

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ГОУ ВПО  
СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

**Коршун В.Н.**

**РОТОРНЫЕ РАБОЧИЕ ОРГАНЫ  
ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

**механика взаимодействия  
с предметом труда**

*Утверждено редакционно-издательским  
советом СибГТУ в качестве монографии*

Красноярск 2005

ISBN  
УДК 631.3.001

**Коршун В.Н.** Роторные рабочие органы лесохозяйственных машин: Механика взаимодействия с предметом труда: Монография. – Красноярск СибГТУ, 2004. – 272 с.

Приведены основы детерминированной и стохастической механики взаимодействия роторных рабочих органов лесохозяйственных машин со специфическим предметом труда, обладающим анизотропными свойствами. Дается схематизация входных воздействий на рабочие органы от предмета труда и опорной поверхности движения лесных машин. Особое внимание уделено компьютерному и математическому моделированию стохастических свойств лесной почвы как многокомпонентной среды с единичными включениями, создающими импульсные воздействия.

Представлены методики и результаты аналитических, имитационных и экспериментальных исследований взаимодействия с предметом труда рабочих органов с жестким, упругим и шарнирным креплением измельчающих элементов.

Рекомендуется конструкторам лесохозяйственных и сельскохозяйственных машин.

Табл. 49. Ил. 89. Библиограф. 140 назв.

Рецензенты: зав. кафедрой Красноярского аграрного университета, д-р, техн. наук., профессор *Н.М. Антонов*; гл. конструктор ОАО «Краслесмаш», канд. техн. наук., доцент *В.Г. Мельников*, член методического совета СибГТУ, канд. техн. наук., доцент *А.В. Михайленко*

© В.Н. Коршун, 2005

© Сибирский государственный технологический университет, 2005

## Содержание

<b>Введение .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Основы механики взаимодействия рабочих органов с предметом труда .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1 Схематизация взаимодействия рабочих органов с предметом труда и опорной поверхностью .....</b>	<b>10</b>
<b>1.2 Кинематика взаимодействия рабочих органов с предметом труда...</b>	<b>14</b>
<b>1.3 Оптимизация кинематики взаимодействия .....</b>	<b>22</b>
1.3.1 Оптимизация кинематики горизонтального ротора .....	22
1.3.2 Оптимизация кинематических параметров вертикального ротора ..	32
1.3.3 Оптимизация кинематики обратно вращающегося ротора .....	37
<b>1.4 Анализ динамики взаимодействия .....</b>	<b>43</b>
1.4.1 Определение нагрузок на основе методов классической механики .	44
1.4.2 Моделирование динамики процесса измельчения .....	47
1.4.3 Численно-аналитическое исследование нагрузок .....	52
1.4.4 Исследование влияния конструктивных факторов на параметры динамики .....	63
<b>1.5 Экспериментальное определение параметров взаимодействия .....</b>	<b>71</b>
<b>1.6 Выводы по разделу .....</b>	<b>76</b>
<b>2 Основы механика лесной почвы .....</b>	<b>77</b>
<b>2.1 Классификация предмета труда .....</b>	<b>77</b>
<b>2.2 Лесная почва как механический предмет труда и среда движения машин .....</b>	<b>78</b>
2.2.1 Вертикальная структура лесной почвы .....	79
2.2.2 Горизонтальная структура лесной почвы .....	83
<b>2.3 Механические свойства минерального основания лесных почв ....</b>	<b>87</b>
2.3.1 Физические свойства минерального основания лесных почв .....	93
2.3.2 Механические свойства лесных почв .....	97
<b>2.4 Механические свойства лесных почв, подвергнувшихся техногенному и антропогенному воздействию .....</b>	<b>101</b>
<b>2.5 Исследование механических включений в лесных почвах .....</b>	<b>104</b>
2.5.1 Структура и прочностные свойства подземных включений .....	104
2.5.2 Структура и параметры напочвенных включений .....	109
2.5.3 Структура и параметры единичных включений .....	112
<b>2.6 Выводы .....</b>	<b>115</b>
<b>3 Математическое и компьютерное моделирование механики взаимодействия с предметом труда и опорной поверхностью.</b>	<b>117</b>
<b>3.1 Моделирование взаимодействия с лесной почвой .....</b>	<b>118</b>
<b>3.2 Моделирование свойств лесной подстилки .....</b>	<b>126</b>
3.2.1 Прогнозирование толщины подстилки .....	127
3.2.2 Моделирование деформирования подстилки .....	132
3.2.3 Моделирование плотности подстилки при сжатии .....	134
3.2.4 Моделирование плотности при сдвиге .....	135
<b>3.3 Методика прогнозирования параметров лесной почвы .....</b>	<b>137</b>
<b>3.4 Моделирование опорной реакции ротора .....</b>	<b>139</b>
<b>3.5 Моделирование тяговой реакции ротора .....</b>	<b>143</b>
<b>3.6 Вывод .....</b>	<b>147</b>

<b>4</b>	<b>Реологическая механика взаимодействия с предметом труда.....</b>	<b>148</b>
4.1	Исследование динамики измельчения .....	148
4.1.1	Структурные модели измельчаемого материала .....	149
4.2	Реологическое моделирование процесса измельчения .....	157
4.3	Результаты моделирования.....	167
4.4	Выводы .....	168
<b>5</b>	<b>Экспериментальная механика взаимодействия .....</b>	<b>169</b>
5.1	Исследование физико-механических и технологических свойств опавших листьев .....	169
5.2	Компьютерная методика исследования свойств измельчаемого материала .....	177
5.2.1	Общее описание методики .....	178
5.2.2	Вычислительный алгоритм для AutoCAD .....	180
5.2.3	Программа расчета площади (на языке AutoLISP) .....	183
5.2.4	Результаты исследований по компьютерной методике .....	184
5.3	Оценка качества измельчения растительных материалов роторными рабочими органами .....	186
5.4	Экспериментальные исследования механических характеристик опавших листьев и хвои .....	191
5.4.1	Методика определения механических свойств .....	192
5.4.2	Описание установки для испытаний .....	194
5.5	Результаты экспериментальных исследований .....	201
5.5.1	Прочностные параметры материалов .....	201
5.5.2	Параметры анизотропии .....	206
5.5.3	Параметры демпфирования .....	209
5.5.4	Исследование импульсных нагрузок .....	213
5.6	Исследование колебаний шарнирных ножей .....	215
5.6.1	Экспериментальное определение нагрузок .....	215
5.6.2	Компьютерный анализ результатов исследований .....	220
5.7	Выводы .....	224
<b>6</b>	<b>Оценка энергоемкости взаимодействия .....</b>	<b>225</b>
6.1	Теоретические исследования энергоемкости измельчения .....	226
6.1.1	Работа деформаций .....	226
6.1.2	Мощность деформаций .....	227
6.2	Исследование энергоемкости измельчения на основе реологических моделей .....	228
6.3	Экспериментальные исследования энергоемкости измельчения .....	234
6.3.1	Описание установки .....	234
6.3.2	Планирование экспериментальных исследований роторов .....	240
6.3.3	Анализ размерностей .....	240
6.4	Оценка энергоемкости взаимодействия по эмпирическим моделям .....	247
6.5	Общие выводы по исследованию энергоемкости взаимодействия.....	253
6.6	Оптимизация энергоемкости взаимодействия .....	254
6.6.1	Аналитическая оптимизация энергоемкости .....	254
6.6.2	Компьютерная оптимизация энергоемкости .....	256
	Заключение .....	262
	Библиографический список .....	263

## Введение

Цель лесного хозяйства - постоянное обеспечение устойчивого развития лесов, лесного комплекса и биотехносферы в целом. Решать поставленную цель человеку помогают лесохозяйственные машины, которые совместно с технологическими приемами и методами образуют процессы неистощимого комплексного и рационального лесопользования. В настоящее время принята парадигма, по которой лесное хозяйство и человек рассматриваются как части единой экосистемы [1]. Федеральная программа развития лесного хозяйства, намеченная к реализации к 2005 году, предусматривает комплекс мероприятий, в частности, по внедрению новых технологий и технических средств с учетом зарубежного опыта. Однако реализация программы в части лесохозяйственного комплекса ставится под сомнение. Фактический износ основного технологического оборудования в лесной промышленности в настоящее время превышает 60 %. В указанной программе [1] машины распределяются по возрастным группам: 1 – до 5 лет; 2 – от 5 до 10 лет; 3 – от 10 до 20 лет; 4 – от 20 лет и выше. Большинство единиц лесозаготовительного оборудования приходится на 1 группу. Так, для трелевочных тракторов доля машин 1 группы составляет 73 %, для погрузчиков – 70 %; для лесовозных автопоездов – 69 %; для раскряжевочных установок – 37 %; для сушильных агрегатов – 2 %; для деревообрабатывающих машин – 43 %. Анализ показывает, что в лесозаготовительной отрасли сохраняется опасная тенденция ускоренного развития оборудования для первичной заготовки лесного сырья с целью его реализации без глубокой переработки. Дорогостоящая и высокопроизводительная зарубежная техника приобретает, как правило, с целью заготовки круглого леса. Однако лесозаготовительная отрасль в целом имеет шанс для интенсивного развития. Развитию лесохозяйственных машин в федеральной программе уделено мало внимания, в то же время их износ существенно превышает износ лесозаготовительных машин. В настоящее время лесное хозяйство остается придатком лесозаготовительной отрасли.

Перспективы развития лесохозяйственной техники могут определяться принципами создания техники и реформирования сельскохозяйственного производства [2]. Принципы сельского и лесного хозяйства во многом совпадают и, в частности предусматривают: 1. Сохранение оптимального соотношения природных ресурсов; 2. Оптимизация соотношения площадей под угодья; 3. Сохранение среды обитания флоры, фауны, людей; 4. Многофакторная адаптация растений в системе *растение-почва-климат*; 5. Гарантированное воспроизводство природных ресурсов.

В области прогрессивной организации производства предусматривается реализация принципов адаптивного землепользования: 1) дифферен-

циальное использование потенциала среды; 2) оптимизация севооборотов; 3) экологичность производства; 4) ограничение антропогенной и техногенной нагрузки на среду. Реализация принципов агроландшафтного земледелия и адаптивного землепользования определяют требования в отношении всех субъектов системы *человек-общество-природа*. Ориентация на сохранение естественного оптимума соотношений природных ресурсов и площадей определяет объем и виды работ, а также обуславливает региональные приоритеты по производству определенной продукции с учетом особенностей региона и рыночных потребностей. Реализация принципа гарантированного воспроизводства природных ресурсов требует разработки машинных технологий с сохранением природного баланса региона, перевода заготовки лесного сырья за счет постепенных рубок и рубок ухода, развитие лесовосстановления. Принцип ограничения антропогенной нагрузки на среду требует от конструкторов выбора оптимальных нагрузок машин на почву, при которых не происходит нарушения экологического равновесия в природе.

Лесохозяйственные и сельскохозяйственные машин с пассивными рабочими органами объективно требуют для технической реализации своих преимуществ машинно-тракторных агрегатов, обладающих большой массой и высоким техногенным воздействием на предмет труда и среду движения машин. Лесохозяйственные машины с роторными рабочими органами, несмотря на повышенную энергоемкость, обладают большими возможностями для адаптации к целям ведения сельского и лесного хозяйства, однако предъявляют высокие требования к техническому уровню своего конструктивного воплощения.

Роторные рабочие органы лесохозяйственных машин (*РО*) взаимодействуют с предметом труда, обладающим своей спецификой. Специфика предмета труда заключается, прежде всего, в гигантском разнообразии физико-механических, технологических, биологических, химических, агротехнических и других свойств. Эти свойства, как правило, носят анизотропный характер, оцениваются случайными параметрами; переменны во времени, существенно зависят от места расположения предмета труда и, главное, претерпевают изменения при взаимодействии с *РО*. Мы будем рассматривать только физико-механические и технологические свойства предмета труда, которые оказывают существенное влияние на механику и режимы функционирования рабочих органов.

Из физико-механических свойств предмета труда наибольший интерес представляют прочностные свойства, которые варьируются в более узких пределах и оцениваются следующими параметрами: пределы прочности, модули упругости и пластичности, относительное удлинение, коэффициент Пуассона, коэффициент динамической вязкости и т.п. Свое необходимое и первостепенное значение данные свойства приобретают при оптимизации динамических параметров рабочих органов и определении нагрузок.

Технологические свойства предмета труда приобретают первостепенное значение при обосновании режимов функционирования *РО*. К ним мы относим: размерные характеристики, плотность и влажность, массу, коэффициенты трения, угол естественного откоса, наличие примесей и др. Часто предмет труда при работе мобильных лесохозяйственных агрегатов выполняет функции опорной поверхности или среды движения машин, параметры которых оцениваются случайными величинами и носят нелинейный характер.

Основы механики взаимодействия *РО* с предметом труда были заложены академиком В.П. Горячкиным [3]. Большой вклад в развитие теории измельчения растительных материалов внесли Н.Е. Резник [4,5], В.А. Ясенецкий [6], М.З. Цымерман [7] и многие другие. Теория измельчения кормов представлена в работах Г. М. Кукты [8], В.Р. Алешкина [9], Ф.С. Кирпичникова [10], Г.Е. Листопада [11] и других авторов. Большой вклад в методику расчетов *РО* внесли М.Н. Летошнев [12], А.Б. Лурье [13,14], И.А. Долгов [15], М.В. Саблик [16], Г.Н. Синеоков [17,18], Л.А. Резников [19] и другие ученые. В последние годы издан ряд фундаментальных учебников и пособий по сельскохозяйственным и лесохозяйственным машинам [20,21,22,23,24,25,26,27].

В опубликованных работах механика взаимодействия рабочих органов машин с предметом труда рассматривается в детерминированной постановке и с ограниченным числом показателей эффективности без учета изменчивости природно-производственных условий и свойств предмета труда. Стохастическое моделирование характеристик предмета труда использовалось в работах Р.А. Полуэктова [28], Н.П. Бусленко [29,30], А.К. Редькина [31], А.Н. Тихонова [32], П.М. Мазуркина [33], а также в публикациях зарубежных авторов [34,35]. Реологическое моделирование взаимодействия рабочих органов машин с предметом труда применялось в работах В.И. Баловнева [36,37], Н.Е. Резника [4,5] и других авторов.

Существующие методы определения свойств предмета труда, как правило, не учитывают взаимодействие их с роторными рабочими органами, либо выполняются при невысоких скоростях взаимодействия. Расчеты рабочих органов, выполненные на основе статических или квазистатических предположений, при которых поверхность движения лесохозяйственных машин и параметры предмета труда рассматриваются как среды и материалы с постоянными физико-механическими и геометрическими параметрами, дают конструктивные параметры, не удовлетворяющие условиям прочности, жесткости и долговечности. Введение в расчеты динамических коэффициентов приводит к увеличению материалоемкости. В сельскохозяйственном машиностроении при обосновании конструктивных параметров машин принимают стационарными нагрузки на машины от предмета труда. Данное допущение оправдано для машин, работающих на сельскохозяйственных старопашотных

почвах. Однако при обработке лесных почв, изобилующих древесными включениями, на *РО* лесохозяйственных агрегатов передаются импульсные нагрузки, носящие нелинейный характер.

При обосновании параметров *РО* следует, прежде всего, оценить их взаимодействие со специфическим предметом труда. Однако *РО* передают на машину дополнительные нагрузки, связанные с кинематическим (несиловым) возбуждением колебаний, неуравновешенностью вращающихся масс, сопротивлением воздуха. В почвообрабатывающих машинах *РО* выполняют функции опорных элементов и движителя. Кроме того, *РО* и опорные элементы лесохозяйственных машин деформируют опорную поверхность. Данные аспекты функционирования *РО* не изучались. Недостаточно использовались в опубликованных исследованиях компьютерные технологии, хотя стандарт ISO 9000 явно требует для повышения качества любой деятельности внедрения современных компьютерных разработок.

Целью настоящей работы является повышение технического уровня *РО* лесохозяйственных машин за счет использования при их исследовании, разработке, конструировании и эксплуатации научно обоснованных методов оценки возмущающего воздействия от специфического предмета труда и опорной поверхности движения машинно-тракторных агрегатов. Научной основой для исследований являлись: механика машин [38], реология и механика грунтов [39,40], теория упругости и пластичности [41,42,43,44,45], математическое и компьютерное моделирование динамических систем [46], цифровая обработка сигналов [47], теория эксперимента [48], новые информационные технологии. Книга является логическим продолжением ранее изданной монографии [49]. Материал для данной монографии собирался, обрабатывался и анализировался в течение двадцати лет.

В первой главе даются основы механики взаимодействия *РО* с предметом труда в детерминированной постановке. Приводится схематизация взаимодействия, оптимизация кинематики и результаты компьютерного моделирования *РО* почвообрабатывающих машин, которые оцениваются экспериментальными исследованиями. Приводятся результаты исследований влияния конструктивных параметров роторных рабочих органов на параметры динамики взаимодействия с предметом труда и опорной поверхностью.

Во второй главе разрабатывается механика лесной почвы как многокомпонентной среды с единичными включениями, а в третьей главе - приводятся методика и результаты компьютерного моделирования ее свойств в стохастической постановке. Предлагаемая методика апробируется при компьютерном моделировании физико-механических свойств лесной почвы на основе данных, полученных другими авторами. Приводятся результаты моделирования опорной и тяговой реакции роторных рабочих органов лесохозяйственных машин при взаимодействии с лесной опорной поверхностью движения.

В четвертой главе приводятся результаты исследований напряжений и деформаций в материале при его взаимодействии с *РО*, выполненных на основе реологических моделей. Даются аналитические решения для частных случаев.

В пятой главе дается компьютерная методика экспериментальных исследований механических свойств компонентов предмета труда: лесной подстилки, опавших листьев, хвои. Приводится описание компьютерных программ для обработки экспериментальных данных.

В шестой главе представлены результаты оценки энергоемкости взаимодействия *РО* с предметом труда, приводятся результаты оптимизации основных проектных параметров и режимов функционирования, а в седьмой главе – аналитические исследования частных случаев взаимодействия. Приводятся результаты аналитической и компьютерной оптимизации процессов взаимодействия по критерию энергоемкости измельчения.

Иллюстрации в книге выполнены автором в графическом редакторе КОМПАС-ГРАФИК (АСКОН, лицензия № К-01-00725, СибГТУ). Текст создан в редакторе Microsoft Word (Microsoft, Corp.), на вставленные объекты даны ссылки в подрисуночной подписи. В рисунках и во вставленных объектах применялся шрифт Gost type A (АСКОН), в остальных случаях – Times New Roman (Microsoft, Corp.). Для компьютерного моделирования применялись программы MathCAD (MathSoft, Inc.), MATLAB (MathWorks, Inc.), Microsoft Excel (Microsoft, Corp.) и приложения к ним. Использовались официально зарегистрированные названия программных средств.

# 1 Основы механики взаимодействия рабочих органов с предметом труда

## 1.1 Схематизация взаимодействия рабочих органов с предметом труда и опорной поверхностью

Рабочие органы мобильных лесохозяйственных машин ( $PO$ ) при взаимодействии с предметом труда ( $T$ ) совершают активное вращательное движение с линейной скоростью по концам измельчающих элементов  $V_\omega$  (рисунок 1.1), перемещаясь в пространстве с линейной скоростью  $V_s$ . Для стационарных машин предмет труда в пространстве может перемещаться со скоростью  $V_t$ . Проведенный анализ [49] показывает, что принципиально возможно четыре кинематических схемы парного взаимодействия  $PO$  с  $T$ . Взаимодействие, при котором  $T$  неподвижен, а  $PO$  совершает одновременно вращательное и поступательное движения (схема  $a$ ), характерно для мобильных машин. Для почвообрабатывающих машин данная схема имеет две разновидности в зависимости от совпадения или несовпадения направлений линейной скорости вращения  $V_\omega$  и скорости агрегата  $V_s$  (попутное и встречное фрезерование).

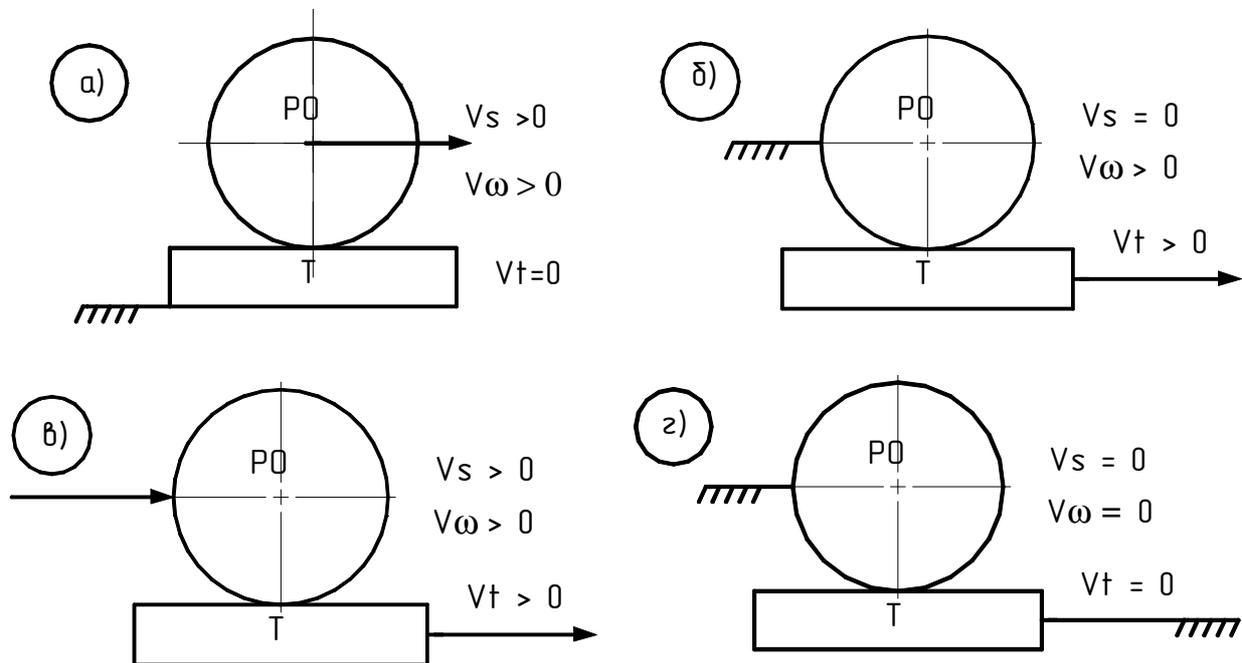


Рисунок 1.1 – Схемы взаимодействия  $PO$  с предметом труда  
Схема  $б$  характерна для  $PO$ , ось вращения которых неподвижна в