

На правах рукописи

СТЕПАНОВ АРТЕМ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЛЕСОВОЗНЫХ  
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок  
и лесного хозяйства

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Петрозаводск – 2015

Работа выполнена на кафедре промышленного транспорта ФГБОУ ВПО  
«Петрозаводский государственный университет»

- Научный руководитель: **Питухин Александр Васильевич**,  
доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты: **Бурмистрова Ольга Николаевна**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующая кафедрой «Технологии и  
машины лесозаготовок» ФГБОУ ВПО  
«Ухтинский государственный  
технический университет»
- Салминен Эро Ойвович**, кандидат  
технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
«Промышленного транспорта» ФГБОУ  
ВПО «Санкт-Петербургский  
государственный лесотехнический  
университет имени С.М. Кирова»
- Ведущая организация: Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Воронежский  
государственный лесотехнический  
университет имени Г.Ф. Морозова»

Защита состоится 24 июня 2015г. в 16:00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.190.03 при Петрозаводском  
государственном университете по адресу: 185910, г. Петрозаводск,  
пр. Ленина, 33.

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

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2015г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Р. В. Воронов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Лесопромышленный комплекс является одной из основополагающих отраслей республики Карелия. Одним из важнейших элементов его эффективной работы и развития является надежная и достаточная по плотности сеть лесовозных автомобильных дорог. Основная часть вывозимого лесоматериала осуществляется по средствам сухопутного транспорта, и его доля в себестоимости достигает значений около 45%.

Ввиду большой стоимости изыскания, проектирования, строительства и эксплуатации лесовозных автомобильных дорог, незначительного финансирования данного направления лесной отрасли как со стороны государства, так и частного сектора, а также нежелание лесозаготовительных компаний строить лесовозные дороги на долгий перспективный срок, ставит задачу о необходимости повышения эффективности каждого из перечисленных этапов. Рост эффективности необходимо осуществлять за счет использования новых материалов, техники и технологии при строительстве, эксплуатации и содержании лесовозных автомобильных дорог, а также применения методов математического моделирования и совершенствования методик расчета различных конструктивных элементов при проектировании.

В последнее время уверенно вводится в отрасль сортиментная технология транспортировки лесного материала, которая отличается увеличенными нагрузками на покрытие в сравнении с хлыстовой технологией. Низкие объемы строительства новых лесовозных автомобильных дорог и недостаточное внимание к поддержанию работоспособности уже существующих, а также наличие увеличенных нагрузок на покрытие способствуют интенсивному образованию различных неровностей и деформаций дорожной одежды.

Из-за неровностей, образующихся на покрытии дороги, скорость движения автопоезда может снизиться вдвое, производительность на 30...40%, а себестоимость вывозки заготовленного леса увеличится на 50...60%. Самым распространенным видом из неровностей, образующихся на грунтовых, гравийных и щебеночных покрытиях, является гребенка, ее доля составляет порядка 80% от всех неровностей.

Вышеперечисленные и другие факты вызывают необходимость совершенствования используемой для вывозки сети лесовозных автомобильных дорог. Актуальность разработки методов определения оценки вероятности безотказной работы вследствие усталостного изнашивания, а также определение факторов влияющих на образования неровности типа «гребенка» и составление ее математической модели для прогнозирования ее появления обусловлена необходимостью

повышения эксплуатационной надежности дорожных покрытий лесовозных автомобильных дорог.

**Цель работы.** Целью диссертационной работы является повышение транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных дорог на стадии проектирования и эксплуатации. Это достигается путем уточнения методов расчета вероятности безотказной работы лесовозных автомобильных дорог вследствие усталостного изнашивания дорожного покрытия и моделирования процесса образования неровностей типа «гребенка», которая является весьма распространенным дефектом на покрытиях лесовозных дорог.

**Задачи исследования.**

Для достижения цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработать метод определения вероятности безотказной работы участка автомобильной лесовозной дороги вследствие усталостного изнашивания дорожного покрытия;

2. Разработать математическую модель образования неровности типа «гребенка»;

3. Провести экспериментальные исследования на участках лесовозных автомобильных дорог, где присутствует неровность типа «гребенка»;

4. Проверить адекватность разработанных методов и математических моделей.

**Методы исследований.** Для решения поставленной цели были использованы методы: теории вероятностей, математической статистики, регрессионного анализа, дифференциального и интегрального исчисления, теории расчета нежестких дорожных одежд, теоретической механики, механики разрушения, корреляционного и спектрального анализа, математического моделирования. В процессе решения поставленных задач и обработки результатов экспериментов применялись прикладные программные пакеты Microsoft Excel, MathCAD14.

**Степень разработанности.** Анализ литературы показал, что темы планирование эффективного расположения сети лесовозных автомобильных дорог, усовершенствование конструкций лесовозных автомобильных дорог и применяемые для строительства материалы, воздействие нагрузок на автомобильную дорогу, а также влияние других факторов на работоспособность покрытий весьма актуальны. Исследованием данных направлений занимались О.Н. Бурмистрова, И.В. Григорьев, А.А. Камусин, В.К. Катаров, А.Н. Петров, Э.О. Салминен, А.В. Скрыпников, А.П. Соколов, С.И. Сушков, В.С. Сюнёв, P. Pierre, P. Kumar и др. Также анализ ранее разработанных трудов показал, что недостаточно подробно изучены вопросы усталостного изнашивания дорожного покрытия и процесса образования неровности

типа «гребенка». По этой причине задача повышения транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог требует продолжения исследований.

**Научная новизна.** Научной новизной обладают:

-Уточненный метод определения вероятности безотказной работы участка лесовозной дороги вследствие усталостного изнашивания дорожного покрытия;

-Математическая модель образования неровности типа «гребенка»;

-Метод «максимумов – минимумов» измерения неровности типа «гребенка»;

-Метод «случайных ординат» измерения неровности типа «гребенка»;

-Результаты экспериментальных исследований неровности типа «гребенка» на лесовозных автомобильных дорогах.

**Значимость для теории.** Разработанный метод определения вероятности безотказной работы участков лесовозных дорог вследствие усталостного изнашивания и математическая модель образования профиля дороги типа гребенка позволяют более точно определить условия работы дорожных конструкций и углубить теорию надежности лесовозных автомобильных дорог.

**Значимость для практики.** Результаты исследования позволяют на этапе проектирования и эксплуатации лесовозных автомобильных дорог уменьшить ущерб от воздействия движущихся автопоездов, спрогнозировать работы по содержанию, а также улучшить транспортно-эксплуатационные качества и потребительские свойства лесовозных дорог.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

-Метод оценки периода зарождения усталостной трещины и периода ее распространения при усталостном изнашивании дорожного покрытия;

-Метод определения вероятности безотказной работы участка лесовозной автомобильной дороги вследствие усталостного изнашивания дорожного покрытия;

-Модель образования неровности типа «гребенка»;

-Метод «максимумов – минимумов» измерения неровности типа «гребенка»;

-Метод «случайных ординат» измерения неровности типа «гребенка»;

-Методики обработки экспериментальных данных, полученных при измерении неровностей типа «гребенка».

**Достоверность выводов и результатов исследований обеспечивается:** применением методов математической статистики; проведением экспериментальных исследований в полевых условиях,

подтвержденной адекватностью полученных моделей за счет хорошей сходимости экспериментальных и теоретических данных.

**Апробация работы.** Материалы работы докладывались и обсуждались на 63-й и 64-й научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (апрель 2011, апрель 2012 г. - ПетрГУ г. Петрозаводск), на всероссийской научно-технической конференции «Повышение эффективности лесного комплекса Республики Карелия» (апрель 2014 г., апрель 2015 г. – ПетрГУ г. Петрозаводск), а также на заседаниях кафедры "Промышленного транспорта" и кафедры "Технологии металлов и ремонта" Петрозаводского государственного университета.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 3 работы в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных выводов, списка литературы. Общий объем работы 136 страниц. Диссертационная работа содержит 37 рисунков, 10 таблиц. Список литературы содержит 135 источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** рассмотрена проблема плотности сети лесовозных автомобильных дорог северо-западного региона России, и в частности республики Карелия, а также рассмотрено состояние проблемы повышения эксплуатационного уровня лесовозных автомобильных дорог. Лесовозные автомобильные дороги должны обеспечивать бесперебойное, круглосуточное, круглогодичное безопасное и удобное движение автомобилей с расчетными скоростями и осевыми нагрузками в течение всего срока службы, что возможно только при своевременном осуществлении работ по ремонту и содержанию. Планирование данных видов работ должно осуществляться на основании значений транспортно-эксплуатационных показателей.

Изменение параметров лесовозных автомобильных дорог вызвано воздействием лесовозных автопоездов и погодно-климатических факторов.

В виду того что основные транспортные пути для вывозки лесной продукции были построены около 25 лет назад и за этот период изменился нагрузка на ось автомобиля в сторону увеличения, то встает вопрос о более частых ремонтных работах покрытия лесовозных автомобильных дорог и более тщательному их содержанию.

**Во второй главе** рассмотрена необходимость применения теории вероятностей при расчетах дорожных конструкций.

Одной из причин образования отказов лесовозных дорог является усталостное изнашивание, под которым понимают процесс разрушения дорожного покрытия, характеризующийся усталостными явлениями в подповерхностных слоях.

Расчет на усталостное изнашивание производим по наибольшему контактному напряжению  $\sigma_n$ , с использованием уравнений механики разрушения. При нерегулярном переменном нагружении от движения лесовозных автопоездов фактическое изменение напряжений может быть сведено к блочному нагружению. Один блок нагружения состоит из  $r$  ступеней, каждой из которых соответствует амплитуда контактных напряжений  $\sigma_{ni}$  и число циклов повторения этой амплитуды в блоке  $v_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, r$ .

Срок службы до отказа, при длительности блока нагружения  $t_{\sigma}$ , записывается в виде:

$$T = \lambda \cdot t_{\sigma}. \quad (1)$$

где  $\lambda$  - среднее число блоков нагружения до разрушения.

Для описания процесса усталостного изнашивания покрытия лесовозных автомобильных дорог на первой стадии рассеянных повреждений используем уравнение В.В. Болотина с помощью которого рекомендуется определять число циклов зарождения  $N_3$ , после чего трещина начнет свое развитие при воздействии контактных циклических напряжений постоянного размаха:

$$N_3 = \frac{N_c}{((\chi \Delta \sigma - \sigma_{th}) / \sigma_{\psi})^{m_3}}, \quad (2)$$

где  $N_c$  – постоянная времени;

$\chi$  – коэффициент концентрации напряжений от микродефекта;

$\sigma_{\psi}$ ,  $\sigma_{th}$ ,  $m_3$  – константы материала (при заданных условиях внешней среды);

$\sigma_{\psi}$  – характеризует сопротивление материала накоплению микроповреждений;

$\sigma_{th}$  – характеризует порог сопротивления накоплению микроповреждений;

$\Delta \sigma$  – размах напряжений в цикле;

В нашем случае при воздействии циклических контактных напряжений полагаем  $\Delta \sigma = \sigma_n$ .

При задании нагрузки в виде блока, получаем зависимость:

$$N_3 = v_6 \frac{N_c \sigma_{\psi}^{m_3}}{\sum_{j=1}^r v_j (\chi \Delta \sigma_j - \sigma_{th})^{m_3}}. \quad (3)$$

В случае задания нагрузки в виде плотности распределения размахов действующих напряжений  $f(\Delta\sigma)$ :

$$N_3 = \frac{N_c \sigma_\psi^{m_3}}{\int_{\sigma_{th}}^{\sigma_B} f(\Delta\sigma) (\chi \Delta\sigma - \sigma_{th})^{m_3} d\Delta\sigma}. \quad (4)$$

Время зарождения трещины, выраженное в единицах наработки, определится зависимостью:

$$T_3 = t_6 \frac{N_c \sigma_\psi^{m_3}}{\sum_{j=1}^r v_j (\chi \Delta\sigma_j - \sigma_{th})^{m_3}}. \quad (5)$$

Для описания процесса усталостного изнашивания на стадии развития усталостной трещины предложено использовать уравнение Пэриса:

$$\frac{dl}{dN} = C \Delta K^n, \quad (6)$$

где  $l$  – длина трещины;

$N$  – число циклов;

$n, C$  – экспериментально определяемые константы;

$\Delta K$  – изменение (размах) коэффициента интенсивности напряжений в цикле;

$$\Delta K = Y(l) \Delta\sigma \sqrt{\pi l}, \quad (7)$$

где  $\Delta\sigma$  – размах напряжений в цикле,  $\Delta\sigma = \sigma_n$ ;

$Y(l)$  – коэффициент, учитывающий размеры покрытия и вид дефекта.

Таким образом, используя формулы (6) и (7) определяем число циклов  $N$  распространения усталостной трещины до разрушения при воздействии циклической нагрузки от лесовозных автопоездов с постоянным размахом  $\Delta\sigma$ :

$$N = \frac{1}{C \Delta\sigma^n \pi^{n/2}} \int_{l_0}^{l_c} \frac{dl}{Y^n(l) l^{n/2}}, \quad (8)$$

где  $l_0$  – начальный размер трещины;

$l_c$  – критический размер трещины.

Число циклов  $N_p$  распространения усталостной трещины до разрушения при задании нагрузок в виде блока  $(\Delta\sigma_j, v_j)$ ,  $j=1, \dots, r$ . Здесь  $r$  – количество ступеней в блоке нагружения:

$$N_p = \frac{a_p v_6}{C \pi^{n/2} \sum_{j=1}^r v_j \Delta\sigma_j^n} \int_{l_0}^{l_c} \frac{dl}{Y^n(l) l^{n/2}}, \quad (9)$$

где  $a_p$  – предельная степень накопления повреждений;

$v_6$  – общее число циклов нагружения (объем блока нагружения);

$v_j$  – число циклов нагружения при воздействии контактной циклической нагрузки  $\Delta\sigma_j$ .



В случае задания нагрузки не в виде блока нагружения, а в виде плотности распределения  $f(\Delta\sigma)$ , определяем число циклов распространения трещины от начальной величины  $l_0$  до критической  $l_c$ :

$$N_p = \frac{a_p}{C\pi^{n/2} \int_{\Delta\sigma_{th}}^{\sigma_B} \Delta\sigma^n f(\Delta\sigma) d\Delta\sigma} \int_{l_0}^{l_c} \frac{dl}{Y(l)l^{n/2}}. \quad (10)$$

где  $\Delta\sigma_{th}$  – пороговое значение размаха контактных напряжений, ниже которого рост трещины не происходит;

$\sigma_B$  – предел прочности;

$a_p$  – предельная степень накопления повреждений.

Число циклов распространения усталостной трещины связано с длительностью ее распространения, выраженной в единицах наработки, следующей зависимостью:

$$T_p = N_p \frac{t_\delta}{v_\delta} = N_p t_e, \quad (11)$$

где  $t_\delta$  – длительность блока нагружения;

$t_e$  – средняя длительность одного цикла.

Общий срок службы дорожного покрытия с учетом двух стадий развития трещины запишется в виде:

$$T = T_3 + T_p. \quad (12)$$

Оценку вероятности безотказной работы вследствие усталостного выкрашивания необходимо производить для всего интервала температур работы дорожного покрытия. Для описания нагрузочного режима используем матрицу: по строкам матрицы с заданным интервалом приводятся температуры дорожного покрытия, по столбцам – уровни нагрузки от воздействия колес лесовозных автопоездов при движении в заданном интервале температуры.

Срок службы до разрушения при распространении трещины

$$T_p = t_\delta \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \frac{2(l_c^{\frac{2-n_i}{2}} - l_0^{\frac{2-n_i}{2}})}{v_{ij} C_i (2 - n_i) Y^{n_i} \sigma_{ij}^{n_i} \pi^{\frac{n_i}{2}}}, \quad (13)$$

где  $v_{ij}$  – число циклов за блок нагружения  $t_\delta$  воздействия на дорожное покрытие при температуре  $t_i$  и нагрузке  $F_j$ .

В правую часть выражения (13) входят случайные величины  $n_i, C_i, \sigma_{ij}, v_{ij}, l_c, l_0$  характеризующиеся своими функциями распределения. Как функция случайных аргументов, величины  $\lambda$  и  $T_p$  также являются случайными. Чтобы найти функцию распределения  $T_p$ , применяем метод статистических испытаний. При нерегулярной нагруженности в случае, когда закон распределения контактных напряжений представлен в виде ступенчатого графика со ступенями  $\sigma_{nij}$ ,

случайные вариации функции распределения контактных напряжений могут быть описаны соотношением:

$$\sigma_{nij} = \overline{\sigma_{nij}} \varepsilon \quad (14)$$

где  $\overline{\sigma_{nij}}$  – среднее значение контактных напряжений ступени блока  $i$ ,  $j$   
 $\varepsilon$  – коэффициент, учитывающий влияние нерегламентируемых факторов.

Величина  $\varepsilon$  принимается нормально распределенной, имеющей среднее значение, равное единице  $\bar{\varepsilon}=1$ .

Подставляя в уравнение (13) выражение (14) для  $\sigma_{ij}$  получаем:

$$T_p = t_\delta \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \frac{2 \left( l_c^{\frac{2-n_i}{2}} - l_0^{\frac{2-n_i}{2}} \right)}{v_{ij} C_i (2 - n_i) Y^{n_i} \varepsilon^{n_i} \overline{\sigma_{ij}^{n_i}} \pi^{\frac{n_i}{2}}}. \quad (15)$$

С учетом периода зарождения усталостной трещины

$$T = T_3 + T_p = t_\delta \left[ \sum_{i=1}^k \frac{N_{ci} \sigma_{\psi i}^{m_{3i}}}{\sum_{j=1}^r v_{ij} (\chi \overline{\sigma_{ij}} - \sigma_{thi})^{m_{3i}}} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \frac{2 \left( l_c^{\frac{2-n_i}{2}} - l_0^{\frac{2-n_i}{2}} \right)}{v_{ij} C_i (2 - n_i) Y^{n_i} \varepsilon^{n_i} \overline{\sigma_{ij}^{n_i}} \pi^{\frac{n_i}{2}}} \right]. \quad (16)$$

Задавая законы распределения случайных переменных и используя зависимость (16) с помощью известной процедуры метода статистических испытаний определяем средний срок службы, закон распределения срока службы и другие необходимые оценки.

**В третьей главе** рассмотрены основные параметры и причины оказывающие влияние на образование неровности типа «гребенка» на дорожном покрытии лесовозной автомобильной дороги а также составлена математическая модель ее образования.

Причиной образования неровности типа «гребенка» является воздействие вертикально и горизонтально направленных сил от колес автомобилей, величина которых превышает значения угла внутреннего трения и внутреннего коэффициента сцепления частиц материала покрытия. В результате происходит перемещение компонентов материала дорожной одежды и тем самым нарушается ровность покрытия. Форму синусоидального профиля неровности типа «гребенка» обеспечивает колебательный характер работы подвески автомобилей, т.е. воздействие со стороны колеса на дорогу будет

увеличиваться в момент отбоя подвески и уменьшаться в момент сжатия, образуя волны в местах контакта.

Также первопричиной образования гребенки может служить некоторая другая неровность, например отдельный камень на гравийном покрытии или щебенка на щебеночном покрытии выделяющаяся из уровня поверхности дорожной одежды и вызывающая колебание подвески автомобиля.

К работам по содержанию при борьбе с гребенкой относятся утюжка на грунтовых покрытиях и грейдерование на гравийных и щебеночных. При этом материал дорожной одежды находящийся на максимуме гребня срезается и перемещается в последующий минимум, образуя ровную поверхность с заданным поперечным уклоном (рисунок 1). Однако после прохода автогрейдера мы получаем поверхность с неравномерным коэффициентом уплотнения, так в месте бывшего максимума плотность достигает своих максимальных значений, а в месте бывшего минимума находится взрыхленный материал с низким уровнем уплотнения. В этом случае образование гребенки происходит намного быстрее за счет более интенсивного выбивания неуплотненного материала, причем положение гребней относительно друг друга остается на прежних местах.

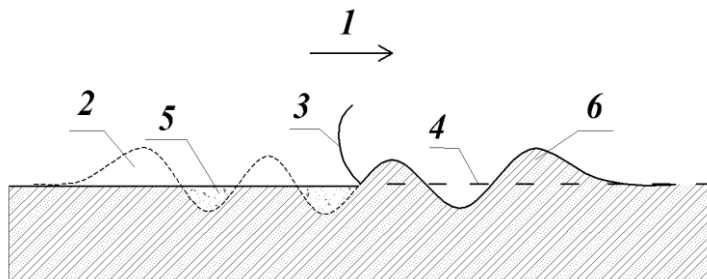


Рисунок 1 – Грейдерование лесовозной автомобильной дороги: 1 – направление движения автогрейдера; 2 – срезанный гребень; 3 – отвал автогрейдера; 4 – уровень автомобильной дороги; 5 – рыхлый материал покрытия; 6 – уплотненный материал покрытия.

Причина образования гребенки связана с нестабильностью колебаний подвески автомобиля. То есть волнистость возникает от движения колеса, которое вначале заезжает по гребню вверх и подлетает в воздух, а после падения, на некотором расстоянии, оно выбивает одну часть материала покрытия, а другую часть материала уплотняет. В любом случае это воздействие создает очередную впадину, развивая волнистый профиль.

В качестве основы для составления модели процесса образования неровности типа «гребенка» принята математическая модель, которую

составил западный ученый А. Douglas. Математическая модель предполагает что существует некоторая ровная поверхность лесовозной автомобильной дороги в направлении  $x$ , причем реальное положение профиля соответствует значению  $H(x,t)$ . По этой дороге двигаются автомобили массой  $M$  со скоростью  $V$ , ходовая часть которых состоит из рессор с собственной частотой  $\omega_0$  и амортизаторов с коэффициентом демпфирования  $b$ . Пусть  $Z$  - высота до рамы проезжающих машин относительно ровной поверхности и причем  $H-Z+(g/\omega_0^2)$  это величина, на которую пружины сжимаются (рисунок 2).

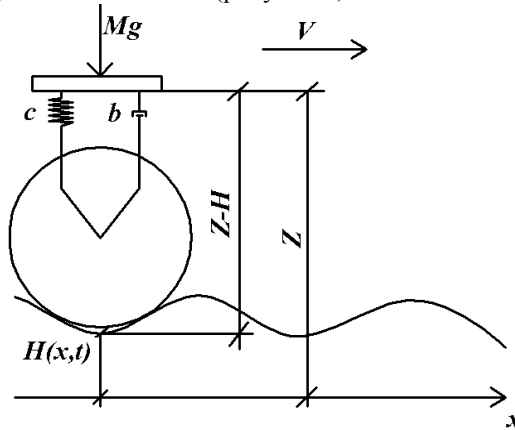


Рисунок 2 – Элементы рассматриваемой модели

В представленной модели проанализирована стабильность плоскости покрытия следующим способом: если есть любая волна номер  $k$ , для которой линейная скорость роста имеет положительное направление, то амплитуда растет во времени при неустойчивой горизонтальной поверхности. Комплексная часть роста жесткости пружины дает информацию о том, что волнообразование движется по направлению  $x$ , т.е. увеличивается и уменьшается.

Для наиболее быстро растущей волны определяем ее длину по формуле:

$$T = VT_p(1 + \Gamma - \Gamma^2)^{1/2}, \quad (17)$$

где  $V$  – скорость движения автомобиля, м/с;

$T_p$  – период собственных колебаний автомобильных пружин, с.

$\Gamma$  – безразмерный параметр, определяющийся по формуле:

$$\Gamma = b/M\omega_0 \quad (18)$$

где  $b$  – коэффициент демпфирования амортизатора, Нс/м;

$M$  – нагрузка на покрытие от колеса, кН;

где  $\omega_0$  – собственная частота рессоры, 1/с.

По аналогии с уравнением Пэриса, описывающим скорость роста трещины при воздействии циклических нагрузок, полагаем

$$\frac{dh}{dN} = C(\tau_{max}h^{1/2})^\alpha. \quad (19)$$

где  $h$  – размах цикла (профиля гребенки), мм;

$N$  – число циклов нагружения дорожного полотна проезжающими транспортными средствами;

$C, \alpha$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от свойств дорожного покрытия и скорости роста гребенки;

$\tau_{max}$  – максимальные касательные напряжения, возникающие в дорожном покрытии при воздействии колеса, МПа.

Откуда

$$N = \int_{h_0}^{h_{max}} \frac{dh}{C(\tau_{max}h^{1/2})^\alpha}. \quad (20)$$

Интегрируя уравнение (20), получаем число циклов до образования гребенки глубиной  $h_{max}$ :

$$N = \frac{2(h_{max}^{\frac{2-\alpha}{2}} - h_0^{\frac{2-\alpha}{2}})}{C\tau_{max}^\alpha(2-\alpha)}. \quad (21)$$

В модели (19) показатель степени при  $h$  составляет 0.5, что справедливо для уравнения Пэриса в механике разрушения и следует из точного решения задачи теории упругости о распространении трещины в сплошной анизотропной упругой среде. В общем случае, показатель степени можно обозначить величиной  $\beta$ , подлежащей экспериментальному определению. При этом получим:

$$N = \frac{h_{max}^{1-\alpha\beta} - h_0^{1-\alpha\beta}}{C\tau_{max}^\alpha(1-\alpha\beta)}. \quad (22)$$

**Четвертая глава** работы посвящена описанию методов и оборудования для проведения экспериментальных исследований, а также методике обработки полученных данных. Целью экспериментальных исследований являлось подтверждение адекватности разработанных методов и математических моделей.

Для измерения ровности покрытий лесовозных автомобильных дорог используются следующие инструменты: нивелир и нивелирная рейка, дорожная рейка РДУ «Кондор», автомобильная установка ПКРС-2.

Для проведения эксперимента была выбрана универсальная дорожная рейка РДУ «Кондор», так как именно она предназначена для съемки местных участков и диапазон длин волн гребенки как раз соответствует для их удобного измерения, а также она достаточно проста и имеет невысокую стоимость.

Существующий метод измерения согласно ГОСТ 30412-96 не удовлетворял условиям эксперимента, так как предназначен для оценки ровности покрытия на больших по протяженности участках. Вследствие этого были разработаны два метода измерений. Первый метод, метод максимумов - минимумов был принят при съемке гребенки в зимний период. Для чего:

- устанавливаем рейку в месте, где необходимо произвести исследования на покрытии перпендикулярно волнам гребенки;
- соотносим начало рейки с одним из наивысших значений волн гребенки, тем самым обозначая начало координат;
- берем отчет по горизонтали, по рейке в местах изменения перепадов волны, то есть в низших и высших положениях неровности, в миллиметрах;
- с помощью клинового промерника в тех же точках берем отчет по вертикали, в миллиметрах (рисунок 3).

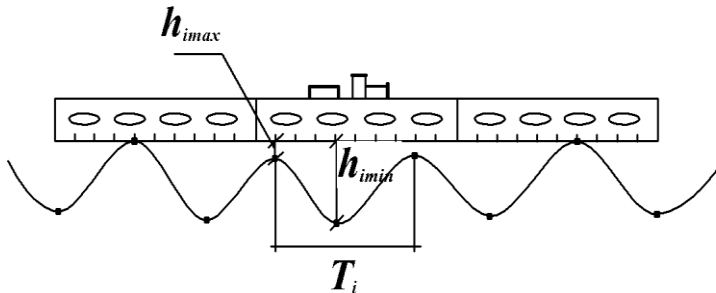


Рисунок 3 – Схема измерения гребенки методом максимумов - минимумов

Однако, при обработке данных полученных с помощью рассматриваемого метода, выявился ряд недостатков таких как:

- значения глубины и высоты неровностей отсчитываются от уровня соприкосновения дорожной рейки с двумя наивысшими значениями гребенки;
- по полученным значениям можно лишь приблизительно судить о форме самой неровности.

Следует отметить, что схематизация случайных процессов по методу максимумов - минимумов широко используется для оценки уровня нагруженности элементов конструкции в задачах теории надежности.

Так как метод максимумов - минимумов имеет недочеты, то было принято решение применить второй метод, метод случайных ординат (рисунок 4).

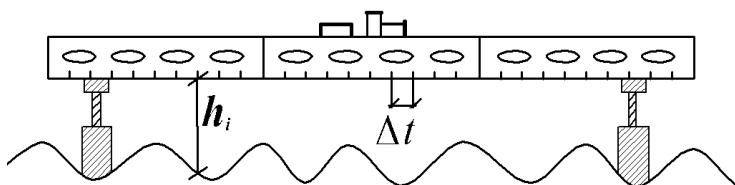


Рисунок 4 – Схема измерения гребенки методом случайных ординат  
Согласно этому способу необходимо:

- на покрытии, в месте, где необходимо произвести исследования, перпендикулярно волнам гребенки установить две опоры на таком расстоянии чтобы на них можно было установить дорожную рейку;
- на заранее подготовленные опоры устанавливается рейка дорожная универсальная «РДУ – Кондор»;
- с использованием уровня и съёмных подкладок рейка выводится в горизонтальное положение;
- начиная от нуля рейки по горизонтали с определенным выбранным шагом в миллиметрах, берутся отчеты с помощью клинового промерника от дорожного покрытия до низа рейки в миллиметрах.

Указанный метод позволяет по полученным данным построить более подробный профиль, тем самым можно увидеть форму неровности, углы подъема и спуска, а также дает возможность не ограничиваться выборкой на длину рейки и предполагает ее перестановку большое количество раз.

Таким образом, метод случайных ординат при съемке неровностей типа «гребенка» позволяет изучать сплошные волнообразования неограниченной длины, дает больше данных и является достаточно точным.

В результате исследования неровности типа «гребенка» по методу максимумов - минимумов было принято решение о нахождении оценок математических ожиданий и дисперсий, а также оценки коэффициента корреляции между шагом и глубиной неровностей.

Определение оценки коэффициента корреляции между шагом и размахом неровностей осуществляем по формуле:

$$\tilde{r}_{Th} = \frac{\sum_1^n (T_i - \bar{T})(h_{imin} - h_{imax} - \bar{h})}{(n - 1)\bar{\sigma}_T \bar{\sigma}_h}, \quad (23)$$

где  $\tilde{r}_{Th}$  - оценка коэффициента корреляции между шагом и размахом неровностей;

n – количество измерений;

$T_i$  - значение  $i$ -го измерения шага между гребнями, мм;  
 $\bar{T}$  - оценка математического ожидания шага между гребнями, мм;  
 $h_{imin}$  - значение  $i$ -го измерения глубины неровности, мм;  
 $h_{imax}$  - значение  $i$ -го измерения высоты неровности, мм;  
 $\bar{h}$  - оценка математического ожидания размаха неровности, мм;  
 $\bar{\sigma}_T$  - среднее квадратическое отклонение шага между гребнями, мм;  
 $\bar{\sigma}_h$  - среднее квадратическое отклонение размаха неровности, мм.  
 Уравнение прямой среднее квадратической регрессии  $h$  на  $T$ :

$$h - \bar{h} = \bar{r}_{Th} \frac{\bar{\sigma}_h}{\bar{\sigma}_T} (T - \bar{T}). \quad (24)$$

Данные, полученные по методу случайных ординат, было принято исследовать с помощью спектрального анализа.

Вначале определяем оценку корреляционной функции по формуле:

$$\tilde{K}(\tau) = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} \dot{h}(t_i) \dot{h}(t_{i+m}), \quad (25)$$

где  $n$  – количество измерений;

$m$  – номер момента взятия отсчета;

$\dot{h}(t_i)$  – центрированное значение функции в момент  $i$ , мм;

$\dot{h}(t_{i+m})$  – центрированное значение функции в момент  $i+m$ , мм.

Определяем оценку спектральной плотности:

$$\tilde{S}(\omega) = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^n \tilde{K}_i \cos(\omega i \Delta t) \Delta t, \quad (26)$$

где  $\omega$  – угловая частота, рад/мм;

$$\omega = 2\pi f, \quad (27)$$

где  $f$  – частота, находится в пределах от 0 до  $f_c$ , 1/мм;

$$f_c = \frac{1}{2\Delta t}, \quad (28)$$

где  $f_c$  – частота среза, 1/мм;

$\Delta t$  - величина шага измерений, мм;

$\tilde{K}_i$  – значение оценки корреляционной функции для моментов  $i\Delta t$  при  $i=1, 2, \dots, n$ , мм<sup>2</sup>.

Представленные методики позволяют определить основные параметры гребенки, а также установить взаимосвязь между ними.

**В пятой главе** проверена адекватность предложенных методов, а также представлены результаты измерений и результаты их обработки.

Исследования согласно методу максимумов - минимумов проводились зимой на лесовозной дороге около поселка Деревянка.

Результаты обработки экспериментальных данных представлены в таблице 1, график и уравнение регрессии представлены на примере 5 участка.



Таблица 1 – Результаты анализа по методу максимумов-минимумов

№ участка	Оценка мат. ожидания $\bar{T}$ , мм.	Оценка мат. ожидания $\bar{h}$ , мм.	Оценка дисперсии $T$ , мм <sup>2</sup> .	Оценка дисперсии $h$ , мм <sup>2</sup> .	Оценка коэффициента корреляции, $r_{th}$
1	470	10,9	5750	19,55	-0,68
2	817	10,17	63333	6,58	-0,76
3	540	10,4	23000	19,43	0,42
4	300	8,43	9166	3,37	0,64
5	300	2,71	28114	0,93	0,72

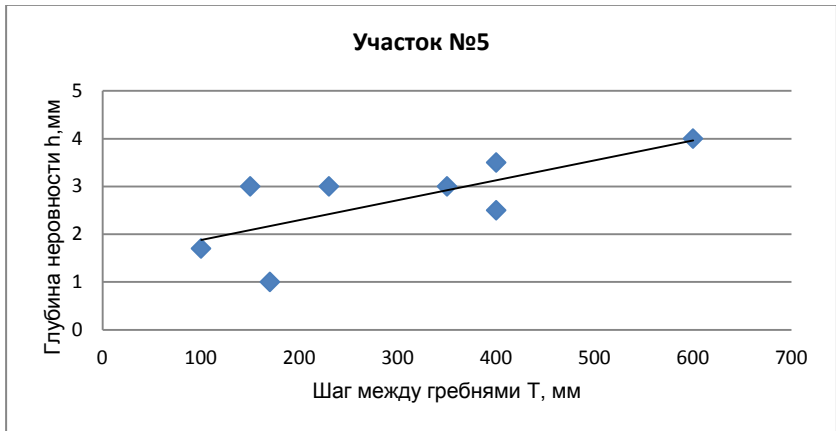


Рисунок 5 – Результаты измерений участка №5

Уравнение регрессии для участка №5:

$$h = 0.0042T + 1.4625 . \quad (29)$$

Экспериментальные исследования согласно методу случайных ординат проводились летом на лесовозной автомобильной дороге с покрытием переходного типа в виде песчано-гравийной смеси, расположенной в Прионежском районе республики Карелия около поселка Деревянка, на которой проводились измерения в зимний период. Также с помощью этого метода, исследования были проведены в сентябре 2014 года на другой лесовозной автомобильной дороге также имеющей переходный тип покрытия в виде песчано-гравийной смеси а местами в виде отсева дробления, которая проходит в Прионежском

районе около поселка Чална. Всего по этому методу исследовано 7 участков.

Результаты обработки данных на примере 1-го участка полученных по методу случайных ординат представлены в графиках корреляционной функции(рисунок 6), спектральной плотности(рисунок 7) и значении дисперсии  $\bar{\sigma}_h^2 = 120 \text{ мм}^2$ .

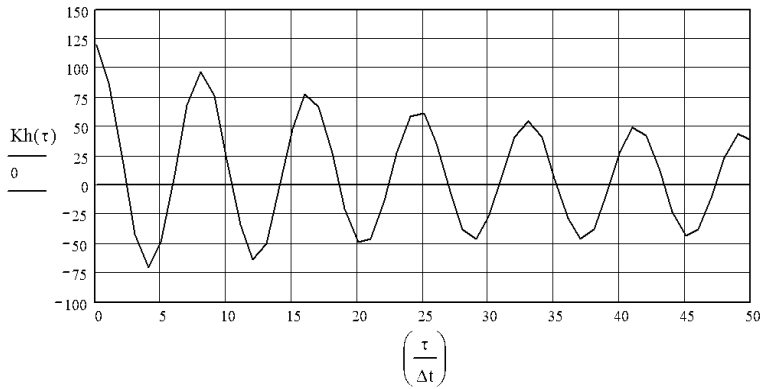


Рисунок 6 – График корреляционной функции для 1 участка

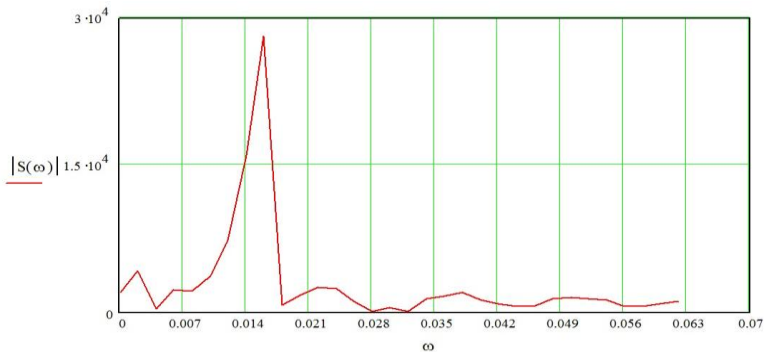


Рисунок 7 – График спектральной плотности для 1 участка

По полученным графикам спектральной плотности можно судить о том, какая частота вносит наибольший вклад. Из рисунка 7 видно, что пик спектральной плотности находится при угловой частоте  $\omega = 0,016 \text{ 1/мм}$ , что соответствует значению шага  $T=390 \text{ мм}$ .

В качестве расчетного, для проверки адекватности математической модели процесса образования неровностей типа гребенка, был выбран автомобиль - сортиментовоз МАЗ-6312А9-326-012. Сравнение результатов представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение результатов

Тип расчетного автомобиля	Значение шага гребенки полученного по математической модели, мм	Значение шага гребенки полученного в результате измерений на дороге, мм	Расхождения значений шага гребенки, %
Легковой автомобиль	387	390	0,77
Груженный сортиментовоз	413	390	5,89
Пустой сортиментовоз	986	390	152,82

Как видно из расчетов по математической модели, полученные значения шага гребенки от проходов груженого сортиментовоза  $T_1=413\text{мм}$  и легкового автомобиля  $T_2=387\text{мм}$  соразмерны с экспериментальными значениями, полученными на действующих лесовозных автомобильных дорогах. Значение шага гребенки, полученной в результате расчета математической модели для пустого сортиментовоза, сильно отличаются от результатов экспериментального исследования, что обусловлено жесткостью рессор, так как они рассчитаны на плавное движение в загруженном состоянии, в ненагруженном же состоянии рессоры практически несжимаемы. В целом можно сделать вывод, что математическая модель процесса образования неровностей типа гребенка составлена верно и может применяться для расчетов по прогнозированию производства работ по содержанию лесовозных автомобильных дорог и дорог общего пользования с покрытием переходного типа.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Уточнен метод определения вероятности безотказной работы участка дороги вследствие усталостного изнашивания дорожного покрытия, а именно: предполагается, что усталостная трещина зарождается на некоторой глубине, в зоне действия максимальных касательных напряжений а не на поверхности, как это предполагалось ранее; рассмотрен период зарождения усталостной подповерхностной трещины; учитывается влияние температурного фактора на уровень контактных напряжений и характеристики сопротивления усталостному изнашиванию; так как трещина зарождается на глубине, то при расчете

на усталостное изнашивание следует опираться не на традиционные экспериментальные кривые усталости, а уравнения механики разрушения.

2. Установлено, что: гребенка образуется в основном на дорогах с покрытием низшего и переходного типов; образование гребенки можно наблюдать на всем протяжении дорог, но чаще всего ее можно встретить на участке где присутствует переход от покрытия капитального типа к покрытию переходного типа, а также на подъемах, спусках, в местах подхода к повороту, непосредственно на нем самом и на выходе из поворота; если поворот построен в виде виража, то образование неровности происходит ближе к низу поперечного профиля поворота; гребенка образуется на участках где возможно развить скорость движения автомобилей выше 20 км/ч;

3. Установлено, что: при большой интенсивности движения с одновременным выпадением осадков в виде дождя гребенка образуется быстрее (1-3 суток), чем при тех же условиях, но без осадков (15 – 20 суток); гребни неровности располагаются перпендикулярно оси лесовозной автомобильной дороги.

4. Выявлено, что на процесс образования гребенки больше всего оказывают влияние: скорость движения транспортных средств, характеристики подвески части автомобилей, нагрузки на покрытие, число циклов нагружения дорожного полотна проезжающими машинами, а также характеристики материала покрытия.

5. Составлена математическая модель образования неровности типа «гребенка», которая учитывает все выше перечисленные параметры и позволяет определить величину шага, размах цикла и скорость роста гребенки, тем самым спрогнозировать работы по содержанию лесовозных автомобильных дорог.

6. Разработан метод измерения неровности типа «гребенка», получивший название «максимумов – минимумов», в результате которого можно получить значения шага между гребнями неровности и величину размаха циклов.

7. Разработан метод измерения неровности типа «гребенка», получивший название «случайных ординат», позволяющий проводить измерения гребенки с заданной точностью и в результате дающий значительное количество информации для детального исследования неровности.

8. Выявлено, что: оценка средней величины шага гребенки в зимний период на покрытии в виде снежного наката  $T_1 \approx 490$  мм, что на 30% больше, чем оценка средней величины шага гребенки  $T_2 \approx 350$  мм в летний период на гравийном покрытии. Такое расхождение

образовалось ввиду различия свойств материалов покрытия лесовозных автомобильных дорог, а также условий движения автомобилей.

9. Анализ результатов экспериментального обследования участков лесовозных автомобильных дорог с помощью корреляционного анализа показал зависимость шага между гребнями и размахом цикла. Спектральный анализ позволил выявить частотный характер неровности и показал зависимость размеров неровности типа гребенка от таких параметров как: скоростной режим движения по лесовозной дороге, наличие поворотов, подъемов, спусков, материал покрытия и т.д.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ**

### ***В изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России***

1. Питухин А.В., Петров А.Н., Марков В.И., Степанов А.В. Метод определения вероятности безотказной работы участка лесовозной автомобильной дороги вследствие усталостного изнашивания дорожного покрытия // Транспортное дело России. 2013. №2(105). С. 15-18.
2. Питухин А.В., Петров А.Н., Степанов А.В. Оценка надежности дорожного покрытия при воздействии предельной нагрузки с позиции механики разрушения// Ученые записки ПетрГУ. – 2013. – №8. – С. 81-83.
3. Степанов А.В., Петров А.Н. Анализ сети лесовозных дорог республики Карелия // Ученые записки ПетрГУ. 2014. №8(145).Т.2. С. 78 – 81.

### ***В статьях и материалах конференций***

1. 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.
2. Петров А.Н., Степанов А.В. Оценка качества содержания лесовозных автомобильных дорог // Повышение эффективности лесного комплекса Республики Карелия: материалы третьей республиканской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, докторантов. – Петрозаводск, 2012. – С. 33-35.
3. Степанов А.В. Особенности использования глинистых грунтов при возведении земляного полотна автомобильных дорог // Научно-исследовательская работа студентов: материалы 63-й научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Петрозаводск, 2011. – С.82-83.

4. Степанов А.В., Петров А.Н., Питухин А.В., Рожин Д.В. Результаты экспериментального исследования неровностей на лесовозной автомобильной дороге в зимний период // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов, докторантов. – Петрозаводск, 2014. – С. 56-58.

5. Степанов А.В. Применение наноструктурированного шунгита при устройстве дорожных одежд автомобильных дорог // Программа I отборочного этапа 64-й научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Петрозаводск, 2012. – С.20.

***Учебно – методические работы***

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

2. Петров А.Н. Методика обобщенной комплексной оценки качества и уровня содержания дороги по потребительским свойствам. Петров А.Н., Марков В.И., Степанов А.В., Лопатин А.Ю. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013. – 19 с.

***Отзывы на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями просим высылать по адресу: 185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.190.03 Воронову Р.В.***

Подписано в печать \_\_\_\_\_.2015. Формат 60×84<sup>1/16</sup>  
Бумага офсетная. Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Изд. № \_\_\_\_\_.

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Петрозаводский государственный университет

Отпечатано в типографии Издательства ПетрГУ  
185910, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33