси.

16. Сформулированы рекомендации по содержанию и ремонту лесных дорог.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ

В изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. Герасимов Ю.Ю., Катаров В.К., Ковалёва Н.В., Рожин Д.В., Соколов А.П., Сюнёв В.С. Совершенствование системы оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2013. № 8 (137). С. 70–76.

2. Ратькова Е. И., Катаров В. К., Ковалева Н. В. Уплотнение оснований лесных дорог на глинистых грунтах в межсезонные периоды // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2015. № 4 (149). С. 95–97.

3. Ковалева Н.В. Обоснование технологических решений строительства лесных дорог по критерию прочности дорожного полотна // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». 2015. № 6 (151). С. 111–113.

4. Ковалева Н.В. Опыт строительства и эксплуатации лесной дороги с заданными прочностными характеристиками // В мире научных открытий. Сер. «Естественные и технические науки». Красноярск: Изд-во «Научно-инновационный центр», 2015. № 10.1 (70). С. 511-520.

Учебные пособия

1. Катаров В. К., Ковалева Н. В., Кочанов А. Н., Марков В. И., Петров А. Н., Ратькова Е. И., Рожин Д. В., Степанов А. В., Соколов А. П., Сюнёв В. С. Проектирование, строительство, содержание и ремонт лесных дорог: Учеб. пособие. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. 92 с.

В статьях и материалах конференций

1. Ковалева Н.В. Теория и практика применения геоматериалов в дорожном строительстве // Научно-исследовательская работа студентов: материалы 64-й научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ. 2012. С. 84–85.

2. Ковалева Н. В., Катаров В. К., Ратькова Е. И. Исследование влияния циклов «замораживание – оттаивание» на характеристики лесных почво-грунтов, используемых при строительстве лесных дорог // Материалы международной научно-технической конференции «I Европейский лесопромышленный форум молодёжи» (15–17 мая 2014 г.) / Воронеж: ВГЛТА. 2014. С. 176–180.

3. Катаров В.К., Сюнёв В.С., Петров А.Н., Рожин Д.В., Ковалева Н.В. Трансграничные решения в области развития лесотранспортной

инфраструктуры и биоэнергетики в фокусе рационального использования растительного мира // Современное состояние, тенденции развития, рациональное использование и сохранение биологического разнообразия растительного мира: материалы международной научной конференции (Минск – Нарочь, 23-26 сентября 2014г.) – Минск, 2014. – С. 198-199.

4. Петров А.Н., Рожин Д.В., Катаров В.К., Марков В.И., Ковалева Н.В., Степанов А.В. Опыт практической реализации трансграничных решений в области проектирования и строительства лесных дорог // Классический университет в пространстве трансграничности на Севере Европы: стратегия инновационного развития: материалы международного форума. – Петрозаводск, 2014. – С. 83-84.

5. Селиверстов А.А., Суханов Ю.В., Лукашевич В.М., Пеккоев А.Н., Катаров В.К., Кузнецов В.К., Ковалева Н.В. Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы Международной научно-технической конференции. Ведение интенсивного лесного хозяйства в технопарке ПетрГУ. – Вологда: ВоГУ. 2014. С. 27-30.

6. Ковалева, Н.В. Обеспечение прочностных характеристик дорожной конструкции при строительстве лесных дорог по технологии «из канав» [Текст] / Н.В. Ковалева, В.К. Катаров, В.С. Сюнёв // Актуальные проблемы лесного комплекса : сборник научных трудов. – Брянск: БГИТУ, 2015. – Выпуск 43. – С. 153-155.

7. Ковалева, Н. В. Моделирование уплотняющего воздействия экскаватора на грунт при строительстве лесной дороги [Текст] / Н.В. Ковалева // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. – Воронеж, 2015. – № 5, ч. 4 (16-4). – С. 90-93.

8. Ковалева, Н.В. О численном моделировании уплотняемого грунта при строительстве лесных дорог [Текст] / Н.В. Ковалева // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции. – Воронеж, 2015. – Т. 3, № 7-1 (18-1). – С. 490-493.