

На правах рукописи

Галактионов Олег Николаевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СКВОЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ЛЕСОСЕЧНЫХ РАБОТ
С РЕЦИКЛИНГОМ ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ**

05.21.01 – Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Петрозаводск – 2016 г.

Работа выполнена на кафедре технологии и организации лесного комплекса ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»

Научный консультант – **Шегельман Илья Романович**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты – **Бурмистрова Ольга Николаевна**, доктор
технических наук, профессор, заведующий
кафедрой технологий и машин лесозаготовок
Ухтинского государственного технического
университета

Шадрин Анатолий Александрович, доктор
технических наук, доцент, профессор кафедры
технологии и оборудования лесопромыш-
ленного производства Московского государ-
ственного университета леса

Куницкая Ольга Анатольевна,
доктор технических наук, доцент, доцент ка-
федры лесозаготовительных производств
Санкт-Петербургского государственного лесо-
технического университета им. С. М. Кирова
ФГБОУ ВО «Братский государственный уни-
верситет»

Ведущая организация –

Защита диссертации состоится 25 марта 2016 г. в 11:00 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

Воронов Роман Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. На Государственном совете в апреле 2013 г. правительству Российской Федерации было поручено разработать «Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года», направленные на повышение вклада лесного сектора в социально-экономическое развитие страны за счет перехода к интенсивной модели использования и воспроизводства лесных ресурсов.

При этом предусматривалось «создание условий, стимулирующих увеличение объемов использования низкотоварной древесины и отходов древесного сырья, в том числе в коммунальной и промышленной энергетике». Очевидно также, что в настоящее время при разработке технологических процессов лесосечных работ не уделяется необходимого внимания проблеме рециклинга лесосечных отходов, т. е. возврата древесных материалов (крон, вершин, неликвидов) в производственный процесс.

Таким образом, актуальность работы состоит в возможности организации эффективного рециклинга лесосечных отходов в производство биотоплива, древесной зелени, технологической щепы для выпуска плит на основе использования сквозных технологических процессов лесосечных работ.

Материалы работы соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства»: «5. Обоснование и оптимизация параметров и режимов работы лесозаготовительных и лесохозяйственных машин; 6. Выбор технологий, оптимизация параметров процессов с учетом воздействия на смежные производственные процессы и окружающую среду; 7. Разработка технологий и систем машин, обеспечивающих комплексное использование древесного сырья и отходов в технологических и энергетических целях; 8. Обоснование технологий и оборудования лесообработывающих производств на лесопромышленных и лесохозяйственных предприятиях».

Степень разработанности темы исследования. Проблемами повышения эффективности вовлечения лесосечных отходов в производственный процесс занимался ряд учреждений (КарНИИЛП, КирНИИЛП, СпбЛТА, ЦНИИМЭ, Архангельский ЛТИ). В частности, разработаны вопросы проектирования и совершенствования техники и технологических процессов лесосечных работ и переработки лесосечных отходов на лесосеке. Проведенные исследования направлены на обоснование технологических процессов производства продукции из лесосечных отходов как независимых процессов и на исследование размерных параметров лесосечных отходов. Значительное количество работ посвящено топливному использованию древесных ресурсов, что привело к узкому рассмотрению лесосечных отходов только как источника энергии. При этом не выработаны рекомендации и принципы формирования сквозных технологий лесосечных работ с рециклингом лесосечных отходов, т. е. процессов, учитывающих состояние сырьевого ресурса

на последовательных стадиях обработки. В представленной диссертации обосновывается решение проблемы использования лесосечных отходов, состоящее в дифференцированном подходе к их использованию, на базе научно обоснованных рекомендаций по формированию сквозных технологических процессов лесосечных работ, обеспечивающих эффективный рециклинг лесосечных отходов.

Объектом исследования являются сквозные технологические процессы заготовки деловой древесины и рециклинга лесосечных отходов.

Предмет исследования – взаимодействие машин сквозных технологических процессов заготовки деловой древесины, обеспечивающих эффективный рециклинг лесосечных отходов.

Цель исследования – повышение эффективности использования лесосечных отходов на основе формирования сквозных технологических процессов лесосечных работ с учетом рециклинга лесосечных отходов.

Для достижения цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Исследовать характер расположения лесосечных отходов на лесосеке в зависимости от природно-производственных факторов и параметров сквозных технологических процессов лесосечных работ.

2. Выявить закономерности и разработать математические модели концентрации биомассы лесосечных отходов на лесосеке при реализации сквозных технологических процессов лесосечных работ.

3. Обосновать комплексный критерий оценки сквозных технологических процессов лесосечных работ, обеспечивающих эффективный рециклинг лесосечных отходов.

4. Разработать методику принятия решения о направлении рециклинга биомассы лесосечных отходов и формирования на этой основе оптимальных сквозных технологических процессов лесосечных работ.

5. Разработать рациональные технологические решения и рекомендации по формированию сквозных технологических процессов лесосечных работ, обеспечивающие эффективный рециклинг биомассы лесосечных отходов.

6. Оптимизировать производительность лесозаготовительных машин в сквозном технологическом процессе с рециклингом лесосечных отходов в различных природно-производственных условиях.

Гипотеза исследования: эффективность выбранного направления рециклинга биомассы лесосечных отходов определяется структурой сквозного технологического процесса лесосечных работ.

Материалом для решения задач служат данные натурных и вычислительных экспериментов, результаты теоретических исследований.

Научная новизна работы состоит в развитии теории сквозных технологических процессов лесосечных работ, заключающейся в разработке методики измерения и установлении закономерностей изменения локальной концентрации лесосечных отходов, учете состояния инфраструктуры лесного участка и технологического оснащения лесозаготовительных машин, поз-

воляющей формировать сквозные технологические процессы лесосечных работ, обеспечивающие эффективный рециклинг лесосечных отходов.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость состоит в разработке методики определения концентрации лесосечных отходов, базирующейся на аналитическом описании вариации концентрации лесосечных отходов по элементам технологической инфраструктуры лесосеки. Полученные результаты позволяют проектным и лесозаготовительным организациям формировать структуру и режим сквозных технологических процессов лесосечных работ, обеспечивающих эффективный рециклинг лесосечных отходов с учетом параметров сырья и продукции, а также условий проведения лесосечных работ, что позволит повысить полезный выход древесного сырья не менее чем на 10–15 %. Практическую значимость работы подтверждает ее выполнение при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 14.574.21.0108 от 20.10.2014 г.

Методология и методы исследования. Методология исследования базируется на общенаучных и специальных методах: теоретическом анализе и математическом моделировании технологических систем, экспериментальных исследованиях концентрации лесосечных отходов и технологии работы лесных машин, методах обработки экспериментальных данных, анализе причинно-следственных связей, функционально-технологическом анализе.

Положения, выносимые на защиту:

1. Классификация сквозных технологий лесосечных работ, включающая концентрацию лесосечных отходов, как параметр, определяющий условия эффективности технологических процессов заготовки деловой древесины и рециклинга лесосечных отходов.

2. Методика оценки концентрации лесосечных отходов, отличающаяся учетом формы обследуемой площади, процедурой измерения элементов лесосечных отходов, способом обработки результатов, учетом инфраструктуры технологического процесса лесосечных работ.

3. Экспериментальная и теоретическая оценка уровня концентрации лесосечных отходов в базовых технологических процессах лесозаготовок как основы для формирования эффективного сквозного технологического процесса с рециклингом лесосечных отходов.

4. Закономерности изменения концентрации лесосечных отходов в сквозных технологических процессах лесосечных работ, зависящие от типа технологического процесса.

5. Закономерности, характеризующие уровень нагруженности волокон в зависимости от их протяженности, схемы размещения, запаса древесины, определяющие эффективность функционирования сквозного технологического процесса лесосечных работ с рециклингом лесосечных отходов.

6. Рекомендации по увеличению концентрации лесосечных отходов, учитывающие особенности функционирования сквозных технологических процессов лесосечных работ при заготовке деловой древесины и позволяю-

щие минимизировать снижение их производительности путем разделения технологических процессов во времени, ориентации валки деревьев, варьирования ширины пазов, выбора места обрезки сучьев.

7. Рекомендации по формированию технологических процессов рециклинга лесосечных отходов, учитывающие требования к ведению лесосечных работ и направленные на повышение эффективности сквозного технологического процесса путем увеличения локальной концентрации биомассы лесосечных отходов – использования возможностей лесозаготовительных машин по транспортировке лесосечных отходов, минимизации протяженности волокон, учета сезонности ведения работ.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов базируется на анализе результатов научно-исследовательских работ, посвященных утилизации лесосечных отходов. Достоверность обеспечивается применением в исследованиях апробированного научно-методического аппарата; сходством результатов выполнения аналогичных измерений в различных природно-производственных условиях, а также результатами сравнения теоретических и экспериментальных данных. При исследовании математических моделей технологических процессов получены результаты, не противоречащие практике лесозаготовительных предприятий и проведенных исследований.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы были представлены на конференциях: «Приграничный регион: наука и инновации» (Петрозаводск, 2014), международная научно-техническая «Леса России в XXI веке» (Санкт-Петербург, 2014), «Технология, машины и производство лесного комплекса будущего» (Воронеж, 2004), «Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике» (Петрозаводск, 2004), «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» (Вологда, 2005), «Наука и устойчивое развитие общества, Наследие В. И. Вернадского» (Тамбов, 2007), «Опыт внедрения устойчивого лесопользования и лесопользования в практику» (Новгород, 2013), «Международная выставка инноваций и технологий Лесдревмаш – 2014» (Москва, 2014), «Новые технологии и устойчивое развитие в лесах Карелии» (Петрозаводск, 2002, 2003), «Проблемно-ориентированные исследования процессов инновационного развития региона» (Петрозаводск, 2013).

Содержание работы изложено в 21 публикации в журналах, рекомендованных ВАК для представления результатов научных исследований.

Работа выполнена на 315 страницах, содержит 5 разделов, 96 иллюстраций, 78 таблиц, 299 формул.

В первом разделе раскрыто состояние НИОКР в области рециклинга древесных отходов.

Вопросами совершенствования техники и технологии лесосечных работ как основного процесса занимались отечественные и зарубежные ученые В. Г. Кочегаров, С. Ф. Орлов, В. И. Алябьев, И. Р. Шегельман, А. К. Редькин, А. М. Цыпук, Ю. Ю. Герасимов, В. С. Сюнев, В. С. Суханов, М. В. Гомонай, Р. Hakila.

Компоненты лесосечных отходов и их соотношение изучались в работах МГУЛ, ГНЦлеспром КарНИИЛП, КирННИЛП, СПбГЛТУ, ЦНИИМЭ, САФУ, Поволжский ГТУ, Воронежской ВГЛТУ, ПетрГУ, Ухтинский ГТУ.

Оборудование для организации технологических процессов по утилизации лесосечных отходов на лесосеке разрабатывалось в КарНИИЛПе, параметры оборудования обосновывались в работах В. С. Суханова, М. В. Гоманая, И. Р. Шегельмана, В. В. Коробова, Н. П. Рушнова, С. Б. Васильева.

Технологические процессы рециклинга лесосечных отходов и экономики использования лесосечных отходов рассмотрены в работах Р. И. Томчука, Г. М. Михайлова, Н. А. Серова, В. И. Патыкина, С. Б. Васильева, В. Л. Никишова, Э. Д. Левина, А. П. Петрова, Р. Hakila, A. Asikainen, P. G. De Vries, E. Alakangas, B. Hilring и др.

Проведенные ранее исследования направлены на обоснование технологических процессов производства заданных видов продукции, при этом отсутствуют научно обоснованные рекомендации по оптимизации выбора направления рециклинга биомассы лесосечных отходов в рамках сквозных технологий лесосечных работ.

Проведенные ранее исследования, направленные на обоснование технологических процессов лесосечных работ, не позволили обосновать принципы формирования сквозных технологических процессов лесосечных работ с учетом направлений рециклинга биомассы лесосечных отходов.

Во втором разделе рассмотрены общие проблемы формирования сквозных технологических процессов лесосечных работ с рециклингом биомассы лесосечных отходов.

Существующие классификации технологических процессов лесосечных работ, разработанные в трудах проф. С. Ф. Орлова и дополненные в связи с появлением многооперационных машин проф. В. Н. Меньшиковым, а также проанализированные на основе функционально-технологического анализа (проф. И. Р. Шегельман), включают в себя следующие группы процессов: с вывозкой деревьев; с вывозкой хлыстов; с вывозкой сортиментов.

В процессах рециклинга лесосечных отходов выделены две группы технологических процессов – массовые и специализированные. Их выделение обусловлено применением совершенно разного оборудования, получением продукции с разным уровнем переработки, значительной разницей в производительности машин в указанных группах.

Кроме того, процессы рециклинга лесосечных отходов разделим на две подгруппы – с получением товарной продукции и без получения товарной продукции. Вторая подгруппа включает использование отходов лесозаготовок как строительного материала, удобрения лесных почв. В указанных подгруппах по-разному производится расчет экономической эффективности.

Развитие технологии лесосечных процессов, разнообразие направлений и перспектив использования лесосечных отходов требуют изменения принципов **классификации процессов рециклинга лесосечных отходов:**

- с неопределенным видом продукции: массовая переработка лесосечных отходов;
- с определенным видом продукции: необработанные лесосечные отходы (рассыпные); прессованные лесосечные отходы (пачки или брикеты); измельченные лесосечные отходы (щепа); сортированные лесосечные отходы (древесная зелень); без вывозки транспортировки (строительный материал).

Вид вырабатываемой продукции практически однозначно определяет тип процесса рециклинга лесосечных отходов, для которого необходимо найти оптимальные условия взаимодействия с основным технологическим процессом.

Определение области использования для группы технологических процессов является важнейшим следствием классификации. Под областью использования понимаем территориальное размещение, условия сочетаемости процессов, временные и производительные показатели.

Особенностью предлагаемой системы критериев является учет взаимодействия технологических процессов и концентрации лесосечных отходов.

Предлагается следующая система критериев оценки технологических процессов лесосечных отходов с рециклингом лесосечных отходов.

Производительность основного процесса. Максимум производительности достижим при следующих условиях: минимизации требований к размерно-качественным характеристикам продукции процесса рециклинга лесосечных отходов; разделения процесса рециклинга и основного технологического процесса во времени; разделения в пространстве.

Наивысшая производительность процесса рециклинга лесосечных отходов достижима при: максимуме локальной концентрации лесосечных отходов; минимальных требованиях к продукции; размещении процесса рециклинга с разделением по времени с основным процессом.

Управляемость технологического процесса характеризует возможность его модификации под производство того или иного конечного продукта. При анализе технологических процессов лесосечных работ показана их достаточная гибкость, что позволяет характеризовать управляемость соотношением производительностей в разном сочетании технологических процессов.

Сочетаемость основного технологического процесса и процесса рециклинга лесосечных отходов определяется требованиями, предъявляемыми к конечной продукции (в рамках лесосеки), и в конечном итоге производительностью процессов ($\Pi_{баз}$). Выпуск специализированной продукции приводит к снижению производительности основного технологического процесса ($\Pi_{баз+рец}$) и снижению сочетаемости.

Уровень сочетаемости рассчитаем следующим образом:

$$I = \frac{\Pi_{баз+дон}}{\Pi_{баз}} \cdot \quad (1)$$

Удельные затраты. Затраты на основную продукцию рассчитываются рекомендуемыми методами с учетом технологических операций, направ-

ленных на увеличение концентрации лесосечных отходов, снижение потерь времени при оставлении более длинных отрезков некачественной древесины, изменение схемы движения лесозаготовительных машин и т. д.

Результаты моделирования заготовки древесной зелени (рис. 1) показывают, что величина удельных затрат быстро растет с уменьшением доли заготавливаемого сырья. При изменении величины параметров технологической системы критерий демонстрирует жесткость и показывает несогласованность их параметров (рис. 1).

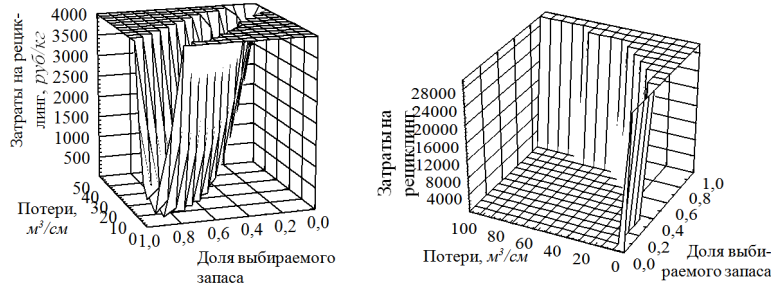


Рис. 1. Затраты на производство дополнительной продукции при использовании различных типов основных технологических процессов

Локальная концентрация сырья. Является основой для взаимодействия технологических процессов лесосечных работ и характеризуется:

- измеримостью;
- связью с основным технологическим процессом и процессом рециклинга;
- применимостью ко всем технологическим процессам и операциям;
- независимостью от внешних условий;
- связью с параметрами оборудования.

Локальная концентрация сырья или готовой продукции измеряется в единицах массы или объема на единицу площади ($кг/м^2, м^3/м^2$).

Перечисленные критерии используются для оценки эффективности сквозных технологических процессов лесосечных работ с рециклингом лесосечных отходов.

Рассмотрим теоретические основы описания концентрации лесосечных отходов и ее влияние на сквозные процессы лесосечных работ.

Ранее получен ряд регрессионных зависимостей максимума локальной концентрации лесосечных отходов от ряда параметров древостоя и инфраструктуры лесосеки:

$$\rho_{max} = e^{a_0 + a_1 \Delta + a_2 k + a_3 \cos \alpha + a_4 N_{\delta} k + a_5 b \cos \alpha} * e^{a_6 H \sin \alpha + a_7 C + a_8 \ln(d_{\delta} H) + a_9 R + a_{10} k \Delta + a_{11} N_{\delta} k \Delta} \quad (2)$$

В данной работе получена аналитическая зависимость локальной концентрации лесосечных отходов на пасеке в зависимости от запаса древесины, ширины пасеки и расстояния от волока:

$$\rho_{нас} = \frac{qk_{кр} k_{техн} b}{b - l_{б.э.} \sin \alpha + x} \quad (3)$$

где b – ширина пасеки, m ; k – доля породы в древостое; α – угол валки деревьев, град; N_{δ} – число стволов, $шт$; d_{δ} – средний диаметр дерева на высоте груди, $см$; H – средняя высота дерева, $м$; C – сезон; R – разряд высоты деревьев; $a_0, a_1 \dots a_{11}$ – коэффициенты регрессии; q – запас, $м^3/га$; $k_{кр}$ – доля кроны от стволового запаса; $k_{техн}$ – доля отпада кроны в технологическом процессе; x – расстояние от волока до наблюдаемой точки на пасеке, $м$.

Зависимость (2) позволяет проводить анализ лесосечного процесса с целью управления положением максимальной концентрации лесосечных отходов (рис. 2; 1 – хлыстовая трелевка ТБ-1; 2 – хлыстовая трелевка ТДТ-55; 3 – сортиментная технология, вальщик) и выработки обоснованных рекомендаций для процессов рециклинга лесосечных отходов.

Таким образом, концентрация лесосечных отходов это определяющий фактор для анализа эффективности сквозных процессов.

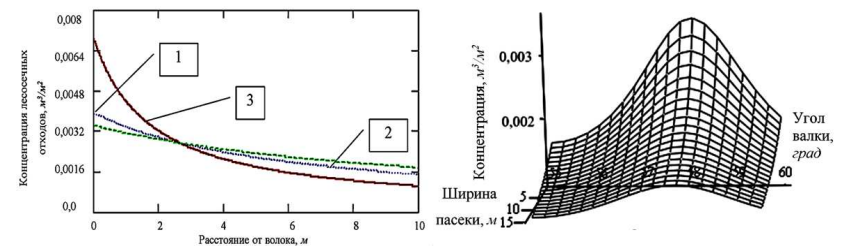


Рис. 2. Концентрация лесосечных отходов на пасеке

В теоретическом анализе сквозных технологических процессов лесосечных работ получим взаимосвязь концентрации лесосечных отходов с производительностью технологических процессов.

Производительность процесса рециклинга лесосечных отходов, базирующегося на использовании мобильной рубительной машины, определяется концентрацией лесосечных отходов, задающей количество пачек лесосечных отходов, взятых с рабочей стоянки ($n_{п}$), и число перехватов при обработке порции лесосечных отходов ($n_{нх}$):

$$T_{ц} = t_{пер} + (t_{нав} + t_{зах} + t_{доств} + t_{руб} + n_{нх} t_{нх}) * n_{п} + t_{хх} + t_{зх} + t_{выгр}, \quad (4)$$

где $t_{пер}$ – время на переезд к рабочей стоянке, $с$; $t_{нав}$, $t_{зах}$, $t_{доств}$ – время на наведение, захват и доставку лесосечных отходов в кузов, $с$; $t_{руб}$ – время на удержание пачки лесосечных отходов у приемного устройства рубительного барабана, $с$; $t_{выгр}$ – время выгрузки щепы или отцепки контейнера, $с$; $t_{хх}$, $t_{зх}$ – время грузового и холостого ходов, $с$; $t_{нх}$ – время перехвата, $с$.

Количество перехватов ($n_{пх}$) при работе мобильной рубительной машины, манипуляторного подборщика или пакетформирующей машины определим по формуле:

$$n_{пх} = \frac{\rho_{лок}}{S_{зах} k_{П}}, \quad (5)$$

где $\rho_{лок}$ – локальная концентрация лесосечных отходов, $м^3/м^2$; $S_{зах}$ – площадь просвета захвата, $м^2$.

Объем лесосечных отходов, доступный машине с манипулятором: при равномерной концентрации лесосечных отходов:

$$V_{ол} = (\pi l_{мак}^2 - AB) \rho_{лок}; \quad (6)$$

при неравномерной концентрации:

$$V_{ол} = (\pi l_{мак}^2 - AB) \rho_{ср} \quad (7)$$

$$\rho_{ср} = \frac{S_{сег} \rho_{нас} + 2l_{мак} \Delta \rho_{вол}}{\pi l_{мак}^2}, \quad (8)$$

где $l_{мак}$ – вылет манипулятора, $м$; A, B – длина и ширина пачки, $м$; $S_{сег}$ – площадь сегмента, образованного краем волока и окружностью, описываемой манипулятором на максимальном вылете, $м^2$; $\rho_{нас}$, $\rho_{вол}$ – концентрация лесосечных отходов на пачке и волоке, $м^3/м^2$; Δ – ширина волока, $м$.

Совокупность формул (3), (7), (8) представляет аналитические зависимости концентрации лесосечных отходов от параметров оборудования (вылет манипулятора, длина сортиментов) и характеристик древостоя (запас, объем ствола, порода).

Минимальный уровень концентрации соответствует равномерному расположению лесосечных отходов, при среднем объеме ствола $V_{сл}$, среднем расстоянии между деревьями l_0 он составит:

$$\rho_{мин} = \frac{V_{сл} k_{кр}}{\pi l_0^2}, \quad м^3/м^2. \quad (9)$$

Максимальный уровень концентрации соответствует расположению всей массы лесосечных отходов на ограниченной площадке.

Харвестер обеспечивает концентрацию стволовой древесины на уровне:

$$\rho_{нас} = \rho_{л} \frac{2b}{l_{срм}}, \quad м^3/м^2, \quad (10)$$

где $\rho_{л}$ – исходная концентрация древесины на лесосеке, $м^3/м^2$; $l_{срм}$ – средняя длина сортимента, $м$; b – ширина пачки, $м$.

На волоке соответственно:

$$\rho_{вол} = \rho_{л} \frac{k_{кр} 2b}{\Delta}. \quad (11)$$

При необходимости изменить величину концентрации, руководствуясь полученными формулами, определяют параметры и величину, на которые их необходимо изменить в технологическом процессе.

В основном технологическом процессе понятие локальной концентрации применимо к деревьям, породам, хлыстам, виду сортиментов:

$$\rho_x = \rho_{л} k_i \frac{2b}{l_{срм}}, \quad (12)$$

где $\rho_{л}$ – концентрация стволовой древесины на лесосеке, $м^3/м^2$; k_i – доля содержания i -го сортимента в общем объеме древесины.

При рециклинге понятие локальной концентрации применяется к лесосечным отходам.

Для повышения величины локальной концентрации возможны следующие воздействия на технологический процесс: трелевка деревьев за вершину; использование машин основного технологического процесса для накопления и перемещения лесосечных отходов; обрезка сучьев на погрузочных площадках; перемещение вальщиками лесосечных отходов на волок; включение в технологический цикл харвестеров операции перемещения лесосечных отходов, в том числе с целью их сортировки; организация работы харвестера таким образом, при котором крону с деревьев, доступных с одной рабочей стоянки, обрезают в ограниченной области; валка деревьев кроной на волок; увеличение вылета манипулятора.

Кроме концентрации лесосечных отходов, для оценки эффективности сходных технологических процессов используем скорость роста концентрации лесосечных отходов на площади лесосеки:

$$v_x = \frac{\rho_{л} \pi l_{ман}^2}{T_{ц}^x}. \quad (13)$$

Параметром, определяющим эффективность сквозных технологических процессов, является место образования лесосечных отходов: пачка, волок (трелевочный, магистральный), разделочная площадка, погрузочный пункт.

Изменение величины данного параметра происходит при следующих условиях: применение харвестеров; применение ВПМ; трелевка деревьев; трелевка деревьев за вершины.

Таким образом, разработана система оценки сквозных технологических процессов работ, заключающаяся в том, что, наряду с общеизвестными критериями, в нее включены: концентрация продукции и отходов, сочетаемость технологических процессов.

Исследование изменения критериев для технологических процессов лесосечных работ в зависимости от внешних условий (параметров лесосеки, характеристик древостоя) показало, что наиболее чувствителен к изменению параметров технологический процесс лесосечных работ на базе вальщиков и трелевочных тракторов, а нечувствителен (стабилен) – с трелевкой деревьев и обрезкой сучьев на погрузочном пункте.

Изменение величины критериев при использовании технологических процессов на базе ВПМ может достигать 81,9 %. Для технологических

процессов на базе харвестеров и форвардеров изменение величины критериев составляет около 11,9 %.

Разработка математических моделей основных технологических процессов лесосечных работ.

Аналитическое описание (формулы 3, 7, 8) концентрации лесосечных отходов и производительности основного технологического процесса позволило получить выражение для концентрации лесосечных отходов в зависимости от параметров природно-производственных процессов:

- для вальщика:

$$\rho_{нас} = \frac{120 V_{xl} qk_{кр} k_{техн} b}{(b - l_{б.з.} \sin \alpha + x) \left(\frac{3600 (T_{см} - t_{пз}) V_{xl} f_1}{\Pi_{вал}^{см}} - \right)^2} \dots \rightarrow$$

$$\rightarrow \dots \frac{1}{\frac{\pi d_{cp}^2}{4} - 0.8 sd_{cp} \left(1 + \frac{d_{cp}^2}{B_{ин} d_{cp}} \right) - t_3 + t_{дон} - t_{нпр}}$$

$$+ \frac{0.5 \Pi_{ин}}{0.5 \Pi_{ин}} \left(1 + \frac{d_{cp}^2}{B_{ин} d_{cp}} \right) - t_3 + t_{дон} - t_{нпр}$$

(14)

- для ВПМ:

$$\rho_{нас} = \frac{k_{кр} k_{техн}}{(b + l_{б.з.} \sin \alpha + x) \left(\frac{10^3 (T_{см} - t_{пз}) V_{xl} f_2}{\Pi_{впм}^{см} \left(\frac{l_{мак} - l_{мин}}{v_{сп}} \right)} - \frac{t_1}{3.6 \left(\frac{l_{мак} - l_{мин}}{v_{сп}} \right)} \right)}$$

(15)

- для харвестера:

$$\rho_{нас} = \frac{M_{II} qk_{кр} k_{техн}}{av_{xx} (b - l_{б.з.} \sin \alpha + x) \left(\frac{3600 (T_{см} - t_{пз}) V_{xl} f_{см}}{\Pi_{хрв}^{см}} - \Sigma t \right)}$$

(16)

Исследование эффективности использования лесосечных отходов для строительства волоков.

Для устойчивого функционирования технологического процесса часть лесосечных отходов направляют на укрепление волока. Исследование взаимодействия движителя и опорной поверхности, а следовательно, и изменения скорости движения позволит определить экономический эффект от использования слоя лесосечных отходов.

Для определения взаимодействия колеса лесозаготовительной машины со слоем лесосечных отходов и грунтом на волоке определены площадь их контакта в зависимости от рейсовой нагрузки на машину.

Величина потерь на движение лесозаготовительной машины из-за динамической деформации движителя принята незначительной, и учитывалась только статическая деформация.

При форме площадки контакта в виде эллипса ее площадь составит:

$$S_k = \pi \frac{b_0 l_k}{4} = \pi \frac{b_0 \left(\sqrt{2r_k^2 \left(1 - \cos \left(\arcsin \left(\frac{2G}{pb_k r_k^2} \right) \right) \right)} \right)}{4},$$

(17)

где b_0 – длина малой оси эллипса – ширина беговой дорожки колеса, м; l_k – длина большой оси эллипса – длина площадки контакта, м.

Давление колеса на опорную поверхность:

$$P = \frac{G}{S_k} = \frac{4G}{\pi b_k \left(\sqrt{2r_k^2 \left(1 - \cos \left(\arcsin \left(\frac{2G}{pb_k r_k^2} \right) \right) \right)} \right)}$$

(18)

Приведенная методика дает хорошие результаты при определении статической деформации для широкопрофильных шин лесозаготовительных машин (ошибка менее 3 %).

Аналитическая зависимость (18) позволяет связать параметры движения лесозаготовительной машины и ее рейсовую нагрузку с состоянием волока.

В третьем разделе изучены характеристики лесосечных отходов как источника вторичных ресурсов.

Основные характеристики лесосечных отходов, влияющие на производительность и направление рециклинга лесосечных отходов, эффективность их использования, включают в себя: концентрацию, объем, размеры, прочность, содержание компонентов, влажность.

Локальная концентрация лесосечных отходов зависит от способа их образования; с ростом случайных потерь снижается объем экономически доступных лесосечных отходов и снижается производительность технологического процесса рециклинга.

Размерные и прочностные характеристики лесосечных отходов влияют на эффективность укрепления волоков. Например, длинномерные лесосечные отходы позволяют дольше поддерживать уровень проходимости лесозаготовительной техники. Соотношения различных размерных групп в лесосечных отходах исследовались в КарНИИЛПе, КирНИИЛПе, ЛТА.

Содержание компонентов и влажность оказывают влияние на эффективность использования лесосечных отходов как топлива. На рис. 4 показаны изменения энергосодержания древесного топлива в зависимости от влажности и состава смеси.

Основные направления рециклинга лесосечных отходов следующие: строительство волоков, производство топлива, технологической и топливной щепы, заготовка древесной зелени, производство древесного угля.

Среди направлений рециклинга выделим массовое и специализированное: первое – обращено на всю массу лесосечных отходов с низкими требованиями по размерам, качеству, составу; второе – направлено на компоненты, отвечающие определенным требованиям по качеству и размерам.

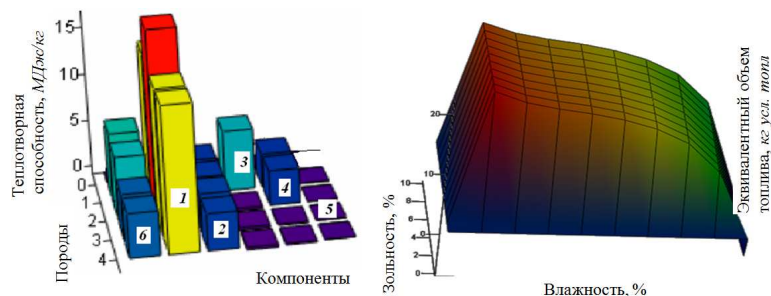


Рис. 4. Теплотворная способность лесосечных отходов в зависимости от состава:

1 – древесина; 2 – кора; 3 – крона; 4 – хвоя; 5 – гниль; 6 – среднее значение для смеси

Примеры массовых направлений рециклинга: энергетическое, укрепление волоков и строительство усов, производство щепы.

Примеры специализированных направлений: пиленая продукция, заготовка древесной зелени, производство древесного угля.

Основные признаки специализированного направления: использование только части ресурсов лесосечных отходов; переработка узкой группы компонентов; высокая себестоимость продукции.

Таким образом, в условиях лесосечных работ технологии рециклинга лесосечных отходов необходимо выбирать на основе массовой их переработки, с высоким уровнем утилизации и базируясь на типовом технологическом оборудовании.

Экспериментальное исследование концентрации лесосечных отходов.

Для исследования концентрации лесосечных отходов использован метод линейных пересечений.

В процессе измерений концентрации предварительно определяют следующие параметры элементов лесосечных отходов: размеры элементов (диаметры, длины), средние показатели. Обработка результатов исследований позволяет получить информацию о концентрации лесосечных отходов в зависимости от технологического процесса лесосечных работ.

Методика проведения эксперимента включает: характеристику лесосеки и технологического процесса – вид рубки, запас, размеры лесосеки, ширину волоков и пасек; выделение типичного участка лесосеки; разметку обследуемой площадки; измерения; определение уровня концентрации; расчет параметров лесосечных отходов для совокупности.

Измерения проведены: для выборочных и сплошных рубок; для трелевки в хлыстах, деревьях и сортиментах; для вальщиков, ВПМ и харвестеров; на волоках и пасеках.

Средний диаметр элементов лесосечных отходов определен по формуле:

$$\bar{X} = \frac{\pi S W}{G} \bar{x} \sum_{i=0}^n \frac{1}{l_i}, \text{ м.} \quad (19)$$

Средняя концентрация лесосечных отходов определена по формуле:

$$\rho = \frac{\pi}{G} \sum_{i=0}^n \frac{x_i}{l_i}, \text{ м}^3/\text{м}^2. \quad (20)$$

С учетом использования объектов постоянной длины и прямоугольной формы пробных участков формула (20) принимает вид:

$$\rho = \frac{\pi \sum_{i=0}^n d_i^2}{2,83 l_{\text{ср}}}, \text{ м}^3/\text{м}^2. \quad (21)$$

Результаты исследований концентрации лесосечных отходов.

Южная Карелия, Олонецкое лесничество, лесной участок ЗАО «Шуялес». Трелевка древесины в хлыстах, за вершины, трактором с тросочерным оборудованием. Концентрация лесосечных отходов на пасеке в штучном выражении приведена на рис. 5, а. Уровень концентрации растет по направлению к волоку. Максимальный уровень $0,075 \text{ м}^3/\text{м}^2$.

Трелевка в сортиментах. Максимальный уровень концентрации лесосечных отходов на пасеке составляет $0,008 \text{ м}^3/\text{м}^2$ вблизи волока (рис. 5, б).

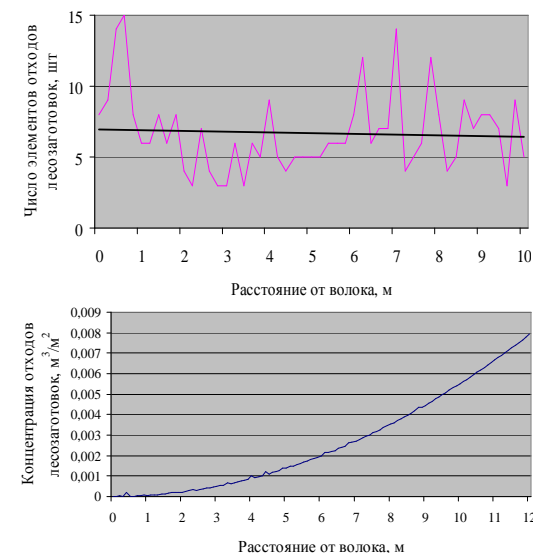


Рис. 5. Концентрации лесосечных отходов на пасеке:
а – при хлыстовой трелевке; б – при сортиментной трелевке (харвестер)

Средняя Карелия, Лососинское лесничество, лесной участок ООО «Лесма». Исследовано распределение лесосечных отходов при проведении выборочных рубок (выборка 30 %). Работы проводились вальщиками и форвардером ЛТ-189. Максимальный уровень концентрации лесосечных отходов составил $0,02 \text{ м}^3/\text{м}^2$ (рис. 6).



Рис. 6. Концентрация при выборочных сортиментных рубках

Одновременно проводился анализ концентрации лесосечных отходов на волоке, данные представлены на рис. 7. Большая часть лесосечных отходов размещается на волоке с концентрацией $0,035 \text{ м}^3/\text{м}^2$. Определен коэффициент полндревесности для лесосечных отходов на волоке – $0,17$.

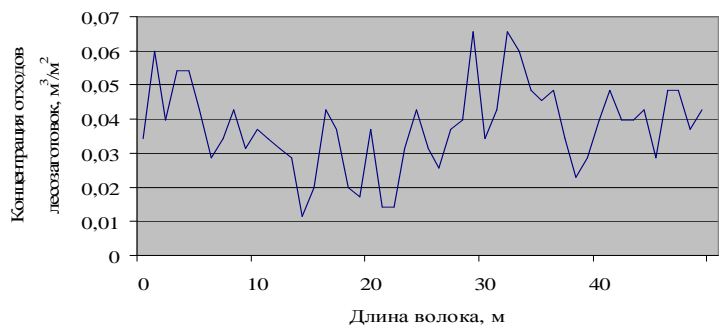


Рис. 7. Концентрация лесосечных отходов на волоке

Западная Карелия, Суоярвское лесничество, лесной участок ОАО «Запкареллес». Измерена концентрация лесосечных отходов после сплошных рубок ВПМ – скиддер. Максимальная концентрация на пасаках и волоках составила $0,0054 \text{ м}^3/\text{м}^2$, тенденций в расположении не выявлено. Основная масса лесосечных отходов собрана на верхнем складе.

Средняя Карелия, Прионежское лесничество, лесной участок КСК «Строитель». Измерена концентрация лесосечных отходов после сплошных рубок на базе бесчokerного трелевочного трактора и вальщика. Концентрация составила $0,005 \text{ м}^3/\text{м}^2$. Особенность технологического процесса – использование бесчokerного трактора на сборе лесосечных отходов после обрезки сучьев, что привело к высокому уровню их концентрации – $0,4 \text{ м}^3/\text{м}^2$.

Проведено исследование лесосечных отходов после уборки лесосек. Встречались следующие типы размещения лесосечных отходов: равномерно на волоках – $0,03 \text{ м}^3/\text{м}^2$, равномерно на волоках – $0,003 \text{ м}^3/\text{м}^2$ и небольшими

скоплениями на пасаках – $0,0002 \text{ м}^3/\text{м}^2$, крупными скоплениями на лесосеке – от $0,01$ до $0,4 \text{ м}^3/\text{м}^2$, без тенденций в расположении, максимальная плотность на погрузочных пунктах до $0,5 \text{ м}^3/\text{м}^2$. Локальная концентрация составила от $0,003$ до $0,5 \text{ м}^3/\text{м}^2$.

Обобщенные данные уровня локальной концентрации лесосечных отходов в зависимости от типа технологического процесса и места их нахождения приведены в табл. 1.

Таким образом, получено экспериментальное описание локальной концентрации лесосечных отходов на лесосеке, изучены их размерные параметры. Подтверждены результаты моделирования, и создана база для формальной оптимизации сквозных технологических процессов лесосечных работ с рециклингом лесосечных отходов.

Таблица 1

Локальная концентрация лесосечных отходов в зависимости от технологии лесозаготовок и места образования, $\text{м}^3/\text{м}^2$

Тип процесса	Базовый агрегат	Пасака	Волок	Погрузочный пункт	Примечание
Сортиментный	Бензопила	0,0027	0,032	0,002	Без уборки
Сортиментный	Бензопила	0,06	0,04	0,002	С уборкой
Сортиментный	Бензопила	0,008	0,008	–	Выборочные, 30 %
Сортиментный	Харвестер	0,0027	0,04	0,002	
Сортиментный	ВПМ	0,0052	0,0052	0,24	Харвестер (процессор)
Сортиментный	Бесчokerный	0,003	0,003	0,24	
Хлыстовой	Тросчokerный	0,031	0,031	0,002	
Хлыстовой	Тросчokerный	0,027	0,027	0,002	
Деревья	ВПМ	0,0052	0,0052	0,24	
Уборка лесосек	Ручная			0,4	После разработки
Уборка лесосек	Ручная	0,06	0,04	0,002	В процессе разработки
Фон	–	7,8E-6	7,8E-6	–	Диаметр элементов менее 5 мм

Проведены исследования ресурсов тонкомерной древесины, пригодной для использования в целом виде. Тонкомерная древесина формируется в ходе сплошных рубок при обрезке вершин, также в эту группу попадают вырубаемые деревья подроста. В табл. 2 приведены статистические характеристики размеров тонкомерной древесины, на рис. 8 показаны соответствующие гистограммы. Тонкомерная древесина практически отсутствует при работе харвестера (процессора).

Таблица 2

Характеристики тонкомера из лесосечных отходов

Параметр	Диаметр	Длина
Среднее значение	6,9	4,2
Число измерений, шт	142	142
Дисперсия	6,3	5,5
Стандартное отклонение	2,5	2,3
Стандартная ошибка	0,2	0,2

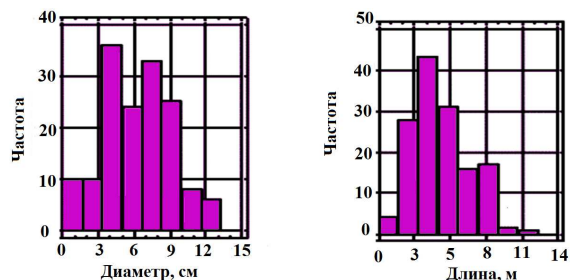


Рис. 8. Гистограммы распределения тонкомерной древесины по размерам

Таким образом, получены данные о концентрации лесосечных отходов в технологических процессах лесосечных работ в зависимости от вида процесса и места расположения лесосечных отходов. Это позволит в дальнейшем формировать эффективные сквозные технологические процессы лесосечных работ с рециклингом лесосечных отходов.

В четвертом разделе исследованы направления минимизации использования лесосечных отходов в строительстве волоков, для увеличения доли лесосечных отходов в промышленной переработке.

Теоретической основой определения нагруженности волока, при работе лесозаготовительной машины, служит изменение расстояния трелевки на одну и ту же величину, определяемую рейсовой нагрузкой. Количество проходов трактора через сечение волока:

$$n_i = N - i, \quad (22)$$

то же с учетом параметров древостоя и рейсовой нагрузки:

$$n_i = 2t \frac{a \cdot b \cdot q_d}{14400 \cdot \pi \cdot M_p} \left(1 - \frac{L_{тек}}{L_{max}}\right), \quad (23)$$

где t – число лент (при использовании метода узких лент); a, b – размеры лесосеки, m ; M_p – рейсовая нагрузка, m^3 ; $L_{тек}, L_{max}$ – расстояние трелевки по волоку, текущее и максимальное, m .

На рис. 9 показано изменение нагруженности волока при работе трелевочного трактора в зависимости от условий ведения лесосечных работ.

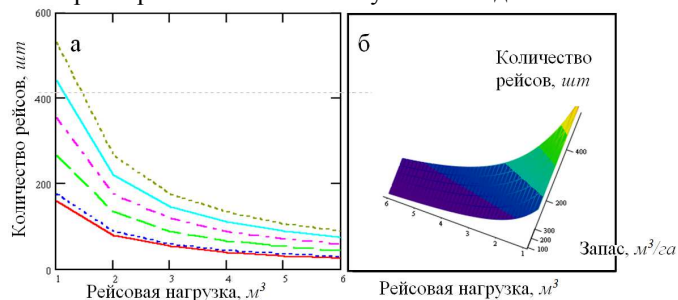


Рис. 9. Нагруженность волока в зависимости от запаса и рейсовой нагрузки

В процессе моделирования нагруженности волока установлено, что ее уровень возрастает по мере приближения к погрузочному пункту, при этом скачок нагруженности волока происходит вблизи примыкания другого волока. Для высвобождения ресурсов лесосечных отходов укрепление волоков необходимо вести пропорционально их нагруженности.

Для исследования зависимости между объемом лесосечных отходов, направленных на обустройство волоков, и несущей способностью грунтов проведены полевые эксперименты по изучению влияния концентрации лесосечных отходов на состояние грунта при проходе трелевочной машины.

Методика исследования необходимого объема лесосечных отходов для укрепления волоков направлена на оценку деформации грунта при проходе лесозаготовительного агрегата по волоку с различной концентрацией лесосечных отходов.

Исследования проведены на песчаном и суглинисто-торфянистом грунте. Использована аппаратура: ударник ДорНИИ, тензодатчики, усилитель и АЦП, программное обеспечение. Предварительно проведены лабораторные исследования на смоделированном образце почвы.

Лесосечные отходы длинами 0,7 м, диаметрами от 2 до 70 мм, предварительно сформированные в пачки массой 2 кг, укладывались на волок по пути следования лесозаготовительной машины. На глубине 150 мм закладывались тензодатчики, связанные кабелем с усилителем сигнала и АЦП. Получаемые данные о степени деформации тензодатчика обрабатывались программами RealLab, Excel.

Установлено, что для сохранения несущей способности волока, обеспечивающей выполнение сменного задания, например (табл. 3), для суглинисто-торфянистых грунтов требуется все имеющиеся лесосечные отходы направить на строительство волоков. Также исследования показали, что минимальный уровень использования лесосечных отходов на строительстве волоков составляет $0,023 \text{ м}^3/\text{м}^2$ для колесных и $0,012 \text{ м}^3/\text{м}^2$ для гусеничных машин, что позволяет высвободить до 120 м^3 лесосечных отходов на лесосеке (табл. 3).

Анализ табл. 3 показывает, что на грунтах 2-го и 3-го типа местности наблюдается дефицит лесосечных отходов, и для увеличения их свободных объемов необходимо учитывать варьирование влажности различных участков лесосеки, осваивать увлажненные лесосеки в морозный период, останавливать лесозаготовки на период максимального увлажнения грунтов.

На лесных участках с высоким уровнем увлажнения, с учетом использования лесосечных отходов, сохранение производительности сквозного технологического процесса лесосечных работ на первоначальном уровне невозможно. Дополнительные ограничения на сохранение производительности сквозного технологического процесса лесосечных работ накладывает ограничение ресурсов лесосечных отходов.

Таблица 3

Объем лесосечных отходов, доступный для рециклинга с учетом уровня несущей способности волоков и их нагруженности, m^3

Тип машины	Гусеничные машины			Колесные машины		
	Доля возврата несущей способности волоков					
	0,2	0,4	0,6	0,2	0,4	0,6
1-й тип местности, относительная влажность менее 0,75						
Песок	120	120	120	120	-280	-680
Супесь	120	120	120	120	-280	-680
Суглинок	120	120	-280	120	-280	-680
Глина	-280	-280	-680	120	-280	-680
Торф	-280	-280	-1080	-	-	-
2-й тип местности, относительная влажность от 0,75 до 0,9						
Песок	-280	-280	-1080	-280	-680	-1480
Супесь	-280	-280	-1080	-280	-680	-1480
Суглинок	-680	-680	-1480	-280	-680	-1880
Глина	-	-	-	-	-	-
Торф	-	-	-	-	-	-
3-й тип местности, относительная влажность более 0,9						
Песок	-280	-680	-1080	-280	-680	-1480
Супесь	-280	-680	-1080	-280	-680	-1480
Суглинок	-680	-680	-1480	-280	-680	-1480
Глина	-	-	-	-	-	-
Торф	-	-	-	-	-	-

Таким образом, использование лесосечных отходов для строительства волоков пропорционально нагруженности волока и заданной величине возврата несущей способности позволяет стабилизировать производительность основного технологического процесса из-за снижения вероятности буксования, увеличения скорости передвижения, снижения трения о стенки колеи, а также увеличить количество ресурсов лесосечных отходов для рециклинга.

В пятом разделе приведены результаты экспериментального исследования модуля упругости лесосечных отходов. Для определения условий движения лесозаготовительных машин по слою отходов необходимо определить их характеристики, в частности модуль упругости при сжатии.

Характеристики древесных материалов определялись неоднократно, однако условия нагружения массивов лесосечных отходов существенно отличаются от исследованных случаев: хаотичное расположение, различные размеры, расположение отходов на упругом основании, неправильная форма составляющих отходов – все перечисленное указывает на необходимость проведения специальных исследований.

Методика исследований. Исследования проведены на лесосеке по окончании лесозаготовительных работ. Сформированы и обмерены связки лесосечных отходов. Отмечены особенности исследуемых лесосечных

отходов – породы, содержание крупномера, сухостойного и детритного материала. Установкой грузов заданной массы на вершину кучи лесосечных отходов ее сжимали, и измеряли величину вертикальной деформации.

Распределение полученных данных соответствует логнормальному закону (99 %). На рис. 10 приведена гистограмма опытных данных.

Часть результатов по определению модуля упругости лесосечных отходов приведена в табл. 4. На рис. 11 приведены графики, описывающие изменение модуля упругости в зависимости от нагрузки.

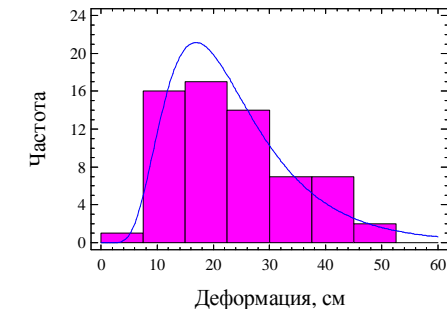


Рис. 10. Гистограмма значений деформации куч лесосечных отходов

Таблица 4

Модуль упругости массивов лесосечных отходов

Высота, м	Нагрузка, Н			Относительная деформация			Площадь, m^2	Модуль упругости, $кПа$		
	выборка			выборка				выборка		
	1	2	3	1	2	3		1	2	3
0,42	700	1450	2150	0,21	0,29	0,43	1,54	2,12	3,29	3,26
0,60	700	1450	2150	0,25	0,42	0,45	1,54	1,82	2,26	3,11
1,30	700	1450	2150	0,12	0,19	0,27	1,54	3,94	4,90	5,19
0,60	700	1450	2150	0,17	0,27	0,32	1,23	3,42	4,43	5,54
0,55	700	1450	2150	0,13	0,27	0,31	1,23	4,48	4,33	5,67
Средние	700	1450	2150	0,21	0,29	0,33	1,85	3,21	4,35	4,94

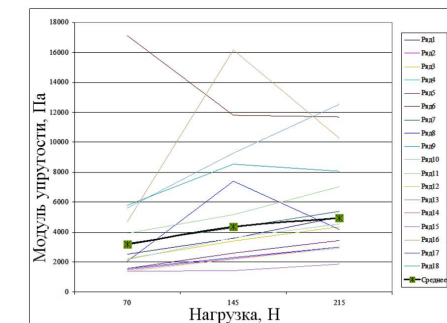


Рис 11. Изменение модуля упругости при сжатии слоев лесосечных отходов

Особенность деформирования слоя лесосечных отходов в том, что при малых нагрузках относительная деформация значительна: в среднем 0,18, минимум 0,12, что выходит за линейный участок диаграммы нагружения для монолитных материалов (обычно не более 0,01). Необходимо построить модель, адекватно описывающую зависимость модуля упругости слоя лесосечных отходов от нагрузки. Полученные данные позволяют построить такие модели в виде регрессионных уравнений.

Для дальнейшей обработки используем средние значения модуля упругости и относительной деформации (табл. 5).

Таблица 5

Относительная деформация и модуль упругости слоя лесосечных отходов

Параметр		Высота, м	Нагрузка, Н	Относительная деформация	Модуль упругости, Па
Исходная высота		0,76	–	–	–
Высота после нагружения	1	0,60	700	0,214	3207,37
	2	0,55	1450	0,287	4346,22
	3	0,52	2150	0,331	4944,10
Остаточная высота		0,64	–	–	–

Для использования результатов экспериментов в технологических расчетах построены регрессионные уравнения модуля упругости слоя лесосечных отходов: от приложенной нагрузки; от деформации; деформации и приложенной нагрузки и деформации слоя отходов от нагрузки. Уравнения позволяют описать взаимодействие лесозаготовительной машины и лесосечных отходов на волоке (рис. 12).

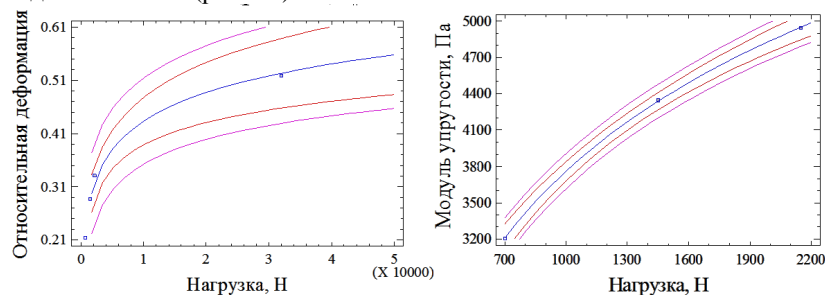


Рис. 12. Изменение характеристик лесосечных отходов при нагружении

Наибольшим коэффициентом детерминации обладают логарифмические модели (99,91 %), приведенные на рисунке 12: относительной деформации ($R^2 = 99,91$):

$$\varepsilon = -0,278996 + 0,0773525 \ln(G); \quad (24)$$

модуля упругости слоя отходов в зависимости от деформации ($R^2 = 99,93$):

$$E = 9322,85 + 3970,21 \ln(\varepsilon), \text{ Па}; \quad (25)$$

модуля упругости слоя лесосечных отходов в зависимости от нагрузки ($R^2 = 99,98$):

$$E = -6942,29 + 1549,72 * \ln(G), \text{ Па}; \quad (26)$$

модуля упругости слоя лесосечных отходов при известной нагрузке и площади контакта движителя и опорной поверхности ($R^2 = 99,99$):

$$E = -1472250 + 161859,0 \ln\left(\frac{G}{S}\right). \quad (27)$$

Разработанная система уравнений описывает взаимодействие лесозаготовительной машины и слоя лесосечных отходов, что позволяет определить затраты энергии на движение лесозаготовительных машин по слою лесосечных отходов и экономический эффект от данного направления рециклинга.

Шестой раздел посвящен оценке направлений рециклинга лесосечных отходов на основании предложенной системы критериев.

Выработка энергии. Ресурсы лесосечных отходов для использования в данном направлении представляют собой практически всю биомассу, имеющуюся на лесосеке, за исключением деловой стволовой древесины. В предсказуемые потери войдут (на основании данных табл. 3):

- для технологического процесса с трелевкой деревьев лесосечные отходы низкой концентрации на пасаках и волоках – 3,2 %;
- для технологического процесса с трелевкой хлыстов лесосечные отходы низкой локальной концентрации на пасаках – 5,6 %;
- для технологического процесса с трелевкой сортиментов лесосечные отходы низкой локальной концентрации на пасаках: 4,2 % – при работе харвестеров; 8,3 % – при работе вальщиков.

При любом технологическом процессе на лесосеке останутся лесосечные отходы с крайне низкой концентрацией, вызывающей значительное снижение производительности машин процесса рециклинга лесосечных отходов. Модельным анализом технологического процесса установлено, что эта величина составляет $0,002 \text{ м}^3/\text{м}^2$.

Влажность лесосечных отходов является их важнейшей характеристикой. Из опыта Скандинавских стран известно, что при поставке лесосечных отходов на топливо цена назначается, исходя из их влажности. Следовательно, для организации эффективного рециклинга лесосечных отходов необходима их сушка непосредственно на лесосеке.

Для лесосечных отходов используют естественную сушку в местах скопления: в кучах после уборки лесосек; в пакетах на местах их формирования; в штабелях пакетов.

Высыхание лесосечных отходов до влажности 20 %, по данным Г. М. Михайлова, Н. А. Серова, естественным образом происходит в течение 80–90 дней. С другой стороны, в процессе сушки наблюдаются потери коры, листья, хвоя, интенсивность изменения которых также известна.

Моделированием процесса сушки лесосечных отходов средствами системы Mathcad установлено, что минимальный срок выдержки лесосечных отходов в летнее время, с учетом достижения оптимальной влажности и минимальных потерь компонентов лесосечных отходов, составил 42 дня.

Для реализации этого направления использования лесосечных отходов требуется оборудование: для трелевки – форвардер, пачкоподборщик; для штабелевки – форвардер; для сбора в пакеты – пакетирующие машины. Для пакетирования лесосечных отходов предложено навесное оборудование, защищенное патентом на полезную модель № 98379.

При пакетировании следует учитывать потери компонентов при обработке сухих лесосечных отходов (моделированием установлены потери до 12 %), целесообразно сначала их пакетировать и штабелевать, а затем оставлять на сушку. При этом работы основного технологического процесса и процесса пакетирования лесосечных отходов не должны пересекаться. Производительность основного технологического процесса снижается до 18 % из-за выполнения операций по концентрации лесосечных отходов. Необходимы площади для размещения пакетов лесосечных отходов.

Сочетаемость с основным процессом высокая, моделирование сквозного технологического процесса показало снижение производительности основного технологического процесса не более чем на 18 %, возможна организация не влияющих друг на друга технологических процессов. Для сбора или упаковки лесосечных отходов без потерь компонентов лесосеку следует разделить на секции, в которых сначала выполняют операции по заготовке стволовой древесины, а затем заготовку лесосечных отходов.

Затраты на готовую продукцию процесса рециклинга определяют с учетом потерь прибыли из-за снижения производительности основного технологического процесса и издержек процесса рециклинга. При функционировании нескольких процессов рециклинга потери прибыли относят по процессам пропорционально их производительности.

Во всех случаях внедрения процесса рециклинга важнейшими являются затраты на доставку продукции. Наиболее значимы эти затраты при производстве щепы, древесного топлива. Процессы рециклинга с получением более дорогой продукции или плотнее упакованной менее чувствительны к затратам на перевозку.

Исследованиями установлено, что перспективными являются использование и разработка машин для формирования пакетов отходов с достижением коэффициентов полндревесности 0,5 и более.

Обоснование оптимальных режимов технологических процессов с полным использованием биомассы дерева.

В качестве критериев для оптимизации выбраны: производительность технологических процессов основного и рециклинга; расход ресурсов в технологических процессах; концентрация лесосечных отходов; себестоимость продукции технологических процессов основного и рециклинга.

Целевая функция имеет следующий вид:

$$F(X) = \sum_{i=1}^7 k_i x_i = 0,25 P_q^{осн} + 0,21V_{ом}^{осн} + 0,14V_{омх}^{осн} + \dots \\ \dots + 0,18 C_{ед}^{осн} + 0,07 P_q^{pec} + 0,04V_{ом}^{pec} + 0,11 C_{ед}^{pec} \rightarrow \max, \quad (28)$$

где $P_q^{осн}$, P_q^{pec} – часовая производительность технологических процессов основного и рециклинга, $m^3/ч$; $V_{топл}^{осн}$, $V_{топл}^{pec}$ – объем топлива, затрачиваемый на деформацию волокна в основном процессе и рециклинге, л; $V_{омх}$ – объем лесосечных отходов, m^3/m^2 ; $C_{ед}^{осн}$, $C_{ед}^{pec}$ – себестоимость продукции в основном процессе и рециклинге, руб/ m^3 .

Обобщенный критерий получен путем нормализации и свертки на базе весовых коэффициентов. Коэффициенты определены на основании попарного сравнения технико-экономических показателей работы сквозных технологических процессов лесосечных работ.

Величины частных критериев рассчитаны на основании зависимостей производительности основного технологического процесса ($R^2 = 97,22\%$):

$$P_\phi = 289,819 + 6,350V_{хл} + 0,017q + \dots \\ \dots + 0,332v_{зр} + 0,013L_{max} + 0,323V_{куз} + 0,414L_{мп}; \quad (29)$$

прочностные характеристики слоя лесосечных отходов ($R^2 = 98,76\%$):

$$E = -1472250 + 161859,0 \ln\left(\frac{G_k}{S_k}\right); \quad (30)$$

расход топлива на деформацию поверхности волокна ($R^2 = 94,38\%$):

$$V_{ом} = 1,853 \cdot 10^{-5} p + 8,826 \cdot 10^{-3} L_{тр} - \dots \\ \dots - 2,733\omega_k + 3,510 \cdot 10^{-8} E - 3,43 \cdot 10^{-6} G_k; \quad (31)$$

стоимость продукции основного технологического процесса ($R^2 = 97,52\%$):

$$C_{уд} = \left(-0,51P_{см} + 1,116 \cdot 10^{-6} B_{см} - 2,873 \cdot 10^{-5} \lg \frac{B_{см}}{P_{см}} \right)^2; \quad (32)$$

производительность в технологическом процессе рециклинга ($R^2 = 96,63\%$):

$$P_{рм} = 1,005M_p - 2,979L_{max} - 0,024L_{мп} + \dots \\ \dots + 0,177q + 21,236v_{зр} - 8,28b_{лент}; \quad (33)$$

где $V_{хл}$ – средний объем хлыста, m^3 ; q – запас, $m^3/2a$; $v_{зр}$ – скорость в грузовом направлении, m/c ; L_{max} – максимальный вылет манипулятора, m ; $V_{куз}$ – объем кузова, m^3 ; $L_{мп}$ – расстояние трелевки, m ; G_k – нагрузка на одно колесо, H ; S_k – площадь контакта колеса и поверхности волокна, m^2 ; p – давление в шине, Pa ; ω_k – угловая скорость колеса, rad/c ; E – модуль упругости слоя лесосечных отходов на волокне, Pa ; $B_{см}$ – балансовая стоимость лесозаготовительного оборудования, руб; $b_{лент}$ – ширина ленты, обрабатываемой машиной технологического процесса рециклинга, m .

Параметрами, связывающими основной технологический процесс и процесс рециклинга лесосечных отходов и влияющими на величину обобщенного критерия, выбраны элементы, входящие в формулу (6): угол валки, ширина пачки, вылет манипулятора, ширина рабочей зоны машины дополнительного процесса (форвардера, подборщика отходов, пачкоформирующей машины, мобильной рубительной машины).

Результаты расчетов приведены в табл. 6. На рис. 13 приведены частные поверхности отклика и величина обобщенного критерия.

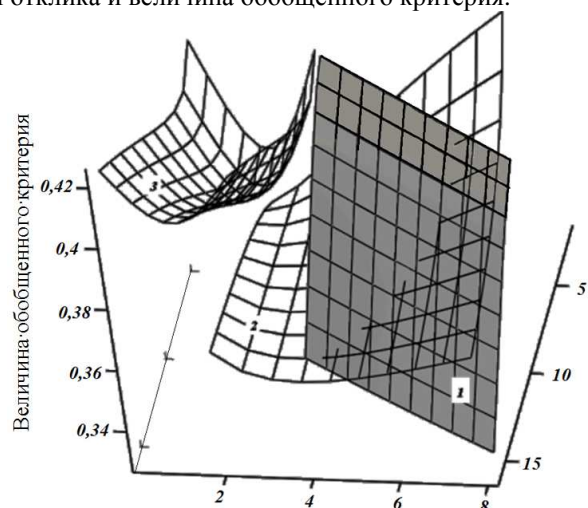


Рис. 13. Частные случаи поверхности отклика целевой функции:
1 – вылет манипулятора – ширина пасаки, 2 – ширина пасаки – рабочая зона машины,
3 – рабочая зона машины – угол валки деревьев

Данные табл. 6 показывают соотношение между различными показателями технологических процессов: харвестер – форвардер, ВПМ – скиддер, вальщик – трелевочный трактор. Наибольшая величина обобщенного критерия (1,59) достигается в случае использования сквозного технологического процесса на базе системы машин ВПМ – скиддер. Это объясняется перемещением лесосечных отходов на погрузочный пункт или промплощадку, что повышает концентрацию лесосечных отходов до $0,24 \text{ м}^3/\text{м}^2$, и производительность сучкорезных машин (процессоров) и машин процесса рециклинга лесосечных отходов.

Таблица 6

Результаты оптимизации комплексного технологического процесса

Параметр	Система машин		
	1	2	3
Вылет манипулятора, м	7,69	8	10
Время сортировки, с	7	2,35	–
Рейсовая нагрузка (емкость кузова), м^3	8	8	9,52
Расстояние трелевки, м	670	400	–
Ширина пасаки, м	12	5	8
Ширина рабочей зоны машин процесса рециклинга лесосечных отходов, м	5	7	4,5
Угол валки, град	0,79	0,39	0,39
Величина обобщенного критерия	1,56	1,59	0,73
Локальная концентрация лесосечных отходов, $\text{м}^3/\text{м}^2$	0,04	0,24	0,24

Таким образом, очевидна эффективность применения лесосечных отходов для строительства волоков, способствующего повышению производительности труда и снижению себестоимости лесосечных работ. Наибольший эффект достигается при использовании колесных трелевочных машин.

В таблице 7 приведен вариант оценки пригодности лесного участка для организации сквозных технологических процессов лесосечных работ с рециклингом лесосечных отходов в направлениях: строительство волоков, заготовка биотоплива, заготовка древесной зелени, заготовка технологической щепы. Условия ведения работ приняты средними для Карелии, система машин – ВПМ – скиддер. Для выбранных условий объем лесосечных отходов составит 798 м^3 , объем лесосечных отходов для укрепления волока с учетом характеристик грунта 139 м^3 .

Таблица 7

Оценка направлений рециклинга

Направление рециклинга	Доступные ресурсы для рециклинга, м^3	Концентрация лесосечных отходов в рабочей зоне машин рециклинга, $\text{м}^3/\text{м}^2$	Сочетаемость технологических процессов
Строительство волоков	139	0,03-0,06	0,82
Биотопливо	659	0,18	1,0
Древесная зелень	118	0,03	0,64
Технологическая щепка	547	0,15	1,0

Таким образом, в условиях Карелии наилучшие результаты дает процесс рециклинга с выработкой биотоплива и технологической щепы, низкая эффективность процесса получения древесной зелени обусловлена низкой концентрацией ресурса.

Заключение

Анализ результатов экспериментальных, теоретических и модельных исследований позволяет сделать следующие выводы:

1. Высокая вариативность условий проведения лесосечных работ, параметров продукции рециклинга лесосечных отходов требует формирования сквозных технологических процессов лесосечных работ с высокой приспособляемостью к условиям производства и выбранным направлениям рециклинга лесосечных отходов.

2. На основании проведенного анализа установлено, что значимым параметром, влияющим на эффективность взаимодействия компонентов сквозных технологических процессов лесосечных работ, является уровень концентрации деловой древесины и лесосечных отходов на лесосеке.

3. Разработана классификация сквозных технологических процессов лесосечных работ, использующая концентрацию лесоматериалов как основной

классифицирующий фактор, позволяющий формировать рекомендации по направлениям рециклинга для групп технологических процессов.

4. Разработана и апробирована методика определения величины концентрации лесосечных отходов в технологических процессах лесосечных работ, учитывающая геометрические характеристики лесосеки и позволяющая определять концентрацию лесосечных отходов в ее областях. Методика применима для всех типов лесов и размеров элементов лесосечных отходов.

5. Определены закономерности изменения концентрации лесосечных отходов в зависимости от технологического процесса лесосечных работ, при этом установлено, что наибольшая концентрация до $0,24 \text{ м}^3/\text{м}^2$ лесосечных отходов достигается при использовании технологических систем на базе валочно-пакетирующих машин.

6. Локальная концентрация лесосечных отходов при ведении лесозаготовок в условиях древостоев Карелии, в зависимости от вида технологического процесса, при запасах стволовой древесины $90\text{--}170 \text{ м}^3/\text{га}$ колеблется в пределах от $0,002$ до $0,4 \text{ м}^3/\text{м}^2$.

7. Моделированием процесса формирования слоя лесосечных отходов на лесосеке установлено, что повышение их локальной концентрации возможно при изменении параметров сквозного технологического процесса, в частности: переносе отходов вальщиками и захватами манипуляторов лесосечных машин, увеличении ширины пасек до величины вылета манипулятора, уменьшении суммарной протяженности волоков, трелевке лесосечных отходов лесозаготовительными машинами, сортировке харвестерами и ВПМ, трелевке деревьями, использовании комбинированных машин.

8. Рециклинг лесосечных отходов с производством древесного топлива в условиях сквозного технологического процесса лесосечных работ целесообразно вести при их концентрации не менее $0,03 \text{ м}^3/\text{м}^2$.

9. Увеличение ресурсов лесосечных отходов для направлений рециклинга с производством товарной продукции обеспечивается снижением уровня их использования в строительстве волоков, путем учета несущей способности грунтов. Высвобождаемые объемы лесосечных отходов для средних условий Республики Карелия приведены в табл. 3.

10. Моделированием взаимодействия движителя лесозаготовительной машины и поверхности волока, укрепленного лесосечными отходами, установлено, что в ряде условий на слабых грунтах возможно повышение скорости движения лесозаготовительных машин до 24 %, следовательно, и их производительности, что определяет одно из основных направлений рециклинга лесосечных отходов.

11. Проведенные исследования показали, что наилучшее соотношение между объемом лесосечных отходов используемых в строительстве волоков и их объемом, доступным для товарного рециклинга, достигается при

толщине слоя на волоке не менее $0,2 \text{ м}$, при этом обеспечивается повышение производительности лесозаготовительных машин на величину не менее 5 %.

12. Для повышения эффективности использования лесосечных отходов как строительного материала и увеличения объема для товарного рециклинга необходимо укладывать их слоями, чередуя поперечное и продольное направления, что позволяет снизить грунтовые напряжения в 3,9 раза.

13. Для повышения производительности процессов лесосечных работ, минимизации трудозатрат и увеличения ресурсов технологически доступных лесосечных отходов проектирование и строительство транспортной инфраструктуры лесосеки следует вести с учетом минимизации ее высоконагруженных частей – магистральных волоков, разворотных площадок и частей пасечных волоков, расположенных на слабых грунтах.

14. Лабораторными и полевыми исследованиями установлено, что величина модуля упругости слоя лесосечных отходов, расположенного на волоке, находится в пределах $9,5\text{--}10,01 \text{ КПа}$.

15. На основе моделирования работы сквозных технологических процессов установлено, что в условиях Республики Карелия наилучшие условия функционирования процессов рециклинга лесосечных отходов возникают при использовании системы машин ВПМ – скиддер, при этом величина обобщенного критерия эффективности достигает значения 1,59.

16. Распределение объемов лесосечных отходов по основным направлениям рециклинга – строительные материалы, биотопливо, древесная зелень: с учетом необходимости ведения лесосечных работ на переувлажненных участках, до 80 % лесосечных отходов необходимо использовать для строительства волоков; на грунтах влажностью до 50 % на укрепление волоков требуется до 60 % биомассы и 40 % может быть направлено на рециклинг; на сухих или замороженных грунтах практически весь объем биомассы лесосечных отходов доступен для рециклинга.

17. Дальнейшие исследования необходимо вести в направлении поиска технических решений, обеспечивающих эффективный рециклинг лесосечных отходов с получением полуфабрикатов глубокого уровня переработки непосредственно на лесосеках, выбирать параметры технологических процессов, обеспечивающие высокую концентрацию лесосечных отходов на погрузочных площадках, создавать лесозаготовительные машины с проходимостью, позволяющей высвободить лесосечные отходы для производства полуфабрикатов и продукции.

Основное содержание диссертации опубликовано в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Меньшиков, В. Н. Характер изменения производительности валочно-пакетирующей машины кругового действия в зависимости от типа леса и возраста разрабатываемого древостоя / В. Н. Меньшиков, И. И. Тихонов, О. Н. Галактионов // Лесной журнал. — 1998. — № 6—63. — С. 54 — 56.

2. Галактионов, О. Н. Использование отходов лесозаготовок для энергетических целей / О. Н. Галактионов, В. И. Скрыпник // Лесная промышленность. — 2005. — № 4. — С. 23 — 25.
3. Васильев, С. Б. Совершенствование технологии утилизации отходов лесозаготовок / С. Б. Васильев, О. Н. Галактионов // Известия С-Петербургской лесотехнической академии. — 2006. — Вып. 178. — С. 144 — 152.
4. Галактионов, О. Н. Производительность машин на сборе лесосечных отходов с учетом их концентрации / О. Н. Галактионов // Известия С-Петербургской лесотехнической академии. — 2007. — Вып. 184. — С. 186 — 192.
5. Галактионов, О. Н. Оценка эффективности использования лесосечных отходов для строительства трелевочных волоков / О. Н. Галактионов, М. А. Пискунов, П. В. Безлатный // Известия С-Петербургской лесотехнической академии. — 2008. — Вып. 185 — С. 86 — 93.
6. Галактионов, О. Н. Применение метода линейных пересечений при оценке объемов отходов лесозаготовок / О. Н. Галактионов // Лесной журнал. — 2008. — № 5 — С. 66 — 72.
7. Галактионов, О. Н. Методика расчета производительности процессов сбора отходов лесозаготовок / О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов // Известия С-Петербургской лесотехнической академии. — 2008. — Вып. 186. — С. 85—92.
8. Шегельман, И. Р. Состояние нагруженности волоков при функционировании комплексных лесосечных систем / И. Р. Шегельман, О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов // Вестник МАНЭБ. — 2009. — № 14 (1) — С. 68—72.
9. Галактионов, О. Н. Характеристики настила из лесосечных отходов и состояние грунта на трелевочном волоке / О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов, М. А. Пискунов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. — 2009. — № 7 (101). — С. 90 — 95.
10. Галактионов, О. Н. Исследование естественной сушки пакетов лесоматериалов / О. Н. Галактионов // Перспективы науки. — 2011. — № 12 (27). — С. 170 — 172.
11. Шегельман, И. Р. Перспективное устройство для формирования пакетов отходов лесозаготовок / И. Р. Шегельман, О. Н. Галактионов // Наука и бизнес: пути развития. — 2011. — № 6. — С. 144 — 146.
12. Галактионов, О. Н. Формирование структуры лесотранспортных путей лесосеки на лесотипологической основе / О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер. «Естественные и технические науки». — 2011. — № 8. — С. 81 — 84.
13. Галактионов, О. Н. Исследование взаимосвязи технологической проходимости лесозаготовительных машин с параметрами лесной среды [Электронный ресурс] / О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов // Инженерный вестник Дона. — 2012. — № 4. — Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4t1y2012/1145>.
14. Галактионов, О. Н. Методические основы комплексного обследования лесных участков, пройденных рубками / О. Н. Галактионов, П. О. Щукин // Наука и бизнес: пути развития. — 2012. — № 9 (15). — С. 74 — 76.

15. Галактионов, О. Н. Упругие свойства массивов лесосечных отходов / О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов // Вестник Поволжского государственного технического университета. — 2012. — № 1 (1). — С. 52 — 62.
16. Шегельман, И. Р. Ресурсосберегающие технологии на лесозаготовках. Терминология и направления проблемно-ориентированных исследований / И. Р. Шегельман, О. Н. Галактионов, П. О. Щукин // Глобальный научный потенциал. — 2012. — № 1 (10). — С. 89 — 93.
17. Галактионов, О. Н. Методика оценки энергозатрат при движении форвардера / О. Н. Галактионов // Resources and Technology. — 2012. — Т. 9. — № 1. — С. 10 — 12.
18. Шегельман, И. Р. Взаимосвязь технологий заготовки и воспроизводства лесных ресурсов / И. Р. Шегельман, В. М. Лукашевич, О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов // Перспективы науки. — 2013. — № 3 (42). — С. 243 — 245.
19. Галактионов, О. Н. Оптимальные условия функционирования сквозных технологических процессов лесосечных работ / О. Н. Галактионов // Наука и бизнес: пути развития. — 2014. — № 3 (33). — С. 101 — 103.
20. Шегельман, И. Р. Рециклинг отходов: актуальность возрастает [Электронный ресурс] / И. Р. Шегельман, П. О. Щукин, О. Н. Галактионов, А. С. Васильев, Ю. В. Суханов // Инженерный вестник Дона — 2014. — № 3. — Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2479>.
21. Шегельман, И. Р. К вопросу формирования имитационной модели процесса функционирования дробильных технологических систем / И. Р. Шегельман, П. О. Щукин, О. Н. Галактионов, Ю. В. Суханов, А. С. Васильев, А. М. Крупко // Наука и бизнес: пути развития. — 2015. — № 3 (45). — С. 63 — 65.
22. Lukashevich V., Shegel'man I, Sukhanov Yu., Vasilev A., Galaktionov O. Introduction of interactive teaching methods into the disciplines of forest specialities: a case of Petrozavodsk State University // Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 214, 5 December 2015, Pages 119-127. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042815059583>.
23. Шегельман, И. Р. Машина для заготовки деловой и энергетической древесины / И. Р. Шегельман, А. В. Демчук, О. Н. Галактионов, П. В. Будник Патент России на полезную модель № 128062. Оpubл. 20.05.2013.
24. Шегельман, И. Р. Способ работы валочно-сучкорезно-раскряжевой машины / И. Р. Шегельман, О. Н. Галактионов, А. В. Демчук. Патент России на изобретение RU № 2492628. Оpubл. 20.09.2013.
25. Шегельман, И. Р. Рабочий орган валочно-сучкорезно-раскряжевой машины для выработки сортиментов / И. Р. Шегельман, О. Н. Галактионов, А. В. Демчук. Патент России на полезную модель № 117259. Оpubл. 27.06.2012.
26. Галактионов, О. Н. Устройство для сбора лесосечных отходов и их формирования на лесосеке / О. Н. Галактионов, И. Р. Шегельман, П. В. Безлатный, М. И. Куликов. Патент России на полезную модель № 98379. Оpubл. 20.10.2010.

27. Шегельман, И. Р. Способ выполнения лесосечных работ многооперационной лесозаготовительной машиной / И. Р. Шегельман, А. В. Демчук, О. Н. Галактионов, П. В. Будник Патент России на изобретение RU № 2554444. Оpubл. 27.06.2015.
28. Шегельман, И. Р. Способ заготовки и вывозки дров и лесосечных отходов от лесных участков к котельным / И. Р. Шегельман, О. Н. Галактионов, А. В. Демчук, В. Н. Баклагин, П. В. Будник. Патент России на изобретение RU № 2554442. Оpubл. 27.06.2015.
29. Шегельман, И. Р. Машина для заготовки древесины / И.Р. Шегельман, А. В. Демчук, О. Н. Галактионов, П. В. Будник. Патент России на полезную модель № 135227. Оpubл. 10.12.2013

в монографиях

30. Галактионов, О. Н. Технологический процесс лесозаготовок и ресурсы лесосечных отходов / О. Н. Галактионов. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. — 95 с.
31. Шегельман, И. Р. Техническое оснащение современных лесозаготовок / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, О. Н. Галактионов. — СПб.: ПРОФИ — ИНФОРМ, 2005. — 344 с.
32. Шегельман, И. Р. Лесной бизнес: производительность лесосечных машин и организация работы персонала / И. Р. Шегельман, М. Н. Рудаков, О. Н. Галактионов. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. — 100 с.

в учебных пособиях и методических указаниях

33. Шегельман, И. Р. Структура и методы исследования производственных процессов на лесосеке: методические указания / И. Р. Шегельман, О. Н. Галактионов; КРИА. — Петрозаводск, 2001. — 62 с.
34. Шегельман, И. Р. Производительность лесосечных машин и оборудования: учебное пособие / И. Р. Шегельман, О. Н. Галактионов; — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2001. — 72 с.
35. Галактионов, О. Н. Малозатратные и ресурсосберегающие технологии на лесозаготовках: учебное пособие / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, О. Н. Галактионов, В. М. Лукашевич. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2012. — 200 с.
36. Шегельман, И. Р. Техника и технология лесосечных работ: учебное пособие / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, О. Н. Галактионов. — ПетрГУ. — Петрозаводск. 2004, — 228 с.
37. Галактионов, О. Н., Участки и линии нижних складов / О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов; — Петрозаводск. Изд-во ПетрГУ, 2005. — 84 с.
38. Галактионов, О. Н., Оборудование участков и линий нижних складов / О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов; — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. — 88 с.
39. Шегельман, И. Р. Инновационные технологии лесосечных работ / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, О. Н. Галактионов; — Петрозаводск. Изд-во ПетрГУ, 2012. — 116 с.

40. Сюнёв, В. С. Энергетическое использование древесной биомассы: заготовка, транспортировка, переработка и сжигание: методическое пособие / В. С. Сюнёв [и др.]. — Петрозаводск. Изд-во ПетрГУ. 2014. — 123 с.
41. Галактионов, О. Н. Технологические процессы и машины на заготовке, транспортировке и переработке древесного сырья: учебное пособие / О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов; — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. — 60 с.
42. Шегельман, И. Р. Производство лесосечных работ: технология и техника: учебное пособие для студентов вузов лесоинженерного профиля / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, А. В. Питухин, О. Н. Галактионов. — Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2015. — 367 с.

в статьях и материалах конференций

43. Галактионов, О. Н. Энергетический потенциал вторичных ресурсов заготовки и переработки биомассы дерева на щепу целлюлозно-бумажного назначения / О. Н. Галактионов, А. Ф. Булатов // Современные проблемы развития лесопромышленных производств. — 2001. — № 6. — С. 31 — 37 (Сер. «Лесопромышленный комплекс»).
44. Галактионов, О. Н. Задача выбора оптимальных направлений использования древесных ресурсов / О. Н. Галактионов // Проблемы лесопромышленных регионов: Материалы всероссийской науч.-практ. конф. — М.: ИПИИ, 2002. — С. 23 — 24
45. Галактионов, О. Н. Энергетический потенциал вторичных ресурсов биомассы дерева/ О. Н. Галактионов, А. Ф. Булатов // Новые информационные технологий в целлюлозно-бумажной промышленности и энергетике: Материалы V международной научно-технической конференций. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2002, — С. 21—23.
46. Галактионов, О. Н. Анализ лесного фонда Сегежского лесхоза / О. Н. Галактионов, В. Е. Голубев // Региональный лесопромышленный комплекс: на пороге перемен: Научные труды № 9 / под ред. д. т. н. проф. И. Р. Шегельмана; КРИА. — Петрозаводск, 2003. — С. 18—19.
47. Галактионов, О. Н. Выбор оптимальных сочетаний процессов лесозаготовки стволовой древесины и отходов лесозаготовок / О. Н. Галактионов // Новые технологии и устойчивое развитие в лесах Карелии: Тез. докл. республиканской науч.-практ. конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей, посвященной 50-летию каф. ТОЛК. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003, — 31 с.
48. Галактионов, О. Н. Оптимизация процессов заготовки древесной зелени и топливно-энергетических ресурсов / О. Н. Галактионов // Региональный лесопромышленный комплекс: на пороге перемен: — 2003. — №9 (Сер. «Лесопромышленный комплекс»).
49. Галактионов, О. Н. Анализ лесного фонда Сегежского лесхоза / О. Н. Галактионов, В. Е. Голубев // Материалы республиканской науч.-практ. конф. — Петрозаводск, 2003. — С. 15 — 16.

50. Галактионов, О. Н. Управление образованием лесосечных отходов / О. Н. Галактионов // *Технология, машины и производство лесного комплекса будущего: Материалы международной научн.-практ. конф. Часть I.* – Воронеж: ВГЛТА, 2004. — С. 52 — 57
51. Галактионов, О. Н. Комплексные исследования процессов первичного транспорта леса при сквозных технологических процессах лесозаготовок / О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов, И. Р. Шегельман // *Экономические, экологические и технологические проблемы развития региона. Научные труды № 12.* — Петрозаводск, 2004. — С. 3 — 13.
52. Галактионов, О. Н. Влияние природных и производственных факторов на нагруженность пасечных и магистральных волоков / О. Н. Галактионов, М. А. Пискунов // *Использование GPS для повышения качества управления транспортно-технологическими процессами в ЛПК: материалы научно-практ. семинара / СПбЛТА.* — СПб.: ЛТА, 2004. — С. 11 — 12.
53. Галактионов, О. Н. Процесс лесозаготовок и образование лесосечных отходов / О. Н. Галактионов, М. А. Пискунов // *Труды лесинженерного факультета. Вып. 6 (специальный).* – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2005. — С. 23 — 26.
54. Галактионов, О. Н. Мера совершенства технологического процесса при лесозаготовках / О. Н. Галактионов // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы международной научно-технической конференции.* – Вологда: ВоГТУ, 2005. — С. 18 — 20.
55. Галактионов, О. Н. Исследование специфики образования лесосечных отходов / О. Н. Галактионов, М. А. Пискунов // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы международной научно-технической конференции.* – Вологда: ВоГТУ, 2005. — 123 с.
56. Галактионов, О. Н. Концентрация древесины как основа для сравнения технологических процессов лесозаготовок / О. Н. Галактионов // *Лесозаготовка. Выпуск 6: Межвузовский сборник научных трудов / под ред. проф. В. П. Корпачева.* — Красноярск: СибГТУ, 2005. – С. 49 — 55.
57. Галактионов, О. Н. Влияние структуры вторичных ресурсов биомассы дерева на ее топливный потенциал / О. Н. Галактионов, К. В. Полежаев // *Вузовская наука – региону: Материалы четвертой всероссийской научно-технической конференции: 21 февраля 2006.* – Вологда: ВоГТУ, 2006. — С. 110—112.
58. Шегельман, И. Р. Белорусский форвардер на лесосеке / И. Р. Шегельман, В. И. Скрыпник, О. Н. Галактионов // *Деловой лес.* — № 11. — С. 59—62.
59. Галактионов, О. Н. Оценка отходов лесозаготовок как энергетического ресурса / О. Н. Галактионов // *Наука и устойчивое развитие общества. Наследие В. И. Вернадского. Сборник материалов 2-й Международной научно-практической конференции: 28—29 сентября 2007.* — Тамбов: Издательство ТАМБОВПРИНТ, 2007. – С. 80—81.
60. Галактионов, О. Н. Минимизация экологического воздействия комплексных лесосечных систем на лесной участок / О. Н. Галактионов, М. А. Пискунов, А. В. Кузнецов // *Наука и бизнес. Пути развития: Сборник ма-*

- териалов 1-й Международной научно-практ. конференции: 28—29 января 2009.* – Тамбов: Издательство ТАМБОВПРИНТ, 2009. — С. 125 — 126.
61. Галактионов, О. Н. Оптимизация функционирования систем машин для несплошных рубок / О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы международной научно-технической конференции, 9—11 декабря 2008.* – Вологда: ВоГТУ, 2009. — С. 154 — 157.
62. Галактионов, О. Н. Оптимизация условий взаимодействия комбинированных лесосечных процессов / О. Н. Галактионов // *Материалы всероссийской научно-практ. конференции 24 июля 2013 г.; Петрозаводский государственный университет.* – Петрозаводск: Verso, 2013. — С. 31 — 32.
63. Шегельман, И. Р. Заготовка и воспроизводство лесных ресурсов / И. Р. Шегельман, В. М. Лукашевич, О. Н. Галактионов, А. В. Кузнецов // *Reports Scientific Society.* — 2013. — № 1. — С. 141 — 142.
64. Галактионов, О. Н. Формирование условий для рециклинга древесной биомассы за рубежом / О. Н. Галактионов // *Материалы международной научно-технической конф., 10—11 октября 2014.* — СПб.: СПбГЛТУ, 2014. — С. 178 — 180.
65. Галактионов, О. Н. Исследование возможности производства пористых материалов на основе древесных отходов / О. Н. Галактионов, А. С. Попов // *Приоритетные направления развития науки и образования: Сборник материалов V Международной научно-практ. конференции.* — Чебоксары, 2015. — С. 289 — 290.

Галактионов Олег Николаевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СКВОЗНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ ЛЕСОСЕЧНЫХ РАБОТ
С РЕЦИКЛИНГОМ ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ

Автореферат