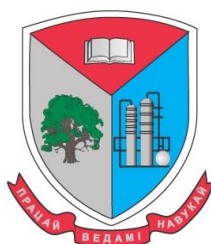


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Международное общество ученых технического образования



## **ЛЕСНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ДИЗАЙН**

**Материалы докладов 87-й научно-технической конференции  
с международным участием**

**31 января – 17 февраля 2023 года**

Минск 2023

УДК 630\*3+674 (06)(07.034.44)

**Лесная инженерия, материаловедение и дизайн** : материалы 87-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 31 января – 17 февраля 2023 г. [Электронный ресурс] / Белорус. гос. технол. ун-т. ; отв. за изд. И.В. Войтов. – Минск : БГТУ, 2023. – 318 с. ISBN 978-985-897-100-7.

Сборник включает результаты научных исследований, выполненных профессорско-преподавательским составом, сотрудниками и аспирантами факультета лесной инженерии, материаловедения и дизайна, а также других ВУЗов, организаций и ведомств.

К открытой печати предлагаются материалы, которые направлены на решение актуальных теоретических и прикладных задач проектирования и эксплуатации лесозаготовительного оборудования и лесных машин. Рассмотрены научно-исследовательские работы, включающие разработку высокоэффективных ресурсосберегающих технологий лесозаготовок и деревообработки, а также позволяющие усовершенствовать конструкции и способы строительства лесных автомобильных дорог. В ряде представленных работ авторами освещены вопросы общетехнического характера, направленные на разрешение отраслевых проблем. Достаточно полно нашло отражение проблем применения нового дереворежущего инструмента, конкурентоспособных материалов и композитов, направления рационального и комплексного их использования.

В целом результаты проведенных научных исследований свидетельствуют, что представленные разработки прошли производственную апробацию, а это позволяет сделать вывод о их полезности специалистам практикам лесной и деревообрабатывающей промышленности, а также лесного машиностроения и станкостроения, проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог.

Рецензенты: Черная Н.В., д-р техн. наук, профессор  
Лыщик П.А., канд. техн. наук, профессор

Главный редактор: Войтов И.В., ректор, д-р техн. наук, профессор

**ISBN 978-985-897-100-7**

© УО «Белорусский государственный  
технологический университет», 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Хорошун Н.В., Насковец М.Т., Россоха Е.В.</i> Совершенствование транспортного обеспечения торговой площадки лесхоза на основе модернизации существующего сортиментовозного парка техники .....	8
<b>Подсекция ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ</b>	
<i>Голякевич С.А., Пищов С.Н.</i> Особенности учета заготовленных круглых лесоматериалов в информационно-измерительных системах харвестеров.....	12
<i>Голякевич С.А., Гороновский А.Р.</i> Методика подбора многооперационных машин в лесозаготовительные комплексы .....	16
<i>Голякевич С.А., Мохов С.П.</i> Сравнительный анализ эксплуатационных свойств форвардеров для условий слабонесущих грунтов .....	19
<i>Голякевич С.А., Протас П.А.</i> Результаты анализа практики выполнения технологических операций харвестерами в различных лесоэксплуатационных условиях .....	23
<i>Кононович Д.А., Мохов С.П., Арико С.Е., Исаченков В.С., Яскевич В.А.</i> Оценка адекватности разработанной математической модели комплекса машин для сбора лесосечных отходов .....	27
<i>Протас П.А., Лыско Д.С.</i> Применение информационно-измерительной системы оптимизации пиломатериалов, обеспечивающей их рациональное использование.....	30
<i>Лыско Д.С.</i> Способы повышения эффективности использования древесного сырья в лесопильном производстве.....	33
<i>Протас П.А., Евкович И.А.</i> Предиктивная аналитика и ее применение в лесопромышленном производстве.....	36
<i>Ледницкий А.В., Протас П.А., Мисуно Ю.И.</i> Возобновляемые древесные энергетические ресурсы как элемент развития зеленой экономики в Республике Беларусь.....	40
<i>Духовник А.А., Мохов С.П.</i> Задачи рубок ухода за лесом.....	43
<i>Мисуно Ю.И.</i> Особенности планирования и организации лесосечных работ с учетом сезонных и климатических условий в Республике Беларусь.....	46
<i>Евкович И.А.</i> Оценка рисков возникновения стихийных бедствий и их последствий в лесном хозяйстве.....	50
<i>Мисуно Ю.И., Протас П.А.</i> Оперативное определение характеристик условий проведения лесосечных работ для обоснования выбора системы машин.....	53
<i>Богдан Е.С., Германович А.О.</i> Применение прицепной рубильной машины повышенной проходимости.....	55
<i>Исаченков В.С., Леонов Е.А., Гарабажу А.А., Клоков Д.В., Барковский Н.В.</i> К вопросу математического моделирования комбинированного технологического оборудования колесной трелевочной машины с шарнирно-сочлененной рамой.....	58
<i>Хорошун Н.В., Насковец М.Т., Россоха Е.В.</i> Навесная трамбовочная вибрационная плита .....	61
<i>Борозна А.А., Пустовой И.Ф., Сушков Е.О.</i> Восстановители и модификаторы поверхностей пар трения для выполнения безразборного ремонта и повышения ресурсоэнергосбережения узлов и агрегатов лесозаготовительной техники и транспорта в лесном комплексе.....	65

<i>Насковец М.Т., Борозна А.А.</i> Направления повышения надежности и снижение энергоемкости транспортно-технологических машин в лесном комплексе .....	69
<i>Ким Ю.А., Зубович Н.П., Насковец М.Т., Войтеховский Б.В.</i> О распределении величин давления под грунтозацепами колесного движителя повышенной проходимости .....	73
<i>Анисимов П.Н.</i> Перспективы автономного энергообеспечения объектов лесной промышленности.....	76
<i>Досалиев К.С., Узакбаева Г., Атамбаев Б.</i> Исследование химического состава фосфогипса для возведения земляного полотна автомобильной дороги.....	79
<i>Юнусалиев Э.М., Абдуллаев И.Н., Досалиев К.С.</i> Мониторинг сейсмостойкости эксплуатируемых зданий с помощью газодетонационного агрегата.....	82
<i>Леонов Е.А., Игнатенко В.В., Исаченков В.С., Клоков Д.В.</i> Сравнительный анализ применения механизированной лесозаготовки и машинного комплекса .....	86
<i>Насковец М.Т., Каледва Г.М., Жлобич П.Н.,</i> Перспективные способы устройства подъездов к лесохозяйственным магистралям на основаниях с низкой несущей способностью грунтов.....	89
<i>Лащенко А.П., Короленя Р.О.</i> Подход к решению закрытой транспортной задачи с использованием матричного исчисления.....	92
<i>Лащенко А.П.</i> Динамическое воздействие подвижного состава на покрытие автомобильных дорог.....	95
<i>Короленя Р.О., Бедная Ю.А.</i> Анализ значений времени проезда сортиментовозами одного километра пути на вывозке древесины.....	96
<i>Короленя Р.О., Барташевич Е.И.</i> Показатели работы сортиментовозов при различных схемах организации перевозки древесины.....	99
<i>Панкратович А.С.</i> Алгоритм подготовки и проведения исследований характеристик технологических элементов лесосек на базе лесохозяйственных учреждений.....	102
<i>Панкратович А.С.</i> Анализ взаимосвязи параметров и размещения технологических элементов лесосеки.....	106
<i>Лыщик П.А., Карпечина В.Ю.</i> Водно-тепловой режим земляного полотна лесных автомобильных дорог.....	110
<i>Науменко А.И., Лыщик П.А., Бавбель Е.И.</i> Производственные испытания дорожных конструкций, устроенных из композиционного малоцементного вяжущего.....	114
<i>Науменко А.И., Лыщик П.А., Бавбель Е.И.</i> Особенности проектирования лесных автомобильных дорог на основе ГИС-технологий.....	116
<i>Науменко А.И.</i> Применение местных грунтов, укрепленных комплексным вяжущим для строительства лесных автомобильных дорог.....	119

**Подсекция ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЯ  
ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

<i>Божелко И.К., Божко Д.В.</i> Оптимизация раскроя круглых лесоматериалов с использованием языка программирования Python.....	121
<i>Гайдук С.С., Прохорчик С.А., Ручкина Е.В.</i> CLT-панели в деревянном домостроении	125
<i>Игнатович Л.В., Гордиевич Е.И.,</i> Сравнительная оценка качества изделий мягкой мебели по органолептическим показателям.....	128
<i>Гордиевич Е.И.</i> Исследование эксплуатационных свойств пружинных матрасов в зависимости от их состава.....	132

<i>Гриневич С.А., Гришкевич А.А.</i> Обзор конструкций когтевых завес современных круглопильных деревообрабатывающих станков.....	135
<i>Дмитренков А.И., Никулин С.С., Никулина Н.С., Томина Е.В.</i> Использование олигомеров на основе побочных продуктов производства полибутадиена для модифицирования древесины.....	139
<i>Дубовская Л.Ю. Игнатович Л.В., Гордиевич Е.И.</i> Экология будущего – синтез-природы и производства мебели.....	143
<i>Леонович О.К., Дупанов С.А.</i> Классификационный подход к оценке качественных характеристик натурального мореного дуба.....	146
<i>Игнатович Л.В., Лосик Е.А.</i> Древесные композиционные материалы на основе шпона в производстве мебели.....	150
<i>Игнатович Л.В., Гордиевич Е.И., Билаш Л.Г.</i> Стиль «Ретро-мебель» в современном интерьере: основные принципы и особенности дизайна.....	153
<i>Клепацкий И.А., Раповец В.В.</i> Влияние потери режущей способности ножей для агрегатной переработки древесины на качество торцевого среза технологической щепы.....	156
<i>Божелко И.К., Коновалова А.А.</i> Вторичная переработка древесины, пропитанной антисептиками.....	160
<i>Коновалова А.А., Божелко И.К.</i> Сравнительная оценка способов и средств для отбеливания древесины.....	164
<i>Леонович О.К., Божелко И.К., Божко Д.В., Коняхина О.В., Шернаев А.Н., Джалалов Б.Т.</i> Определение оптимальной температуры березовых кражей при лущении шпона различной толщины.....	168
<i>Леонович О.К., Дупанов С.А.</i> Особенности защиты археологических изделий из мореного дуба и сосны.....	172
<i>Леонович О.К., Коняхина О.В.</i> Эффективность применения деполимеризованных гидролизных лигнинов в производстве фанеры.....	176
<i>Прохорчик С.А., Гайдук С.С., Ручкина Е.В.</i> Физико-механические свойства напольных покрытий на основе полимерминеральных композиций.....	180
<i>Рудак О.Г., Бабич Д.П.</i> Анализ изменения влажности пиломатериалов по толщине при прогреве в ненасыщенной среде.....	184
<i>Рудак О.Г., Бабич Д.П.</i> Оценка влияния относительной влажности сушильного агента на скорость нагревания пиломатериалов в период начального прогрева..	187
<i>Чуйков А.С., Шетько С.В., Рудак О.Г.</i> Современные производственные комплексы по изготовлению мебельного щита.....	190
<i>Тарутько К.И., Грошев И.М.</i> Композиционные древесные пластины, модифицированные отходами обувных картонов.....	193
<i>Трофимов С.П., Осоко С.А.</i> Сравнение методов расчета коэффициента трения в воздуховодах систем аспирации.....	196
<i>Трофимов С.П.</i> Ретродревесина в деревянном домостроении.....	199
<i>Трофимов С.П.</i> Сегрегация измельченной древесины при формировании слоя в отсутствие вибрации.....	203
<i>Федосенко И.Г., Дубоделова Е.В.</i> Методика определения содержания азота в твердом биотопливе.....	207
<i>Федосенко И.Г., Станковский М.А.</i> Особенности получения из древесины восстановленного сорбента путем улучшения структуры древесного угля.....	210
<i>Федосенко И.Г.</i> Свойства наполненных корьевых плит на минеральном вяжущем.	213
<i>Чуйков А.С., Куневич В.О., Рудак О.Г.</i> Компьютерная анимация подвижных элементов мебели в условиях виртуальной среды.....	217

<i>Шелемет Н.Ю., Чуйков А.С.</i> Композиционные материалы для облегчения конструкции спортивного инвентаря.....	220
<b>Подсекция ОБЩЕТЕХНИЧЕСКАЯ</b>	
<i>Пищов М.Н., Бельский С.Е., Царук Ф.Ф., Журба П.В.</i> Влияние остаточных напряжений после проведения диффузионного упрочнения на развитие процесса усталостного разрушения конструкционных сталей.....	224
<i>Бельский С.Е., Пищов М.Н., Сурус А.И.</i> Исследование влияния температурно-временных параметров поверхностного упрочнения на сопротивление изнашиванию штамповой стали .....	227
<i>Пищов М.Н., Бельский С.Е., Сурус А.И., Блохин А.В., Царук Ф.Ф., Адель Рашид.</i> Исследование кинетики изнашивания инструментальной стали 5ХНМ после различных видов поверхностного упрочнения.....	231
<i>Соболь В.Р., Блохин А.В., Пищов М.Н., Бельский С.Е., Адель Рашид.</i> Влияние поверхностного упрочнения на развитие процесса усталостной повреждаемости металлических материалов.....	235
<i>Царук Ф.Ф., Бельский С.Е., Пищов М.Н.</i> Анализ характеристик усталости вторичных алюминиевых сплавов после их упрочнения.....	239
<i>Пищов М.Н., Бельский С.Е., Журба П.В.</i> Анализ распределения остаточных напряжений в поверхностных слоях после различных видов диффузионного упрочнения.....	240
<i>Пищов М.Н., Бельский С.Е., Царук Ф.Ф., Лось А.М.</i> Повышение усталостных характеристик инструментальной стали поверхностным упрочнением.....	243
<i>Пищов М.Н., Бельский С.Е., Царук Ф.Ф., Лось А.М., Журба П.В.</i> Исследование усталостных характеристик металлов и сплавов при их высокочастотном нагружении .....	246
<i>Блохин А.В., Бельский С.Е., Адель Рашид</i> Повышение комплекса механических характеристик Al-сплавов, изготовленных из вторичного сырья, путем совершенствования технологии термической обработки.....	248
<i>Блохин А.В., Адель Рашид, Лось А.М.</i> Расчет напряженно-деформированного состояния плоских балочных образцов для усталостных испытаний в резонансном режиме с возбуждением колебаний через заделку.....	252
<i>Блохин А.В., Сурус А.И., Пищов М.Н., Нестерова Я.И.</i> Особенность разрушения образцов для испытаний, изготовленных из вторичного сырья при нагружении знакопеременным изгибом.....	256
<i>Сурус А.И., Лось А.М., Блохин А.В., Пищов М.Н., Пархимович М.И.</i> Повышение надежности соединений с натягом.....	260
<i>Лось А.М., Сурус А.И., Блохин А.В., Пищов М.Н.</i> Проблемы эксплуатации стальных грузонесущих гибких органов и пути их решения.....	264
<i>Касперов Г.И., Зязюля У.В., Анашкевич В.Д., Левкевич В.Е.</i> Оценка параметров карьеров Гродненской области, как основа безопасности региона.....	267
<i>Касперов Г.И., Зязюля У.В., Анашкевич В.Д., Левкевич В.Е.</i> Состав и структура карьеров по добыче строительных материалов Брестской области.....	271
<i>Гарабажу А.А., Исаченков В.С., Лоцакова М.П., Клоков Д.В.</i> Определение оптимального характера движения частиц материала в межлопастном пространстве роторно-центробежного смесителя.....	275
<i>Анохин С.М.</i> Параметрическое моделирование в процессе изучения географических дисциплин.....	278

<i>Калиниченко А.С., Козинец А.В., Ковенский А.Е., Басинюк В.Л., Волкотруб Р.Е.</i> Исследование механических колебаний в приводах точного электронного машиностроения .....	282
<i>Козинец А.В., Калиниченко А.С., Лобкова М.П.</i> Основные тенденции развития современного зондового оборудования точного электронного машиностроения..	285
<i>Калиниченко А.С., Козинец А.В., Глазунова А.А.</i> Аппаратно-программные сред- ства прецизионной обработки.....	288
<i>Калиниченко А.С., Лугин В.Г., Нисс В.С., Королев А.Ю.</i> Некоторые особенности формирования модифицированных слоев на титановых сплавах при электро- литно-плазменной обработке.....	292
<i>Полховский А.В., Наркевич А.Л., Шетько С.В., Прохорчик С.А., Максимцова А.В.</i> Механические характеристики лыж: разрушающая нагрузка и жесткость средней части.....	296
<i>Куис Д.В., Степанкин И.Н., Поздняков Е.П., Свидунович Н.А., Раковец А.С., Кравченко А.С., Гордиенко Д.Д.</i> Влияние режимов термохимической обработки на структурообразование и свойства модифицированных слоев стали BOHLER 303M EXTRA.....	300
<i>Куис Д.В., Калиниченко А.С., Григорьев И.Е., Шейнерт В.А., Слуцкий А.Г.</i> Вли- яния режимов получения на структурное состояние и показатели свойств быстроохлаждённых металлических элементов с неравновесной структурой ....	302
<i>Карнович С.И., Цынкович О.Ю., Карнович С.С.</i> Конструкции дереворежущих фрез с регулируемым числом режущих элементов.....	304
<i>Латушкина С.Д., Жоглик И.Н., Куис Д.В., Раковец А.С., Кравченко А.С., Цын- кович О.Ю., Гордиенко Д.Д.</i> Влияние технологических параметров осаждения на структуру и показатели физико-механических свойств нитридных вакуум- но-плазменных покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов.....	306
<i>Найзабеков А.Б., Панин Е.А., Волокитина И.Е., Лежнев С.Н. Толкушкин А.О. Куис Д.В.</i> Исследования с помощью компьютерного моделирования влияния предварительной термической обработки на эволюцию микроструктуры мед- ного сплава, подвергнутого радиально-сдвиговой прокатке.....	309
<i>Раковец А.С., Куис Д.В., Писаренко Л.З., Свидунович Н.А.</i> Влияние перегрева и продолжительности выдержки на эффект модифицирования.....	313
<i>Раковец А.С., Куис Д.В., Писаренко Л.З., Свидунович Н.А., Цынкович О.Ю.</i> Исследование влияния модифицирующих и легирующих добавок на структуру и свойства чугуна.....	316

Н.В. Хорошун  
(СП ЗАО «МАЗ-МАН», г. Минск);  
М.Т. Насковец, доц., канд. техн. наук;  
Е.В. Россоха, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОРГОВОЙ ПЛОЩАДКИ ЛЕСХОЗА НА ОСНОВЕ МОДЕРНИЗАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩЕГО СОРТИМЕНТОВОЗНОГО ПАРКА ТЕХНИКИ**

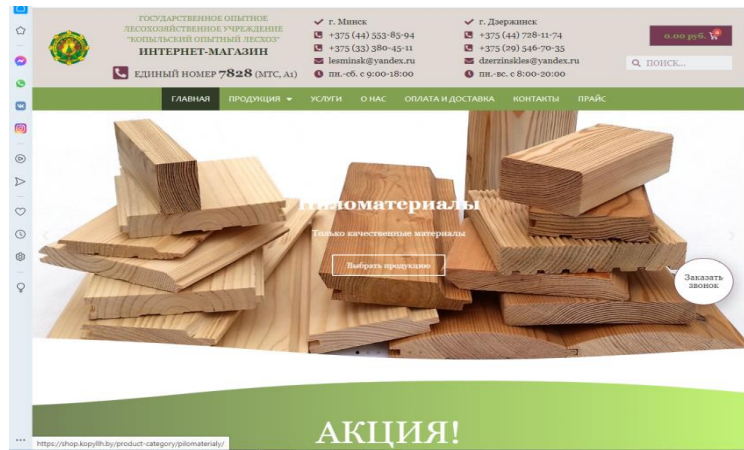
Принимая во внимание сложившуюся неблагоприятную обстановку на внешних рынках, Министерством лесного хозяйства республики Беларусь принято решение об открытии лесхозами отрасли дополнительных торговых площадок. В ассортименте торговых площадок присутствуют лесоматериалы, пиломатериалы, погонажные изделия, топливные гранулы, щепа, дрова. Помимо этого, можно приобрести посадочный материал древесных и кустарниковых пород, саженцы хвойных и лиственных пород, а также мед и иную продукцию.

Новые дополнительные торговые объекты открыты в областных городах Бресте, Витебске Гродно, а также в деревне Калинино Гомельского района (территория деревообрабатывающего цеха) и в Борисове на производственном участке «Неманица». Борисовский опытный лесхоз открыл торговую площадку в Борисове, Копыльский опытный лесхоз – в Дзержинске и Минске (рисунок 1, 2). Новые торговые площадки появятся в Могилевской области и других регионах страны.



**Рисунок 1 – Торговая площадка Копыльского опытного лесхоза в г. Минск**





**Рисунок 2 – Интернет – площадка Копыльского опытного лесхоза**

Продажи представляют собой начальную стадию процесса выхода готовой продукции в сферу использования. На наш взгляд в современных условиях хозяйствования транспортное обеспечение есть многогранный комплекс, представляющий собой совокупность технических и технологических инструментов; экономических, правовых и организационных воздействий; форм и методов управления транспортными процессами и операциями [1]. Также транспортное обеспечение возможно рассмотреть, как одну из ключевых функций логистики, а именно транспортировку, включающую в себя такие главные функции, как перемещение, упаковку, пакетирование грузов и их хранение.

Бизнес – процесс транспортировки товара от складов готовой продукции лесхоза – товаропроизводителя до конечного потребителя, представленного собственной сетью розничной, торговой площадкой или индивидуальным потребителем начинается с принятия руководством лесхоза управленческого решения: использовать собственный транспорт (инсорсинг), либо воспользоваться транспортными услугами сторонней организации (аутсорсинг). Выбор одного из двух вариантов основывается на экономике и социальных аспектах самого лесхоза – товаропроизводителя и складывающейся экономике от привлечения транспорта сторонней организации.

Бизнес – процесс транспортного обеспечения начинается со склада готовой продукции – цеха лесхоза и включает в себя следующие этапы:

- а) подъезд транспортного средства к территории склада готовой продукции – цеха лесхоза;
- б) движение транспортного средства к месту погрузки партии товара;
- в) установка транспортного средства под погрузку;

г) погрузка партий товара в транспортное средство;  
д) доставка партий товара к торговой площадке;  
е) разгрузка партий товара с транспортного средства;  
ж) погрузка партии товара в транспортное средство;  
з) доставка партии товара от торговой площадки к конечному клиенту.

и) разгрузка партий товара с транспортного средства у конечного клиента;

к) проезд транспортного средства в автопарк.

Технология доставки, как часть логистического процесса, включает в себя следующие два этапа:

а) транспортировка и экспедиция заказов;

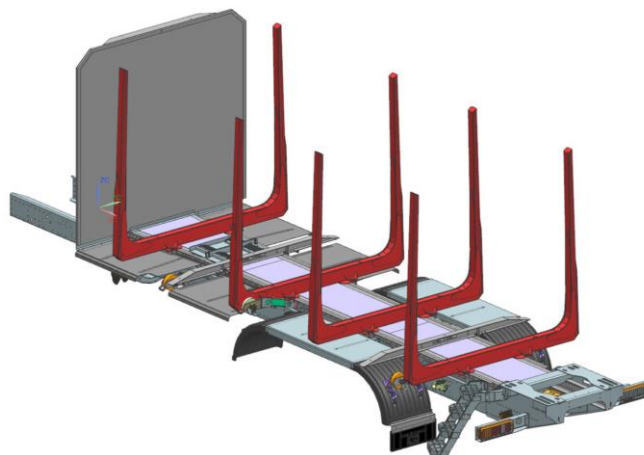
б) сбор и доставка порожней тары и товароносителей.

Транспортировка и экспедиция заказов могут осуществляться складом лесхоза, используя собственный парк транспортных средств или привлекая транспортные компании – перевозчиков, самим заказчиком или логистическим посредником. Для доставки партии товара со склада автотранспортным средством применяют две формы поставки: централизованную и децентрализованную.

Наиболее распространенной и экономически целесообразной является централизованная доставка заказов со склада. В этом случае благодаря консолидации мелких заказов в одну крупную транспортную партию и оптимизации маршрутов доставки можно добиться значительного сокращения транспортных расходов и запасов в пути. Осуществление поставок мелкими и частыми партиями ведет к сокращению ненужных страховых запасов у потребителей. Централизованная поставка может осуществляться двумя способами: маятниковым и кольцевым маршрутами.

В настоящее время в лесхозах отрасли насчитывается порядка 900 единиц сортиментовозного транспорта, где основными являются сортиментовозы–автопоезда производства ОАО «Минский автомобильный завод» и СП ЗАО «МАЗ-МАН». Анализ парка указанных производителей позволяет сделать вывод, что для транспортного обеспечения торговой площадки лесхоза целесообразно произвести модернизацию существующего сортиментовозного парка техники по следующему направлению.

Так как основной реализуемой продукцией являются лесоматериалы, пиломатериалы и погонажные изделия, то считаем экономически целесообразным будет усовершенствование сортиментовозной надстройки с модернизацией коников и ложементов (рисунок 2.).



**Рисунок 3 – Сортиментовозная надстройка  
СП ЗАО «МАЗ-МАН»**

Длина погрузочного пространства – 6,8 м (до основания колонны КМУ). Ширина погрузочного пространства – 2,5 м.

Модернизация коников и ложементов нам видится в изменении высоты коника в сторону ее уменьшения до 1000 ... 600 мм и возможностью комплектования кониками с откидывающимися вниз стойками до 180 градусов, что позволит беспрепятственно производить погрузочно-разгрузочные работы вилочным фронтальным погрузчиком.

Предлагаемый нами подход к совершенствованию транспортно-го обеспечения торговой площадки лесхоза на основе модернизации существующего сортиментовозного парка техники позволит лесхозам отрасли в кратчайшие сроки невидоизменяя конструкцию и непероформируя технические документы автомобильно и прицепной техники с минимальными финансовыми затратами сохраняя социальный пакет водителей эффективно решать логистические задачи транспортного обеспечения торговой площадки лесхоза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусова, Л. А. Транспортное обеспечение сбыта и реализации готовой продукции / Л. А. Белоусова, В. С. Бачмага. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2015. – № 14 (94). – С. 234-237. – URL: <https://moluch.ru/archive/94/21008/> (дата обращения: 22.02.2023).

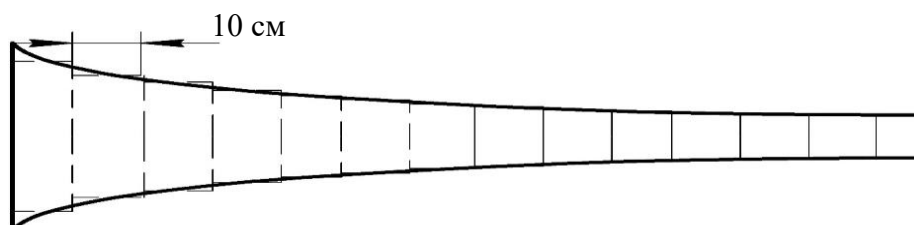
## ОСОБЕННОСТИ УЧЕТА ЗАГОТОВЛЕННЫХ КРУГЛЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ В ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ХАРВЕСТЕРОВ

Каждый производитель информационно-измерительных систем работой харвестера имеет собственный программный интерфейс, реализующий данные функции. При этом общая логика их функционирования в целом схожа. Для каждой породы дерева формируется инструкция по раскряжевке в виде таблицы, по горизонтали и вертикали которой указываются диаметры и длины сортиментов.

До начала разработки лесосеки по распоряжению лица, ответственного за номенклатуру производимой продукции, заполняется таблица инструкций по раскряжевке, находящаяся в электронном виде на центральном компьютере системы управления. Данная инструкция также может быть передана в компьютер харвестера в режиме on-line, как, например, в Швеции.

Исследование информационно-измерительных систем харвестера в направлении учета ими заготовленной древесины позволили установить, что в зависимости от производителя используются следующие основные способы вычисления объема круглых лесоматериалов:

– *Вычисление объема по 10-сантиметровым отрезкам круглого лесоматериала в коре.* Объем вычисляется как сумма объемов 10-сантиметровых цилиндрических отрезков круглого лесоматериала (рис. 1). Диаметр каждого отрезка принимается равным его среднему диаметру с корой.



**Рисунок 1 – Схема вычисления объема ствола  
по 10-сантиметровым отрезкам  
(изображение сбega ствола утрировано)**

– *Вычисление объема по 10-сантиметровым отрезкам круглого лесоматериала без коры.* Способ идентичен предыдущему, однако перед проведением оценки диаметра производится его сокращение на толщину коры. Следует обратить внимание на то, что величина диаметра, отображаемая на экране и выводимая при печати на термопринтер, указывается с учетом коры, а в расчете объема круглого лесоматериала общая толщина коры вычитается в виде статичного процентного показателя от зафиксированного диаметра ствола. Данный процентный показатель во многих системах учета установлен «по умолчанию» в размере 4 % для всех пород и диаметров. При этом существует возможность его изменения на одну из предустановленных регрессионных зависимостей. Данные зависимости определены в 2010 году Лесным исследовательским институтом Швеции (Skogforsk) в виде стандарта StanForD (Standard for Forest machine Data and Communication). Всего их 5:

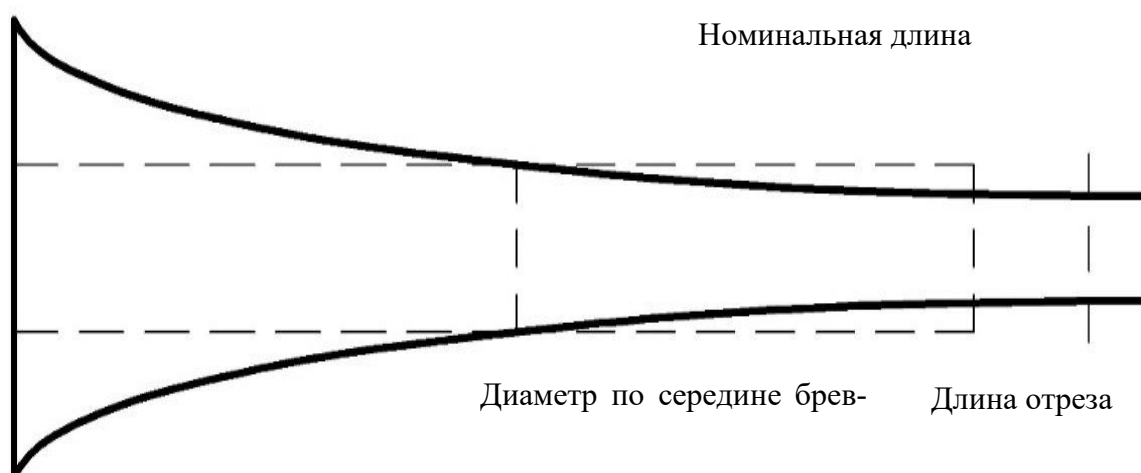
1. Swedish Zacco; 2. German; 3. German Distance Based; 4. Skogforsk 2004 Scots pine, 5. Skogforsk 2004 Norway spruce. В основном в европейских странах используются методы 2, 4, 5.

К примеру, метод Swedish Zacco определяет двойную толщину коры (мм) по линейной зависимости:

$$2H = 3,28 + 0,0370 \cdot D,$$

где  $2H$  – двойная толщина коры, мм;  $D$  – диаметр ствола, мм.

– *Вычисление объема по среднему диаметру круглого лесоматериала без коры.* Такой способ оценки наименее точен, однако используется в ряде стран, к примеру, в Германии. Принципиальная схема такого измерения показана на рис. 2.



**Рисунок 2 – Схема вычисления объема ствола по среднему диаметру сортамента (изображение сбega ствола утрировано)**

Объем круглого лесоматериала определяется как объем цилиндра номинальной длины, которая меньше реально отрезанной длины, диаметр которого равен диаметру посередине круглого лесоматериала без коры. Для того, чтобы система могла учитывать разницу между номинальной и реальной длиной бревна, максимальный допуск на длину сортимента сдвигается в положительную сторону, чаще всего от + 120 до + 170 мм.

Помимо отличий в перечисленных способах учета, которые значительно влияют на расчетную величину объема, в большинстве информационно-измерительных систем длина круглого лесоматериала может быть учтена на выбор либо как фактически измеренное значение в месте остановки харвестерной головки, которое зафиксировал датчик длины, либо как прогнозная номинальная величина, установленная в инструкции по раскряжке. Разница между этими значениями зависит не только от точности устройства, измеряющего длину, но и от величины устанавливаемого оператором пиловочного окна.

Его размер, как правило, принимается в зависимости от типа круглого лесоматериала и скорости его обработки.

Отрицательные величины начала пиловочного окна позволяют харвестерной головке провести раскряжку круглого лесоматериала с длиной меньше базовой на задаваемую величину, а положительные – с длиной строго больше базовой величины. Так, к примеру, при базовом значении длины 600 см задание пиловочного окна со значениями от – 3 см до + 3 см означает, что приемлемыми для данной породы и типа являются круглые лесоматериалы длиной 597–603 см. При значениях пиловочного окна от + 2 см до + 5 см приемлемой длиной будет считаться 602–605 см.

На практике стремятся к минимальному значению пиловочного окна, однако слишком малые его размеры могут привести к «неустойчивой работе харвестерной головки». Энергия движения дерева не может мгновенно погаситься прижатием сучкорезных ножей и блокированием протаскивающих вальцов. В случае если длина круглого лесоматериала превышает заданную базовую длину, скорректированную на величину пиловочного окна, харвестерная головка стремится с помощью реверсивного движения вернуться в допуск пиловочного окна. Однако, при высоких показателях разгонных характеристик она может вновь «проскочить» допускаемую область. Указанное повторяется до того момента пока харвестерная головка не остановится в допуске пиловочного окна, что значительно увеличивает продолжительность выполнения операции.

При определении размеров задаваемого пиловочного окна следует также учитывать, что классификация размеров лесоматериалов по диаметрам и длинам установлена в СТБ 2187. Предельные отклонения от номинальных размеров по длине лесоматериалов должны быть в диапазоне от  $-0,02$  до  $+0,05$  м.

Размерные характеристики заготавливаемых круглых лесоматериалов также регламентируются в СТБ 1711-2007 и СТБ 1712-2007. В соответствии с этими документами установлены следующие значения припусков по длине:

- лесоматериалы для продольной распиловки, строгания, использования в круглом виде и балансовое долготье должны иметь припуск по длине от  $0,03$  м до  $0,05$  м; для лущения – от  $0,02$  м до  $0,05$  м на каждый чурак. При этом фактическая длина бревна длиной  $2$  м и более может быть больше на  $0,05$  м по сравнению с номинальной вместе с припуском;

- для балансов, поставляемых в чураках, припуск по длине не устанавливается. Предельное отклонение по длине балансов –  $\pm 0,02$  м.

- скос пропила допускается в пределах припуска по длине при условии сохранения его минимального значения. В балансах скос пропила не нормируется.

В СТБ 2315-1-2013, СТБ 2315-2-2013, СТБ 2316-1-2013 и СТБ 2316-2-2013 требования по размерным характеристикам установлены в соответствии с СТБ 1667-2012.

В связи с большой инерционностью процесса обрезки сучьев следует задавать размер пиловочного окна с диапазоном менее  $3$  см, а максимальную границу выбирать согласно требованиям приведенных выше стандартов и инструкции.

Анализ изложенных в статье данных позволяет утверждать, что при использовании исправных информационно-измерительных систем, прошедших стандартную процедуру калибровки и проверки точности:

- различные варианты учета заготовленной древесины могут давать отличия в значениях объема круглых лесоматериалов до  $10\%$ ;
- различные размеры пиловочных – до  $1,5-2\%$ ;
- применение вариантов учета с корой или без коры до  $7,5-8\%$ .

При этом конструктивное исполнение измерительной системы, погодные условия, характеристики предмета труда, техническое состояние приводов и механизмов харвестерной головки и др. могут суммарно приводить к погрешности измерения величин более  $7-10\%$ .

С.А. Голякевич, канд. техн. наук, доц.;  
А.Р. Гороновский, канд. техн. наук, доц.  
(БГТУ, г. Минск)

## **МЕТОДИКА ПОДБОРА МНОГООПЕРАЦИОННЫХ МАШИН В ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ**

Исследования проводились в рамках реализации задания «Разработать технологии проведения лесозаготовительных работ комплексами многооперационных машин на основе принципов устойчивого лесопользования» отраслевой научно-технической программы Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь «Сохранение устойчивого развития лесов с учетом изменения климата». В этой связи к разрабатываемой методике предъявлялись следующие требования:

- методика подбора должна быть оперативно реализуема широким кругом специалистов в лесозаготовительной отрасли без необходимости сложных математических расчетов.

- исходные данные для выполнения анализа должны быть легко доступны для лесозаготовителя из открытых источников.

- получаемые результаты должны быть сопоставимы для разных вариантов машин и их дополнительного оснащения для всего диапазона предполагаемых условий эксплуатации.

В результате проведения исследований разработана методика, которая предполагает возможность выбора машин для конкретных условий эксплуатации и формирования из них лесозаготовительных комплексов.

Порядок использования методики следующий. Вначале следует определить характеристики природно-производственных условий проведения лесозаготовок согласно лесоэксплуатационной классификации лесных территорий Республики Беларусь. Выбрать вид проводимой рубки, вид требуемой конечной продукции. Подобрать соответствующий определенным выше параметрам технологический процесс.

После конкретизации условий эксплуатации лесозаготовителю предлагается провести выбор наиболее значимых для него потребительских качеств и эксплуатационных свойств машин, а далее оценить их с использованием расчетных методов и сравнить с их уже эксплуатируемыми машинами.

Основная методологическая проблема выбора конечных технических характеристик каждой машины комплекса заключается в том, что изменение одной из них, влияющей на отдельную цепочку «пока-



затель – эксплуатационное свойство – потребительское качество» непременно вызовет изменение в другой подобной цепочке.

В качестве наиболее важных эксплуатационных свойств для форвардеров следует рассматривать: опорную и геометрическую проходимость, тягово-сцепные свойства, устойчивость и маневренность.

В условиях плотных грунтов (I – II тип местности) при проведении рубок ухода, машины прежде всего должны обеспечивать высокую маневренность и геометрическую проходимость. В условиях проведения рубок главного пользования на грунтах со слабой и пониженной несущей способностью (III – IV тип местности), напротив, машины должны иметь повышенный уровень опорной проходимости и тягово-сцепных свойств при обеспечении приемлемого уровня маневренности и устойчивости.

Далее по выбранным техническим характеристикам машин – осуществить подбор конкретных моделей машин в лесозаготовительный комплекс и для каждой машины произвести выбор дополнительного оснащения.

Результатом реализации методики может быть выбор сразу несколько вариантов машин. Поэтому для окончательного подбора машин в комплекс мы рекомендуем использовать ряд ниже изложенных принципов, а также, для конкретизации выбора – экономический или комплексный технический критерий оценки эффективности их эксплуатации.

Основные принципы подбора машин в лесозаготовительные комплексы – следующие:

1. Машины и их дополнительное оснащение, включаемые в лесозаготовительные комплексы по своим конструктивным и технологическим параметрам должны соответствовать потенциальным природно-производственным условиям эксплуатации: рельефу местности, почвенно-грунтовым и лесорастительным условиям, виду заготавливаемой древесины и т.д.;

2. Машины должны соответствовать действующим лесохозяйственным требованиям и требованиям соответствующих национальных стандартов;

3. Применяемая технология и реализующие ее машины, по возможности, должны обеспечивать минимальные затраты по последующей уборке лесосек и подготовке их к лесовосстановлению;

4. Производительность многооперационных машин в едином лесозаготовительном комплексе должна быть кратной, обеспечивать полную загрузку машин, а их эффективность должна быть обоснована при данном объеме производства. Регулирование кратности произво-

дительности может осуществляться за счет управляемых факторов эксплуатационных условий, которые формируются каждой из машин комплекса и влияют на условия работы и, соответственно, показатели работы последующих.

Для лесозаготовительного комплекса, состоящего из харвестера и форвардера управляемыми факторами эксплуатационных условий, формируемыми харвестером для форвардера будут следующие:

- количество сортиментных групп;
- местоположение пачек сортиментов на лесосеке;
- количество сортиментов в одной пачке;
- ориентация сортиментов относительно волока;
- удаленность места захвата сортиментов от волока;
- положение порубочных остатков.

На основе данных факторов возможна корректировка эксплуатационной эффективности каждой отдельной машины в угоду эффективности комплекса в целом. Для первой машины комплекса данные факторы не устанавливаются.

5. При прочих равных условиях следует сокращать номенклатуру машин, входящих в лесозаготовительный комплекс, стремиться к большей многооперационности каждой машины.

6. Конструкции многооперационных лесозаготовительных машин, входящих в единый лесозаготовительный комплекс, должны быть по возможности унифицированы, а производство их узлов и агрегатов локализовано на территории Республики Беларусь.

Под обеспечением соответствия многооперационных лесных машин потенциальным природно-производственным условиям эксплуатации следует прежде всего понимать способность конструкций машин удовлетворять потребности лесозаготовителей по: производительности, экономичности, надежности, безопасности эксплуатации, обеспечения экологичности, собственной стоимости машин и другим потребительским качествам.

Перечисленная совокупность и порядок действий позволяют сформировать эффективный для конкретных условий эксплуатации комплекс многооперационных лесозаготовительных машин.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ФОРВАРДЕРОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ СЛАБОНЕСУЩИХ ГРУНТОВ

В рамках данной статьи проведен сравнительный анализ характеристик опорной проходимости и энергонасыщенности форвардеров, применяемых в практике лесозаготовок в Республике Беларусь. В перечень сравниваемых моделей вошли как серийно выпускаемые форвардеры, так и перспективные машины.

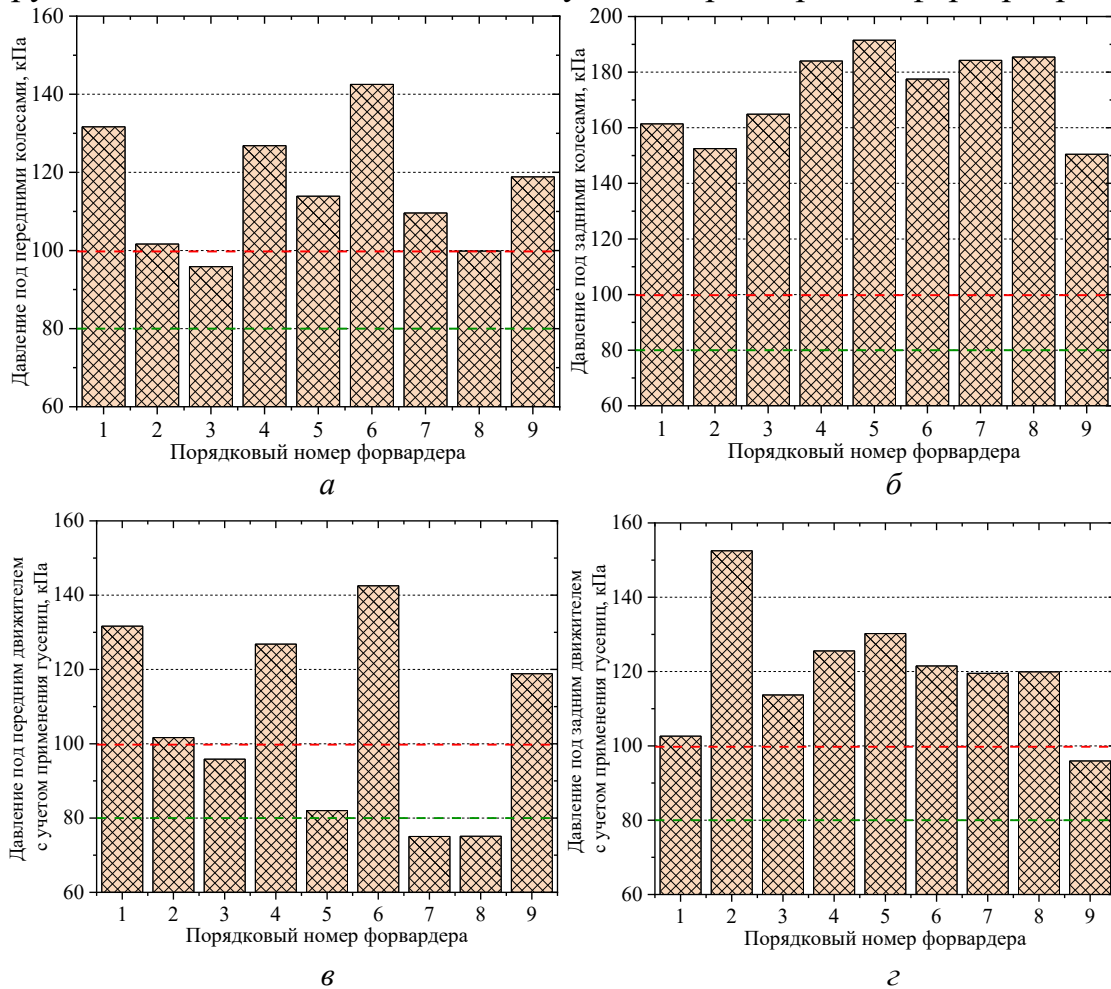
Основной акцент, при выборе расчетных методик для проведения анализа сделан не столько на точность выдаваемого ими конечного результата для каждой конкретной машины, сколько на возможность охвата более широкого круга условий и на относительную сопоставимость результатов для многих сравниваемых вариантов конструкций.

Результаты расчетов опорной проходимости форвардеров (рис. 1) показали, что наилучшей опорной проходимостью среди форвардеров Амкодор (номера 1 – 7 на рис. 1) обладает Амкодор 2661-01, особенно при оснащении задней оси съемными гусеницами. Его расчетное давление на почво-грунты лучше не только в сравнении с серийно производимыми форвардерами Амкодор 2682, 2662, 2641, 2631, но и с новейшими Амкодор FF-1461 и Амкодор FF-1681. Расчеты произведены для варианта транспортировки круглых лесоматериалов с наиболее равномерным распределением их массы. Для форвардеров под номерами 1–7 – длиной 6 м, а для форвардеров 8–9 – длиной 4 м.

Отметим, что на рис. 1 в и г результаты приведены с учетом возможности оснащения движителя наиболее подходящей для грунтов с низкой несущей способностью съемной гусеницей. Результаты для осей, на которые не предусматривается установка гусениц, оставлены без изменений, как для колесного движителя.

Отдельного внимания заслуживает интерпретация результатов для форвардеров Usewood forest master и Vimek 610 SE. Существует мнение, что сравнительно малый вес данных форвардеров обеспечивает им преимущество перед «полноразмерными» ввиду более низкого давления на грунт и как следствие меньшего повреждения корневых систем, что особенно важно при проведении рубок ухода. Действительно, форвардер Usewood forest master обладает одним из наиболее низких давлений движителя передней оси на грунт особенно при использовании съемной гусеницы. Но для задней оси, при усло-

вии реализации полной грузоподъемности его показатели давления на грунт значительно выше, даже чем у «полноразмерных» форвардеров.



*a* – под передним колесами; *б* – под задними колесами; *в*, *г* – под передним и задним движителем с учетом возможности применения гусениц  
 1 – Амкодор 2631, 2 – Амкодор 2641, 3 – Амкодор 2661-01,  
 4 – Амкодор 2662-01, 5 – Амкодор 2682-01, 6 – Амкодор FF-1461;  
 7 – Амкодор FF-1681, 8 – Usewood forest master, 9 – Vimek 610 SE

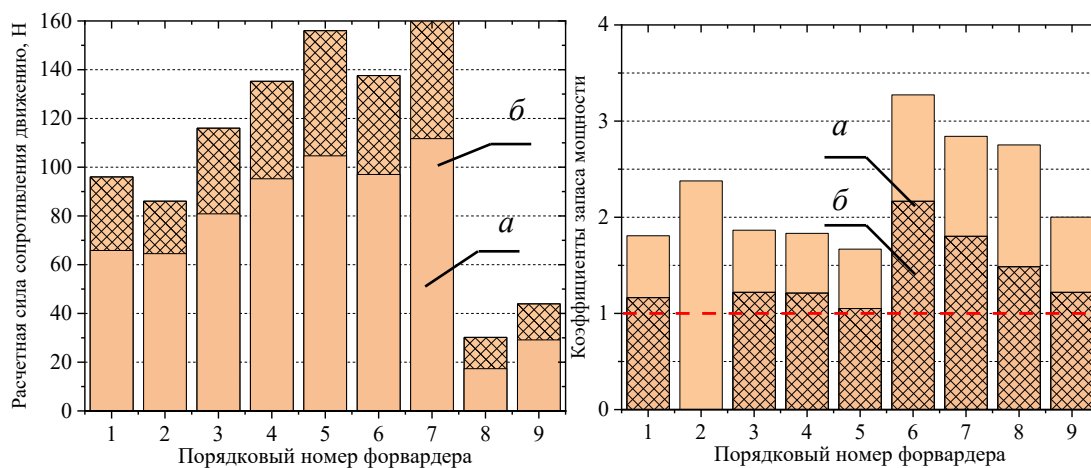
**Рисунок 1 – Давление движителей форвардеров на грунт**

Использование гусениц несколько снижает данный показатель, однако он все еще больше, чем, к примеру, у форвардера Амкодор 2661. Возможность эффективного использования подобного форвардера на слабонесущих грунтах при оснащении его гусеницами должна быть дополнительно обоснована с позиций обеспечения требуемых тяговых свойств и достаточности дорожного просвета. Также следует рассматривать вариант установки гусениц меньшей массы, выполненных у композитных полимеров.

Интерес представляют результаты, полученные для форвардера Vimek 610SE. Он имеет наименьшую величину давления по заднему движителю как при колесном исполнении (150 кПа), так и при комби-

нированном колесно-гусеничном (95 кПа). Однако ввиду использования одиночной передней оси давление на грунт достигает 119 кПа. В сравнении с показателями, достигаемыми другими форвардерами, особенно по задней оси, это не высокое значение, однако в условиях слабонесущих грунтов форвардер Vimek 910 SE будет терять опорную проходимость преимущественно за счет буксования колес передней оси. Существует несколько вариантов снижения давления под колесами передней оси такого форвардера. Первый – конструктивный, разработка форвардера аналогичной конструкции, но с колесной формулой 8K8, с возможностью дальнейшего оборудования его гусеницей, либо применение колес большей ширины, либо использование шин низкого давления. Второй – технологический, заключается в транспортировке сортиментов наибольшей возможной для форвардера длины. Это вызывает перераспределение нагрузки на заднюю ось и, как следствие, повышение опорной проходимости для данного форвардера. С учетом достаточности тягово-сцепных свойств данный форвардер может использоваться на грунтах со слабой несущей способностью даже более эффективно чем большинство «полноразмерных» форвардеров. Для машин эксплуатирующихся в условиях слабонесущих грунтов в дополнение к методике оценки опорной проходимости следует обязательно выполнять оценку тягово-сцепных свойств. На рис. 2 приведены результаты расчета коэффициента запаса мощности и сил сопротивления движению форвардеров для почво-грунтов 3 типа местности с коэффициентами сопротивления качению  $f = 0,25$  и сцепления  $\varphi = 0,4$  (при колесном исполнении движителя),  $f = 0,35$  и  $\varphi = 0,55$  (при колесно-гусеничном исполнении движителя) и рабочим уклоном местности  $i = 0,05$ . Рабочая скорость движения принята равной  $v_{\text{движ}} = 2$  км/ч для всех вариантов.

Использование комбинированных колесно-гусеничных движителей закономерно приводит к росту сил сопротивления движению форвардеров от 1,42 раза для форвардеров Амкодор 2662-01 и FF-1461 и до 1,74 раза для форвардера Usewood forest master (оба с колесной формулой 8K8). Масса каждой гусеницы, установленной на соответствующий балансирный мост для форвардеров под номерами 1, 3 – 7 принималась равной 1050 кг, для форвардера Usewood forest master 450 кг, а для форвардера Vimek 610 SE – 650 кг. Форвардер Амкодор 2641 имеет колесную формулу 4K4 и в виду невозможности оборудования его съемными гусеницами для повышения опорной проходимости в дальнейшем анализе не рассматривался.



1 – Амкодор 2631, 2 – Амкодор 2641, 3 – Амкодор 2661-01,  
 4 – Амкодор 2662-01, 5 – Амкодор 2682-01, 6 – Амкодор FF-1461;  
 7 – Амкодор FF-1681, 8 – Usewood forest master, 9 – Vimek 610 SE

**Рисунок 2 – Расчетные силы сопротивления движению и коэффициенты запаса мощности форвардеров в колесном (а) и комбинированном колесно-гусеничном (б) вариантах**

Для форвардера Амкодор 2682-01 (№ 5 рис. 2) использование гусениц на всех балансирных мостах приводит к существенному сокращению коэффициента запаса мощности. На практике это означает продолжительный разгон, снижение средних рабочих скоростей, невозможность повышения рабочих скоростей в заданных условиях и как следствие снижение общей производительности транспортных операций. Поэтому, при обеспечении потребных сцепных свойств, передний балансир форвардера можно не оснащать гусеницами. Это позволит увеличить коэффициент запаса мощности на 5,9%. Также достаточным запасом мощности на привод движителя как в колесном, так и в колесно-гусеничном исполнении обладают форвардеры Usewood Forest Master (2,725 и 1,485 соответственно) и Vimek 610 SE (2,0 и 1,22 соответственно).

Из зависимостей на рис. 2 видно, что новые форвардеры Амкодор FF-1461; и Амкодор FF-1681 обладают значительным запасом мощности двигателя 3,27 и 2,84 в колесном исполнении и 2,17 и 1,8 в колесно-гусеничном. В описанных условиях это позволяет использовать данные форвардеры с увеличенными до 4,3 км/ч и 3,6 км/ч соответственно рабочими скоростями движения (в колесно-гусеничном исполнении). Также возможна реализация запаса мощности путем присоединения дополнительного прицепного звена общей массой с учетом перевозимого груза до 11 тонн при колесном исполнении движителя и до 16 тонн при комбинированном колесно-гусеничном. При собственной массе прицепного звена 4 тонны это от 7 до 12 тонн дополнительной полезной нагрузки.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПРАКТИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ХАРВЕСТЕРАМИ В РАЗЛИЧНЫХ ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ**

В рамках разработки технического кодекса установившейся практики «Технологии разработки лесосек комплексами многооперационных лесозаготовительных машин» научным коллективом кафедры «Лесных машин, дорог и технологий лесопромышленного производства» анализируются общие требования к реализации технологических процессов, их классификация, требования к оборудованию и приспособлениям и информационным технологиям, используемым в технологическом процессе и др. При этом обширно рассматриваются наиболее востребованные на практике вопросы последовательности выполнения отдельных технологических операций, принципиальные технологические схемы, способы и приемы выполнения отдельных работ в технологических процессах.

В настоящей статье основной акцент сделан именно на классификацию способов и приемов выполнения отдельных операций харвестерами в зависимости от условий проведения рубок и реализуемого харвестерами технологического процесса.

Известно, что харвестер, передвигаясь по лесосеке от одного места технологической стоянки к другому, последовательно выполняет операции валки дерева, обрезки сучьев, раскряжевки ствола на круглые лесоматериалы с укладкой их на землю и подсортировкой по длинам, породам, диаметрам и качеству или без нее (в соответствии с заданием).

В процессе проведения исследований установлено, что на практике передвижение харвестера по лесосеке может производиться по следующим вариантам: по заранее сформированным технологическим коридорам; с формированием технологических коридоров в процессе передвижения; без формирования - между деревьями.

Кривизна траектории движения харвестера должна выбираться с учетом необходимости последующего следования по ней форвардера, его габаритных размеров с грузом и маневренных свойств.

Место технологической стоянки выбирается с учетом наибольшей доступности деревьев для обработки, обеспечения устойчивости харвестера, направления последующей валки и перемещения деревь-

ев. Расстояние между технологическими стоянками рекомендуется принимать 0,6-0,8 длины манипулятора, но не более рабочего вылета манипулятора.

Направление валки деревьев следует выбирать с учетом: обеспечения обзорности с места оператора; естественного наклона ствола дерева и кроны; развитости кроны дерева; рельефа местности; направления ветра; возможности последующего перемещения поваленного дерева к местам очистки от сучьев и раскряжевки; требуемого направления укладки получаемых круглых лесоматериалов, а для рубок ухода и несплошных рубок главного пользования также с учетом наименьшего повреждения оставляемых деревьев.

Захват дерева харвестерной головкой следует производить таким образом, чтобы ось ее подъема-опускания располагалась перпендикулярно предполагаемому направлению валки.

Захват крупных деревьев, имеющих низкорасположенное начало сучковой зоны следует производить на высоте равной 1,2–1,5 высоты харвестерной головки с последующей обрезкой ниже расположенных сучьев путем перемещения головки вниз обратным движением ее подающего механизма и опусканием манипулятора.

Задание направления валки осуществляется путем захвата дерева харвестерной головкой с соответствующей стороны и формирования предварительного натяга манипулятором. Направление валки крупных деревьев может дополнительно задаваться путем создания усилия давления манипулятором на ствол. При этом, высота оставляемого пня должна составлять не более 1/3 диаметра дерева в месте среза согласно СТБ 1342-2002. У деревьев, имеющих разделяющийся ствол, допускается срезать каждое ответвление ствола по-отдельности с соответствующим превышением оставляемого пня. Оставшийся не спиленным пень должен быть удален ручным бензомоторным инструментом до завершения разработки лесосеки.

В условиях глубокого снежного покрова захват дерева харвестерной головкой производится выше предполагаемого места спиливания с последующим перемещением харвестерной головки вниз по стволу и продавливанием снега.

В процессе валки крупных деревьев, с целью снижения повреждений технологического оборудования харвестера следует до момента контакта кроны дерева с землей освободить харвестерную головку от дерева путем ее раскрытия и увода в сторону манипулятором. Ствол повторно захватывается харвестерной головкой в его комлевой части только после остановки дерева по его приземлению. Да-



лее перед выполнением операции обрезки сучьев следует произвести оторцовку ствола.

В случае зависания дерева на кронах рядом стоящих деревьев необходимо выполнить его стаскивание путем перемещения манипулятора, протяжки ствола в харвестерной головке, ходом харвестера или совместным использованием данных приемов.

При реализации технологического процесса на сплошнолесосечных рубках, с расположением круглых лесоматериалов перпендикулярно технологическому коридору, валку деревьев рекомендуется осуществлять под углом  $60^{\circ}$  -  $120^{\circ}$  к оси движения харвестера.

В случае продольного расположения круглых лесоматериалов валку деревьев рекомендуется осуществлять под углом  $\pm 30^{\circ}$  к оси движения харвестера. Валка деревьев в направлении места технологической стоянки харвестера не допускается.

Коррекция соответствующего положения круглых лесоматериалов относительно технологического коридора осуществляется последующим перемещением поваленного дерева манипулятором или ходом харвестера.

Перемещение дерева к местам последующей обрезки сучьев и раскряжевки производится, как правило, после его падения. В процессе падения дерева допускается совмещение операций по его перемещению и обрезке сучьев. Не рекомендуется использовать данное совмещение операций при свободном падении крупных деревьев.

Места обрезки сучьев, также следует выбирать исходя из реализуемой технологии разработки лесосеки.

Обрезка сучьев с дерева осуществляется сучкорезным механизмом харвестерной головки. Подача дерева к сучкорезному механизму осуществляется подающим механизмом харвестерной головки. При таком способе для оставления сучьев на волоке следует располагать харвестерную головку со стороны последующего места раскряжевки таким образом, чтобы ножи сучкорезного механизма были обращены в сторону оси движения харвестера и находились в плоскости наружного края ближайшего его движителя. В случае формирования вала порубочных остатков у края волока следует располагать харвестерную головку таким образом, чтобы развернутые в сторону оси движения харвестера ножи сучкорезного механизма находились на удалении не менее 1 метра от плоскости наружного края ближайшего движителя

Дополнительное перемещение харвестерной головки манипулятором вдоль оси ствола в направлении кроны рационально использовать в случае обрезки сучьев с крупных деревьев, недостаточном тяговом усилии подающего механизма харвестерной головки и доста-

точном контакте кроны дерева с поверхностью земли. При этом начальное положение харвестерной головки следует выбирать в зависимости от длины получаемого круглого лесоматериала таким образом, чтобы в процессе перемещения харвестерной головки манипулятором большая часть сучьев оставалась на волоке.

Не рекомендуется выполнять обрезку сучьев при вылете манипулятора более  $\frac{1}{2}$  его длины.

Подача дерева подающим механизмом харвестерной головки в направлении кабины оператора – запрещается.

Обрезку сучьев, как правило, следует производить последовательно для каждого участка ствола и завершается раскряжкой круглого лесоматериала заданной длины. Однако для облегчения начала движения подающего механизма харвестерной головки после раскряжки круглого лесоматериала целесообразно до начала его раскряжки выполнить обрезку сучьев на небольшой части ствола находящейся за предполагаемым местом раскряжки.

В процессе раскряжки, во избежание повреждения круглых лесоматериалов с образованием отщепов, целесообразно располагать харвестерную головку на минимальной высоте от поверхности земли. Следует также следить за тем, чтобы пильный механизм не касался поверхности земли.

Получаемые круглые лесоматериалы рекомендуется укладывать на поверхность земли в пачки, сортированные по длинам, породам, диаметрам и качеству. Следует избегать размещения круглых лесоматериалов вне пачек.

Вершинная часть дерева, а также порубочные остатки, которые после операций обрезки сучьев и раскряжки находятся за пределами технологического коридора или вала должны быть перемещены в место, соответствующее принятому технологическому процессу.

Машинисту харвестера целесообразно передавать машинисту форвардера дополнительную информацию о расположении на пасеках круглых лесоматериалов разных групп сортировки, о рациональной последовательности подвозки круглых лесоматериалов разных групп сортировки, а при одновременной подвозке круглых лесоматериалов нескольких групп сортировки – о последовательности их укладки в коники форвардера.

Д.А. Кононович, зав. лабораторией;  
 С.П. Мохов, канд. техн. наук, зав. кафедрой ЛМДиТЛП;  
 С.Е. Арико, канд. техн. наук, доц.; В.С. Исаченков, ст. преп.;  
 В.А. Яскевич, студ. (БГТУ, г. Минск)

## ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОМПЛЕКСА МАШИН ДЛЯ СБОРА И ТРАНСПОРТИРОВКИ ЛЕСОСЕЧНЫХ ОТХОДОВ

Оценка адекватности математической модели комплекса машин для сбора и транспортировки лесосечных отходов основывалась на сопоставлении результатов, проведенных теоретических и экспериментальных исследований. При этом оценка адекватности проводилась как для статики, так и для динамики. В качестве сравниваемых величин были выбраны реакции под колесами базового шасси в зависимости от места установки технологического оборудования для сбора лесосечных работ, реакции под колесами базового шасси и балансирующей тележки полуприцепа, усилие, возникающее в пружине рабочего зуба при преодолении препятствия в виде пня машиной для сбора лесосечных отходов, усилие, возникающие при сборе лесосечных отходов на лесосеке и усилие, возникающее при уплотнении лесосечных отходов машиной для транспортировки лесосечных отходов. Результаты определения относительной погрешности приведены в таблице 1 и 2.

**Таблица 1 – Значения относительной погрешности определения реакций под колесами базового шасси с установленным оборудованием для сбора лесосечных отходов теоретическим путем**

Базовое шасси и место установки технологического оборудования	Относительная погрешность, %			
	$\delta R_1$	$\delta R_2$	$\delta R_3$	$\delta R_4$
Базовое шасси Л82.2	2,77	2,41	3,58	4,14
Л82.2 с технологическим оборудованием установленным на переднем бруске трактора	3,93	5,78	4,79	4,19
Л82.2 с технологическим оборудованием установленным на задней гидравлической навеске	1,73	2,44	3,90	4,91
Базовое шасси Л1221	2,3	2,13	2,44	2,34
Л1221 с технологическим оборудованием установленным на переднем бруске трактора	4,3	5,93	5,62	3,55
Л1221 с технологическим оборудованием установленным на задней гидравлической навеске	2,58	3,12	4,37	5,31

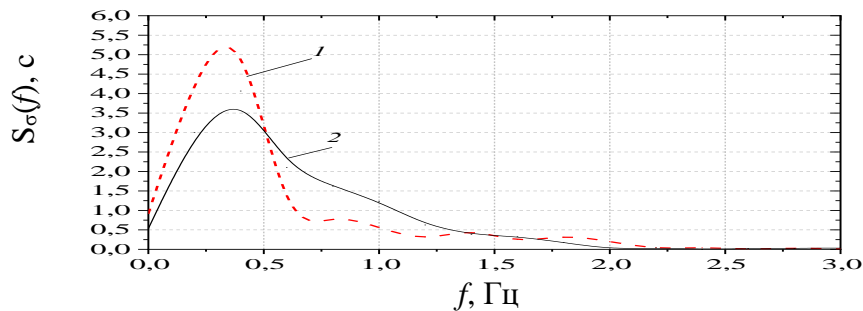
Полученные значения свидетельствуют о том, что средние значения относительной погрешности результатов теоретических исследований по опорным реакциям машины для сбора лесосечных отходов в зависимости от места установки технологического оборудования составляют 4,11%, а максимальное не превышает 5,93%.

**Таблица 2 – Значения относительной погрешности определения реакций под колесами базового шасси с установленным оборудованием для транспортировки лесосечных отходов теоретическим путем**

Базовое шасси и место установки технологического оборудования	Относительная погрешность, %							
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	R <sub>4</sub>	R <sub>5</sub>	R <sub>6</sub>	R <sub>7</sub>	R <sub>8</sub>
Л82.2 с технологическим оборудованием для транспортировки лесосечных отходов	2,24	4,63	6,19	7,24	7,32	7,24	3,26	6,15

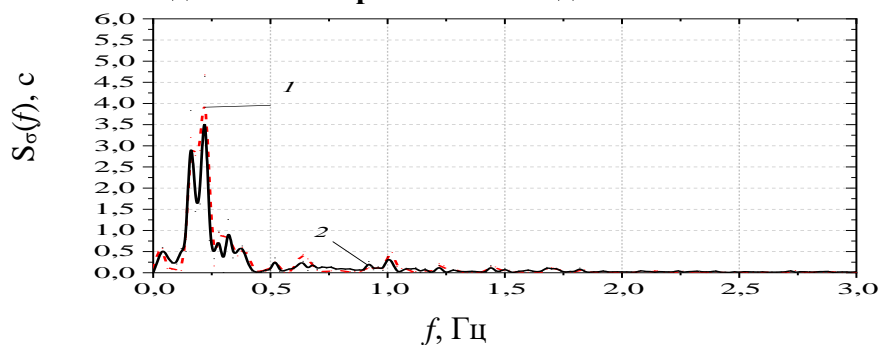
Полученные значения свидетельствуют о том, что средние значения относительной погрешности результатов теоретических исследований по опорным реакциям машины для транспортировки лесосечных отходов составляют 5,53%, а максимальное не превышает 7,24%. Адекватность разработанной математической модели оценена с помощью теста эквивалентности нормированных спектральных плотностей [1, 2, 3] экспериментально полученных значений данных с датчиков силы U9B и устройств деформации УД-1 и соответствующих им теоретических результатов математического моделирования. Экспериментальные данные представляли собой отношение  $K$  выходного напряжения моста Уитсона к его входному напряжению и посредством калибровочной кривой переводились из безразмерных величин  $K$  в показатели силы (Н) и массы (кг), которые регистрировались и обрабатывались с использованием многоканального измерительного усилителя НВМ Spider 8.

В качестве возмущающего воздействия использовался экспериментальный участок лесосеки с предварительно записанным микропрофилем поверхности движения с учетом оставленных после проведения рубки пней рисунок 1 и рисунок 2. Предварительно подтверждено, что сравниваемые экспериментальные и теоретические функциональные зависимости являлись эргодическими и стационарными.



1 – экспериментальная зависимость; 2 – теоретическая зависимость

**Рисунок 1 – Нормированные спектральные плотности при переезде единичной неровности в виде пня**



1 – экспериментальная зависимость; 2 – теоретическая зависимость

**Рисунок 2 – Нормированные спектральные плотности при осуществлении сбора лесосечных отходов на лесосеке**

Проведенная с помощью теста нормированных спектральных плотностей оценка, позволила сделать вывод об адекватности разработанной математической модели. Величины статистики  $D^2$  нормированных спектральных плотностей, сравниваемых параметров, находились в пределах 10,49–13,54 при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и значении области принятия гипотезы  $X_{n,\alpha}^2$  равном 14,07. Это свидетельствует об эквивалентности сравниваемых спектров теоретических и экспериментальных реализаций, а, следовательно, адекватности разработанной математической модели.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лой, В.Н. Колесная трелевочная машина "Беларус" с шарнирно-сочлененной рамой и канатно-чокерным технологическим оборудованием. / В.Н. Лой, Д.В. Клоков, М.К. Асмоловский // Лес-наука-молодежь: Материалы Международной научной конференции молодых ученых / Институт леса НАН Беларуси. – Гомель, 1999. – т.2. – С.132–133.

2. Пищов, С.Н. Применение движителя комбинированного типа для повышения тягово-цепных свойств лесных погрузочно-

транспортных машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / С.Н. Пищов. – Минск, 2008. – 156 л.

3. Хайновский, В.В. Повышение тягово-сцепных свойств двухзвенной погрузочно-транспортной машины с активным приводом прицепного звена: дис. ...канд. техн. наук: 05.21.01 / В.В. Хайновский – Минск, 2005.– 180 л.

УДК 630\*3

П.А. Протас, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);  
Д.С. Лыско, инженер-технолог (ООО «Косвик», г. Заславль)

### **ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ИХ РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ**

В настоящее время, широкое распространение в отрасли получили информационно измерительные системы для сканирования пиломатериалов на наличие дефектов. Машинное сканирование имеет ряд преимуществ перед выполнением данной операции человеком.

Человек принимает решение визуально определяя наличие и размеры дефектов без детального измерения всех их параметров. В данном случае, на результат работы в большей степени влияют опыт человека, выполняющего операцию и его квалификация. Также отрицательное влияние на качество выполняемой операции оказывает снижение эффективности работы к концу рабочей смены за счет усталости, либо человек может думать о чем-то другом отвлекаясь от своей работы. В свою очередь, машинное сканирование не имеет таких влияющих факторов на качество работы, которые свойственны человеку и ряд контролируемых параметров будут значительно больше и детально оценены.

Программа сканирования имеет ряд встроенных параметров, которые включают в себя классификацию дефектов и сортировки, в которые допускается тот или иной дефект. К измеряемым параметрам относятся: геометрические размеры дефектов (ширина и длина), цвет, плотность, глубина и расстояния на котором дефект находится от торца либо кромки доски и другие. Схема системы сканирования представлена на рис. 1. При прохождении пиломатериалов через модуль сканирования датчики, установленные на подающих роликах, передают информацию о скорости движения на считывающие камеры, которые, в свою очередь, строят модель пиломатериала и отмечают подозрительные области (рис. 2). Каждая подозрительная область де-

тально обрабатывается и классифицируется как дефект, либо игнорируется.

При обработке подозрительных областей программа отвечает на два вопроса:

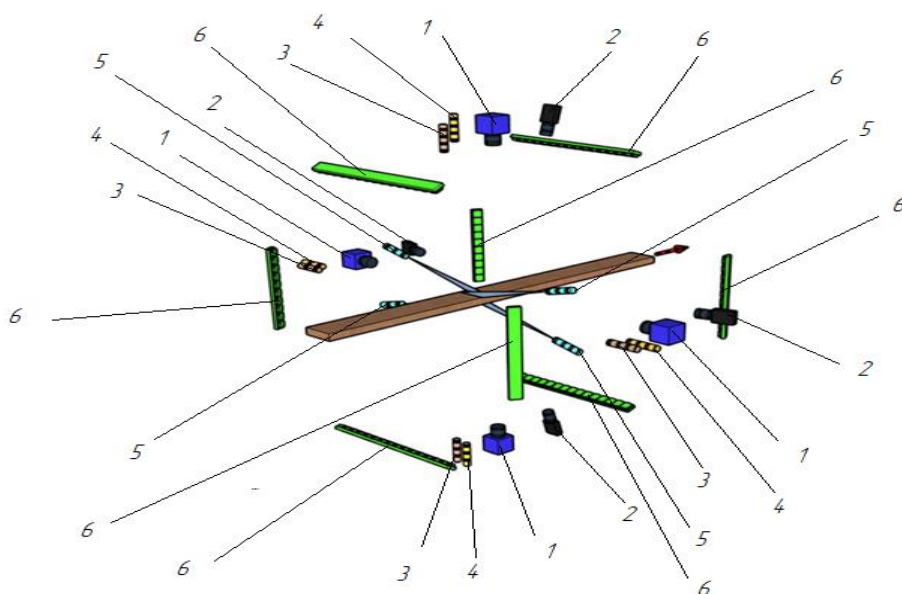
1. Действительно ли это дефект?
2. Если да, то о каком дефекте идет речь?

- наличие сгруппированных темных пятен будет свидетельствовать о возможном наличии таких дефектов как: светлый либо темный сучек, червоточины, трещины;

- области, отличающиеся по цвету от общего цвета пиломатериалов, будут идентифицированы как грибок, химический окрас, сердцевина либо гниль;

- отсутствие части доски на какой-либо поверхности говорит о наличии отверстий от выпавших сучков, трещин, нарушении профиля пиломатериала, механическом повреждении;

- наличие тени при сканировании укажет на повышенную шероховатость поверхности, что будет свидетельствовать о низком качестве обработки поверхности.



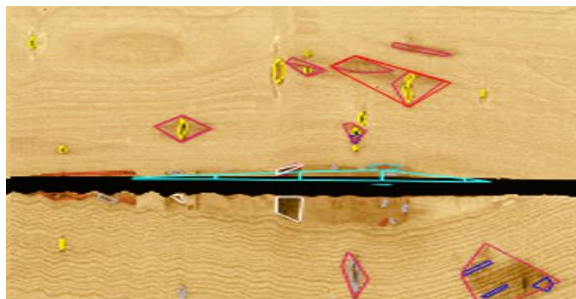
1 – RGB камеры которые определяют цвет пиломатериалов; 2 – мультисенсорные камеры; 3, 4, 5 – лазеры, определяющие геометрию пиломатериалов, шероховатость и полости; 6 – LED освещение

**Рисунок 1 – Схема системы сканирования**

Первый этап анализа подозрительной области сузит круг возможных дефектов до небольшой группы схожих по параметрам, после чего детальная обработка информации классифицирует дефект по определяющим его параметрам:

- тонкие темные линии будут отнесены к трещинам;

- группа темных пятен, формирующих собой фигуру, имеющую очертания овала либо круга, идентифицируется как темный сучек;
- отсутствие древесины овальной либо круглой формы получит классификацию выпавшего сучка;
- и другие.

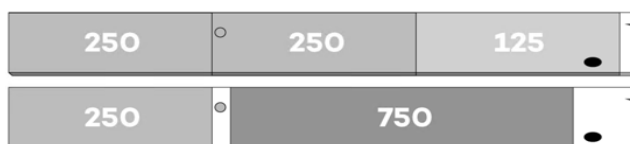


**Рисунок 2 – Выделенные подозрительные области**

Основываясь на полученных данных при сканировании пиломатериалов, программа может мгновенно определить каким образом лучше всего произвести оптимизацию для получения максимального выхода готовой продукции и более высокой ее стоимости, и передает информацию на модуль оптимизации и сортировки.

Основываясь на количестве и классификации дефектов и внесенной информации о стоимости для каждого сорта каждой длины, принимается одно из решений (рис. 3):

1. Получить максимальный выход путем игнорирования дефектов и расторцовки на необходимую длину;
2. Получение более высокого сорта путем вырезания дефектов из пиломатериалов (при этом снижается выход готовой продукции).



**Рисунок 3 – Примеры расторцовки пиломатериалов в зависимости от наличия дефектов**

Учитывая, что машинная сортировка выполняет операцию с большей точностью, скоростью, качеством, более широкому спектру контролируемых параметров и определяет наиболее эффективный метод оптимизации с точки зрения получения большего выхода и стоимости готовой продукции, это делает ее более эффективной, что говорит о больших перспективах использования информационных измерительных систем. Кроме более рационального использования древесного сырья, данные системы позволят увеличить экономические показатели производства.



## СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ В ЛЕСОПИЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В производстве сегодня помимо экономических показателей, таких как прибыль, издержки, себестоимость производства и трудозатраты в совокупности с ними отображаются технические и технологические параметры производства, такие как объемный выход готовой продукции, качественный выход пиломатериалов и спрос на конкретные виды пиломатериалов. При этом объемный и, в большей степени, качественный выход продукции оказывает существенное влияние и на экономические показатели. В этой связи в лесопильном производстве осуществляется поиск решений, обеспечивающих рациональное использование древесных ресурсов и увеличение выхода готовой продукции с единицы перерабатываемого сырья.

Повышение объемного и качественного выхода готовой продукции обеспечивается применением различных способов, каждый из которых имеет свою эффективность, материальные затраты и др.

### *1. Качественная сортировка сырья.*

Принимая во внимание механические и иные свойства древесины, можно назвать ее неоднородным материалом. Диапазон измерения характеристик и физических свойств древесины достаточно велик. От сортировочного процесса всецело зависит дальнейшее целевое использование материала. Качество сортировки лесоматериалов в дальнейшем определит затраты на его переработку и количество образующихся отходов. Небрежность при сортировке может повлечь в будущем не только увеличение отходов, но и расширить статью трудовых и материальных затрат. Качественная сортировка позволит удовлетворять требования любых потребителей. При этом получение большего количества пиломатериалов целевого назначения таких как отделочные, столярные и конструкционные невозможно без использования высокотехнологичного сортировочного оборудования. Операция сортировки сырья в лесопильном производстве должна быть оптимизирована и увязана с технологией лесопиления, применяемым оборудованием, получаемой продукцией, объемами производства.

В некоторых случаях эффективным является также внедрение сортировки полуфабрикатов на отдельных этапах лесопильного производства.

## *2. Обоснование применения выбора лесопильного оборудования.*

Существует множество различных видов оборудования отличающихся по своим характеристикам, что позволяет при грамотном его выборе определить наиболее эффективное для требуемой операции:

- оборудование с программным методом раскроя позволит повысить выход готовой продукции, путем снижения количества образующихся отходов;

- углопильные станки позволяют получать более дорогостоящие пиломатериалы радиального раскроя, но при этом они работают с небольшой производительностью;

- лесопильные рамы обладают высокой производительностью и сравнительно низкой себестоимостью распиловки лесоматериалов, при этом из-за одновременного движения перерабатываемого материала и режущего инструмента значительно снижается качество обрабатываемой поверхности и может привести к нарушению геометрии;

- ленточнопильные станки наряду с высокой производительностью позволяют получить пиломатериалы хорошего качества и высоким полезным выходом, но в то же время имеют высокую стоимость, сложность в эксплуатации и требуют высокой квалификации операторов;

- круглопильные вертикальные станки обладают высокой производительностью, простотой в эксплуатации и небольшой себестоимости, но они эффективно могут пилить бревна без нарушения геометрии и диаметром до 36–40 см.

В настоящее время разработаны ряд методик, позволяющих по отдельным критериям выполнить подбор головного лесопильного оборудования.

## *3. Подготовка сырья перед обработкой.*

За счет использования дополнительного оборудования в лесопильном производстве различного назначения, позволяющего снизить затраты на ремонт оборудования, минимизировать простои из-за поломок, а также повысить качество получаемых полуфабрикатов:

- использование окорочных станков для окорки круглых лесоматериалов позволит получить пиломатериалы более высокого качества и значительно уменьшить износ лесопильного оборудования, так как кора скрывает возможные дефекты круглых лесоматериалов и содержит в себе механические примеси, которые значительно снижают ресурс режущего инструмента во время обработки;

- металлодетекторы и рентгеноскопы позволяют идентифицировать в лесоматериалах металлические включения, которые могут привести к поломкам оборудования и обнаруживать полости в сырье и др.

#### *4. Использование отходов производства.*

Даже при использовании высокотехнологичного оборудования и высокого качества сортировки нельзя исключить образование отходов. Помимо сжигания отходов (которое получило широкое распространение в странах СНГ) возможно их использование для получения различных видов продукции и дополнительной прибыли предприятий:

- горбыльнообрезные станки позволяют из получившегося в результате распиловки круглых лесоматериалов горбыля получать рейку, либо пиломатериалы меньших размеров;

- рубильные машины в комплексе с сортировщиками щепы позволяют переработать кусковые отходы производства на топливную и технологическую щепу. Технологическая щепа может использоваться как в дальнейшем в деревообрабатывающем производстве, так и в смежных областях промышленности;

- из опилок и щепы так же можно получать топливные брикеты и пеллеты которые являются отличным биотопливом и их сжигание обеспечивает получение значительно больше энергии чем опилки и щепа, из которых они сделаны.

Для эффективного применения приведенных способов требуется высокая квалификация инженеров-проектировщиков, технологов, а также операторов станков, что позволит использовать максимально потенциал оборудования и технологических решений.

Вывод: исходя из всего вышесказанного, сегодня существует ряд методов, позволяющих повысить рациональное использование лесосырьевых ресурсов, хотя лесные ресурсы и возобновляемы, использование эффективных технологий переработки позволят сохранить не малую их часть. Для повышения эффективности лесопильного производства целесообразно внедрять более высокое качество сортировки круглых лесоматериалов. При этом следует отметить, что сегодня лесхозы сортируют круглые лесоматериалы по диаметру с градацией 2–4 см, что явно указывает на отсутствие качественной технологии сортировки. Более того, не учитывается внутреннее состояние древесины и многие внешние факторы. Современное лесопильное производство сортирует круглые лесоматериалы по диаметрам с градацией 1 см, а иногда и 0,5 см, что позволяет в значительной мере повысить качество и количество получаемой готовой продукции. Так же углубленная переработка отходов и грамотный подход при выборе оборудования повысит эффективность использования древесного сырья.

## **ПРЕДИКТИВНАЯ АНАЛИТИКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

В настоящее время активно используется такой метод анализа, как предиктивный для обработки и интерпретации информации с целью принятия правильных решений.

*Предиктивная аналитика* (также называемая в литературе прогнозной, либо предсказательной) – это комплекс, состоящий из методов анализа данных и способов их интерпретации, позволяющий принимать успешные решения в будущем на основе результатов прошлых событий [1].

Этот метод основан на статистических моделях и позволяет находить закономерности в исторических и транзакционных данных и определять потенциальные риски и возможности. В качестве основы при выполнении анализа используется опыт аналогичных решений, принятых в прошлом. Главными принципами такой методики являются: классическая стратегия, теория вероятности, функциональная математика, теория игр, корреляционный и регрессионный анализ, экономическая закономерность, экстраполяции трендов.

В современном мире методы прогнозирования широко применяются в различных областях, например: экономической, финансовой, страховой, логистической, туристической, розничной торговли, промышленных предприятий, маркетинге и др.

С применением математических пакетов и информационных технологий начали широко развиваться программные средства, которые применяются для составления самых разнообразных прогнозов – от глобальных до локальных. Они позволяют обрабатывать большие массивы данных, строить линии трендов и т.д. С помощью метода предиктивной аналитики можно, например, изучить исторический опыт предприятия, провести статистическое моделирование и на основании полученной модели спланировать результат его работы.

В настоящее время существует множество методов прогнозирования, но на практике используют 3 основных метода (рис 1).

В процессе прогнозирования и решения задач с помощью методов предиктивной аналитики можно выделить следующие этапы: сбор и подготовка исходных данных; выбор и обоснование математических или экономических моделей по объекту прогнозирования; обработка

информации об объекте прогнозирования, ее уточнение, получение дополнительных характеристик, влияющих на его устойчивость к внешним воздействиям; непосредственно прогнозирование, т.е. получение будущих характеристик объекта в данный момент времени [2].



Рисунок 1 – Методы предиктивной аналитики

В рамках проведения исследований был выполнен анализ предиктивной аналитики и определены возможности ее применения в лесопромышленном производстве, в том числе для оценки прогнозирования эффективности ликвидации последствий стихийных бедствий в лесном фонде.

Проведя исследования, установили, что наиболее целесообразными для лесопромышленного производства могут быть методы математической статистики, а именно: метод теории игр по критерию Вальда и Сэвиджа, а также программные методы с построением линий трендов и экономической эффективности.

Учитывая актуальность изучаемой темы и ее влияние не только на экономику, но также экологию и социальную сферу в последние годы проводятся ряд исследований по оценке методов предиктивной аналитики в лесопромышленном производстве. Такие исследования проводились в научно-исследовательском институте леса земли Баден-Вюртемберг (Германия), Львовском лесотехническом университете (Украина) и др. Так, например, вопросами изучения предиктивной аналитики в лесном хозяйстве, рассматривались в работах

В.Д. Сори́на, В.Я. Гоева, Г.В. Шалабина и других. Построением математических моделей и линий трендов динамики лесного фонда занимались А.Г. Мошкалев, В.К. Ниггель, Г.В. Шалабин, В.Я. Гоев, Л.И. Шершень, Р.П. Делтувас и И.Ф. Мишейкус [3] и другие.

Указанные авторы внесли существенный вклад в разработку приемов автоматизации расчетов, однако решение этой проблемы сводилось, в основном, к построению локальных моделей, освещающих отдельные вопросы с использованием автономной информации и, прежде всего, на стадии лесоустroительного проектирования. Построение сложной системы взаимосвязанных расчетов с использованием единой информационной базы еще не разработано.

Однако в основном проводимые исследования были направлены на изучение состоявшихся стихийных бедствий, их влияния на экономику, лесные экосистемы, оценку экономических потерь от стихийных бедствий. До настоящего времени для условий Республики Беларусь не выполнялись исследования, позволяющие оценить возможность прогнозирования последствий стихийных бедствий в лесфонде и с учетом прогноза разработать способы их ликвидации и планирование мероприятий.

Таким образом, анализ проводимых исследований в данной области показывает актуальность и необходимость дальнейшего развития научного направления с учетом специфики ведения лесного хозяйства в Республике Беларусь и климатической составляющей.

Существенной проблемой является стихийность и непредсказуемость данных негативных явлений, что требует оперативного реагирования и существенных материальных и трудовых ресурсов.

Кроме того, на мой взгляд с применением методов предиктивной аналитики могут решаться и другие задачи для лесного хозяйства, такие как:

- планирование лесосечных работ в течение года: неопределенность здесь обусловлена случайным воздействием погодных изменений, и поэтому состояние лесосек, непостоянством размерно-качественных характеристик заготавливаемого сырья, состоянием техники;

- оперативное управление производством, например, принятие решения о временной переброске техники на поврежденный стихийными бедствиями участок;

- оптимизация определенных параметров оборудования на производстве (например, изменение состояния оборудования на основе предполагаемых погодных условий);

– управление рисками на предприятии – учет тех статистических данных, при которых происходит непредсказуемость стихийных бедствий;

– принятие решения о приоритетном выпуске какого-либо вида продукции при соответствующем сокращении выпуска другой продукции;

Предиктивная аналитика является одним из направлений по обработке больших данных, позволяет лесопромышленному производству принимать более взвешенные и корректные решения сегодня для достижения лучших результатов завтра. Путем анализа данных лесопромышленного производства получают ценную информацию и могут прогнозировать события, находить новые возможности, предвидеть угрозы.

В заключении необходимо отметить, что для эффективной ликвидации последствий от стихийных бедствий в лесном фонде, повышения качества управленческих решений требуется прогноз динамики стихийных бедствий и их влияние на лесные экосистемы. Данный прогноз позволит ускорить принятие рациональных организационных и технических решений, снизить материальные затраты и трудозатраты на ликвидацию последствий стихийных бедствий в лесном фонде, а также обеспечить сокращение сроков ликвидации и соответственно ускорить процесс лесовосстановления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Предиктивная аналитика. Электронный ресурс – [<https://www.cleverence.ru/articles/auto-business/prediktivnaya-analitika-chto-eto-takoe-metody-i-instrumenty-prognosticheskogo-analiza/>]. Дата обращения 22.01.2022.

2. Предиктивная аналитика и ее методы. Электронный ресурс – [<https://in-scale.ru/blog/prediktivnaya-analitika/>]. Дата обращения 22.01.2022.

3. И.В. Шубин. Прогнозирование лесопользования и совершенствование планирования качественного состава лесов: автореф. дис. И.В. Шубин канд. эконом. наук: 08.00.05 / – М., 198., – с.62-63.

А.В. Ледницкий, доц., канд. экон. наук;  
П.А. Протас, доц., канд. техн. наук;  
Ю.И. Мисуно, ассист.  
(БГТУ, г. Минск)

## ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ДРЕВЕСНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ КАК ЭЛЕМЕНТ РАЗВИТИЯ ЗЕЛеной ЭКОНОМИКИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

На фоне глобальных изменений климата все большее внимание обращается на использование в энергетических целях возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Для Республики Беларусь развитие и внедрение ВИЭ актуально для следующих направлений: ветроэнергетика, гидроэнергетика, солнечная энергетика, биоэнергетика. Каждое из этих направлений имеет различную степень эффективности, которая зависит от ряда факторов: климатических условий, наличия ресурсов и инфраструктуры, экологических факторов, влияния на другие отрасли и экономику страны и др.

Повышение потенциала использования ВИЭ стоит одним из приоритетов в плане развития «Зеленой экономики» Республики Беларусь.

В данном направлении Беларусь является участником важнейших международных соглашений по снижению выбросов парниковых газов. Например, в соответствии с Парижским соглашением по климату страны разработали национальные планы мер в области изменения климата. В частности, Беларусь взяла на себя обязательства к 2030 году:

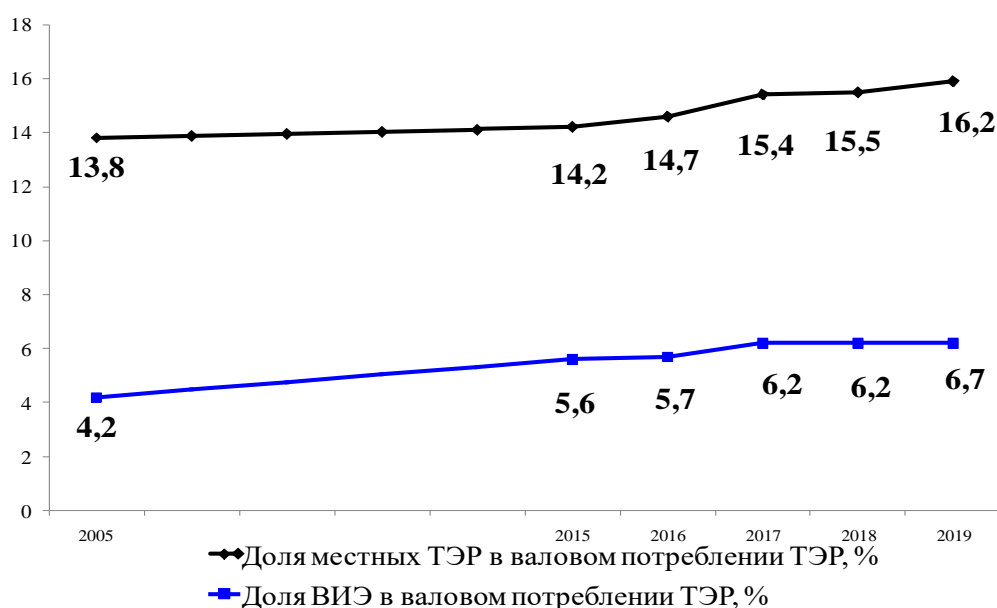
- на 28% уменьшить выбросы парниковых газов (по сравнению с 1990) [1];
- обеспечить выбросы парниковых газов к 2030 г. на уровне не более 96,1 млн. тонн [2].
- увеличить долю возобновляемых источников энергии с 6,2 до 9%;
- уменьшить энергоемкость ВВП на 25% по сравнению с 2010 годом.

В соответствии с Национальным планом действий по развитию зеленой экономики в Республике Беларусь на 2021–2025 годы одним из важнейших направлений предусмотрено **развитие низкоуглеродной энергетике** [3]. Основными целями при этом являются повышение энергетической самостоятельности страны и энергоэффективность во всех секторах экономики. В рамках развития низкоуглерод-



ной экономики особую значимость имеет увеличение доступности использования ВИЭ.

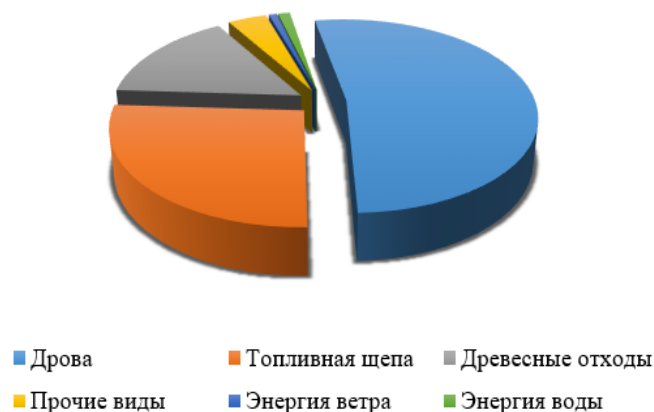
Однако доля возобновляемых источников энергии в валовом потреблении ТЭР пока незначительна и составила в 2019 году – 6,7% [4]. При этом выполнение законодательных и нормативно-правовых актов, направленных на развитие возобновляемой энергетики, обеспечивает постоянное и неуклонное увеличение данного показателя (рис. 1). Доля объема производства первичной энергии из возобновляемых источников должна составлять 8% в объеме валового потребления топливно-энергетических ресурсов к 2026 г. [3].



**Рисунок 1 – Динамика изменения доли местных ТЭР, в том числе ВИЭ в валовом потреблении ТЭР республики**

Баланс использования ВИЭ в Республике Беларусь в 2019 году представлен на рис. 2, из которого видно, что основной объем из них занимает древесная биомасса в виде дров, топливной щепы, древесных отходов. Развиваются и альтернативные источники энергии, в частности, использование биогаза, солнечной энергии и энергии ветра, однако ожидается, что биомасса будет являться преобладающим источником возобновляемой энергии в обозримом будущем.

Следует также отметить, что «зеленая» экономика выступает активным драйвером экономического роста, содействуя достижению Целей устойчивого развития. В Индексе достижения глобальных целевых показателей Целей устойчивого развития в 2020 году Беларусь заняла 18-е место (78,8 балл из 100) и в целом получила оценку выше средней по региону Восточной Европы и Центральной Азии (70,9) [3].



**Рисунок 2 – Баланс использования ВИЭ в РБ в 2019 году, %**

Рассматривая ЦУР в области использования ВИЭ и борьбы с изменением климата необходимо отметить ЦУР 13 и 7. Достижение Цели 13 «Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями» за счет стабилизации уровня выбросов парниковых газов, может произойти благодаря замене высокоуглеродных видов топлива возобновляемыми источниками энергии. В этой связи в Беларуси разработана и реализуется долгосрочная политика по использованию ВИЭ, изложенная в ряде госпрограмм.

Реализация Цели 13 существенно зависит от выполнения Цели 7 «Обеспечение доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Обязательства Республики Беларусь по Парижскому соглашению [Электронный ресурс] / <http://minpriroda.gov.by/ru/paris-ru/>. Дата доступа: 18.02.2023.

2. Государственная программа «Энергосбережение» на период 2016–2020 годы от 28 марта 2016 г. №248.

3. О Национальном плане действий по развитию «зеленой» экономики в Республике Беларусь на 2021–2025 годы. Постановление СМ РБ № 710 от 10 декабря 2021 г.

4. Информация о результатах реализации Государственной программы «Энергосбережение» на 2016 – 2020 годы за 2019 год [Электронный ресурс] / [http://energoeffekt.gov.by/programs/govporgram20162020/20200521\\_progr2019](http://energoeffekt.gov.by/programs/govporgram20162020/20200521_progr2019). Дата доступа: 20.02.2023.

### ЗАДАЧИ РУБОК УХОДА ЗА ЛЕСОМ

Одной из важнейших целей развития лесного хозяйства страны является обеспечение формирования высокопродуктивных и устойчивых лесов, повышение ресурсного потенциала лесов для удовлетворения потребностей экологии и общества. Данные цели отражены в государственной программе «Белорусский лес» до 2025 г. [1], стратегический план развития лесного хозяйства до 2030 г. [2] и др.

Для реализации поставленной цели важнейшим направлением интенсивного ведения лесного хозяйства является качественное и своевременное проведение рубок ухода. Согласно технологическим требованиям, установленными СТБ 1361-2002 «Устойчивое лесопользование и лесопользование. Рубки промежуточного пользования. Требования к технологиям» [3], рубки ухода направлены на выращивание хозяйственно ценных, высокопродуктивных, качественных насаждений и улучшение других полезных свойств леса, увеличение объема лесопользования. Они заключаются в периодической вырубке из насаждений нежелательных деревьев и кустарников для создания благоприятных условий роста лучшим деревьям главных пород и служат источником получения древесины и другого сырья. В последние десятилетия объёмы рубок ухода в лесах Республики Беларусь постоянно увеличиваются. В результате увеличения объемов в течение последних лет сплошных рубок на месте коренных высокопроизводительных сосняков, ельников формируются менее продуктивные леса. Смена пород и породного состава происходит на площади 45-80%. Общий фон этого явления заключается в следующих путях лесообразования: после сплошных рубок вместо сосновых насаждений формируются ельники и смешанные сосняки, после еловых насаждений – лиственно-еловые, елово-лиственные насаждения. Повсеместно идет формирование вторичных лесов. Смена сосновых насаждений на ельники происходит на площади 10-25% от общей площади лесного фонда. Меняется не только возрастная и породная структура лесов. На 50-60% снизилась их продуктивность, на 30-40 лет увеличился оборот рубки, в целом снизилась биологическая устойчивость и функции лесных экосистем. Площадь вторичных лесов, в которых необходимо проводить рубки ухода, достигла величины равной объемам проведения главных рубок. Ускорить смену породного состава, улучшить условия восстановления хвойных пород, организовать оптимальное лесопользование и целевое формирование лесов можно только с по-

мощью рубок ухода. Меры ухода за лесом, как правило, направлены на улучшение качества насаждений и на более полное использование их потенциальной продуктивности. Сложность проведения данных мероприятий объясняется экономическими и технологическими причинами, большой трудоемкостью работ и необходимостью высокой квалификации рабочих. Несмотря на все эти сложности, целесообразность проведения рубок ухода не вызывает сомнений. Без них снижается потенциальная продуктивность лесов, уменьшаются их экологические функции, в значительной мере теряют смысл лесохозяйственные и другие лесохозяйственные работы. Поэтому и доля древесины, полученной при проведении рубок ухода за лесом, является показателем уровня ведения лесного хозяйства.

В настоящее время выделяют следующие виды рубок ухода: осветление, прочистка, прореживание и проходная рубка.

**Таблица – Виды рубок ухода**

Вид рубок ухода	Возраст насаждений, лет			
	хвойных	лиственных		
		дуба, ясеня, клена семенного и смешанного происхождения	березы, ольхи черной, липы, граба	тополя, осины, ольхи серой
Осветление	1–10	1–10	1–10	до 5
Прочистка	11–20	11–20	11–20	6–10
Прореживание	21–40	21–40	21–30	11–20
Проходная рубка	41 и выше	41 и выше	31 и выше	21 и выше

Основные задачи вышперечисленных видов рубок ухода заключаются в следующем:

– Улучшение породного состава древостоев (увеличивается доля главной породы), избежание нежелательной смены пород. Выбор главной породы и уход за ней имеют как экологическое, так и экономическое значение.

– Улучшение товарной структуры древостоев за счет увеличения доли крупной древесины в итоговом запасе сопровождается улучшением качественных характеристик древесины, что является в современных условиях важным технологическим преимуществом.

– Уменьшение времени лесовыращивания или возраста спелости за счет улучшения товарной структуры.

– Увеличение размера пользования древесиной с единицы площади. За время жизни древостоя отмирает более 90% первоначального числа деревьев. Если удалять их своевременно, то можно увеличить размер пользования древесиной примерно в 1,5 раза.

– Улучшение санитарного состояния древостоя. При уходе за лесом удаляют в первую очередь больные и поврежденные вредите-

лями дерева и сухостой. При этом улучшается товарная ценность древостоев и уменьшается возможность заболевания.

– Повышение устойчивости насаждения против повреждений ветром и снегом. После рубки ухода, если она выполнена правильно, не остается деревьев, подверженных ветровалу и снеголому: с наклонным стволом, с однобокой кроной, сильно угнетенных, больных.

– Улучшение качества (сортности) древесины.

Усиление социальной роли леса. Достигается за счет улучшения санитарного состояния древостоя, повышения устойчивости деревьев против болезней и повреждений и в результате целенаправленного изменения состава древостоя. Селекционный эффект. Позволяет рассчитывать на создание благоприятных условий роста лучшим деревьям главных пород. Положительные последствия рубок ухода проявляются только при соблюдении следующих обязательных условий: правильный отбор деревьев в рубку; своевременное начало и окончание рубок; регулярное повторение рубок.

Цели и способы рубок ухода за лесом обуславливаются общими задачами лесного хозяйства, а теоретическое обоснование проводимых мероприятий уровнем экологических и технических знаний в области лесного хозяйства. Наряду с изменениями экологических, хозяйственных и технических предпосылок ведения лесного хозяйства пересматриваются концепции лесоводства, устраняются устаревшие рекомендации и мероприятия, а вместо них создаются новые направления ухода за лесом и способы их осуществления. Предпочтительнее сохраняется и улучшение защитных функций леса, но решение этих задач можно и нужно согласовывать с основными положениями механизации лесного хозяйства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегический план развития лесного хозяйства Беларуси на период до 2030 года: утв. заместителем Премьер-министра Респ. Беларусь 23.12.2014, № 06/201-271. Минск: Совет Министров Респ. Беларусь, 2015. 15 с.

2. О государственной программе «Белорусский лес» на 2021–2025 годы: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 янв. 2021 г., № 52 // Нац. правовой интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100052> (дата обращения 17.01.2023).

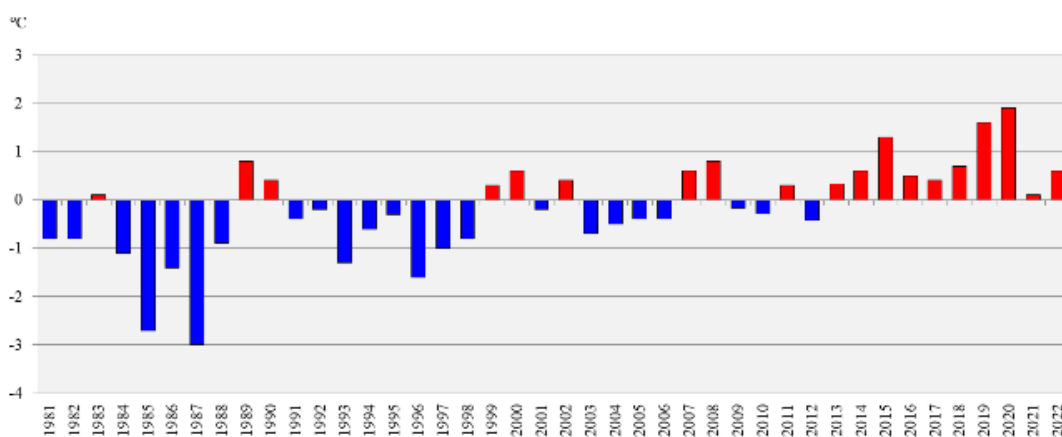
3. Устойчивое лесопользование и лесопользование. Рубки промежуточного пользования. Требования к технологиям: СТБ 1361-2002. Минск: Госстандарт, 2003. 20 с.

## ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ ЛЕСОСЕЧНЫХ РАБОТ С УЧЕТОМ СЕЗОННЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Лесозаготовительное производство, как и в целом весь лесной комплекс, является одним из наиболее климатозависимых направлений деятельности в Беларуси. Плановность и ритмичность работ по заготовке лесоматериалов во многом зависит от климатических факторов. На практике уже давно были разработаны и внедрены необходимые организационные и технологические мероприятия, которые позволяли минимизировать потери времени и древесного сырья, а также снизить простои в производстве.

Однако наблюдаемые в последние десятилетия глобальные изменения климата создают определенные сложности в освоении лесного фонда в течение года. И в первую очередь это касается труднодоступных участков. Ранее их разработка осуществлялась в основном в периоды зимней заготовки. Сейчас климатические условия значительно поменялись. Каким образом и как это можно учесть при планировании и организации проведения лесосечных работ будет рассмотрено в данной работе.

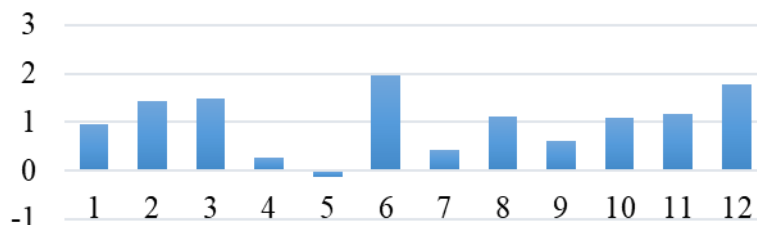
В Беларуси за последние двадцать лет ежегодно фиксируется превышение среднегодовой температуры от климатической нормы (рис. 1) [1].



**Рисунок 1 – Отклонение средней годовой температуры воздуха от климатической нормы (+7,2°C) по Беларуси за период 1981-2022 гг. [1]**

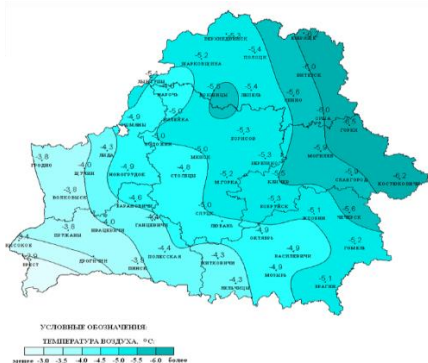
Также наблюдается изменение средней температуры и в течение года. Повышение температурного режима произошло практически в

каждом месяце. Причем до 2016 г. основной рост приходился на зимние и первые весенние месяцы. С 2016 по 2022 гг. основные изменения в сторону увеличения пришлись на зимние месяцы, март и осенние месяцы, а также на июнь (рис. 2).

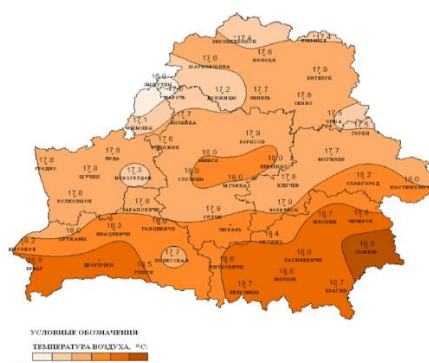


**Рисунок 2 – Отклонение средней месячной температуры воздуха за период 2016-2022 гг. от климатической нормы по Республике Беларусь**

Территориальное распределение средней температуры воздуха в январе и июле можно увидеть на рис. 3 и 4.



**Рисунок 3 – Средняя температура воздуха за январь**

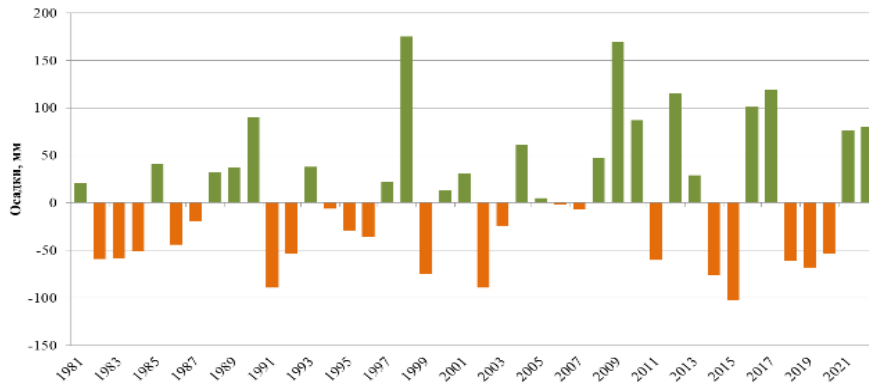


**Рисунок 4 – Средняя температура воздуха за июль**

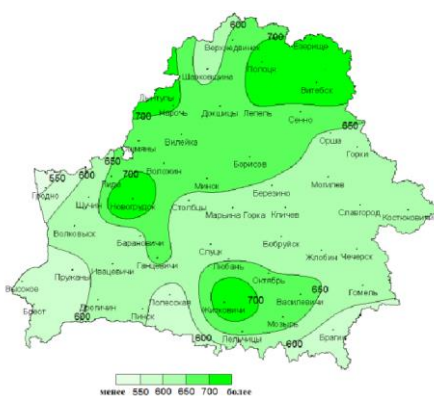
Изолинии температурного режима в январе, как и продолжительность зимнего периода имеют общее направление с северо-востока на юго-запад (рис. 3). Продолжительность зимнего периода изменяется от 85 дней на юго-западе до 125 дней на северо-востоке. Распределение средней температуры в летний период и расположение изолиний продолжительности периода близко к широтному, они имеют общее направление с севера на юг (рис. 4). Продолжительность этого периода изменяется от 143 дней на севере и до 168 дней на юго-западе.

По количеству осадков за последние два года наблюдаются отклонения от климатической нормы в сторону увеличения. При этом за 40-летний период наблюдений отмечена неравномерность выпадения осадков как в течение года, так и за отдельные годы (рис. 5). Отмечено также, что за последние 20 лет повторяемость засушливых периодов участилась [1].

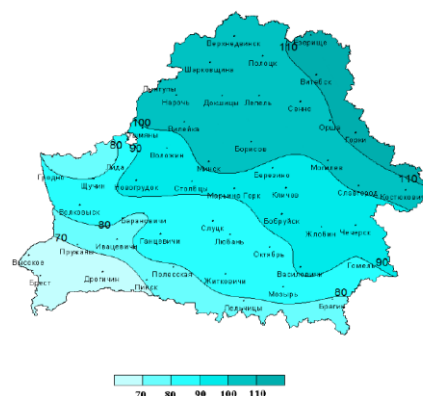
В среднем за год на большей части территории Беларуси выпадает 600–700 мм осадков. На возвышенностях страны осадков несколько больше – 650–700 мм. Низменности, как южные, так и северные получают в основном 600–650 мм осадков (рис. 6).



**Рисунок 5 – Отклонение годовых сумм осадков от климатической нормы (642 мм) по территории Беларуси за период 1981-2022 гг. [1]**



**Рисунок 6 – Количество осадков (мм) за год**



**Рисунок 7 – Количество дней со снежным покровом**

На теплый период года (апрель–октябрь) приходится около 70% всей годовой суммы осадков. Распределение осадков по территории в теплый период года близко к картине распределения годовых сумм. На возвышенностях страны осадков несколько больше 450 мм, на низменностях менее 450 мм. Западные и юго-восточные окраины собирают менее 400 мм осадков. Продолжительность залегания снежного покрова в среднем составляет от 64 дней на крайнем западе страны до 115 дней на северо-востоке (рис. 7). Климатические изменения на территории страны прослеживается через изменение агроклиматических областей. Как можно видеть на рис. 8 на юге страны на Полесье образовалась Новая более теплая агроклиматическая область с большей теплообеспеченностью, для которой характерна самая короткая и теплая зима. Существенным изменением также стал распад Северной агроклиматической области [2].





**Рисунок 8 – Изменение границ агроклиматических областей Беларуси**

В результате смещения границ агроклиматических зон по всей территории Беларуси наблюдается увеличение средней температуры воздуха, снижение количества осадков, продолжительности зимнего периода, а также числа дней со снежным покровом на 10–15 дней. Глубина промерзания почвы уменьшилась на 6–10 см. Повышение температуры первых весенних месяцев приводят к более раннему сходу снежного покрова и переходу температуры воздуха через 0°C в сторону повышения. В среднем за рассматриваемый период этот переход происходит на 10–15 дней раньше средних многолетних значений. На декаду раньше наступает вегетационный период, что ведет к его увеличению в среднем на 12 дней.

Проведенный анализ изменения климатических характеристик показал, что при планировании и организации лесосечных работ учет сезонности необходимо осуществлять в комплексе с такими факторами как: регион, температурный режим, количество осадков, почвенно-грунтовые условия и рельеф местности. Так же было отмечено, что в текущих условиях разработку труднодоступного лесфонда на большинстве территории страны целесообразно переносить на летний период. Стоит отметить, что предлагаемые рекомендации по сезонности лесозаготовок носят временный характер, так как последующее изменение климата приведет к новым вызовам для лесного комплекса, к которым необходимо будет приспосабливаться и потребует от лесной отрасли соответствующих действий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Климатическая характеристика 2022 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://belgidromet.by/ru/climatolog-ru/view/klimaticheskaja-harakteristika-2022-goda-6400-2023/>. – Дата доступа: 24.01.2023.
2. Национальный доклад: уязвимость и адаптация к изменению климата в Беларуси. – Минск, 2014. – 45 с.

## **ОЦЕНКА РИСКОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Существенными и разрушительными стихийными бедствиями в лесном фонде, которые обостряют экологические проблемы, приводят к потере лесных ресурсов, изменению породного состава древостоев, а также к затратам на их ликвидацию, являются такие природные катастрофы как: ветровалы, буреломы, усыхания насаждений и лесные пожары. Такие стихийные бедствия являются стохастическими и непредсказуемыми, которые невозможно спрогнозировать с достаточной степенью вероятности.

Учитывая ежегодные изменение климата, многие специалисты предполагают и дальнейшее воздействие стихийных бедствий на лесной фонд, что и подтверждается статистикой последних лет [1]. Для планирования ликвидации последствий стихийных бедствий, сокращения сроков, снижения затрат, а также сохранения и своевременного восстановления природных ресурсов могут применяться попытки оценки этих рисков для последующей ликвидации последствий стихийных бедствий в лесфонде.

Такие попытки могут заключаться в:

1) **Оценке экономических потерь.** В настоящее время разработана усовершенствованная методика экономических потерь, которая позволяет учесть комплекс влияющих факторов и повысить точность их оценки. Данная методика позволяет оценивать наряду с прямыми потерями дополнительные и косвенные потери, а также дополнительные затраты на ликвидацию последствий природных катастроф, в которые входят: сложные условия эксплуатации техники, снижение норм выработки, увеличение норм расхода топлива, увеличение затрат на техническое обслуживание и ремонт, затрат на перебазировку техники и специалистов, командировочные расходы и др. [1].

2) **Разработка платформы рисков.** Немецкими и Европейскими учеными разрабатываются платформы рисков, которые позволяют накапливать данные, их актуализировать, а также иметь доступ к лесопользователям, лесфондодержателям для принятия своевременных решений [2]. Такая платформа представляет собой веб-инструмент с мобильным приложением, призванный внести свой вклад в концепцию механизма лесных рисков: повышение устойчивости лесов и связанных с ними ландшафтов к будущим воздействиям глобальных изменений, содействие предотвращению, а также управлению рисками и кризисами. Данный механизм оценки рисков позволяет руководству

расставить приоритеты в отношении факторов риска, создающих серьезную угрозу для достижения целей, и, таким образом, организовать максимально эффективное использование дефицитных мощностей.

3) Методика прогнозной аналитики. Предложенная методика позволяет принимать успешные решения в будущем на основе результатов прошлых событий. Метод прогнозной аналитики основан на статистических моделях и позволяет находить закономерности в исторических и транзакционных данных и определять потенциальные риски и возможности. В качестве основы при выполнении анализа используется опыт аналогичных решений, принятых в прошлом. Главными принципами такой методики являются: классическая стратегия, теория вероятности, функциональная математика, теория игр, корреляционный и регрессионный анализ, экономическая закономерность, экстраполяции трендов.

4) Фактическая оценка рисков, которая заключается в проведении работниками мониторинга состояния лесов по факту стихийного бедствия. Для этого используются методы аэрофотосъемки, беспилотно летательный аппарат (БПЛА), измерительный инструмент и др.

Далее в камеральных условиях производится обработка полученных результатов с целью принятия своевременных решений. Особенность частых рисков (их иногда называют статистическими или простыми) заключается в том, что они практически всегда несут в себе потери для лесопромышленных предприятий.

Вероятность наступления данного рискового события постоянно возрастает, поскольку глобальное изменение климата способствует ежегодному увеличению числа ветровалов и крупных лесных пожаров, которых в период сильных ветров, а также засушливой и жаркой погоды становится еще больше. По данным Министерства статистики и анализа Республики Беларусь, в последние десятилетие значительные объемы ветровалов и лесных пожаров по площади и количеству пришлось на 2006, 2009, 2016 и 2022 гг.

Решением проблемы управления экологическими рисками в лесном хозяйстве может стать создание целевого страхового фонда в рамках системы специального страхования на уровне государства.

Вся система коммерческих интересов лесного хозяйства, включая и страхование экологических рисков, строится на необходимости достижения безубыточности лесного хозяйства и формировании адекватных экономических инструментов его эколого-ориентированного развития. На сегодняшний день существуют работы по экономической оценке последствий наступления экологических рисков в лесном хозяйстве с учетом экологического фактора.

Исходя из вышеизложенного, для оценки рисков возникновения стихийных бедствий и их последствий в лесном хозяйстве необходи-

мо разработать систему, которая будет включать в себя различные методы: сбор базы данных, анализ рисков, выбор методов воздействия на риск, система обучения и подготовки кадров и др.

Разработанная система оценки рисков возникающих стихийных бедствий, оказывающих непосредственное влияние на деятельность лесопромышленного предприятия позволит:

- сократить круг рисков, требующих детального анализа;
- дать возможность выделить из набора рисков, оказывающих наибольшее воздействие на данное предприятие, наиболее приоритетные риски с максимальной вероятностью наступления события и негативными последствиями;
- разработать мероприятия, направленные на снижение вероятности рисков или уменьшение последствий отрицательных эффектов, которые могут возникнуть на предприятии.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод о том, что оценка управления рисками лесопромышленного предприятия в современных условиях хозяйствования должна иметь четкую иерархическую структуру с необходимостью ее корректировки по итогам реализации программы мероприятий по снижению рисков и с учетом изменяющихся факторов воздействия окружающей среды.

Снижение масштабов и интенсивности стихийных бедствий, сокращение площади лесов, пройденной пожарами, усохших под воздействием вредных насекомых и болезней, других рисков, то есть сохранение лесного потенциала, будет способствовать поддержанию приемлемого санитарного состояния, жизнеспособности и продуктивной способности лесов, сохранению и поддержанию защитных функций лесов, биологического разнообразия лесов, поддержанию социально-экономических функций лесов. Таким образом, совершенствование оценки управления рисками способствует устойчивому управлению лесным хозяйством.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ледницкий А. В., и др. Экономическая оценка потерь в результате стихийных бедствий в лесном секторе Беларуси в контексте климатических изменений: современное состояние и направления совершенствования с учетом международного опыта. Минск: Изд-во World Bank Group, 2018. 123 с.

2. Немецкая платформа управления лесными рисками и кризисными ситуациями. Электронный ресурс – [<https://www.waldwissen.net/de/waldwirtschaft/schadensmanagement/risikobewertung>]. Дата обращения 24.01.2022.

## **ОПЕРАТИВНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ЛЕСОСЕЧНЫХ РАБОТ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА СИСТЕМЫ МАШИН**

Грамотное проектирование и организация проведения лесосечных работ требует от специалиста лесозаготовительного производства учета большого количества факторов, которые носят систематический и случайный характер. При этом ключевым этапом в проектировании лесосечных работ является выбор системы машин с обоснованием параметров принимаемых машин и оборудования, а также технологии их работы.

Факторы, которые необходимо учитывать при формировании и выборе системы машин:

– природно-производственные условия эксплуатации: таксационные характеристики насаждений, почвенно-грунтовые условия, рельеф местности, климатические условия с учетом принятого сезона выполнения работ;

– принятый технологией процесс лесосечных работ: вид и способ рубки, вид заготавливаемой древесины;

– имеющаяся и проектируемая инфраструктура для выполнения лесосечных работ: принимаемая схема, расположение и параметры транспортно-технологических элементов лесосеки, транспортная доступность к лесосеке;

– себестоимости лесозаготовок;

– требования по обеспечению экологической безопасности всей лесной экосистемы и отдельных ее компонентов.

Природно-производственные условия эксплуатации принимаемой системы машин являются важнейшим фактором, так как они определяют в целом проектируемую технологию работ, возможность обеспечить выполнение требований по охране труда, технике безопасности и охране окружающей среды.

Определение природно-производственных параметров участков лесного фонда, подлежащих разработке проводится на нескольких этапах работ. Так, первоначально подробная характеристика лесных территорий дается при проведении лесоустроительных работ на территории лесфондодержателя каждые десять лет. Последующая оценка и уточнение данных лесоустройства осуществляется при проведении отвода и таксации лесосек перед рубкой. Окончательные параметры лесосеки уточняются при проектировании технологического

процесса и при проведении подготовительных работ к лесосечным работам. В процессе непосредственной разработки некоторые параметры лесосеки необходимо контролировать для того, чтобы сразу ввести корректирующие мероприятия, в том числе и для принятой системы машин.

К оперативно определяемым характеристикам природно-производственных условий проведения лесосечных работ относятся:

- средние параметры подлежащих рубке деревьев;
- степень захламленности и наличие опасных деревьев;
- несущая способность лесного почвогрунта;
- наличие неэксплуатационных площадей;
- текущие и прогнозируемые на период выполнения работ климатические характеристики.

К постоянно контролируемым показателям во время разработки лесосеки необходимо отнести влажность почвы, глубину колеи, работоспособность волоков, в том числе армированных лесосечными отходами.

Методика оценки данных характеристик должна быть достаточно точной и простой для того, чтобы при минимальном инструментальном обеспечении быстро и качественно определить условия выполнения работ. Во многом она будет базироваться на визуальной оценке (определение степени захламленности, наличия опасных деревьев и неэксплуатационных площадей и др.), на применении привычных измерительных инструментов (например, вилка для определения параметров дерева, измерительная рулетка для оценки глубины колеи), на наблюдении и сборе информации о климатических условиях.

Сложным с точки зрения оперативного определения является оценка почвенно-грунтовых условий. Однако в литературе встречается несколько простых методов. Так, например, влажность почвы может определяться с помощью визуального метода Н.А. Качинского; механический состав можно охарактеризовать по способности увлажненного почвенного образца скатываться в шнур и шар; подробная оценка типа почвогрунта включает в себя выкапывание шурфов на глубину до 60 см.

Последующая разработка методики оперативного определения условий эксплуатации лесозаготовительных машин и оборудования позволит минимизировать эксплуатационные затраты при проведении лесосечных работ, снизить негативное воздействие техники на лесную экосистему и при этом обеспечить возможность эффективного проведения последующего лесовозобновления на разработанных участках.

Также данная методика позволит давать обоснованные заключения о возможности проведения работ в сложных эксплуатационных условиях.

Е.С. Богдан, инженер-конструктор  
(ЧПТУП «ТигерЛесЭкспорт», г. Логойск);  
А.О. Германович, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПРИЦЕПНОЙ РУБИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ**

Создание машин и оборудования с повышенной производительностью одна из приоритетных задач машиностроительной отрасли. Исходя из современной технологии лесосечных работ, предусматривающей заготовку древесины на лесосеке хлыстами и сортиментами, заготовка отходов и переработка их на щепу с применением мобильных машин возможна несколькими технологическими схемами. Мобильные применяются для работ на лесосеке, промежуточном и верхнем складе, на деревообрабатывающих предприятиях для переработки отходов, а также для заготовки щепы на складе потребителя [1].

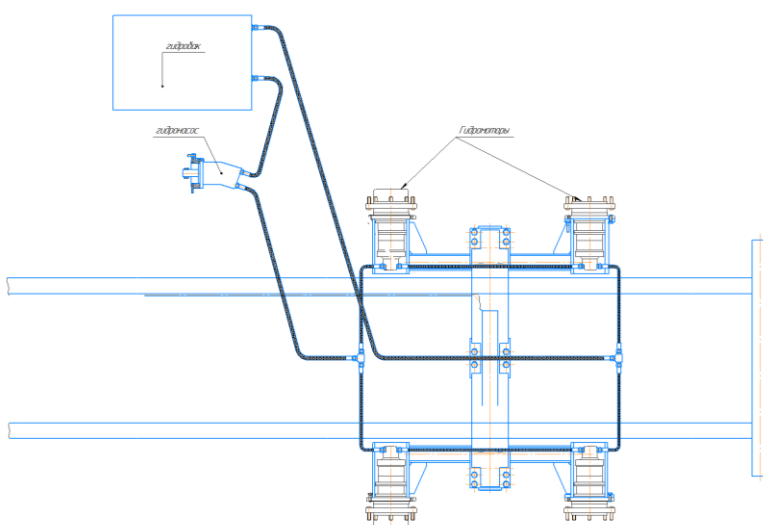
Одним из факторов, влияющих на производительность мобильных рубильных машин, является возможность передвижения к лесосеке, а также скорость движения, развиваемая рубильной машиной при перемещении от лесосеки к лесосеке. Поэтому немаловажно для рубильной машины иметь максимально возможную скорость движения, а также высокую проходимость [1]. Проходимость является важнейшим эксплуатационным свойством лесных машин и в общем смысле определяется способностью надежно двигаться по плохим дорогам и бездорожью [2]. Распределение лесозаготовительных площадей по категориям почвогрунтов в Республике Беларусь следующее: грунты первой категории – 7–9%, второй категории – 35–37%, третьей – 33–35%, четвертой – 22–25% [3]. Первая и вторая категория – наиболее благоприятные почвы по условию проходимости лесных машин. Третья и четвертая категории – неблагоприятные условия движения: суглинистые, глинистые, супесчаные, торфяно-болотные и подзолистые влагонасыщенные грунты. При работе на верхних и промежуточных складах в условиях лесных дорог возможно применение прицепные рубильные машины, транспортируемые колесными тракторами (рис. 1). Основными факторами, ограничивающими работоспособность трактора с тяжелой прицепной машиной на почвах с низкой несущей способностью – являются увеличение сопротивления качению полуприцепа и снижение тяговых возможностей тягача из-за низкого коэффициента сцепления его колес с почвой.



**Рисунок 1 – Прицепная рубильная машина МСА-700**

Эффективным средством повышения тягово-сцепных качеств агрегата в условиях ограниченного сцепления его колес с почвой является активизация прицепа, обеспечивающая снижение необходимой силы тяги на крюке за счет использования силы тяги ведущих колес прицепа.

Оптимальным приводом ведущих колес прицепа может служить объемный гидропривод (рис. 2), одним из основных достоинств которого является возможность регулирования передаточного отношения в зависимости от изменения условий движения, устойчивость работу при малых скоростях и больших нагрузках, удобство компоновки, легкость и простоту реверсирования, надежную защиту от перегрузок с помощью предохранительных клапанов и ограничителей давления [4]. Гидропривод прицепного звена реализуется за счет установки двух или четырех радиально поршневых либо героторных ступичных гидромоторов.



**Рисунок 2 – Схема гидропривода прицепного звена**



Запитка гидромоторов осуществляется от гидронасоса трактора через гидрораспределитель, который позволяет осуществлять регулировку скорости вращения колес, а также позволяет осуществлять реверсивное движение гидромоторов. В кабине трактора устанавливается пульт управления гидрораспределителем, с которого осуществляется запуск, отключение, управление скоростями и направлением вращения гидромоторов привода прицепного звена. Аналогичная система применяется на погрузочно-транспортных машинах «ТИГЕР 14 800 (4WD)», «МПТ-461» предназначенных для сбора, погрузки и транспортировки сортиментов по лесосекам и волокам со слабой несущей способностью грунтов, позволяет повысить эффективность заготовки лесоматериалов при освоении труднодоступного лесосечного фонда.

Применение прицепной рубильной машины повышенной проходимости позволяет повысить эффективность заготовки щепы при освоении заболоченных, труднопроходимых и разрозненных лесосек, работы на почвогрунтах со слабой несущей способности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Германович А. О. Обоснование параметров мобильной рубильной машины на базе многофункционального шасси для производства топливной щепы: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.21.01. Минск, 2015. – 26 с.

2. Богдан, Е. С. Основные конструкции мобильных рубильных машин / Е. С. Богдан, В. В. Мельник // 69-я научно-техническая конференция учащихся, студентов и магистрантов, 2–13 апреля 2018 г., Минск : сборник научных работ : в 4 ч. Ч. 1 / БГТУ, 2018. – С. 229–230.

3. СТБ 1342–2002 Устойчивое лесопользование и лесопользование. Машины для рубок леса. Общие технические требования.

4. Карелина М. Ю. Повышение тягово-сцепных качеств машино-тракторного агрегата с регулируемым объёмным гидроприводом активного прицепа: УДК 629.114.2.02.075 автореф. дис. канд. техн. наук. Москва, 1992. – 34 с.

В.С. Исаченков, ст. преп.;  
Е.А. Леонов, доц., канд. техн. наук;  
А.А. Гарабажиу, доц., канд. техн. наук;  
Д.В. Клоков, доц., канд. техн. наук;  
Н.В. Барковский, студ. (БГТУ, г. Минск);

## **К ВОПРОСУ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КОЛЕСНОЙ ТРЕЛЕВОЧНОЙ МАШИНЫ С ШАРНИРНО-СОЧЛЕНЕННОЙ РАМОЙ**

В настоящее время значительная доля древесного сырья в Республике Беларусь заготавливается специальными трелевочными машинами по хлыстовой технологии трелевки, которая имеет ряд проблемных моментов. Одна из основных – преодоление участков трелевочного и магистрального волоков со слабой несущей способностью грунтов.

Основным технологическим приемом для данной технологии лесозаготовки является сброса пачки хлыстов со следующим подтаскиванием, что значительно увеличивает продолжительность технологического цикла и уменьшения производительности трелевочных машин

Решение этой задачи видится в оснащении колесных трелевочных машин с шарнирно-сочлененной рамой с комбинированным технологическим оборудованием. Для прицепной части технологического оборудования наиболее рациональной является опорная система в виде балансирной тележки. Пачка хлыстов разделяется на две части. Сочетание навесного и прицепного вариантов комбинированного технологического оборудования позволит перераспределить нагрузки и крутящие моменты на полуосях базовой машины в момент буксования, увеличить проходимость, тем самым увеличить производительность. Для определения оптимального состава комбинированного (безчokerного навесного и чokerного прицепного) технологического оборудования необходимо было проведение исследований теоретической направленности.

**Постановка задачи.** Разработать математическую модель движения колесной трелевочной машины с шарнирно-сочлененной рамой с комбинированным (безчokerным навесным и чokerным прицепным с опорной системой в виде балансирной тележки) технологическим оборудованием при работе в особых условиях как динамического объекта управления.

**Основная часть.** Задача была решена разработкой математической модели «Колесная трелевочная машина – навесное безчокерное технологическое оборудование – прицепное чокерное технологическое оборудование – опорная система – пачки хлыстов».

Особенность построения новой модели аналогичны ранее разработанным математическим моделям. При этом выбор расчетно-кинематических и весовых параметров систем проводился на основе анализа показателей, оказывающих преимущественное влияние на динамику поведения всей транспортной системы: статистические величины крутящего момента на передних и задних полуосях; величины вертикальных и угловых ускорений в центре тяжести входящих в систему масс; величины вертикальных ускорений водителя и сиденья.

Входящие в математическую модель колесной трелевочной машины с шарнирно-сочлененной рамой с комбинированным технологическим оборудованием с опорной системой в виде балансирующей тележки дифференциальные уравнения имели ряд допущений, аналогичных ранее разработанным математическим моделям [1 – 6]. За основу принимался базовый трактор с жесткой рамой МТЗ-82.1 и трелевочная машина МЛ-127: машина рассматривается как плоская симметричная система относительно продольной оси в вертикальной плоскости, проходящей через центр тяжести машины; машина движется по опорной поверхности прямолинейно, без спусков и подъемов; колебания масс системы малы; упругие характеристики шин и других упругих элементов линейные или кусочно-линейные, а силы сопротивления пропорциональны скорости деформации; высоты микронеровностей трелевочного волокна под колесами правой и левой колеи усредняются; высокочастотные колебания элементов трансмиссии как с сосредоточенными, так и с распределенными параметрами не рассматриваются; колебания в поперечной плоскости не связаны с продольно-вертикальными; беговая дорожка шины рассматривается в виде безинерционного обруча с радиусом, равным радиусу качения, а контакт колеса с дорогой точечным; шины имеют постоянный контакт с микропрофилем без пробуксовки и бокового проскальзывания; жесткость шин, подвески переднего моста, трансмиссии, прицепного технологического оборудования и пачки хлыстов постоянны.

Предлагаемый математический аппарат позволяет получить в системах высокоуровневого программирования матрицы численных значений отклонений степеней свободы модели, первые производные этих отклонений и соответствующие им моменты времени протекания процесса, тем самым все необходимые параметры оценки динамической нагруженности колесной трелевочной машины с шарнирно-

сочлененной рамой с комбинированным технологическим оборудованием с опорной системой в виде балансирной тележки.

Результаты теоретических исследований следует рассматривать при различных объемах пачки хлыстов, скорости перемещения базовой машины по микропрофилю трелевочных и пасечных волок. Весовые и геометрические параметры комбинированного технологического оборудования могут быть определены изменением входящих в динамическую систему параметров.

**Заключение.** Особенности математического моделирования колесной трелевочной машины с шарнирно-сочлененной рамой с комбинированным (безчокерным навесным и чокерным прицепным с опорной системой в виде балансирной тележки) технологическим оборудованием является предложенное нами минимизация расчетно-кинематических и весовых параметров системы, что существенно снижает количество численных значений степеней свободы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченков, В. С. Математическая модель колесной трелевочной машины / В. С. Исаченков, В. А. Симанович // Труды БГТУ. – 2011 – № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 75–81.

2. Исаченков В. С., Симанович В. А. Обоснование параметров канатно-чокерного технологического оборудования // Труды БГТУ. 2012. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 39–42.

3. Протас П. А., Клоков Д. В. Аналитическое исследование процесса взаимодействия колесных трелевочных машин с пачкой хлыстов и волоком // Актуальные направления научных исследований XXI века: Теория и практика. – 2014 – Т. 2, № 5–4. С. 256–260.

4. Исаченков В. С., Симанович В. А. Обоснование параметров прицепного технологического оборудования колесных трелевочных машин // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 23–27.

5. Математическая модель колесной машины для перемещения длинномерных грузов в особых условиях работы / В. С. Исаченков [и др.] // Автотракторостроение и автомобильный транспорт: сб. науч. тр.: в 2 т. Минск: БНТУ, 2021. Т. 1. С. 251–256.

6. Математическая модель колесной машины с комбинированным технологическим оборудованием для перемещения длинномерных грузов / В. С. Исаченков [и др.] // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. / Министерство образования Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет. Минск: БНТУ, 2021. С. 163–170.

Н.В. Хорошун (СП ЗАО «МАЗ-МАН», г. Минск);  
М.Т. Насковец, доц., канд. техн. наук;  
Е.В. Россоха, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск)

## НАВЕСНАЯ ТРАМБОВОЧНАЯ ПЛИТА

Для уплотнения связных грунтов возможно применять катки на пневматических нишах, кулачковые и решетчатые прицепные катки; для уплотнения несвязных грунтов следует использовать вибрационные и виброударные машины, катки на пневматических шинах.

Наибольшая плотность грунта может быть достигнута при применении машин, обеспечивающих максимальное, допустимое по условиям прочности данного грунта, контактное давление на поверхности (см. табл.).

Контактные давления на протяжении всего процесса уплотнения должны быть близки к пределу прочности грунта. При превышении предела прочности могут возникнуть явления местного разупрочнения (волнообразование перед колесами катков, выдавливание грунта в стороны при трамбовании). При недостаточных контактных давлениях высокая плотность также не может быть достигнута ни уменьшением толщины слоя, ни увеличением числа повторно прилагаемых нагрузок.

Уплотнение грунтов осуществляется следующими технологическими приемами:

1. *Укатка самоходными или прицепными катками*, которая в настоящее время является наиболее производительным и экономичным способом уплотнения земляного полотна.

2. *Трамбование* – универсальный метод уплотнения, пригодный для большинства грунтов. Трамбование применяют для уплотнения грунтов естественных оснований, при доуплотнении существующих насыпей без их разборки, в стесненных местах.

Этим способом можно уплотнять грунт слоями большой толщины за один–два прохода машины. Метод трамбования позволяет получить, плотность грунта значительно выше максимальной стандартной, уплотнять грунт при влажности выше и ниже допустимых пределов. Трамбование можно использовать для уплотнения прочных комковых грунтов, в том числе и крупнообломочных.

3. *Вибрационное уплотнение* применяют для уплотнения крупнообломочных, песчаных, несвязных и малосвязных глинистых грунтов. Одномерные пески эффективно уплотняют только вибрированием.

Виброплиты применяются для уплотнения грунтов, гравийно-щебеночных и других дорожно-строительных материалов в различных областях строительства. Виброплиты позволяют совместить разравнивание и уплотнение сыпучих грунтов.

На рынке стран ЕЭК представлены в основном зарубежные производители навесных виброплит:

1. итальянские производители:

– вибротрамбующие плиты GHENDINI ing FABIO;

– виброплиты Indeco;

– навесное трамбовочное оборудование Simex;

– вибрационные плиты – SPV

2. немецкие производители:

– уплотнитель – трамбовщик серии VP компании LST;

– трамбовочные вибрационные пластины для уплотнения грунта при строительстве компании Stehr Plattenverdichter (рис. 1 а);

– трамбовщик траншей для уплотнения грунта компании Stehr Plattenverdichter;

– 6-тиугольная трамбовочная виброплита для уплотнения грунта компания Stehr Plattenverdichter.

3. навесная виброплита VPN-2400 на МТЗ производства ООО «ТЕХМАР» г. Рыбинск, Ярославская область, Российская Федерация (рис. 2).

Характеристики отдельных навесных виброплит приведены в таблице 1. Отечественные производители виброплит отсутствуют.

Указанное навесное оборудование позволяет эффективно уплотнять грунт при строительстве и может устанавливаться на различную спецтехнику, включая: минипогрузчики, трактора, грейдера и катки.

Конструкция виброплиты обеспечивает полную передачу ударной энергии в грунт и не создает существенных нагрузок на корпус тягача.

Благодаря заложенным в конструкцию виброплиты оптимальным амплитудно-частотным параметрам за 1 проход достигается глубина уплотнения 0,4 – 0,7 метра.

Результат уплотнения серьезно улучшается благодаря сочетанию возмущающей силы и высокой частоты колебаний уплотнительных сил различных направлений и частот. Заменяет дорожный каток различной массы. Трамбовочные виброплиты могут быть одинарными, двойными и тройными.



а

б

а) виброплита Stehr 3CO 80 3 XK немецкой компании Stehr Plattenverdichter

б) навесная виброплита VPN-2400 на МТЗ производства ООО «ТЕХМАР»

г. Рыбинск, Ярославская область, Российская Федерация

**Рисунок 1 – Навесные виброплиты. Общий вид**

**Таблица – Характеристики виброплит**

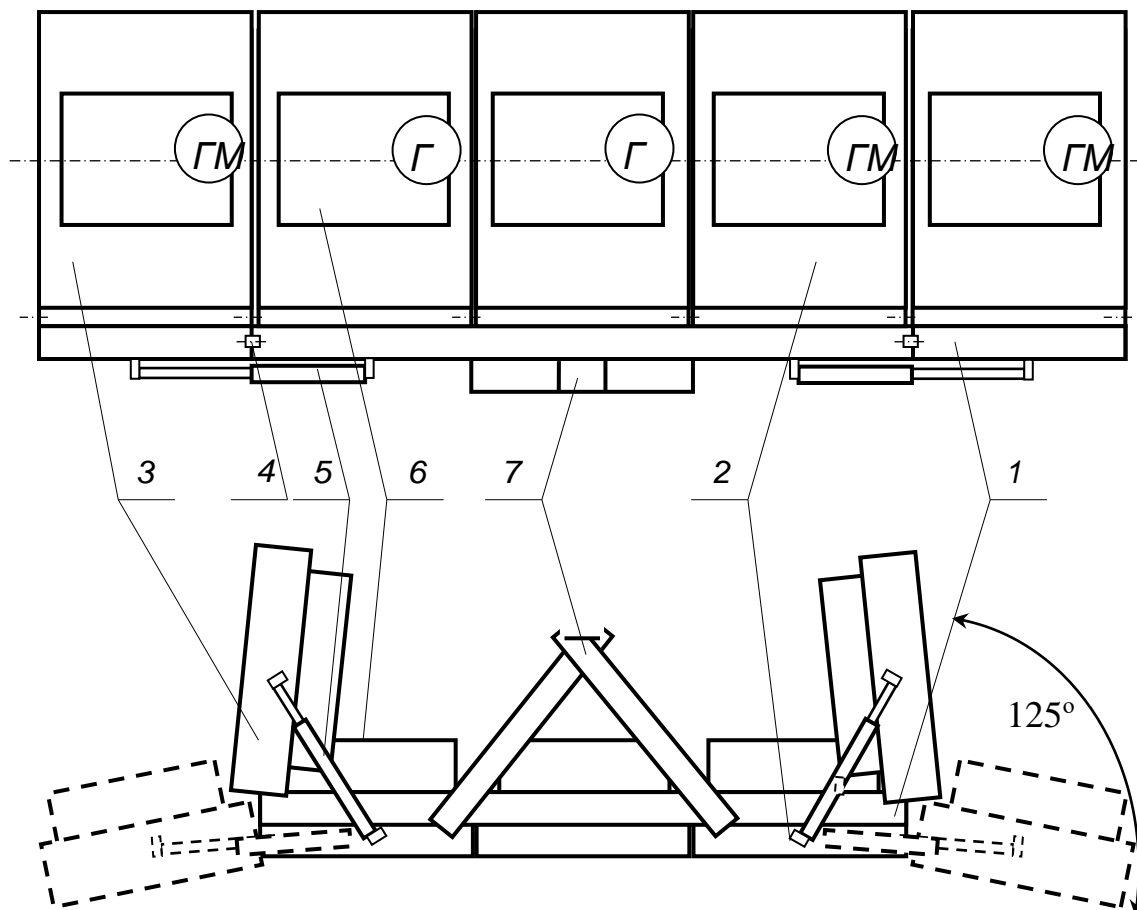
Модель	Stehr 3CO 80 3 XK	VPG-2400
Производитель	Stehr Plattenverdichter	ООО «ТЕХМАР»
Масса, кг	1180	1210
Габаритные размеры Д x Ш x В, мм	1100x2200x850	1000x2400x800
Центробежная сила вибратора, кН	3x60	3x(42 – 60)
Частота колебаний, Гц	<70	<60
Амплитуда, мм	1,4	
Ширина рабочей плиты, м	2,160	2,370
Эффективная рабочая поверхность, кв. м.	1,22	1,26
Глубина уплотнения, м	0,4	0,7
Скорость движения, км/ч	0,6...1,5	0,5...2,0
Привод	гидромотор	редуктор от ВОМ
Толщина плит, мм	20	20
Мощность не менее, л.с.	60	60
Гидропоток не менее, л./мин	200	50 – 70
Рабочее давление, bar	70	180

Изучив характеристики и конструкции навесных виброплит выявлен, по нашему мнению, существенные недостатки:

1. Ширина рабочей плиты находится в диапазоне от 1,9 до 2,4 м. В данном случае эффективность ее применения на лесохозяйственных дорогах иных дорогах шириной до 3,0 метров высоко затратная, так как приходится делать уплотнение в два прохода и зона перекрытия составляет от 0,8 до 1,8 метра;

2. Конструкции навесных виброплит в основном работают в одной плоскости, что затруднительно при уплотнении внешних частей проезжей части дорог, особенно обочин.

На основе конструкторских и технологических изысканий нами предлагается конструкторская разработка усовершенствованной конструкции навесной трамбовочной вибрационной плиты с шириной рабочей зоны до 4,0 метров с возможностью уплотнения внешних частей проезжей части дорог и(или) обочин, технологическая схема и компоновка которой представлена на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Схема навесной трамбовочной вибрационной плиты**

Разработанная усовершенствованная конструкция навесной трамбовочной вибрационной плиты состоит из рамы 1 к которой крепятся три секции виброплит с эксцентриками 2, приводимыми в действие гидромоторами ГМ. На шарнирах 4 к раме 1 прикреплены две дополнительные аналогичные секции 3, приводимые с транспортного положения в рабочее гидроцилиндрами 5. Навесная трамбовочная вибрационная плита агрегируется с трактором МТЗ с помощью устройства 7.



А.А. Борозна, канд. техн. наук (СПбГЛТУ);  
И.Ф. Пустовой (ООО «Реалинпроект»);  
Е.О. Сушков (ООО «ТД Автоминерал»)

## **ВОССТАНОВИТЕЛИ И МОДИФИКАТОРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАР ТРЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ БЕЗРАЗБОРНОГО РЕМОНТА И ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСОЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ УЗЛОВ И АГРЕГАТОВ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ТРАНСПОРТА В ЛЕСНОМ КОМПЛЕКСЕ**

Использование комплекса для безразборной обработки узлов и агрегатов техники позволяет с минимальными временными и трудовыми затратами получить следующие результаты:

- очистить внутренние рабочие поверхности;
- устранить небольшие дефекты поверхностей пар трения;
- запустить процесс образования на трущихся металлических поверхностях металлокерамического слоя, по многим свойствам превосходящего алмазоподобные DLC поверхности;
- образуемый слой под действием температуры и используя энергию трения связывается с металлической подложкой одним кристаллическим каркасом;
- создание кристаллического каркаса сопровождается процессом идеализации рабочих зазоров пар трения – износ компенсируется, дисбаланс частично компенсируется благодаря большему наращиванию каркаса в местах большей нагрузки, общий КПД агрегата повышается;
- в образуемом слое в процессе работы создается аморфная ячеистая олеофильная структура, идеально удерживающая в себе смазочные материалы даже при отсутствии их внешнего поступления, что позволяет защитить поверхности трения от износа в условиях максимальных нагрузок и в моменты запуска агрегатов;
- созданный металлокерамический слой не зависит от смены смазочных материалов и сохраняется в течении всей жизни агрегата, повторное применение комплекса рекомендуется при сильном износе или для поддержания эффективности через 4-6 замен смазочных материалов, препятствует износу трущихся деталей как в обычном режиме работы, так и при повышенных нагрузках, в том числе при запусках, пониженных оборотах, в условиях пониженного давления масла, при низких температурах.

Основные преимущества использования комплекса:

- не требуется регулярного применения при замене смазочных материалов, результат не зависит от их замены;

- комплекс инертен в химическом отношении, совместим с любыми видами масел и смазок: объём рабочего состава составляет 0,01-0.1% от объема смазочных материалов, что физически исключает возможность забивания даже самых узких масляных каналов;
- воздействует исключительно на поверхность в зоне трения и не оседает ни на каких других поверхностях;
- не требуется остановки производства или нарушения логистических цепочек, разборки агрегатов, используется немного нерабочего времени для проведения процедуры;
- снижает вибрационные показатели агрегатов, что положительно сказывается на ресурсе всей конструкции;
- снижает общий уровень шума;
- при плакировании элементов ЦПГ металлокерамическим слоем возникает эффект ограничения отвода теплоты в систему охлаждения, что является частичной адиабатизацией двигателя – одним из приоритетных направлений совершенствования технико-экономических показателей двигателей;
- восстанавливает давление в масляной системе;
- восстанавливает рабочие параметры гидравлических насосов и машин без отрицательного влияния на управляющие гидравлические клапана.

**Таблица – Экономическое обоснование при использовании комплекса на примерах**

Стоимость комплекса, рублей	Результат обработки комплексом	Экономия на ГСМ, рублей	Отложенная экономия за счет ресурса
1	2	3	4
Трактор БЕЛАРУС МТЗ 82.1 Повторение процедуры безразборного ремонта через 1000 моточасов. Средняя стоимость ТО-2 – 19 500 р.			
18 000 р.	Экономия топлива - 9-28%, смазочных материалов при доливке – 50- 85%, увеличение ресурса ДВС и топливной аппаратуры в 2,5-4 раза, снижении вредных выбросов на 40-60%.	72 000 р. средняя	24 000 р. минимум
Форвардер Komatsu 875 Повторение процедуры безразборного ремонта через 1000 моточасов. Средняя стоимость ТО – 38 500 р.			
45 000 р.	Экономия топлива - 7-28%, смазочных материалов при доливке – 55-90%, увеличение ресурса ДВС и топливной аппаратуры в 2,5-4 раза, снижении вредных выбросов на 45-80%.	146 000 р. средняя	215 000 р. минимум

Продолжение таблицы

1	2	3	4
самосвал IVECO TRAKKER AD410T42H Повторение процедуры безразборного ремонта через 100 000 км. Средняя стоимость ТО – 26 500 р.			
35 000 р.	Экономия топлива - 9-24%, смазочных материалов при доливке – 45-90%, увеличение ресурса ДВС и топливной аппаратуры в 2,5-4 раза, снижении вредных выбросов на 40-60%.	242 000 р. средняя	65 000 р. минимум
Харвестер Ponsse Ergo 8W Повторение процедуры безразборного ремонта через 1000 моточасов. Средняя стоимость ТО – 42 700 р.			
45 000 р.	Экономия топлива - 7-26%, смазочных материалов при доливке – 65-90%, увеличение ресурса ДВС и гидравлической системы в 2,5-4 раза, снижении вредных выбросов на 45-80%.	137 000 р. средняя	284 000 р. минимум
Малая коммерческая техника на примере микроавтобуса Mercedes Vito W447 119CDI Повторение процедуры безразборного ремонта через 40 000 км. Средняя стоимость ТО – 9 700 р.			
8 500 р.	Экономия топлива - 9-21%, смазочных материалов при доливке – 30-80%, увеличение ресурса ДВС и топливной аппаратуры в 2,5-4 раза, снижении вредных выбросов на 40-60%.	17 000 р. средняя	67 000 р. минимум

#### Особенности применения комплекса:

– стоимость одной обработки окупается минимум 1,5–2 раза только получаемой экономией топлива;

– на крупногабаритной технике с изначально большим угаром масла экономия на смазочных материалах несколько раз окупает стоимость обработки, на легкой технике экономия небольшая ввиду частой полной замены масла;

– основное преимущество использования обработки комплексом заключается в значительной отложенной экономии на ремонте агрегатов благодаря повышению ресурса и запаса прочности ДВС, турбин, гидравлических систем и топливной аппаратуры;

– при сильном износе техники экономия от применения комплекса «Допресурс.рф» превышает затраты на обработку в 12-18 раз, при обработке новой техники.

Самое главное преимущество применения комплекса – возможность сохранения и восстановления деталей и узлов уже изношенных

агрегатов, что позволяет избежать простоев и добиться значительного снижения расходов на обслуживание техники в условиях санкционного давления на промышленность, когда большинство запчастей недоступно или цены на них сильно завышены.

Области применения комплекса:

1. Силовые установки – ДВС, компрессоры, газогенераторы, гидравлические системы – экономия топлива 7-38%, экономия смазочных материалов до 350%, снижение токсичности выпускных газов на 45-80%, увеличение ресурса узлов и агрегатов в 2,5-4 раза, увеличить общий жизненный цикл агрегатов, значительно повысить запас прочности, расширить диапазоны допустимых нагрузок и условий эксплуатации, получить очень значительное снижение материальных затрат при долгой эксплуатации малосерийных и крупногабаритных агрегатов. Позволяет вновь ввести в работу оборудование, параметры которого вышли из допуска, без проведения серьезного капитального ремонта. Способствует импортозамещению.

2. Подшипниковые и шарнирные соединения, редуктора, трансмиссии, рычажные передачи, насосы, гидравлические системы - увеличение ресурса в 2-5 раз, увеличение общего жизненного цикла оборудования, значительное повышение запаса прочности и расширение диапазонов допустимых нагрузок и условий эксплуатации. Позволяет снизить затраты, связанные с простоем оборудования. Способствует импортозамещению.

3. Сцепки, скользуны, гребни колес, бандажи, стрелочные переводы, рельсы, люлечное подвешивание и т. д. – использование составов комплекса позволяет получить увеличение ресурса в 2,5-5 раз, значительно повысить запас прочности, расширить диапазоны допустимых нагрузок и условий эксплуатации. Позволяет снизить затраты, связанные с простоем. Способствует импортозамещению.

4. Консервация и расконсервация техники. На этапе консервации позволяет защитить трущиеся поверхности благодаря созданию олеофильного металлокерамического слоя, на этапе расконсервации позволяет восстановить полученные при сухом запуске повреждения поверхностей и защитить их при дальнейшей работе, поднять давление в системе смазки до оптимальных значений (рисунок 1) [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Влияние примесей магнетита на триботехнические свойства смазочных композиций, содержащих минеральные модификаторы трения / Д. Н. Любомиров и др. // Трение и износ. – 2011, № 2 (32).

2. Кинетический критерий зарождения смазочных структур при трении минеральных наполнителей К. Н. Долгополов и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2014, № 6.

## **НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ТРАНСПОРТНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН В ЛЕСНОМ КОМПЛЕКСЕ**

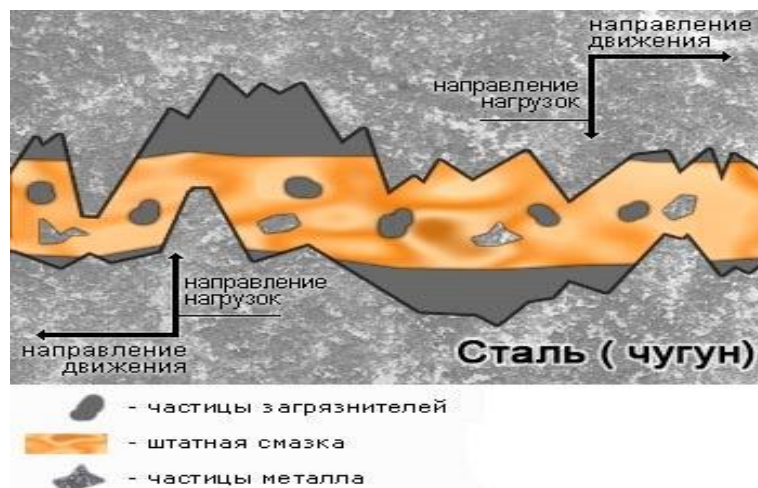
Оборудование лесной промышленности и транспортно-технологические машины эксплуатируются в сложных природно-технологических условиях, с большими нагрузками, при отсутствии качественного сервисного обслуживания. Эти обстоятельства приводят к ускоренному износу техники и большому расходованию энергетических ресурсов. Постоянное повышение цен на топливо, машины и запасные части к ним ставит актуальной задачу повышения износостойкости и снижения энергопотребления при проведении работ лесозаготовительной техники.

Повысить надежность механизмов и увеличить их срок службы, снизить расход энергоресурсов можно, применив новейшую разработку российских ученых, защищенную патентом и известную как – РВС-технология [1].

Технология позволяет в условия штатной эксплуатации восстанавливать изношенные поверхности всех видов трущихся металлических деталей наращивая на поверхности трения металлокерамическую структуру с уникальными характеристиками.

РВС-технология – это совокупность операций использования ремонтно-восстановительных составов (РВС), состоящих из минералов и специальных добавок. РВС состоит из кристаллов минералов (серпентинит, шунгит, доломит и др.) и синтетических добавок, составляющих ноу-хау. Ремонтно-восстановительный состав представляет собой многокомпонентную высокодисперсную смесь природных минералов, которая при высокой температуре и давлении образует на поверхности пар трения антифрикционный и антиизносный слой [2].

На обрабатываемой поверхности образуется кристаллический защитный слой. Кристаллы осевшие вдоль поверхности трения, срастаясь, образуют по всему пятну контакта непрерывную сеть твердых монокристаллов. Новый слой обладает высочайшей адгезией к поверхностям, а также высокой износостойкостью и низкой антифрикционностью. Образованный на поверхности детали новый слой, имеет уникальные свойства и называется металлокерамическим защитным слоем (МКЗС). [3]



**Рисунок 1 – До использования триботехнического состава РВС**

Механизмы, подвергшиеся обработке по РВС-технологии в процессе эксплуатации, требуют меньше технико-экономических затрат, а также в меньшей степени вредят экологии.

Обработка проводится в 3 этапа:

1 этап – очистка мелкими абразивами, входящими в состав РВС, подвергшейся износу поверхности;

2 этап – формирование на очищенной поверхности деталей (стали, чугуна) слоев кристаллической структуры, которая выравнивает поврежденную металлическую поверхность трущихся деталей. Слой защиты образуется за счет взаимодействия металла изношенной поверхности и веществ, входящих в структуру РВС.

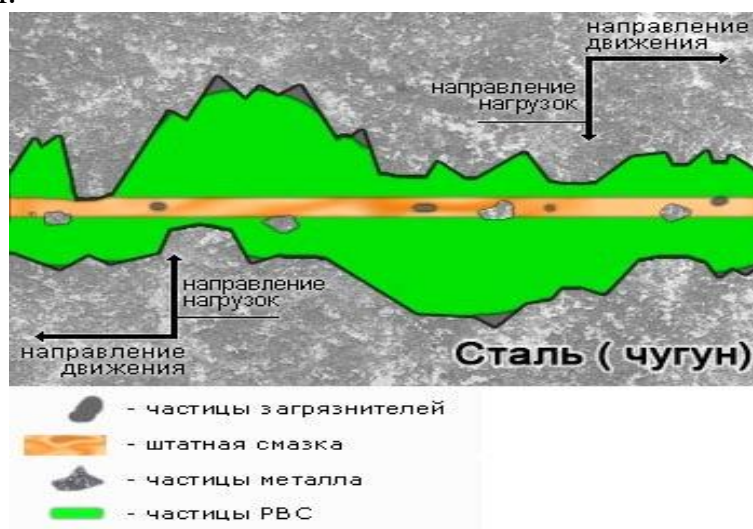
3 этап – поддержание оптимального защитного слоя с характеристиками, необходимыми трущимся деталям для долговременной и бесперебойной в конкретном режиме работы. К таким параметрам относятся: пористость, волнистость, шероховатость, толщина слоя и т. д. Даже, при наличии в смазочном масле минимального количества РВС достаточно для адаптации характеристик образованного слоя. В период нахождения состава в смазке процесс износа поверхностей трения минимален, так как, образованный защитный слой обладает способностью удерживать масло на трущихся деталях, и режим трения сдвигается в зону «мокрого трения», при котором износ минимален.

При выполнении ремонтно-восстановительных работ с использованием РВС-технологии выявляются следующие преимущества:

- обработка выполняется в режиме обычного(штатного) использования техники без прерывания технологического процесса;
- при использовании на незапущенной стадии гораздо дешевле капитального ремонта;

- позволяет восстановить и продлить "жизнь" техники с износом до 60%;
- так же применимо для профилактики увеличения износоустойчивости новой техники и оборудования;

В сравнении с другими присадками и модификаторами трения РВС восстанавливает зазоры деталей, образует надежную металлокерамическую защитную поверхность оптимизирующие зазоры и предотвращающую "сухое трение", а, следовательно, и дальнейший износ деталей.



**Рисунок 2 – После использования РВС**

Для проверки целесообразности использования РВС для восстановления работоспособности двигателя лесовозного автомобиля выпуска 1969 года в учебно-научной лаборатории Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета проводился эксперимент с применением РВС-технологии.

Для эксперимента использовались: обкаточно-тормозной стенд КО-2204 и двигатель ЗИЛ-130 выпуска 1969 года. Силовую установку установили на одной оси с валом гидротормоза. Перед началом эксперимента были сняты контрольные показания компрессии и расхода топлива. После чего в систему смазки двигателя добавили ремонтно-восстановительную смесь – РВС. Силовая установка подверглась испытаниям проводимым под нагрузкой продолжительностью 40 часов. После испытаний сняли контрольные показания (табл. 1 и табл. 2.)

**Таблица 1 – Показания, снятые до и после обработки двигателя РВС составом. Компрессия по цилиндрам, кгс/см<sup>2</sup>**

Цилиндр	1	2	3	4	5	6	7	8
До	6,7	6	6,7	6,5	6,3	6,1	6,2	6,8
После	8,6	8,4	8,9	8,5	8,6	8	8,8	8,5

Измерения: силовая установка выводится на постоянные обороты (2000 об/мин) и подвергается подаче максимальной нагрузки. Затем нагрузку постепенно снижали и проводили контрольные замеры объема потребляемого топлива на контрольных промежутках времени. Результаты представлены в табл. 2 [4].

**Таблица 2 – Расход топлива до и после обработки РВС - составом**

№	До обработки				После обработки			
	об/мин	P, кгс	установ. об/мин	Δ, гр	об/мин	P, кгс	установ. об/мин	Δ, гр.
1	2000	30	950	220	2000	30	900	205
2		25	1300	245		25	1100	210
3		20	1400	270		20	1300	235
4		15-17	1460	280		15-17	1500	260
5		10-12	1680	285		10-12	1700	255

**Эффективная мощность двигателя  $N_e$ , л. с.:**

$$N_e = 0,001 P_T n,$$

где 0,001 – постоянный коэффициент весового механизма гидротормоза;  $n$  – частота вращения двигателя в минуту;  $P_T$  – нагрузка на гидротормозе, кгс.

**Часовой расход топлива  $G_t$ , кг/ч:**

$$G_t = \frac{3,6 \Delta G}{t},$$

где – расход топлива за время опыта, г;  $t$  – время опыта, с.

**Удельный расход топлива  $g_e$ , г/э.л.с.·ч**

$$g_e = \frac{1000 G_t}{N_e}$$

**Среднее эффективное давление  $p_e$ , кгс/см<sup>2</sup>:**

$$p_e = \frac{0,9 P_T}{V_s},$$

где – литраж двигателя, л (6,0 л).

**Таблица 3 – Расчетные показатели**

№	Эффективная мощность, л. с.	Эффективное давление, кгс/см <sup>2</sup>	Часовой расход топлива, кг/ч		Удельный расход топлива, г/э.л.с. ч	
			до обработки	после обработки	до обработки	после обработки
1	60	4,5	6,6	6,15	110	102,5
2	50	3,75	7,35	6,3	147	126
3	40	3	8,1	7,05	202,5	176,2
4	30	2,25	8,4	7,8	280	260
5	20	1,5	8,55	7,65	427,5	382,5



РВС-технология является эффективным средством повышения надежности и снижения энергозатрат техники в лесном комплексе. По показаниям видно, что произошло повышение компрессии в цилиндро-поршневой группе до нормативных значений, предусмотренных для данной силовой установки, а объем потребляемого горючего сократился в зависимости от нагрузки на 7–15%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Салминен Э.О., Борозна А.А., Пушков Д.В. Снижение энергоемкости и повышение надежности машин и оборудования в лесном комплексе. СПбГЛТУ, Санкт-Петербург.
2. Салминен Э.О., Пушков Д.В., Борозна А.А. Использование нанотехнологий для снижения энергоемкости и повышения надежности работы машин и оборудования в лесном комплексе. М. МГУЛ. 2012.
3. РУСПРОМРЕМОНТ [Электронный ресурс] [www.rvs-tech.ru](http://www.rvs-tech.ru)
4. Борозна А.А, Салминен Э.О, Пушков Д.В Повышение надежности и снижение энергоемкости транспортно-технологических машин.
5. Инновации на транспорте и в машиностроении. Сборник трудов III международной научно-практической конференции. Том I. Секция "транспорт и логистика." Санкт-Петербург 2015г стр 23-27.

УДК 621.3.027.542.3

Ю.А. Ким, канд. техн. наук, доц.;  
Н.П. Зубович, магистрант (БНТУ, г. Минск);  
М.Т. Насковец, канд. техн. наук, доц;  
Б.В. Войтеховский, ст. преп. (БГТУ, г. Минск)

### **О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ВЕЛИЧИН ДАВЛЕНИЯ ПОД ГРУНТОЗАЦЕПАМИ КОЛЕСНОГО ДВИЖИТЕЛЯ ПОВЫШЕННОЙ ПРОХОДИМОСТИ**

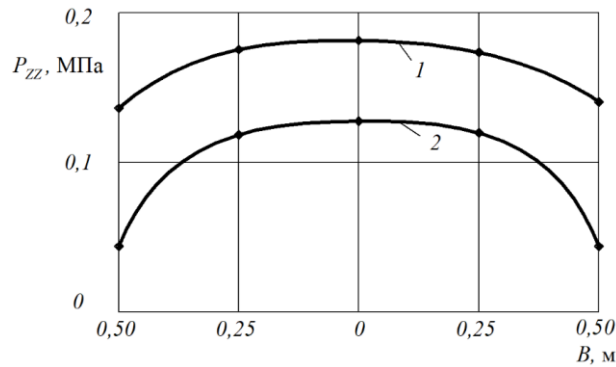
Процесс взаимодействия колесного движителя с дорожным покрытием представляется чрезвычайно сложным. Связано это с тем, что свойства грунта не постоянны и меняются по мере движения транспортного средства. В целом грунт не является упругим, пластичным или вязким, а вязко-упруго-пластичным телом. И каждая из этих составляющих проявляется в большей или меньшей степени в зависимости от целого ряда факторов. Это – структура и состав, влажность, плотность и время воздействия. Так, например, при расчете напряженно-деформированного состояния грунтового массива, являющегося основанием фундамента строительного сооружения, когда действуют большие по величине и длительные нагрузки грунт проявляет пластичность, ползучесть и другие реологические свойства. При ис-

следовании процесса взаимодействия колесного движителя транспортного средства, при небольшом интервале времени действия нагрузки, грунт более ярко проявляет упругие свойства. При этом происходит его частичное восстановление после снятия нагрузки. Поэтому при проектировании колесных движителей высокой проходимости необходимо обеспечение универсальности, то есть обеспечение удовлетворительной работоспособности на разных опорных поверхностях.

Одним из основных показателей оценки процесса взаимодействия колеса и опорной поверхности является глубина оставляемой колеи. Колесные движители высокой проходимости оснащаются грунтозацепами, площадь которых достигает до 40% от площади беговой дорожки шины. Высота грунтозацепов шин высокой проходимости рекомендуется от 0,02 до 0,05 м.

В связи с этим в исследованиях, как правило, приводится усредненная глубина колеи. Величина максимального давления под грунтозацепами приблизительно на 20% выше чем вне их. Эти величины выравниваются лишь при большой глубине погружения колеса. Уменьшение высоты грунтозацепов позволяет выровнять эпюру давлений, однако могут снизиться тяговые качества. Существует мнение, что высота зацепов и другие параметры рисунка протектора практически не влияют на реализацию движителем тягового усилия. Это обосновывается тем, что протектор забивается и колесо работает как гладкое. Полностью с этим согласиться нельзя. Поскольку меры, принимаемые для “самоочищаемости” протектора, позволяют включить почвозацепы в работу. В.Ф. Бобков [1]. указывает, что высокие и расположенные редко зацепы протектора достигают твердого подстилающего основания, пронзая верхние слабые слои и обеспечивают при этом достаточное сцепление. Однако, при чрезмерном увеличении высоты зацепов появляется вероятность их неполного заглубления в грунт при этом будет отсутствовать давление под опорными поверхностями впадин, что повлечет за собой уменьшение силы тяги. Кроме того, при этом повышается радиальная жесткость шины [2,3,4]. Таким образом, комплекс требований, предъявляемых к шинам высокой проходимости обширен и порой противоречив. Так, например, требование снижения уплотняющего воздействия почвы, часто противоречит требованию повышения сцепных качеств. Поэтому при выборе высоты грунтозацепов необходимо компромиссное решение. Б.М. Бражник [5,6,7] на основании экспериментально-теоретических исследований сцепных качеств шин высокой проходимости рекомендует высоту зацепов не более 0,03 м.

На рисунке 1 приведены экспериментальные эпюры нормальных давлений  $P_{zz}$  по ширине пятна контакта шины Ф-82.



*1* – под грунтозацепами, *2* – вне грунтозацепов  
**Рисунок 1** – Экспериментальные эпюры давлений  $P_{zz}$  по ширине пятна контакта шины модели Ф-82 на многолетних травах на торфянике ( $W=50-53\%$ ),  $G = 65$  кН,  $P_w = 0,13$  МПа

Таким образом назначение грунтозацепов состоит в том, что часть грунта, находящаяся между соседними грунтозацепами обеспечивает коэффициент внутреннего трения грунта. При этом, величина коэффициента “грунт по грунту” значительно выше величины коэффициента “резина по грунту”.

Рисунок протектора типа “ёлка” в значительной мере обеспечивает условия самоочищения. То есть часть влагонасыщенного, пластичного грунта защемленная в пространстве между соседними грунтозацепами удаляется по направлению от середины беговой дорожки шины к её краям.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бабков В.Ф. Напряжения в грунтовых основаниях дорожных одежд // Труды ДорНИИ. 1941: вып. 3, С. 99–196.
2. Ким Ю.А., Опейко С.Ф. Теоретическое определение напряжений в области контакта жесткого колеса с деформируемым грунтом // Автотракторостроение. Вып. 17. Теория и конструирование мобильных машин. Минск, 1982. С. 68–70.
3. Колобов Г.К., Полетаев А.Ф. К вопросу взаимодействия тракторной шины с почвой // Тракторы и сельхозмашины. 1960. № 2. С. 9–11.
4. Влияние высоты грунтозацепов протектора на жесткостные характеристики шин ведущих колес тракторов класса 1,4 / Ю.П. Завьялов [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 1984. № 13. С. 18–19.
5. Бражник Б.М. Исследование влияния рисунка протектора шин с регулируемым давлением на сцепление с грунтом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1974. 20 с.
6. Хархута Н.Я., Васильев Ю.М. Деформация грунтов дорожных насыпей. М.: Автотран-сиздат, 1957. 71 с.
7. Антипов Л.А., Соломатин В.И., Шереметьев Б.М. О шинах и пневмооборудовании дорожных катков // Строительные и дорожные машины. 1983. № 4. С. 10–12.

## ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛЕСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Потребление тепловой и электрической энергии в лесопромышленном комплексе при текущих объемах производства составляет около 670 петаджоулей в год, что составляет около 7% всего потребления энергии в России. При этом лесная промышленность занимает всего около 1% ВВП страны. Это говорит о высокой энергоемкости отрасли. По данным исследований 30% от потребляемого стационарными энергоустановками топлива в лесопромышленном комплексе является ископаемым невозобновляемым топливом, таким как мазут, природный газ и каменный уголь [1]. Это без учета потребления моторного топлива бензина и дизельного топлива лесохозяйственными машинами, лесозаготовительными машинами и прочей моторизованной техникой, а также транспортом леса и продукции, которое составляет более 5%.

Ресурсы древесного топлива, полученного из отходов лесопиления и деревообработки доступные при текущих объемах производства [2] в энергетическом эквиваленте составляют 6 % от всего потребления энергии в стране. Использование этих ресурсов в энергетике лесного комплекса и в коммунальной энергетике вместо углеводородного топлива способствует ресурсосбережению и снижает выбросы  $\text{CO}_2$ .

Древесное топливо можно считать углеродно-нейтральным топливом в том случае, если при его производстве не было затрачено другое углеводородное топливо, поскольку дерево в процессе роста поглощает углерод из атмосферы в том же количестве, в котором он содержится в продуктах сгорания древесины [3]. Таким образом энергетика лесной промышленности может быть в значительной степени углеродно-нейтральной. Для этого необходимо, чтобы большинство технологических операций осуществлялись с использованием энергии древесного топлива и возможно альтернативных источников энергии.

В настоящее время технологии сжигания кородревесных отходов и черного щелока в котлах для производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ успешно применяются практически на всех целлюлозно-бумажных комбинатах. Однако, большинство малых и средних деревообрабатывающих производств, и лесозаготовителей, используют электрическую энергию из сети, либо от газопоршневых мини электростанций на природном газе, а при отсутствии сети энер-

госнабжения от дизель-генераторов. Древесное топливо на данных предприятиях используется в лучшем случае для производства тепловой энергии. Вместе с тем исследователями отмечается перспективность технологий первичной деревообработки и даже глубокой переработки древесных ресурсов максимально близко к расположению ресурсов.

Учитывая особенности территориального расположения продуктивных лесов в нашей стране, ограниченности транспортной инфраструктуры и энергетических сетей автономное энергоснабжение лесозаготовительных предприятий с использованием древесного топлива представляется наиболее целесообразным. В последние десятилетия появились значительные достижения в области разработки и внедрения автономных источников энергии малой мощности на органическом топливе, таких как высокотемпературные твердооксидные топливные элементы, быстроходные мини и микро газовые турбины, газовые турбины закрытого цикла, турбины малой мощности с органическим рабочим телом, поршневые двигатели внешнего сгорания.

Научной проблемой в данной области является отсутствие адекватных имитационных моделей систем автономного энергообеспечения объектов лесного комплекса на основе энерготехнологического использования древесных ресурсов, на основе передовых достижений в области автономных источников энергии, учитывающих особенности объектов энергообеспечения лесозаготовительных и деревообрабатывающих предприятий, расположенных в районах без централизованного энергоснабжения. Разработка данных моделей позволит выполнять имитационные эксперименты с целью оптимизации систем энергообеспечения в лесопромышленном комплексе, определения их теоретических показателей функционирования.

Древесное топливо в основной массе производится из отходов лесозаготовок и деревообработки, при этом более 70% топливной древесины образуется на лесосеке в процессах рубок и лесопиления. В большинстве случаев вывозится из леса только наиболее качественная и востребованная древесина, остальная древесина остается на лесосеке. Основные причины сложившейся ситуации заключаются в высокой стоимости, энергоемкости и трудоемкости сбора и транспорта низкокачественной древесины, а также её невостребованность.

Один из путей решения, данной проблемы повышение востребованности древесного топлива из лесосечных отходов у внешних потребителей. Данное решение реализуется в частности в Финляндии, где было построено множество малых коммунальных отопительных котельных на щепе, а также несколько районных электростанций на

щепе и другом древесном топливе [4]. В нашей стране такое решение может быть также применено в не газифицированных районах.

Второй путь – создание малых передвижных энерготехнологических производств непосредственно в лесу, на лесных складах и терминалах и более крупных стационарных. По мнению многих ученых, в том числе отечественных специалистов в области переработки древесных ресурсов, такое решение может быть не только технологически, но и экономически состоятельным. Среди видов продукции при этом упоминаются продукция переработки древесины и зелени – смолы, канифоль, скипидар, канифоль, сырье для биологически-активных добавок, добавки для комбикормов, сырье для косметики и т.д. Вывоз готового или промежуточного продукта будет экономически целесообразнее транспортировки сырья. Однако процессы переработки являются энергоемкими и требуют автономного энергообеспечения.

В настоящее время вопрос автономного энергообеспечения такого рода производств в достаточной степени не проработан. Решение данной проблемы позволит создавать высокотехнологичные мобильные производственные линии для освоения древесных ресурсов экономически не доступных в настоящее время. Автономное энергообеспечение на основе древесного топлива позволит производить готовую продукцию или сырье с минимальным углеродным следом, поскольку традиционное моторное топливо будет потребляться только при транспортировке продукции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Левин А.Б. Энергетический потенциал топливного ресурса лесной биоэнергетики РФ / А.Б. Левин, В.С. Суханов, Д.В. Шереметьев // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2010. № 4. С. 37-42.

2. Корпачев В.П. Потенциал неостребованных ресурсов древесного сырья для биоэнергетики [Текст] / В.П. Корпачев, А. И. Пережилин, А. А. Андрияс, Е. А. Владыкин, А. И. Суховеев // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37. № 5. С. 295-300.

3. Grainger A. The role of low carbon and high carbon materials in carbon neutrality science and carbon economics / A. Grainger, G. Smith // Current Opinion in Environmental Sustainability. 2021. №. 49. P. 164-189.

4. Кривошеин А. Устойчивое управление лесами для производства биотоплива в Финляндии // ЛесПромИнформ. 2017. №4 (126).

К.С. Досалиев, доц. канд. техн. наук;  
Г. Узакбаева, магистрант;  
Б. Атамбаев, магистрант  
(Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова,  
г. Шымкент, Казахстан)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ФОСФОГИПСА ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

С целью утилизации промышленных отходов, нами предлагается введение фосфогипса в состав грунта земляного полотна автомобильной дороги. Для введения данного отхода нам необходимо изучение химического состава. К тому же, химический состав фосфогипса немаловажно отражается на водопоглощении. Водные свойства материалов – это комплексное понятие, заключающееся в водоустойчивости, водонасыщенности, водоотдаче и водопроницаемости исходных материалов.

Правильно подобранный состав подстилающего слоя дорожного полотна автомобильной трассы решает вопрос водно-теплового баланса и поддержания влагоемкости и водонасыщения подушки между земляным покрытием и дорожной одеждой за счет резкого перепада температур и усадки подушки. Поэтому для регулирования водно-теплового баланса и поддержания влагоемкости и влагонакопления между земляным полотном и дорожной одеждой, с целью снижения усадки земляного полотна за счет пучения дорожного покрытия, являющихся следствием образования ям и выбоин, предложено введение в состав шихты отходов фосфорных производств, фосфогипса завода минеральных удобрений ТОО «Казфосфат» и внутренних вскрышных пород бурых углей Ленгерского месторождения [1,2].

**Фосфогипс** – многотоннажный отход производства ортофосфорной кислоты, полученный экстракционным методом из фосфоритов серной кислотой. Ежегодно образуется около 430 тыс.т. фосфогипса. В Республике Казахстан экстракционная ортофосфорная кислота используется как сырье для производства фосфата, концентрированных простых и сложных удобрений, таких как аммофос, двойной суперфосфат, нитрофос, нитрофоска и др [3].

Основным способом удаления фосфогипса в Республике Казахстан на сегодняшний день является складирование в отвалах, что оказывает негативное влияние на окружающую среду. Внешний вид фосфогипса, образующегося при производстве экстракционной фосфорной кислоты показан на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Внешний вид фосфогипса**

В результате вымывания вредных веществ атмосферными осадками и их пыления в сухую погоду, загрязняется атмосферный воздух, подземные и поверхностные воды, почвенно растительный слой, земля и др. [2]. Усредненный гранулометрический состав фосфогипса приведен в таблице 1.

**Таблица 1 – Усредненный гранулометрический состав фосфогипса**

Размер фракций, мм	2-5	1-2	1-0,5	0,1-0,5	менее 0,1
Содержание в %	0,3	21,8	63,6	10,1	4,2

Угол естественного откоса фосфогипса получаемого в Таразском филиале ТОО «Казфосфат» Заводе минеральных удобрений, определен с помощью ящика из плексигласа и находится в пределах  $33^{\circ}$ .

Насыпная плотность фосфогипса колеблется в пределах  $1300 \text{ кг/м}^3$  в зависимости от крупности продукта.

При производстве экстракционной фосфорной кислоты на 1 т готовой продукции образуется около 6 т промытого фосфогипса с удельной поверхностью от 0,18 до 0,25  $\text{м}^2/\text{т}$ , влажность которого составляет около 40%. В пересчете на сухое вещество фосфогипс содержит в среднем (в %):  $\text{SO}_3$  - 36,2;  $\text{CaO}$  - 39,8;  $\text{P}_2\text{O}_5$  - около 1;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 0,1;  $\text{MgO}_3$  - 0,03;  $\text{K}$  - 0,03 и  $\text{Na}$  - 0,1.

Усредненный химический состав фосфогипса, получаемого в Таразском филиале ТОО «Казфосфат» Завода минеральных удобрений приведен ниже и содержит (%%):  $\text{P}_2\text{O}_{5\text{общ}}$  - 0,74;  $\text{P}_2\text{O}_{5\text{вод}}$  = 0,21;  $\text{MgO}$  – следы;  $\text{N}_2\text{O}$  - 0,3789;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 0,087;  $\text{F}$  - 0,081; нерастворимый остаток (НО) -19,67;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - 0,093;  $\text{CaO}$  - 31,80;  $\text{SO}_4^{2-}$  - 54,5. В талице 1 приведен химический состав фосфогипса.

**Таблица 2 - Химический состав фосфогипса**

Element	(keV) mass%	Error%	At%	Compound mass%	K
1	2	3	4	5	6
O K *	0,525	46,53	0,59	65,20	28,8456
Mg K *	1,253	0,72	0,13	0,66	0,5028
Al K *	1,486	0,59	0,11	0,49	0,5135
Si K	1,739	8,08	0,10	6,45	8,6563
P K	2,013	3,49	0,12	2,53	4,7441
S K	2,307	14,09	0,09	9,85	19,0820
Ca K	3,690	26,49	0,15	14,82	37,6557
Total		100,00		100,00	
O *0,000	46,45	0,00	0,00	0,00	0,0000
Mg K *1,253	0,72	0,21	1,99MgO	1,19	0,7066



1	2	3	4	5	6
Al K *1,486	0,59	0,21	0,74Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,12	0,7217
Si K 1,739	8,09	0,21	19,38SiO <sub>2</sub>	17,31	12,1655
P K 2,013	3,50	0,28	3,80P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	8,02	6,6674
S K 2,307	14,11	0,23	29,59SO <sub>3</sub>	35,24	26,8177
Ca K 3,690	26,53	0,20	44,51CaO	37,12	52,9212
Total	100,00	100,00	100,00		

Увеличенный в 100 раз общий вид фосфогипса и его химический состав установлен с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV с системой химического анализа EDXJED-2201 (JEOL, Япония) и показан на рисунке 2.

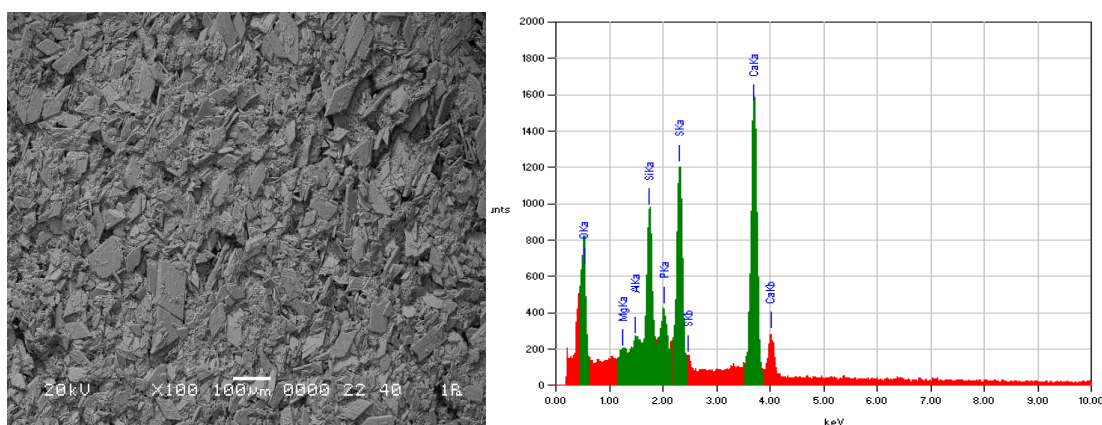


Рисунок 2 – Общий вид фосфогипса, увеличение в 100 раз

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Садыков Ж.А., Жакипбаев Б.Е., Туленов Н.Н. Использование отходов фосфорной промышленности в дорожном строительстве // Международная научно-техническая конференция. - Прага, 2017. С. 27-30.
2. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные минеральные вяжущие материалы. – М.: Инфра-инженерия, 2011. – 544 с.
3. Алтеев Т. Влияние различных факторов на экстракцию фосфорной кислоты из агломерированного фосфатно-кремнистого сырья / Проблемы химической технологии неорганических и органических, силикатных и строительных материалов и подготовки инженерных кадров: тр. междунар. науч.-практ. конф. - Шымкент, 2002. – Т. 1. – С. 38-40.

Э.М. Юнусалиев, доц. канд. техн. наук;  
И.Н. Абдуллаев, доц. канд. техн. наук  
(Ферганский политехнический институт);  
К.С. Досалиев, доц. канд. техн. наук  
(Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова)

## МОНИТОРИНГ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ГАЗОДЕТОНАЦИОННОГО АГРЕГАТА

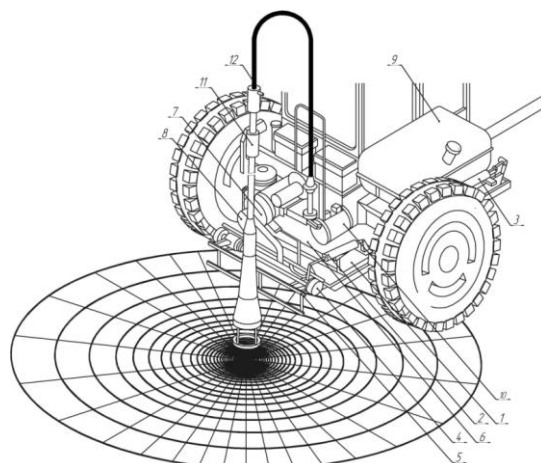
Вопросы изучения сейсмостойкости проектируемых, строящихся, возведённых и эксплуатируемых зданий и сооружений требует: времени на ожидание сейсмоактивности, что не допустимо; затрат сил и средств, что нецелесообразно. В этой связи выставлена рабочая гипотеза в том, что путём искусственного воздействия на грунты с помощью детонационной волновой энергии представится возможность вызова колебаний, с помощью которых можно будет исследовать поведение строительных конструкций, уложенных в дело, всего здания и сооружения в целом.

Поставлена цель: -исследовать поведение конструкций строящихся и эксплуатируемых зданий и сооружений, воспринимающих искусственные колебания, вызываемые детонационным агрегатом, путём воздействия на грунты.

Для достижения поставленной цели определены задачи. В качестве «инструмента» силового воздействия принимается детонационная (взрывная) волна.

Наряду с различными взрывами, а также с существующими дорогостоящими установками и стендами, создающими искусственные колебания для зданий и сооружений, предлагаемый детонационный метод создания колебаний в грунтах, как при строительстве, так и при эксплуатации зданий и сооружений открывает ряд перспектив, упрощающих технические, технологические и организационные вопросы проведения экспериментов над возводимыми объектами, проведения наблюдений над эксплуатируемыми объектами с различными сроками службы.

На рис.1 представлен экспериментальный детонационный агрегат с насадкой, с помощью которого можно вызывать колебания в грунте.



1,5,6-рамы; 2,3-гидроцилиндры; 4-опора; 7-компрессор; 8-ременная передача;  
 9-бензобак; 10-малый бензобак; 11-турбулизатор; 12-резиновая труба;  
 13-насадка; 14-генератор; 15-свеча

**Рисунок 1 – Схема газодинамического агрегата и распространения ударной волны**

На рис. 2 представлена схема размещения агрегата и измерительной аппаратуры на жилых и общественных зданиях



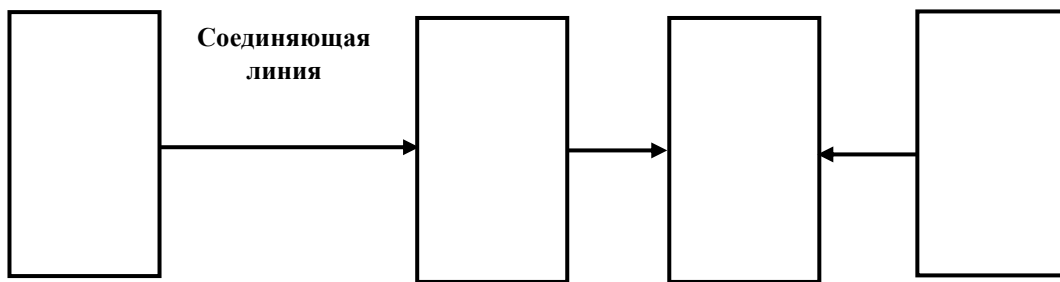
1 – устройство распространения детонации; 2 – газодинамический агрегат;  
 3 – датчики.

**Рисунок 2 – Схема размещения газодинамического детонатора, блока и сейсмометрических датчиков управления**

Параллельно с данными работами ведутся эксперименты по разработке электронного прибора для снятия показаний от детонационного волнового действия на здания и сооружения.

В настоящее время по существующей и дополнительно разработанным методикам организованы нижеследующие натурные испытания конструкций зданий и сооружений.

1. Выбран комплект измерительной аппаратуры, состоящий из измерительных датчиков (сейсмометров), регистрирующих приборов (светолучевых осциллографов), блока питания, соединительных линий шпунтовых коробок (рис. 3).

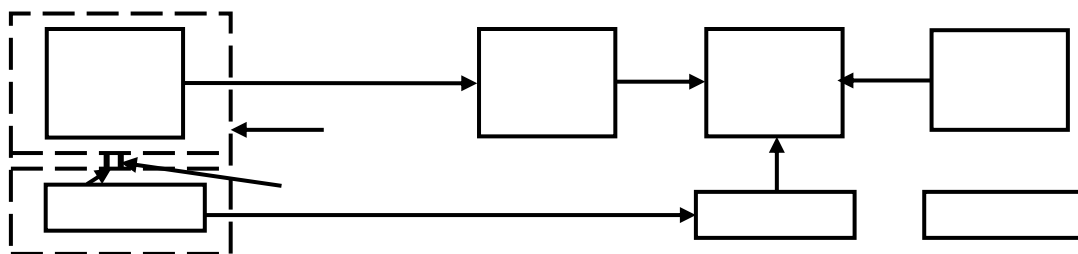


1 – датчики; 2 – шпунтовые коробки; 3 – блоки питания; 4 – осциллографы

**Рисунок 3 – Блок - схема измерительных каналов**

Для регистрации параметров слабых и сильных движений грунтов, зданий и сооружений при динамических воздействиях, в основном, использованы сейсмические датчики типа СМ-3, ВЭГИК, С-5-С, ВВП-3, ОСП-2М, АПТ-1, которые применяются в паре с низкочастотными и высокочастотными гальванометрами типа ГБ-III и ГБ-IV. Измерительные каналы организованы в зависимости от изучаемых динамических процессов. Записи производятся на фоточувствительную осциллографическую бумагу, которая после химической обработки представляет собой осциллограмму измеряемых величин. Необходимая информация, характеристики комплекса сейсмометрической аппаратуры и особенности их использования приведены в работе [9].

В соответствии с основными требованиями и условиями эксплуатации приборов [10] перед проведением натуральных экспериментов в полевых условиях по изучению колебания грунта, зданий и сооружений вся измерительная аппаратура проходит проверку, наладку и калибровку измерительных каналов. В качестве примера на рис.5 приведены амплитудно-частотные характеристики и увеличения каналов, полученные на основе данных сейсмометрических измерительных каналов. Эти результаты использованы при проведении натуральных экспериментов.



1 – сейсмические датчики; 2 – шпунтовая коробка ШК-2; 3 – блок питания П-001; 4 – тензометрический датчик; 5 – блок питания АГАТ; 6 – усилитель ТОПАЗ -3М-01; 7 – осциллограф – Н-041; 8 – индикатор ИЧ10МН; 9 – вибростенд.

**Рисунок 4 – Электрическая схема калибровки измерительных каналов на специальном вибростенде**

Таким образом, проведены все необходимые подготовительные работы для проведения натуральных экспериментов по регистрации воздействия детонационных колебаний на здания, сооружения и грунтовой среды в полевых условиях.

В заключение представляется следующий вывод: проводимые исследования по изучению влияния колебаний грунта от детонационных волн, взамен взрывных и стендовых методов, значительно ускоряют технологию и организацию, сокращают затраты труда, времени и материальных средств на выработку колебаний грунта, что в свою очередь ускоряет процессы по изучению влияния колебаний грунта на сейсмостойкость зданий и сооружений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сагдиев Х., Юнусалиев Э. Оценка сейсмического эффекта промышленных взрывов, производимых в сложных горно-геологических условиях. Узбекский журнал «Проблемы механики», 2006г., №3, с.29-34
2. [www.net-film.ru>film-8309](http://www.net-film.ru/film-8309)
3. [www.kursiv.kz](http://www.kursiv.kz)
4. Зельдович Я.Б., Компанец А.С. Теория детонации. ТТЛ. М., 1955.
5. Mallard £., ChatelierН.,Comp. ( rend./leadSei., Paris, 95, 145 . (1881).
6. Руководство по сбору, обработке и использованию инженерно-сейсмометрической информации. М.:ЦНИИСК им. В.А. КучеренкоГосстрояСССР, 1980, 50с.
7. ТожиевР.Ж., ЮнусалиевЭ.М., АбдуллаевИ.Н. The Amerikan Ways To Study The Impact Of Ground Vibrations From Exhlosions On The Stability Of Buildings And Struktures.The Amerikan Journal Of Interdisciplinary Innovations And Research. Vol.2 Issue 11, 2020.

Е.А. Леонов, доц., канд. техн. наук;  
 В.В. Игнатенко, доц., канд. физ.-мат. наук;  
 В.С. Исаченков, ст. преп. (БГТУ, г. Минск);  
 Д.В. Клоков, доц., канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск)

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ЛЕСОЗАГОТОВКИ И МАШИННОГО КОМПЛЕКСА

Отличительной особенностью разрабатываемого годового лесосечного фонда является многообразие природно-производственных условий, которые в той или иной степени влияют на эффективность применяемых систем машин, в том числе на себестоимость заготовки 1 м<sup>3</sup> древесины. В этой связи выбор и обоснование системы машин для конкретных природно-производственных условиях являются весьма актуальными задачами.

Методика исследований включала определение производственной себестоимости заготовки 1 м<sup>3</sup> круглых лесоматериалов с учетом типа применяемой системы машин и изменяющихся природно-производственных условий ОАО «Витебскдрев».

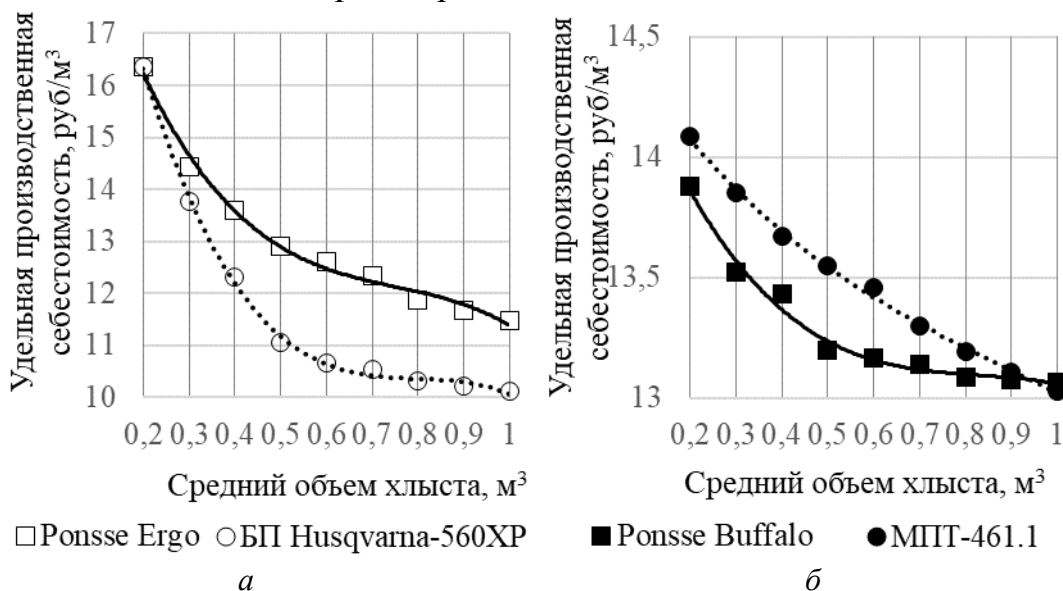
Рассчитанные на основании производственной статистики ОАО «Витебскдрев» удельные показатели, представлены в таблице.

**Таблица – Сравнительная характеристика статей затрат производственной себестоимости заготовки 1 м<sup>3</sup> круглых лесоматериалов**

Статьи затрат, руб./м <sup>3</sup>	Husqvarna -560XP + МПТ- 461.1	Husqvarna- 560XP + Ponsse Buffalo	Ponsse Ergo + Ponsse Buffalo
1. Фонд заработной платы (ФЗП) основных рабочих с отчислениями	6,35	5,47	2,28
2. Эксплуатация и ремонт системы машин в том числе:	11,26	12,09	16,71
– топливо	3,10	3,71	3,54
– ФЗП вспомогательных рабочих с начислениями	2,95	2,42	1,37
– техническое обслуживание и ремонт	1,82	2,44	5,49
– амортизационные отчисления	3,39	3,52	6,31
3. Древесное сырье	7,50	7,50	7,50
4. Общепроизводственные расходы	0,87	0,67	0,53
Итого	25,98	25,73	27,02

Представленные на рис.1, а зависимости позволяют утверждать, что при разработке лесосек со средним объемом хлыста до 0,22 м<sup>3</sup> применяемые бензопилы Husqvarna-560XP и харвестеры Ponsse Ergo

являются сопоставимыми на операциях валки деревьев, очистке их от сучьев и раскряжевке хлыстов на сортименты. С увеличением среднего объема хлыста в разрабатываемых лесосеках с 0,2 до 1,0 м<sup>3</sup> наблюдается снижение удельной производственной себестоимости выполнения указанных операций на 39% и 30% соответственно при использовании бензопил и харвестеров.



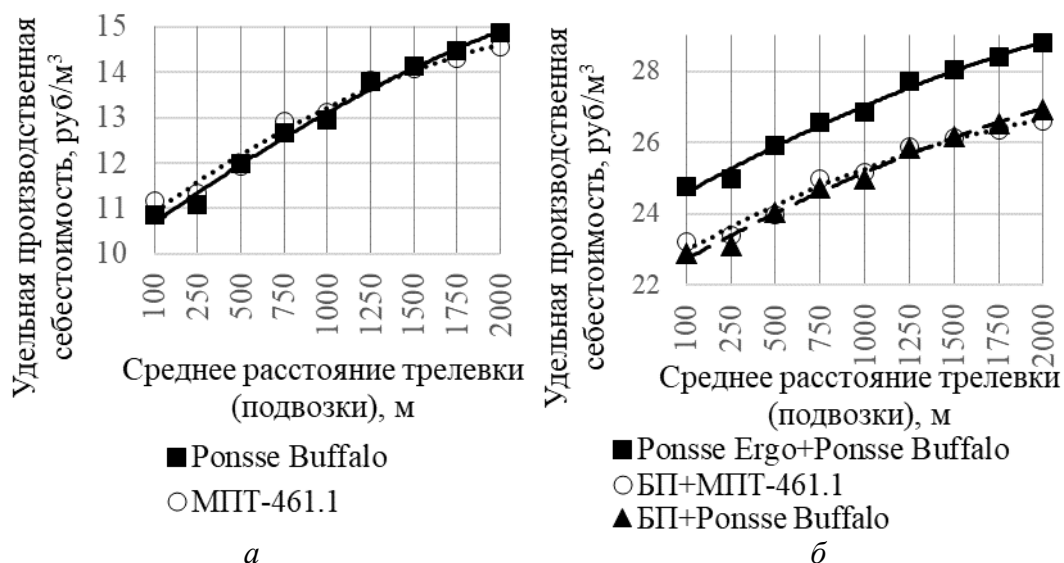
*а* – на операциях валки деревьев, их очистке от сучьев и раскряжевке на сортименты; *б* – на операции подвозки сортиментов

**Рисунок 1 – Динамика изменения производственной себестоимости заготовки 1 м<sup>3</sup> древесины от среднего объема хлыста (при среднем расстоянии подвозки сортиментов 500–700 м):**

Применение определенного типа форвардера (рис. 1, б) в условиях изменяющегося среднего объема хлыста не является принципиальным, так как максимальная разность удельных затрат между прицепной МПТ-461.1 и специализированным Ponsse Buffalo наблюдается в насаждениях со средним объемом хлыста от 0,35 до 0,5 м<sup>3</sup> и составляет не более 3%.

Рассматривая системы машин в целом отметим, что при постоянном среднем расстоянии подвозки древесины 500–700 м принципиальные отличия в удельной себестоимости лесозаготовок наблюдаются в насаждениях со средним объемом хлыста свыше 0,3 м<sup>3</sup>. В этом случае целесообразно применять системы машин на базе бензопил Husqvarna-560XP, которые в настоящее время на 5–8% являются более эффективными по сравнению с машинным комплексом Ponsse Ergo + Ponsse Buffalo.

Исследования влияния среднего расстояния подвозки древесины на величину удельной производственной себестоимости лесозаготовок при постоянном среднем объеме хлыста приведены на рис. 2.



*а* – на операции подвозки сортиментов; *б* – в целом по системе машин  
**Рисунок 2 – Динамика изменения производственной себестоимости заготовки 1 м<sup>3</sup> древесины от среднего расстояния подвозки сортиментов (при среднем объеме хлыста 0,5 м<sup>3</sup>)**

Установлено, что при среднем объеме хлыста 0,5 м<sup>3</sup> специализированные форвардеры наиболее эффективно применять на расстояниях подвозки лесоматериалов до 1300 м (рис. 2, *а*). В этом случае удельная себестоимость данной операции будет в среднем на 5–7% ниже аналогичного показателя при использовании погрузочно-транспортных машин МПТ-461.1. В случае увеличения среднего расстояния подвозки древесины с 1300 до 2000 м приоритет в выборе оборудования следует отдавать МПТ-461.1.

Рассматривая системы машин в целом (рис. 2, *б*), отметим, что при постоянном среднем объеме хлыста разрабатываемых насаждений 0,5 м<sup>3</sup> в диапазоне трелевки (подвозке) круглых лесоматериалов от 100 до 2000 м в условиях лесопункта ОАО «Витебскдрев» с точки зрения удельных производственных затрат применение систем машин на базе бензопил оказывается на 7–9% более выгодным по сравнению с машинным комплексом Ponsse Ergo + Ponsse Buffalo.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Леонов Е. А., Клоков Д. В., Исаченков В. С. Применение двухступенчатой трелевки в условиях Республики Беларусь // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 202–207.



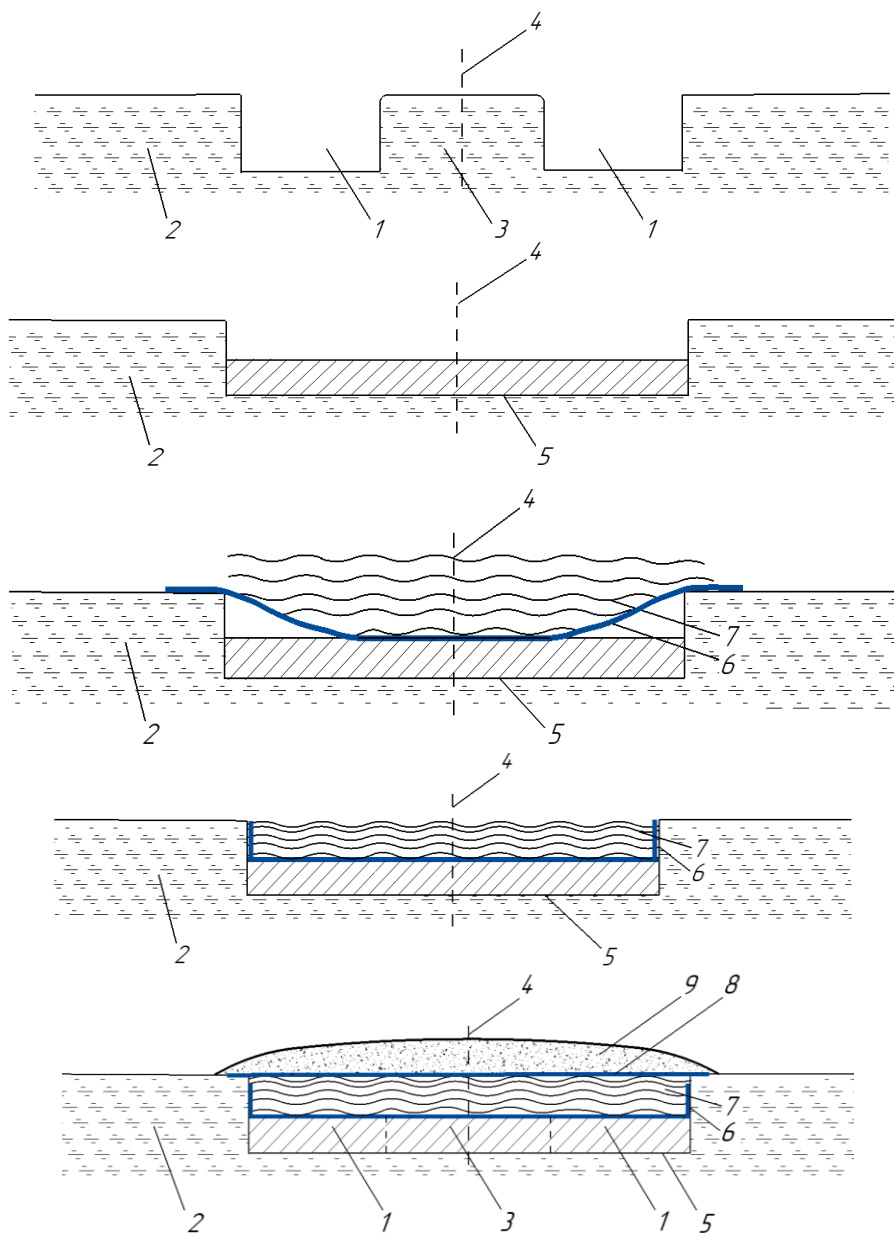
## **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ УСТРОЙСТВА ПОДЪЕЗДОВ К ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫМ МАГИСТРАЛЯМ НА ОСНОВАНИЯХ С НИЗКОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ ГРУНТОВ**

В современном лесном хозяйстве большое внимание уделяется транспортировке древесины, для чего необходимо иметь хорошо развитую дорожную инфраструктуру. Качество дорог на лесных территориях зависит от разных факторов, включая конструктивные и технологические аспекты их устройства.

Для повышения работоспособности и увеличения срока эксплуатации подъездов к лесохозяйственным магистралям на основаниях с низкой несущей способностью грунтов были разработаны перспективные способы их устройства.

Одним из таких способов является способ устройства лесной дороги на основаниях с низкой несущей способностью грунта, который заключается в том, что после образования в процессе эксплуатации в основании колеи грунт межколейного пространства от оси дороги перемещают и распределяют в колеи, формируют корытный профиль покрытия дороги и уплотняют по длине и ширине корытного профиля, далее по поверхности дороги раскатывают первую прослойку из гибкого геосинтетического материала, ширина которой равна периметру корытного профиля покрытия, и на прослойку укладывают и уплотняют хворостяную выстилку из порубочных остатков, при этом процесс уплотнения осуществляют до достижения боковыми краями прослойки и уплотненной хворостяной выстилки верха корытного профиля, затем по устроенному основанию раскатывают вторую прослойку из гибкого геосинтетического материала шириной равной 1,1 ширины корытного профиля покрытия, после этого отсыпают и уплотняют материал слоя покрытия.

Для проведения данной операции используется огромный ассортимент дорожно-строительной техники для устройства подъездов к лесохозяйственным магистралям такие как: автопогрузчик, трактор с навесным экскаваторным оборудованием, прицепной скрепер, автогрейдер, прицепной автогрейдер, автосамосвал, что облегчает работу данного метода.

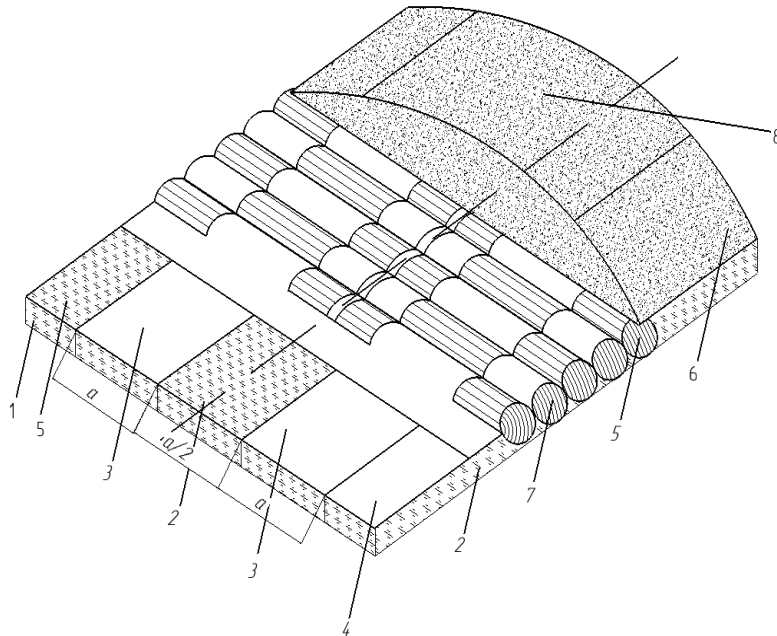


1 – колея; 2 – слабое основание; 3 – грунт межколейного пространства; 4 – ось дороги; 5 – корытный профиль; 6 – первая прослойка геосинтетического материала; 7 – хворостяная выстилка; 8 – вторая прослойка геосинтетического материала; 9 – материал слоя покрытия

**Рисунок 1 – Способ устройства лесной дороги на основаниях с низкой несущей способностью грунтов**

Также можно выделить способ устройства дорожной конструкции на грунтах с низкой несущей способностью, при котором по поверхности подготовленного основания из слабого грунта путем раскатки по длине дорожного полотна, ширина которого включает ширину двух колесопроводов, ширину межколейного пространства и ширину двух обочин, укладывают комбинированную прослойку из геосинтетического материала и поперечных древесных элементов. При

этом прослойку устраивают посредством выполнения в геосинтетическом материале, на расстоянии не менее 0,1 его ширины по оси дороги, по границам колесопроводов продольных прорезей с образованием пяти полос геосинтетического материала.



- 1 – слабое основание; 2 – колесопровод; 3 – межколейное пространство;  
 4 – обочины; 5 – геосинтетический материал; 6 – древесные элементы;  
 7 – серповидный профиль

**Рисунок 2 – Корытный профиль формирования дорожного покрытия лесных дорог**

Далее первоначально поднимают полосы колесопроводов и под каждой из них с обеих сторон дорожного полотна пропускают два поперечных древесных элемента длиной равной половине ширины межколейного пространства, ширине колесопровода и ширине обочины, с упором друг в друга над полосой межколейного пространства на оси дороги, которые также располагают над полосами обочин, после этого поднимают полосы обочин и под ними с обеих сторон дорожного полотна пропускают два поперечных древесных элемента, которые далее располагают над полосами колесопроводов и над полосой межколейного пространства с упором друг в друга на оси дороги. Затем по всей ширине дорожного полотна поверх прослойки отсыпают и уплотняют слой покрытия серповидного профиля.

## ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАКРЫТОЙ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЧНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ

Закрытая транспортная задача – задача о нахождении такого плана перевозки грузов от пунктов отправления до пунктов назначения, при котором запасы перевозимых грузов равны потребностям в них, а транспортные затраты – минимальны. В качестве одного из эффективных инструментов для решения такого рода задач используется интегрированная система MathCad [1]. В общем случае, для решения задач оптимизации в MathCad используются встроенные функции Maximize, Minimize и логический блок Given. Оптимальное решение получают с использованием функций Maximize или Minimize.

Рассмотрим один из классических вариантов решения закрытой транспортной задачи на примере.

**Пример.** На складах предприятий  $a_1, a_2, a_3$  сосредоточена однородная продукция в объемах 240, 180 и 260 единиц. Продукцию необходимо перевезти в пункты назначения  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$  в объемах соответственно 160, 170, 120, 130 и 100 единиц. Тарифы на перевозку единицы продукции с каждого из пунктов отправления в соответствующие

пункты назначения задаются матрицей  $c = \begin{pmatrix} 5 & 3 & 4 & 2 & 4 \\ 8 & 4 & 4 & 4 & 5 \\ 9 & 7 & 3 & 7 & 2 \end{pmatrix}$ .

Необходимо составить такой план перевозок, при котором суммарные транспортные затраты будут минимальны.

Методика решения предполагает составление математической модели и формализации ее в синтаксисе системы (Рис.1).

c11 := 5	c12 := 3	c13 := 4	c14 := 2	c15 := 4	Задание тарифов на перевозку в виде переменных
c21 := 8	c22 := 4	c23 := 4	c24 := 4	c25 := 5	
c31 := 9	c32 := 7	c33 := 3	c34 := 7	c35 := 2	
a1 := 240		a2 := 180	a3 := 260	Запасы	
b1 := 160	b2 := 170	b3 := 120	b4 := 130	b5 := 100	Потребности +
A := a1 + a2 + a3	B := b1 + b2 + b3 + b4 + b5		A - B = 0		Проверка на закрытость

Рисунок 1 – Листинг исходных данных в MathCad

После указания исходных данных, дается описание целевой функции и системы ограничений (Рис. 2.).

```

Целевая функция:
TZ(x11, x12, x13, x14, x15, x21, x22, x23, x24, x25, x31, x32, x33, x34, x35) := (x11·c11 + x12·c12 + x13·c13 + x14·c14 + x15·c15 ...
+ x21·c21 + x22·c22 + x23·c23 + x24·c24 + x25·c25 ...
+ x31·c31 + x32·c32 + x33·c33 + x34·c34 + x35·c35)

x11 := 160  x12 := 80  x13 := 0   x14 := 0   x15 := 0
x21 := 0   x22 := 90  x23 := 90  x24 := 0   x25 := 0   Опорный план
x31 := 0   x32 := 0   x33 := 30  x34 := 130 x35 := 100

+

Given
x11 ≥ 0   x12 ≥ 0   x13 ≥ 0   x14 ≥ 0   x15 ≥ 0   Ограничения на неотрицательность решения
x21 ≥ 0   x22 ≥ 0   x23 ≥ 0   x24 ≥ 0   x25 ≥ 0
x31 ≥ 0   x32 ≥ 0   x33 ≥ 0   x34 ≥ 0   x35 ≥ 0

x11 + x12 + x13 + x14 + x15 = a1
x21 + x22 + x23 + x24 + x25 = a2   Ограничение по вывозу грузов со складов
x31 + x32 + x33 + x34 + x35 = a3

x11 + x21 + x31 = b1
x12 + x22 + x32 = b2
x13 + x23 + x33 = b3
x14 + x24 + x34 = b4
x15 + x25 + x35 = b5   Ограничения по потребностям

```

Рисунок 2 – Листинг задания математической модели

Далее с использованием функции *Minimize* определяется оптимальный план перевозок и рассчитываются транспортные затраты (Рис. 3.).

```

OPlan := Minimize(TZ, x11, x12, x13, x14, x15, x21, x22, x23, x24, x25, x31, x32, x33, x34, x35)

Оптимальный план перевозок:
OPlanT = (120 0 0 120 0 0 170 0 10 0 40 0 120 0 100)

Транспортные затраты:
TZ(OPlan0, OPlan1, OPlan2, OPlan3, OPlan4, OPlan5, OPlan6, OPlan7, OPlan8, OPlan9, OPlan10, OPlan11, OPlan12, OPlan13, OPlan14) = 2.48 × 103

```

Рисунок 3 – Листинг решения

Достоинством такого подхода является простота и наглядность выполняемых действий. Основным же недостатком – с увеличением количества поставщиков продукции и потребителей, усложняется количество вводимой информации. А именно – изменение целевой функции и дополнение ограничений соответствующими уравнениями.

Предлагаемый же подход предполагает формирование исходных данных, математической модели и получение решения с помощью векторов и матриц.

Решение задачи с использованием векторов и матриц позволяет сократить ввод ограничений к целевой функции и подразумевает задание единичной матрицы размерами  $k \times i$  (где  $k$  – количество пунктов назначения,  $i$  – количество пунктов отправления) (Рис. 4.).

```

c := ( 5 3 4 2 4 )
      ( 8 4 4 4 5 )
      ( 9 7 3 7 2 )
A := (240 180 260)T
B := (160 170 120 130 100)T
      ∑A - ∑B = 0

TZ(x) := ∑i=02 ∑j=04 (ci,j · xi,j)

x := ( 160 80 0 0 0 )
      ( 0 90 90 0 0 )
      ( 0 0 30 130 100 )

Given

x ≥ 0   i := 0..2   k := 0..4   mk,i := 1

(x · m)(0) = A   Ограничение по вывозу
                грузов со складов

[(m · x)T](0) = B   Ограничения
                    по потребностям

OPlan := Minimize(TZ, x)   OPlan = ( 120 0 0 120 0 )
                                ( 0 170 0 10 0 )
                                ( 40 0 120 0 100 )

TZ(OPlan) = 2.48 × 103

```

**Рисунок 4 – Листинг решения с использование матричного исчисления**

Таким образом, предлагаемый подход позволяет сократить объем вводимой информации и упростить расчеты, а также анализ полученных результатов при увеличении размерности задачи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лащенко, А. П. Методика изучения транспортной задачи математического программирования при подготовке студентов экономических специальностей / А. П. Лащенко, Р. О. Короленя // Проблемы преподавания высшей математики и информатики в условиях новой образовательной парадигмы : Материалы Международной научно-практической конференции, Минск, 14–15 апреля 2022 года / Редколлегия: С.А. Самаль (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Белорусский государственный университет, 2022. – С. 61-64.

## ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА НА ПОКРЫТИЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

В основу динамики дорожного покрытия, как и других инженерных сооружений, кладется теория колебаний, которая является важнейшей и решающей задачей общей динамики. Поэтому теоретические исследования поставленного вопроса необходимо начать с исследования законов, характера и величины колебаний подвижного состава при взаимодействии с дорожным покрытием с учётом времени воздействия нагрузки подвижного состава.

В настоящее время при расчете дорожных одежд величина динамического коэффициента принимается 1,2 – 1,3, что недостаточно обосновано. Не установлена также зависимость коэффициента динамичности от типа подвижного состава, скорости его движения и дорожных неровностей. Это обстоятельство в известной мере отрицательно сказывается на выборе рациональных конструкций и расчёте дорожных одежд.

При расчете дорожной одежды действие динамической подвижной нагрузки отождествляется с условной статической, увеличенной по сравнению с действительной статической, на так называемую динамическую добавку. Таким образом, действие динамической нагрузки на покрытие от колес подвижного состава будет представлено как статическая нагрузка, умноженная на динамический коэффициент.

При определении динамического коэффициента от подвижной нагрузки в виде пневматических колес автомобиля необходимо знать расчетную колебательную схему и закон вынужденных колебаний.

Однако для более полного исследования вопросов колебаний подвижного состава на покрытии рассматриваются свободные колебания автомобильного поезда с учетом связей между осями и возможными колебаниями перевозимых длинномерных грузов. При составлении уравнений колебания подвижного состава использовали известные методы динамики твердого тела. Не уменьшая роль и значение существующих методов определения ровности дорожного покрытия в современной диагностике автомобильных дорог, мы в тоже время считаем, что учет динамического воздействия подвижного состава на покрытие, имеющего детерминированные неровности, является задачей весьма актуальной.

## АНАЛИЗ ЗНАЧЕНИЙ ВРЕМЕНИ ПРОЕЗДА СОРИМЕНТОВОЗАМИ ОДНОГО КИЛОМЕТРА ПУТИ НА ВЫВОЗКЕ ДРЕВЕСИНЫ

Изучение скоростей движения и продолжительности проезда одного километра пути, в частности, сортиментовозов, требует учета значительного количества показателей.

На скорость движения, а равно и на продолжительность проезда одного километра пути, влияют различные факторы, которые условно можно представить следующим образом (Рис. 1) [1].

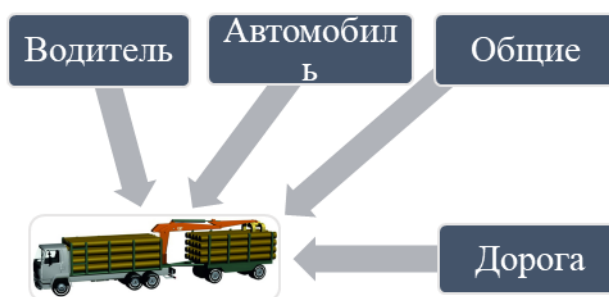


Рисунок 1 – Группы факторов, влияющих на показатели движения сортиментовозов

Известные методы, такие как графические, графоаналитические, метод приближенного интегрирования уравнения движения и другие не нашли широкого практического применения в силу сложности аналитических расчетов и громоздкости графических построений. По некоторым методам определений можно получать ориентировочные значения скорости и времени.

Общим свойством указанных методов является получение искомого значения скорости и времени движения в результате решения уравнения движения автопоезда. Как показывает практика, при определении скорости движения, а соответственно и времени движения автопоезда, любым из этих методов, результаты расчета для какой-либо конкретной дороги не совпадают с измеренными скоростями движения и создают зачастую неправильное толкование о транспортных качествах дороги. Причиной указанных расхождений является недостаточное совершенство расчетных методов, вызванное крайней сложностью теоретического решения вопроса о скоростях движения и большим количеством весьма мало изученных факторов, а также вопроса о теоретическом описании одновременного влияния всех четы-



рех групп факторов. В этой связи, для определения скоростей профессор В.И. Алябьев указывает на целесообразность использования вероятностного подхода или статистических моделей [2].

Для формирования статистической модели, позволяющей с достаточной степенью точности прогнозировать продолжительность работы сортиментовозов на вывозке древесины, были организованы и проведены производственные исследования на базе одного из лесохозяйственных учреждений. Исследования включали изучение показателей работы сортиментовозов на вывозке древесины в грузовом и порожнем направлениях. Данные были получены с помощью навигационного оборудования, установленного на лесовозных транспортных средствах и онлайн-сервиса «БелТрансСпутник».

На первом этапе исследований была проведена классификация используемых для вывозки и перевозки древесины маршрутов на предприятии по методике, представленной в [3].

Процедура отнесения маршрутов движения на группы X, Y, Z сводится к сравнению коэффициента вариации времени проезда одного километра с нормативными значениями, определяющими границы групп X, Y и Z. Таким образом, были определены маршруты вывозки, относящиеся к группе X.

На втором этапе исследований была выдвинута рабочая гипотеза о том, что время хода 1 км по маршрутам группы X подчиняется нормальному закону распределения. Для проверки данной гипотезы, в соответствии с методикой, изложенной в работе [4], был спланирован и проведен эксперимент. В результате были установлены необходимые объемы выборки данных времени проезда одного километра в грузовом и порожних направлениях при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

Статистическая обработка результатов исследований времени пробега одного километра проводилась на основании методики, представленной в работе [5].

Проверка гипотезы о нормальном законе распределения времени проезда 1 км пути проводился с помощью критерия Пирсона  $\chi^2$  [4, 5]. Если выполняется неравенство (1), то гипотеза о нормальности закона распределения времени пробега 1 км принимается.

$$\chi_{\text{набл}}^2 < \chi_{\alpha;v}^2, \quad 1)$$

Критерий Пирсона:

– грузовое направление:

наблюдаемое значение  $\chi_{\text{набл}}^2 = 6,3$ .

табличное значение  $\chi_{0,05;4}^2 = 9,49$ .

– порожнее направление:

наблюдаемое значение  $\chi_{\text{набл}}^2 = 6,73$ .

табличное значение  $\chi_{0,05;4}^2 = 9,49$ .

Гипотеза о нормальном законе распределения времени проезда 1 км пути сортиментовозами на маршрутах, относящихся к группе X была подтверждена.

Доверительный интервал для математического ожидания нормально распределенной величины времени хода одного километра при уровне значимости, равном 0,05 определялся по выражению (2).

$$\left( t_{\text{ср}} - t_{\alpha;v} \frac{S}{\sqrt{n}}; t_{\text{ср}} + t_{\alpha;v} \frac{S}{\sqrt{n}} \right), \quad 2)$$

где  $t_{\alpha;v}$  – параметр, определяемый по таблице значений распределения Стьюдента [4, 5], мин;  $\alpha$  – уровень значимости,  $\alpha = 0,05$ ;  $v$  – число степеней свободы, определяемое как  $v = n - 1$ .

Доверительные интервалы:

– *грузовое направление:*

(2,07 – 0,38; 2,07 + 0,38)

– *порожнее направление:*

(1,78 – 0,09; 1,78 + 0,09)

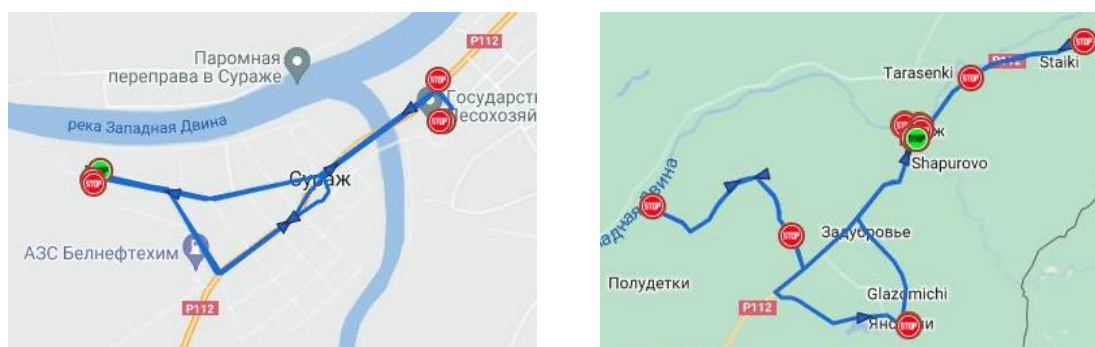
Таким образом, проведены исследования значений времени проезда сортиментовозами одного километра пути на вывозке древесины. Анализ полученных данных позволил получить значения доверительных интервалов времени проезда 1 км рекомендованы для практического использования с целью прогнозирования продолжительности выполнения рейсов на маршрутной сети предприятия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нефедов, А. Ф. Планирование эксперимента и моделирование при исследовании эксплуатационных свойств автомобилей / А. Ф. Нефедов, Л. Н. Высочин. – Львов.: Вища школа, 1976. – 160 с.
2. Сухопутный транспорт леса / В.И. Алябьев [и др.]; под общ. ред. В.И. Алябьева. – М.: Лесная пром-сть, 1990. – 413 с.
3. Насковец, М. Т. Классификация маршрутов транспортировки сортиментов с использованием XYZ-анализа / М. Т. Насковец, Р. О. Короленя // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 71–75.
4. Пижурин, А. А. Основы научных исследований в деревообработке: учебник для вузов / А. А. Пижурин. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. – 305 с.
5. Игнатенко, В.В. Высшая математика. Математические методы и модели в расчетах на ЭВМ. Лабораторный практикум: учеб. пособие / В.В. Игнатенко, О.Н. Пыжкова, Л.Д. Яроцкая; под ред. В.М. Марченко; Изд-во БГТУ. – Минск, 2006. – 126 с.

## ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ СОРТИМЕНТОВОЗОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗКИ ДРЕВЕСИНЫ

Неравномерность заготовки и переработки древесины во времени оказывает влияние на организацию перевозки древесины потребителям. В связи с чем, на предприятиях лесного комплекса, зачастую, вынуждены использовать сочетания различных схем и способов перевозки древесины даже в рамках одной смены работы сортиментовозов (комбинированные маршруты, Рис. 1).



**Рисунок 1 – Сочетание различных схем перевозки при работе сортиментовозов**

При обосновании выбора маршрута работы сортиментовозов на предприятиях не всегда используют методы оптимизации для решения такого рода задач, что может привести к неоправданным транспортным издержкам и упущенной выгоде в целом.

С целью изучения основных показателей работы сортиментовозов на комбинированных маршрутах проведены теоретические исследования. Моделирование проводилось в табличном процессоре MS Excel. Расчеты осуществлялись по методике, изложенной в [3]. Рассматривались следующие схемы перевозки древесины.

Схема 1. Один промежуточный склад сортиментов, на котором сосредоточен запас в объеме  $625 \text{ м}^3$ . Сортименты необходимо перевести со склада 5 потребителям с заданными потребностями. Перевозка осуществляется сортиментовозом с фактической грузоподъемностью  $25 \text{ м}^3$ .

Схема 2. Условия те же, что и по схеме 1, но заявленный объем сортиментов сосредоточен равномерно на 2 складах.

Схема 3. Условия те же, что и по схеме 1, но заявленный объем сортиментов равномерно сосредоточен на 3 складах.

Схема 4. Условия те же, что и по схеме 1, но заявленный объем сортиментов равномерно сосредоточен на 4 складах.

Схема 5. Условия те же, что и по схеме 1, но заявленный объем сортиментов равномерно сосредоточен на 5 складах.

Общая схема расположения гаража, промежуточных складов и потребителей (P1 – P5) представлена на Рис. 2. Координаты всех пунктов были выбраны произвольно. На основе координат были определены расстояния между всеми пунктами.

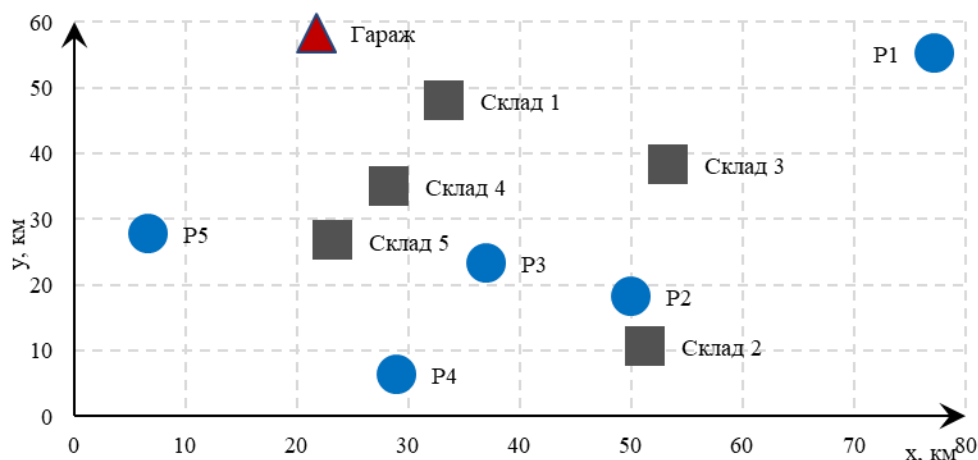


Рисунок 2 – Схема расположения объектов

При расчетах использованы следующие допущения:

1. Весь заявленный объем должен быть перевезен.
2. Процесс перевозок осуществляется непрерывно одним сортиментовозом. Ограничений по срокам поставок нет.

3. Удельная себестоимость пробега одного километра принималась равной: с грузом –  $0,6 \text{ BYN} / \text{км} \cdot \text{м}^3$ ; без груза –  $0,5 \text{ BYN} / \text{км}$ .

4. Критерии оценки: грузовая работа, пройденный путь без груза, коэффициент использования пробега, затраты на перевозку.

5. Критерии назначения рейсов (последовательность объезда потребителей) для каждой из моделируемых схем: начиная от ближайшего к складу потребителя; начиная от дальнего по расположению к складу потребителя; последовательно (по номерам потребителей); последовательно, начиная с первого по номеру потребителя, выполняя по одному рейсу.

6) Потребности потребителей ( $\text{м}^3$ ): P1 – 125; P2 – 100; P3 – 150; P4 – 75; P5 – 175.

7) Распределение запаса по складам – равномерное.

8) Координаты (км): склад 1 (x = 33,3; y = 48,0), склад 2 (x = 51,3; y = 10,7), склад 3 (x = 53,3; y = 38,3), склад 4 (x = 28,3; y = 35,0), склад 5 (x = 23,3; y = 26,7), P1 (x = 77,3; y = 55,3), P2 (x = 50,0; y = 18,3), P3 (x = 37,0; y = 23,3), P4 (x = 29,0; y = 6,3), P5 (x = 6,7; y = 27,7), Гараж (x = 21,7; y = 58,3). Пункт начала и окончания перевозки – Гараж.

Основные результаты представлены в таблице.

**Таблица 1 – Основные результаты исследований**

Схема	Пройденный путь без груза, км (минимальные значения)	Затраты на рейс, ВУН (минимальные значения)	Коэффициент использования пробега (максимальные значения)	Грузовая работа (максимальные значения)
1	34,8	13667,15	0,483	12704,6
2	30,1	11697,80	0,491	906,6
3	28,9	11191,70	0,487	907,6
4	23,2	9028,95	0,491	902,0
5	21,2	8257,65	0,476	871,0

Таким образом, проведены теоретические исследования работы сортиментовозов при различных схемах организации их работы. Анализ полученных результатов показывает значительные разбросы значений анализируемых показателей, что не позволяет однозначным образом утверждать о конкретных практических рекомендациях. Это говорит о необходимости дальнейшего развития и изучения данной проблемы, а также разработки методики обоснования выбора маршрутов для реальных природно-производственных условий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Короленя, Р. О. Моделирование работы сортиментовозов при транспортировке древесины: граф состояний // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 1 (252). С. 129–135. DOI: <https://doi.org/10.52065/2519-402X-2022-252-1-129-135>.
2. Ковалев, Р.Н. Логистическое управление транспортными системами: учеб. пособие / Р.Н. Ковалев, Д.В. Демидов, С.Н. Боярский – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2008. – 166 с.
3. Ванчукевич, В. Ф. Грузовые автомобильные перевозки: учеб. пособие / В. Ф. Ванчукевич, В. Н. Седюкевич, В. С. Холупов – Минск: Выш. шк., 1989. – 272 с.

## **АЛГОРИТМ ПОДГОТОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСОСЕК НА БАЗЕ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ**

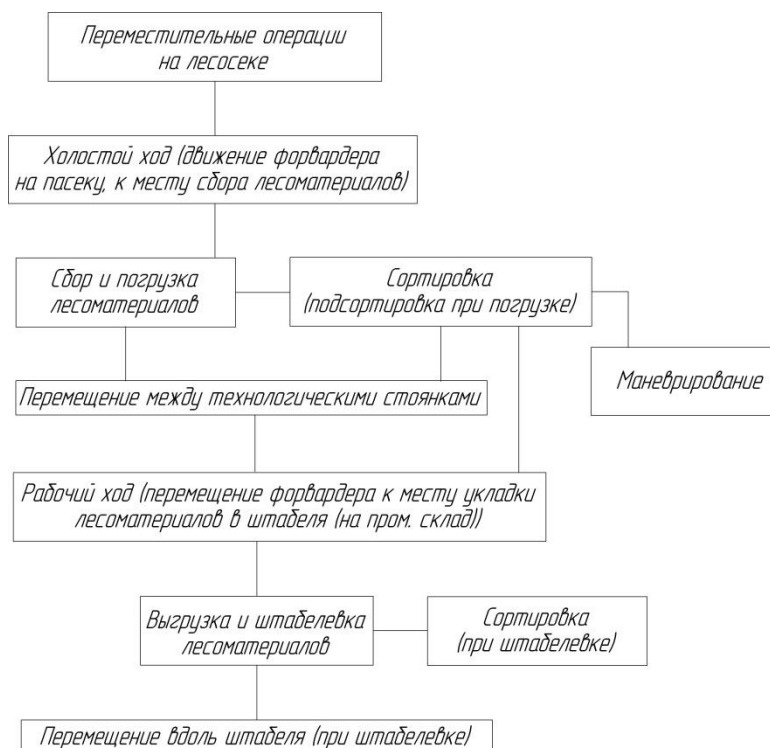
Эффективное проведение лесозаготовительных работ на лесосеке подразумевает под собой необходимость учета большого количества разнообразных факторов (природно-климатических и почвенно-грунтовых условий; различных технологических аспектов, зависящих от выбранной технологии заготовки; экологических и социальных требований, предъявляемых к лесозаготовительному процессу; экономических аспектов, и многого другого), оказывающих на проведение данных работ существенное влияние.

Однако наличие такого большого количества требующих внимания факторов в значительной мере усложняет принятие каких-либо оптимизационных решений при проведении лесозаготовительных работ. В связи с чем, возникает необходимость в проведении различных исследований в данной области.

В настоящее время наиболее важной частью научно-исследовательской работы является проведение экспериментальных исследований, поскольку они дают возможность, в силу имеющегося научного опыта, проследить за ходом проведения исследования, а также при необходимости активно на него воздействовать [1].

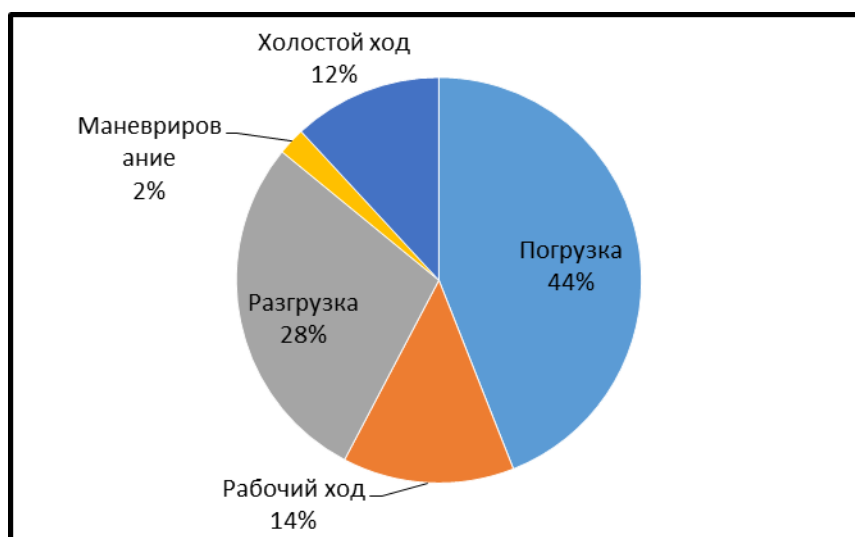
Описываемые экспериментальные исследования в качестве своей цели имеют изучение характеристик, способов и схем размещения технологических элементов лесосеки, а также их влияния на эффективность лесозаготовительного производства на базе лесохозяйственных учреждений Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь.

Данное влияние в основном сказывается в значительной степени на объеме проводимых лесозаготовительной техникой переместительных операций (рис. 1) на лесосеке (рабочем и холостом ходах лесозаготовительной техники, перемещении техники в процессах погрузки и разгрузки лесоматериалов, сортировке и штабелевке) [2].



**Рисунок 1 – Переместительные операции, выполняемые форвардером на лесосеке**

Согласно проводимым ранее исследованиям [3] на территории лесохозяйственных организаций Министерства лесного хозяйства, среднее соотношение времени выполняемых форвардером переместительных операций на лесосеке можно представить следующей диаграммой (рис. 2).



**Рисунок 2 – Соотношение времени выполняемых форвардером переместительных операций**

В качестве основных исследуемых характеристик выступают следующие:

- геометрия и габаритные размеры лесосеки, а также всех ее технологических элементов (площадь, ширина, длина);
- суммарная площадь технологических элементов;
- расстояние трелевки;
- расположение трелевочных волоков и погрузочных пунктов, в свою очередь зависящее от выше перечисленных параметров (схемы расположения волоков, взаимное расположение волоков и погрузочных пунктов, а также их взаимное примыкание, примыкание погрузочного пункта к лесосеке и др.);
- время, затрачиваемое лесозаготовительной техникой на выполнение переместительных операций;
- статистические данные предприятий, и др.

Первоначальная методология проведения экспериментальных исследований включает в себя следующие элементы:

1. Сбор статистических данных на предприятиях Министерства лесного хозяйства РБ (количественные и качественные показатели лесного фонда предприятий; схемы расположения технологических элементов, и разработки лесосек; эксплуатационные и экономические показатели эффективности работы лесозаготовительной техники; данные полученные с использованием ГИС; и др.), а также проведение их анализа.

2. Проведение полевых исследований (установление размерных показателей лесосек и их проектируемых технологических элементов до проведения лесозаготовок, возможно с использованием ГИС-систем; сбор данных о работе лесозаготовительной техники в процессе осуществления деятельности).

3. Математический анализ полученных данных, и сравнение их с данными полученными в результате теоретических исследований, с использованием разрабатываемой методики оптимизации параметров и размещения технологических элементов лесосеки.

4. Проверку адекватности результатов, полученных при проведении математического анализа и сравнении данных, и написание соответствующих рекомендаций.

Для проведения данных экспериментальных исследований необходимо наличие соответствующего измерительного оборудования.

В качестве подобных измерительных средств могут быть использованы следующие инструменты и оборудование:



1. Лазерный дальномер Mileseeey T7 (диапазон измерений 0.2 – 100 м, точность измерений  $\pm 2$  мм).
2. Фиброгласовая и металлическая рулетки.
3. БПЛА DJI Phantom 4 с модулем RTK. Данная модель БПЛА предназначена для выполнения геодезических, картографических и инспекционных задач, а также обеспечивает высокую точность и производительность.
4. Ультразвуковой высотомер, дальномер, угломер Vertex IV/360. Прибор может использоваться для измерения высоты объектов (0-999 м), горизонтального расстояния, угла ( $-55^{\circ}$ - $85^{\circ}$  гр.) и наклона.
5. GNSS планшет LT700H с программным обеспечением для отвода и таксации участков лесного фонда ГисЛес для QGIS, который также может быть использован при проведении экспериментальных исследований.

Перед проведением исследований для данного оборудования будет проводиться юстировка, для получения соответствующего уровня точности измерений и погрешностей.

По предоставленному алгоритму планируется проведение экспериментальных исследований на базе Негорельского учебно-опытного лесхоза, Логойского лесхоза и ряда других лесохозяйственных учреждений Республики Беларусь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Григораш, О. В. Методология экспериментальных исследований / О. В. Григораш // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 127. – С. 849-864. – DOI 10.21515/1990-4665-127-059. – EDN YLZUKT.
2. Панкратович, А. С. Методы оценки влияния размещения технологических элементов лесосеки на производительность форвардера / А. С. Панкратович, П. А. Протас // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2022. – № 2(258). – С. 130-136. – DOI 10.52065/2519-402X-2022-258-2-130-136. – EDN AПBJW.
3. Пищов С. Н. Применение движителя комбинированного типа для повышения тягово-сцепных свойств лесных погрузочно-транспортных машин: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2008. 156 с.

## АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ И РАЗМЕЩЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕСОСЕКИ

В соответствии с Лесным кодексом РБ [1], СТБ 1360-2002 «Устойчивое лесопользование и лесопользование. Рубки главного пользования. Требования к технологиям» [2], СТБ 1361-2002 «Устойчивое лесопользование и лесопользование. Рубки промежуточного пользования. Требования к технологиям», Правилами отвода и таксации лесосек в лесах Республики Беларусь, а также некоторыми другими нормативно-правовыми актами, регламентирующими проведение лесозаготовительной деятельности, можно выделить ряд технологических элементов лесосеки (пасечные и магистральные волокна, погрузочные пункты и др.), с характерными для каждого собственными параметрами, а также предъявляемыми требованиями.

1. Для лесосеки характерны следующие *параметры*: ширина, длина, площадь, конфигурация (форма лесосеки):

- *Ширина лесосеки*, зависит от категории лесов, рельефа местности, участия главных пород, и других факторов. При этом она, как правило, не должна превышать 100 м.

- *Длина лесосеки* при отводе в рубку ограничивается выделом (реже кварталом, при отводе нескольких смежных выделов).

- Правилами рубок леса в Республике Беларусь [3] регламентируется *площадь лесосеки*, которая в зависимости от способа и вида рубок, преобладающих пород и категории лесов может варьироваться в диапазоне не более 3–30 га. Например, при проведении равномерно-постепенных рубок главного пользования в природоохранных лесах площадь лесосек не должна превышать 20 га. Средний же показатель площади лесосек для сплошных рубок главного пользования в республике составляет 1,5–2,5 га. В рубку может отводиться часть выдела, весь выдел целиком или несколько таксационных выделов, что также влияет на площадь лесосеки.

- *Конфигурация лесосеки* (форма лесосеки). Конфигурация лесосеки зависит в основном от формы выдела. Данный параметр лесосеки в РБ не регламентируется нормативными актами, однако имеются некоторые практические рекомендации, согласно которым необходимо проводить отвод лесосек таким образом, чтобы конфигурация лесосеки имела максимально простую форму. Это связано с тем, что предприятиями Министерства лесного хозяйства используются в ос-

новном стандартные схемы размещения волоков на лесосеке, использование которых на лесосеках простой формы является менее трудозатратным и сравнительно производительным. Следует отметить, что сложная форма лесосеки затрудняет размещение погрузочных пунктов на лесосеке, а с ними и трелевочных волоков соответственно. При значительной площади и сложной конфигурации лесосеки целесообразно ее разделять на несколько лесосек (делянок) простой формы.

2. Для **пасаки** в качестве основного параметра выступает ее ширина. *Ширина пасаки* зависит от технологии и типа используемого лесозаготовительного оборудования, что оказывает влияние на количество трелевочных волоков и их расположение на лесосеке. Например, в случае использования бензиномоторных пил для заготовки лесоматериалов ширина пасаки зависит в основном от таксационных показателей древостоя, и используемой технологии заготовки и составляет в среднем 25 м. С одной стороны, увеличение ширины пасаки позволяет уменьшить количество пасаек, а соответственно и трелевочных волоков, что увеличит вариативность размещения технологических элементов на лесосеке, а также уменьшит их общую площадь. Однако данные изменения потребуют наличия соответствующих технологий и оборудования, что скажется в свою очередь на производительности. *Длина пасаки* будет зависеть от схемы расположения трелевочных волоков и ширины лесосеки.

3. В качестве основных параметров **трелевочных волоков** выделяются их ширина, схема расположения, а также угол примыкания пасечного волока к магистральному.

- *Ширина волока* должна обеспечивать лесозаготовительной технике возможность свободного и безопасного маневрирования в процессе погрузки лесоматериалов, перемещении по волоку, в том числе на поворотах и примыканиях. При проведении рубок главного пользования ширина волока должна быть не менее 5 м, а в случаях, когда волоки проложены по косогору, данный показатель должен быть не менее 7 м. При проведении рубок промежуточного пользования ширина трелевочного волока должна быть равна ширине лесохозяйственной машины, увеличенной на 1 м (2 м в случае размещения волока на косогоре), но не менее 3 м.

- В настоящее время на лесозаготовках используются следующие *схемы расположения* трелевочных волоков: параллельная, диагональная, радиальная. Из них наибольшее распространение получила параллельная схема ввиду простоты, минимизации трудозатрат на подготовительные работы, ее удобства при тракторной трелевке.

- *Угол примыкания* пасечных волоков к магистральному волоку

ку в основном зависит от формы участка и рельефа местности. При угле примыкания более  $45^\circ$  для безопасности трелевки должен обеспечиваться плавный переход по дуге закругления, что в свою очередь увеличивает трудозатраты на организацию размещения технологических элементов, приходящиеся на подготовку волоков и мест их примыкания друг к другу. Изменение ширины трелевочного волока окажет влияние на общую площадь технологических элементов, а также на подготовку дополнительных инфраструктурных элементов (места разворота техники, точки примыкания волоков и др.).

**4. Погрузочный пункт** (промежуточный лесопромышленный склад) обустраивается с учетом применяемого на лесосечных работах оборудования, технологии, рельефа, почвенно-грунтовых условий лесосеки и других требований. В качестве основных параметров погрузочного пункта следует выделить его **габаритные размеры и площадь**, которые в свою очередь будут влиять на общую площадь технологических элементов на лесосеке (при его расположении в пределах лесосеки). При выборе места размещения погрузочного пункта, его размеров и примыкания в настоящее время руководствуются следующими требованиями:

- до начала выполнения лесосечных работ подготавливаются зоны безопасности вокруг временных объектов на расстоянии не менее 50 м от лесопогрузочных пунктов, верхних складов, различных организационно-технических элементов. Убираются опасные деревья, а в подлежащих разработке участках – все деревья [4];

- если погрузочный пункт примыкает к стенке леса, не подлежащего рубке, то зону безопасности здесь не разрубают, но на расстоянии 50 м убирают все опасные деревья;

- под погрузочный пункт желательно использовать территорию, имеющую редину, прогалину, без подроста основной породы (при его размещении в пределах лесосеки);

- места под штабеля для лесоматериалов должны быть расположены на сухих и ровных площадках с обозначением границ штабелей, проходов и проездов между ними.

Приведенные выше требования в основном ссылаются на подготовку опасной зоны вокруг погрузочного пункта, а также на размещение оборудования и организационных элементов непосредственно на погрузочном пункте. Однако они не дают понимания о требованиях к геометрии и размерам пункта, что усложняет его размещения в случае, когда он примыкает к лесосеке.

На практике встречаются случаи, когда погрузочный пункт (промсклад) выносится за пределы лесосеки. Данный вариант можно

считать актуальным, если общая площадь технологических элементов лесосеки превышает 25% от площади лесосеки, а также для исключения подъезда лесовозных автопоездов к лесосекам.

Все вышеперечисленное, привносит определенные сложности в выбор рационального размещения технологических элементов на лесосеке (пасек, трелевочных волоков, погрузочных пунктов и др.), связанные в первую очередь с увеличением количества возможных вариантов размещения элементов на лесосеке.

Проведенный анализ показал, что параметры технологических элементов лесосеки имеют тесную связь с их размещением на лесосеке. Однако не у всех из них данная связь четко определена, что, в первую очередь, связано с отсутствием достаточной нормативно-правовой базы, и требует определенных изменений.

В совокупности, цепочки взаимосвязи параметров и размещения соответствующих им технологических элементов образуют сложную многогранную систему, зависящую от большого количества факторов и переменных, и требующую проведения дальнейших исследований, которые позволили бы установить четкую взаимосвязь между ними, а также оптимизировать процесс размещения технологических элементов на лесосеке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лесной кодекс Республики Беларусь // Национальный правовой интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=Нк1500332> (дата обращения: 01.02.2023).

2. Устойчивое лесопользование и лесопользование. Рубки главного пользования. Требования к технологиям: СТБ 1360-2002. – Введ. 01.07.2003. – Минск: Госстандарт, 2003. – 16 с.

3. Правила рубок леса в Республике Беларусь. – Утв. постановлением Министерством лесного хозяйства Республики Беларусь, 19.12.2016 г., № 68.

4. Правила по охране труда при ведении лесного хозяйства, обработке древесины и производстве изделий из дерева. – Утв. постановлением Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь и Министерством лесного хозяйства Республики Беларусь, 30.03.2020 г., № 32/5.

## ВОДНО-ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЛЕСНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Водно-тепловой режим – это закономерное изменение в течение времени влажности и температуры в приземном слое воздуха и в верхних слоях грунтов. В грунтах земляного полотна с течением некоторого периода времени устанавливается свой водно-тепловой режим, который в какой-то мере отличается от водно-теплового режима окружающей местности, но подчиняется общим закономерностям изменения влажности и температуры, соответствующей климатической зоне. Водно-тепловой режим как фактор, влияющий на деформационные качества дорожной конструкции, может быть положен в основу анализа прочности и устойчивости дорожной конструкции. Поэтому при назначении расчетного значения модуля упругости необходимо иметь расчетную влажность грунтов, принимаемую в зависимости от водно-теплового режима местности, а также качественные и количественные закономерности сезонного изменения основных физико-механических свойств грунта [1].

Тепловой режим местности после устройства земляного полотна также изменяется, поэтому перед началом строительства дороги по метеорологическим данным района пролегания трассы необходимо составить дорожно-климатический график (рисунок 1), на котором показывают ход температуры воздуха, атмосферные осадки, направление ветра, глубину промерзания грунтов, начала сезонов года.

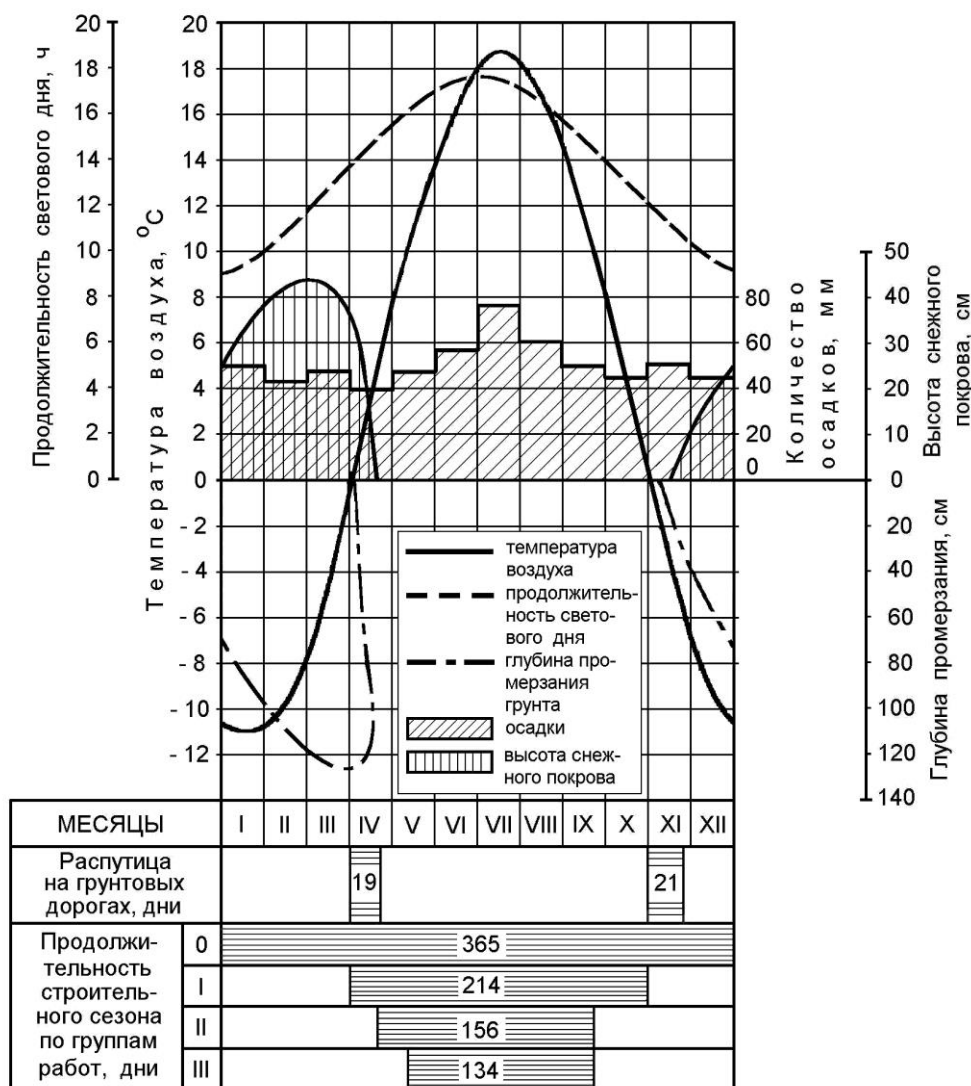
Основные источники увлажнения лесных автомобильных дорог указаны на рисунке 2. Данные источники могут быть как в жидком, так и в твердом состоянии в зависимости от цикла круглогодового хода водно-теплового режима. Вследствие, они образуют поверхностный сток, часть их просачивается в грунт и пополняет запасы грунтовой воды, а другая часть – испаряется.

В цикле круглогодового хода водно-теплового режима выделено пять периодов. На территории Беларуси в октябре-ноябре происходит повышение влажности грунта земляного полотна, в связи с уменьшением испарения.

В ноябре-январе происходит накопление влаги в рабочем слое земляного полотна за счет передвижения влаги снизу- вверх из боковых канав.

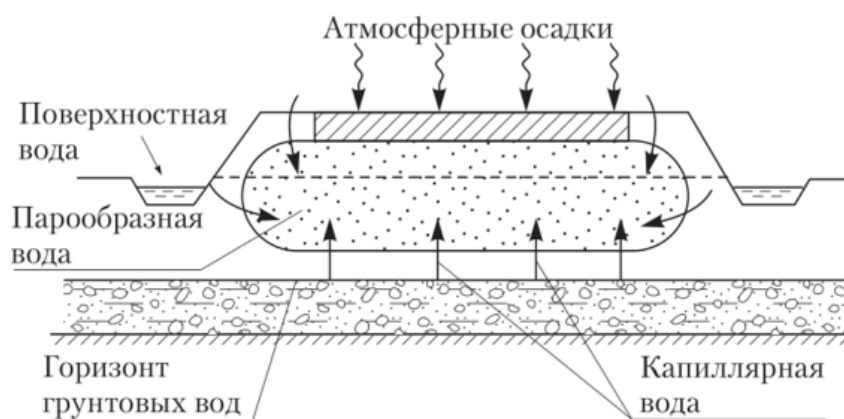
В январе-феврале грунт промерзает и происходит некоторое вымерзание влаги (испарение льда) на участках, оголенных от снега и при отсутствии достаточных источников поступления влаги снизу и боков.

В феврале-апреле промерзание грунта достигает максимальной величины и резко повышается влажность грунтов (образование ледяных линз и пучин).



**Рисунок 1 – Дорожно-климатический график района пролегания участка дороги (построенный по данным справочника по климату Беларуси)**

В апреле-мае происходит оттаивание грунта с большим количеством воды и резким падением прочности грунта. Изменения влажности в грунте дорожного полотна существенно влияют на его прочность, т. е. идет резкое снижение модуля упругости дорожных конструкций.



**Рисунок 2 – Источники увлажнения грунтов земляного полотна**

Оценкой уплотнения грунта служит степень его плотности, при которой прекращается возможность осадок земляного полотна от воздействия повторных нагрузок и уплотнения.

Для характеристики физического состояния грунтов необходимо знать не только естественную влажность, но и степень заполнения пор водой (относительную влажность). Так, при исследовании двух образцов грунта различной влажности были получены следующие данные (таблица 1).

Из таблицы 1 видно, что весовая влажность 2-го образца на 4% больше первого. Но это не значит, что второй образец более водонасыщен, чем первый. Поэтому для установления водонасыщенности образцов необходимо определить их пористость, плотность и степень влажности.

**Таблица 1 – Исследование образцов грунта различной влажности**

Наименование показателей грунтов	Показатели	
	1-й образец	2-й образец
Плотность частиц грунта $\rho_s, \tilde{a}/\tilde{m}^3$	2,68	2,68
Плотность грунта $\rho_0, \tilde{a}/\tilde{m}^3$	2,0	1,6
Весовая влажность $W, \%$	18	22

Чем плотнее грунт, тем прочнее его структура. Таким образом, для достижения прочной структуры грунта необходимо затратить большую работу на его уплотнение. При этом имеется определенный минимум по уплотнению, ниже которого структура будет неустойчивой. Поэтому в каждой точке земляного полотна грунт должен соответствовать определенным нормативным значениям.

Степень уплотнения грунтов в слоях земляного полотна приведена в таблице 2.



**Таблица 2 - Степень уплотнения грунта в слоях земляного полотна**

Вид земляного полотна	Часть земляного полотна	Глубина расположения слоя от поверхности покрытия, м	Минимальный коэффициент уплотнения грунта при типах дорожной одежды	
			капитальном	облегченном и переходном
Насыпи	верхняя (рабочий слой)	до 1,5	1,00-0,99	1,00-0,98
	нижняя непотопляемая	от 1,5 до 6,0 включ.	0,95	0,95
		более 6,0	0,98	0,95
	нижняя подтопляемая	от 1,5 до 6,0 включ. более 6,0	0,95	0,95
Выемки и нулевые места	в слое сезонного промерзания	до 1,2	1,00-0,99	1,00-0,98
	ниже слоя сезонного промерзания	до 1,2	0,95	0,95-0,92

Земляное полотно и дорожная одежда должны иметь достаточную прочность на протяжении всего времени эксплуатации дороги. Одной из причин, влияющих на прочностные характеристики дорожно-строительных материалов, является влажность и температура, т. е. водно-тепловой режим.

Регулирование водно-теплого режима грунта земляного полотна позволяет повысить прочность грунта за счет уменьшения поступления влаги в зону промерзания, так как во время промерзания грунта влажность его увеличивается за счет миграции влаги из нижних талых слоев, а также от грунтовых вод. Влажность грунта достигает максимума (предел текучести) во время оттаивания грунта земляного полотна. Сезонное изменение влажности зависит от совокупности факторов: типа грунта, высоты насыпи, скорости промерзания грунта земляного полотна.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лыщик П.А., Бавбель Е.И., Науменко А.И. Основные принципы развития сети лесных автомобильных дорог / П.А. Лыщик, Е.И. Бавбель, А.И. Науменко // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 1 (228). С. 125–130.

А.И. Науменко, доц., канд. техн. наук;  
П.А. Лыщик, проф., канд. техн. наук;  
Е.И. Бавбель, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, УСТРОЕННЫХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАЛОЦЕМЕНТНОГО ВЯЖУЩЕГО**

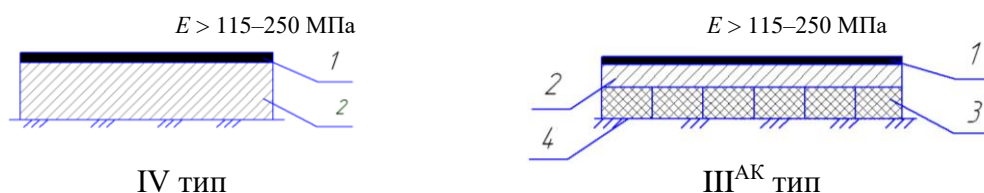
Дорожные конструкции воспринимают различные виды внешних воздействий, основными из которых являются воздействия от автомобильной нагрузки и погодно-климатических факторов. Кроме внешних воздействий, дорожные конструкции должны воспринимать нагрузки (иногда значительные) от собственной массы. Основные элементы дорожной конструкции – дорожная одежда и земляное полотно. Дорожную одежду считают достаточно прочной, если под воздействием всех нагрузок она сохраняет в течение заданного срока сплошность и требуемую ровность покрытия. Земляное полотно считают устойчивым, если изменение его несущей способности, высотных и геометрических параметров не выходит за расчетные пределы в течение срока службы [1–4].

В последние годы, с появлением большегрузных автомобильных поездов, значительно возросла колесная автомобильная нагрузка, которая вызывает предельные вертикальные и горизонтальные напряжения и деформации в конструктивных слоях дорожной одежды и верхних слоях земляного полотна. Это вызывает необходимость строить все более мощные и дорогостоящие конструкции.

Для оценки эффективности практического использования разработанных дорожных конструкций [2] и методики проектирования цементогрунтовых смесей для устройства конструктивных слоев в производственных условиях были построены и прошли опытно-промышленную проверку участки лесных автомобильных дорог с использованием местных грунтов, укрепленных композиционными малоцементными вяжущими [1].

Целью работы является проверка теоретических предпосылок и результатов лабораторных экспериментов по определению прочностных и деформационных свойств цементогрунтов, полученных на основе укрепления местных грунтов композиционными малоцементными вяжущими, а также транспортно-эксплуатационных характеристик разработанных дорожных конструкций лесных автомобильных дорог [4].

Основные конструктивные решения – устройство слоя покрытия, несущего или дополнительного слоя основания дорожной конструкции представлены на рис. 1.



- IV тип  
 1 – слой поверхностной обработки на основе щебня и битума;  
 2 – покрытие из цементогрунта; 3 – арматурный каркас «георешетка-цементогрунт»; 4 – грунт земляного полотна
- III<sup>AK</sup> тип

**Рисунок 1 – Дорожные конструкции из цементогрунта и арматурного каркаса**

Цель применения конструктивного слоя из цементогрунта и арматурного каркаса «георешетка-цементогрунт» – создание усиленного слоя дорожной одежды, имеющего улучшенные характеристики по отношению к слою из заполнителя:

- повышенную прочность (повышенную сопротивляемость возникающим напряжениям сдвига) [4];
- повышенную жесткость (модуль упругости слоя повышается по отношению к модулю упругости заполнителя) [4];
- пониженные температурные деформации при заполнителе, содержащем композиционные вяжущие.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лыщик П. А., Науменко А. И., Синяк С. А. Конструкции лесных автомобильных дорог на основе арматурного каркаса «георешетка-цементогрунт» // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 79–82.
2. Бавбель Е. И., Игнатенко В. В., Науменко А. И. Конструирование и методика расчета дорожных одежд из укрепленных грунтов // Труды БГТУ. 2016. № 2: Лесная и деревообраб. пром-сть. С. 58–60.
3. Лыщик П.А., Игнатенко В.В., Бавбель Е.И., Науменко А.И. Обоснование структуры и состава дорожной цементогрунтовой смеси на основе математической модели / П.А. Лыщик, Е.И. В.В. Игнатенко, Бавбель, А.И. Науменко // Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2015. № 2 (175). С. 39–43.
4. Лыщик П.А., Бавбель Е.И., Науменко А.И. Состав минерального вяжущего для укрепления дорожных грунтов / П.А. Лыщик, Е.И. Бавбель, А.И. Науменко // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2014. № 2 (166). С. 33–36.

А.И. Науменко, доц., канд. техн. наук;  
П.А. Лыщик, проф., канд. техн. наук;  
Е.И. Бавбель, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ**

В основу разработанного программного обеспечения прогнозирования расположения лесотранспортных сетей положены четыре принципа:

- универсальность (возможность моделировать произвольные по конфигурации и площади участки реальных территорий с трассируемыми лесотранспортными путями);
- гибкость (удобство пополнения программного обеспечения за счет включения в его состав новых компонентов, а также корректировки отдельных его частей без изменения целого);
- быстрое действие;
- диалоговый режим.

Прогнозирование расположения лесотранспортных сетей на больших территориях (лесхозы) достигается разбиением исходной ЦММ на отдельные сегменты (лесничества), решением оптимизационной задачи на каждом сегменте (лесничестве) и последующим синтезом (склежкой) рационального варианта лесотранспортной сети. Программное обеспечение по прогнозированию расположения лесотранспортных путей на долгосрочную перспективу включает в себя систему построения возможных вариантов лесотранспортной сети и выбора оптимальной.

Проектирование опорной лесотранспортной сети включает: многовариантное размещение сети лесных дорог с учетом лесоводственно-таксационных характеристик насаждений и особенностей реальной местности (наличие рек, болот, существующей сети дорог и т.д.), а также определение очередности строительства лесных дорог (рис. 1).

Метод проведения оценки, мониторинга и размещения лесотранспортных путей заключается в следующем:

1. Находится рациональное размещение лесотранспортной сети.
2. Устанавливаются типы лесовозных автопоездов, используемых на лесозаготовительном предприятии и типы дорожных одежд существующей лесотранспортной сети.
3. Определяется точка примыкания новой трассы лесной авто-

мобильной дороги.

4. Определяется технический уровень звеньев трассы лесной дороги.

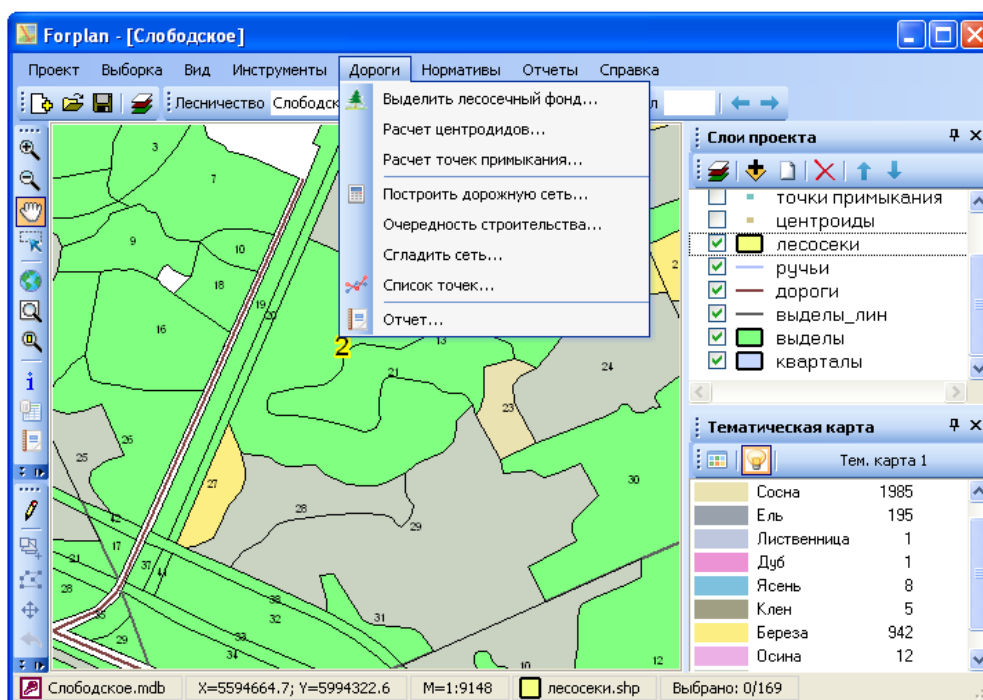


Рисунок 1 – Интерфейс программы

Для постоянного мониторинга лесотранспортных путей используется модуль программы – Макет 13 «Земли линейного протяжения»:

– ширина трасс лесных дорог проставлена в метрах, протяженность в границах квартала в километрах, в обоих случаях с точностью до 0,1;

– для лесных автомобильных дорог, канав, каналов используются шифры состояния: 68 – состояние удовлетворительное и 69 – неудовлетворительное;

– для просек, разрывов и разных трасс коды с 61 по 67: 61 – чистая, 62 – чистая минерализованная, 63 – заросшая, 64 – заросшая минерализованная, 65 – захламленная, 66 – проезжая, 67 – непроезжая;

– назначение дороги: 1 – лесохозяйственная, 2 – лесовозная, 3 – пожарная, 4 – общего пользования, 5 – ветки.

– тип покрытия дорожного полотна и ширина проезжей части в метрах с точностью до 0,1 указывается только для лесных автомобильных дорог с искусственным покрытием. Тип покрытия: 1 – асфальтированные, 2 – бетонные, 3 – гравийные.

– графа «сезонность действия» заполняется при описании грунтовых автомобильных дорог: 1 – круглогодичная, 2 – зимняя, 3 – летняя.

– указывается показатель «требуется проведения мероприятия (длина)». Ее указывают в км (с точностью до 0,1), а шифр проектируемого мероприятия проставляется в макете 2 «Проектируемые хозяйственные мероприятия».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лыщик П.А., Бавбель Е.И. Совершенствование норм проектирования лесных автомобильных дорог / П.А. Лыщик, Е.И. Бавбель // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн. Материалы докладов 84-й научно-технической конференции, посвященной 90-летию юбилею БГТУ и Дню белорусской науки (с международным участием). Отв. За издание И.В. Войтов. 2020. С. 20–21.

2. Лыщик П.А., Бавбель Е.И., Науменко А.И. Основные принципы развития сети лесных автомобильных дорог / П.А. Лыщик, Е.И. Бавбель, А.И. Науменко // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 1 (228). С. 125–130.

3. Лыщик П.А., Бавбель Е.И. Проектирование лесных автомобильных дорог на основе ТКП 500 «Лесные автомобильные дороги. Нормы проектирования и правила устройства» и ГИС-технологий / П.А. Лыщик, Е.И. Бавбель // Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ. Материалы Международной научно-технической конференции в рамках Международного молодежного форума по лесопромышленному образованию (Лес-Наука-Инновации – 2018). 2018. С. 16–20.

4. Петько А.Р., Бавбель Е.И. Клотоидное трассирование лесной автомобильной дороги / А.Р. Петько, Е.И. Бавбель // Студенческий журнал, ООО «Сибирская академическая книга», Новосибирск. 2019. № 30–2 (74). С. 46–48.

5. Бавбель Е.И., Лыщик П.А. Обоснование размещения лесотранспортных сетей / П.А. Лыщик, Е.И. Бавбель / Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2009. № 4. С. 82–88.

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕСТНЫХ ГРУНТОВ, УКРЕПЛЕННЫХ КОМПЛЕКСНЫМ ВЯЖУЩИМ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЛЕСНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

При разработке технической документации на строительство лесных автомобильных дорог всегда ставится задача по максимальному использованию грунтов, залегающих вдоль трассы, как для возведения земляного полотна, так и для частичного применения их при устройстве дорожной одежды. Степень использования таких грунтов определяется их пригодностью для дорожного строительства, что должно подтверждаться прочностными и деформационными показателями. В большей степени притрассовые грунты требуют улучшения их характеристик, так как они относятся к условно пригодным.

Укрепление грунтов – принципиально новый подход в создании прочных дорожных конструкций лесных автомобильных дорог. При устройстве слоев основания, морозозащитного слоя проезжей части и обочин [1–4] из укрепленных грунтов поступление влаги к материалу земляного полотна сверху через дорожную одежду и обочины значительно снижается.

В дорожной технической литературе и практике часто пользуются термином местные материалы. При этом всегда учитывают важную особенность и преимущество использования местных материалов в дорожном строительстве. Эти материалы не требуют дальних перевозок автомобильным транспортом и исключают надобность в перевозках таких материалов железнодорожным транспортом. Исходя из этого, к местным, а, следовательно, к доступным для применения и дешевым материалам, поддающимся укреплению вяжущими и другими материалами, следует относить как повсеместно залегающие, широко распространенные природные грунты различного состава, так и твердые обломочные отходы производства, и некондиционные каменные материалы, называемые искусственными (техногенными) грунтами в соответствии с ГОСТ 25100.

Актуальность использования укрепленных грунтов в настоящее время обусловлена увеличивающимися объемами строительства лесных автомобильных дорог до 150–200 км ежегодно и дефицитом (высокой стоимостью) каменных материалов. На большей части лесной территории Республики Беларусь каменные строительные материалы распространены не значительно либо полностью отсутствуют. До-

рожное строительство базируется на привозных строительных материалах. Значительные затраты на транспортирование материалов вызывают увеличение общей стоимости строительства лесных автомобильных дорог. Поэтому на этих территориях для устройства дорожных конструкций целесообразно применять местные материалы, укрепленные различными вяжущими [3].

Следует отметить, что исследования по укреплению дорожных грунтов лесных дорог проводились в весьма ограниченном количестве. Лесные автомобильные дороги имеют свою специфику и особенности: в лесной зоне преобладают кислые грунты; преобладание глинистых и переувлажненных грунтов; плохая проветриваемость дорог в лесной зоне; отдаленность районов строительства лесных автомобильных дорог от предприятий, что существенно повышает стоимость доставки материалов; ограниченность ресурсов и дорожно-строительных материалов в местах строительства и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Bavbel E.I., Naumenko A.I. Laboratory studies to strengthen the local soils of forest roads / E.I. Bavbel, A.I. Naumenko // *Sciences of Europe*. 2018. № 31–1 (31). С. 38–42.

2. Bavbel E.I., Naumenko A.I., Zhilinsky M.V. Development of the composition of low-cement composite binder to strengthen the local road soils / E.I. Bavbel, A.I. Naumenko, M.V. Zhilinsky // *Sciences of Europe*. 2018. № 31–1 (31). С. 43–46.

3. Лыщик П.А., Игнатенко В.В., Бавбель Е.И., Науменко А.И. Обоснование структуры и состава дорожной цементогрунтовой смеси на основе математической модели / П.А. Лыщик, Е.И. В.В. Игнатенко, Бавбель, А.И. Науменко // *Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность*. 2015. № 2 (175). С. 39–43.

4. Лыщик П.А., Бавбель Е.И., Науменко А.И. Состав минерального вяжущего для укрепления дорожных грунтов / П.А. Лыщик, Е.И. Бавбель, А.И. Науменко // *Труды БГТУ. №2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность*. 2014. № 2 (166). С. 33–36.

5. Плышевский, С. В. Физико–химические исследования золы–уноса из топки с псевдоожиженным слоем при сжигании фрезерного торфа / С. В. Плышевский, П. А. Лыщик, А. И. Науменко, Л. М. Виноградов, С. М. Добкин // *Тепло– и массоперенос – 2014: сб.тр. – Минск: Институт тепло– и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси*, 2015. – С. 30–35.



УДК 674.09

И.К. Божелко, канд. тех. наук, зав. кафедрой;  
Д.В. Божко, магистрант (БГТУ, г. Минск)

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСКРОЯ КРУГЛЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯЗЫКА ПРОГРАММИРОВАНИЯ PYTHON

Целью работы является: создание программного модуля для расчета оптимальных схем раскроя бревен на п/м.

На основе теоретических сведений Н.А. Батина был создан программно-технологический модуль, позволяющий рассчитывать оптимальные схемы раскроя бревен для выхода оптимальных схем раскроя по заданной спецификации.

Составлена общая схема реализации программно-технологического модуля (рис. 1), а также 6 поясняющих блоков к основным блокам программы.

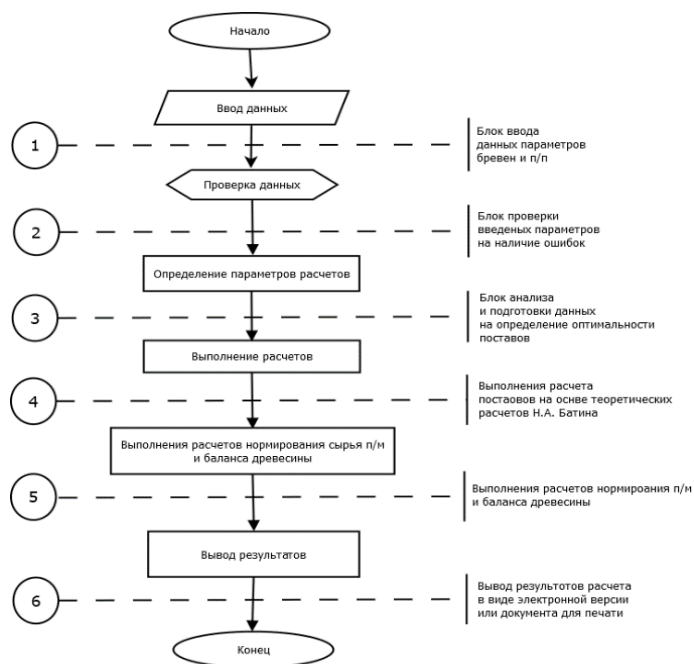
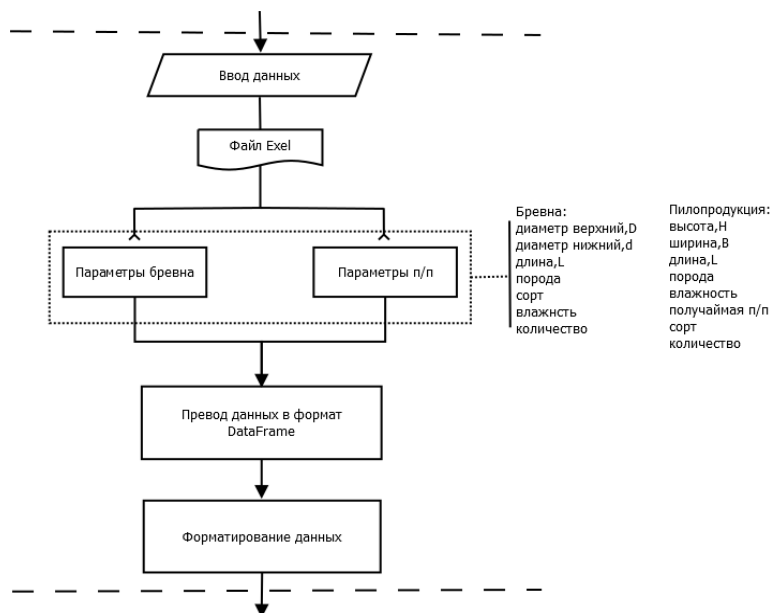


Рисунок 1 – Общая схема реализации программно-технологического модуля

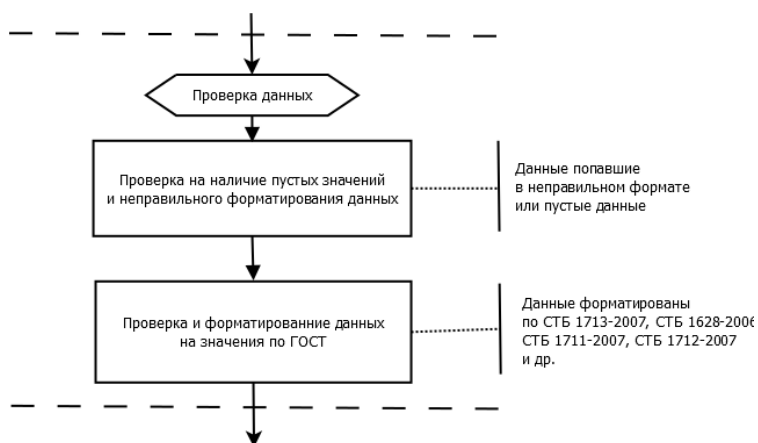
Начало программы начинается с ввода данных (блок 1, рис. 2). Данные вводятся путем введения основных характеристик бревен и получаемого п/м в файле Excel. Основными параметрами для бревна выступают: верхний и нижний диаметр, длина, порода, сорт, влажность и количество бревен, а для получаемых п/м: высота, ширина,

длина, порода, влажность, сорт, количество и получаемая п/п. Также производится перевод данных в формат DataFrame для дальнейшей реализации. Форматирование данных производится для перевода значений в нужные измерения для дальнейших расчетов.



**Рисунок 2 – Блок ввода данных**

Следующим этапом реализации программы является проверка введенных данных (блок 2, рис. 3). Проверка данных начинается с проверки наличия пустых данных и данных неправильного формата, а также проверку и форматирование данных по СТБ для бревен и п/м, если данные не соответствуют заданным параметрам вызывается ошибка формата данных.



**Рисунок 3 – Блок проверки введенных данных**

Дальнейшим этапом реализации программы будет определение параметров расчета (блок 3, рис. 4). В этом блоке рассчитываются основные параметры п/м и бревен, для расчета оптимальных поставок.

Выбор способа распиловки выбираются вручную, определяется количество выпиленных досок и их расположение в поставе.

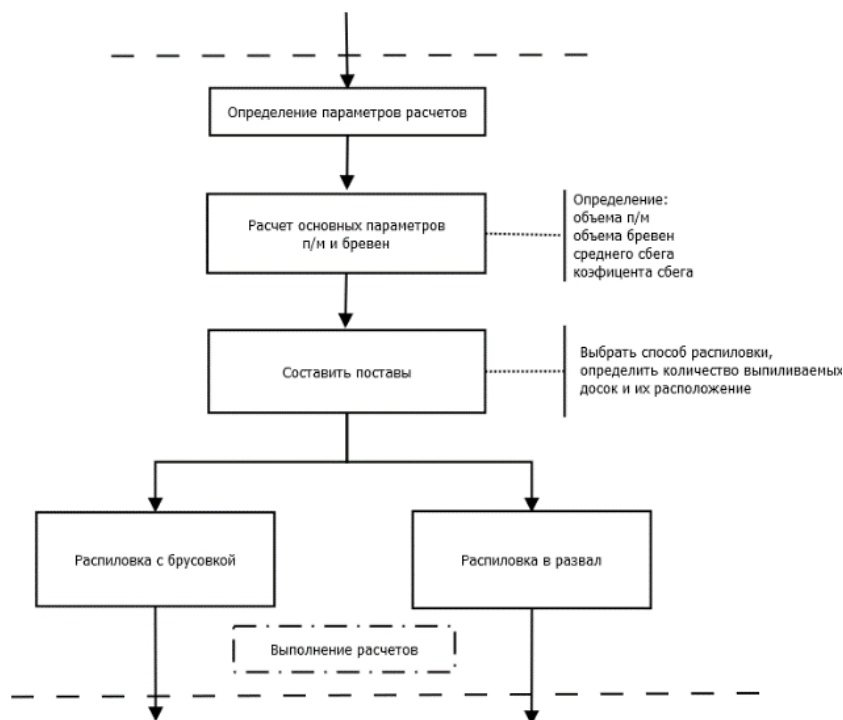
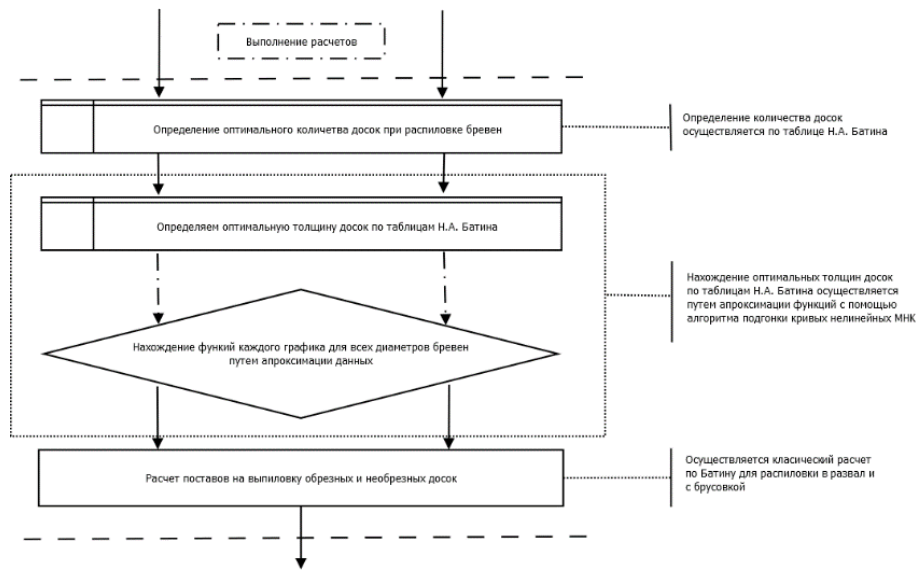


Рисунок 4 – Блок определения параметров расчета

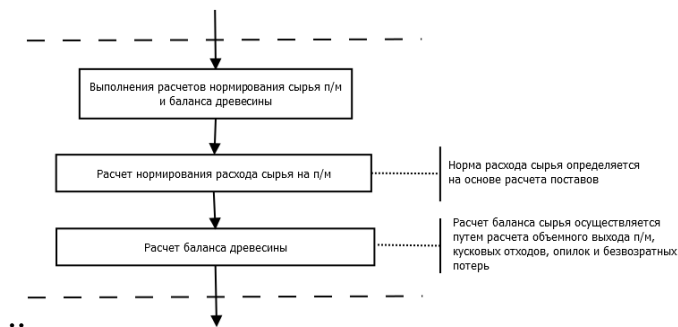
Следующим этапом реализации программы является выполнение расчетов (блок 4, рис. 5). Здесь выполняются расчеты на основе теоретических сведений Н.А. Батина, по нахождению ширины и количества центральных и боковых досок, нахождения оптимальных толщин досок. Для реализации табличных методов Н.А. Батина используется аппроксимация функций с помощью алгоритма подгонки данных МНК библиотеки ScyPy.

Последующими расчетами поставов является расчеты нормирования сырья п/м и баланса древесины (блок 5, рис. 6). Расчет нормы сырья производится на основе расчета поставов, для расчета баланса древесины производится расчет баланса сырья путем вычисления его объемного выхода п/м, кусковых отходов, опилок и безвозвратных потерь.

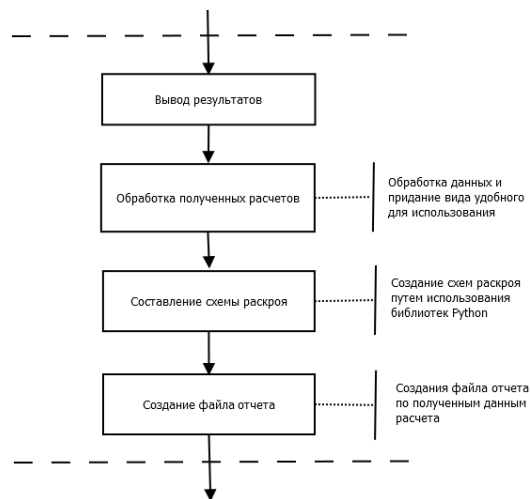
Заключаящим этапом реализации программы является вывод результатов (блок 6, рис. 7). Обработка полученных расчетов нужно для предания полученным расчетам хороший вид, для реализации его в отчете. Создание схем раскроя происходит путем использования библиотеки FreePDF для отрисовки схемы и создания отчета.



**Рисунок 5 – Блок выполнения расчетов**



**Рисунок 6 – Блок расчетов нормирования сырья п/м и баланса древесины**



**Рисунок 7 – Блок вывода результатов**

Файл отчета представляет собой файл PDF формата с схемой раскроя бревна на п/м и таблицей с основными параметрами расчета или без нее.

С.С. Гайдук, доц., канд. техн. наук;  
С.А. Прохорчик, доц., канд. техн. наук;  
Е.В. Ручкина, ассист.  
(БГТУ, г. Минск)

## **CLT-ПАНЕЛИ В ДЕРЕВЯННОМ ДОМОСТРОЕНИИ**

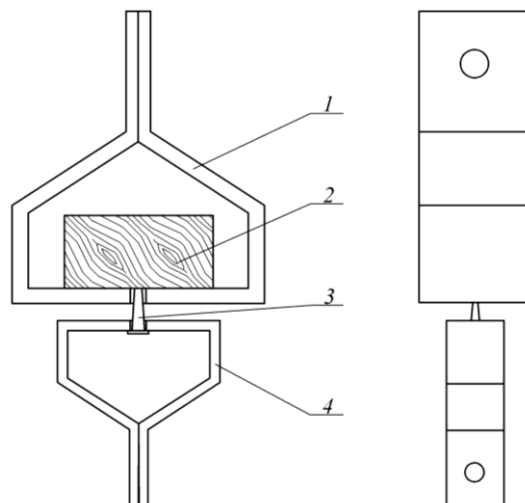
В Республике Беларусь строительству жилья уделяется большое внимание. Так на государственном уровне разработана и реализуется программа, предполагающая создание рабочих мест и условий комфортного проживания в малых городах и сельской местности. На сегодняшний день имеется большой выбор материалов для строительства домов (бетон, кирпич, различного рода блоки, древесина и т.д.). Среди представленных материалов во всем мире наиболее перспективным считается древесина, так это возобновляемый и экологически чистый материал. Все большую популярность приобретают разработанные в 1996 г. так называемые деревянные CLT-панели (Cross Laminated Timber), получаемые путем перекрестного склеивания деревянных реек. Данный материал обладает целым рядом достоинств: экологичность, небольшой вес по сравнению с железобетонными конструкциями, высокие физико-механические, звуко- и теплоизоляционные свойства, продолжительный срок службы (до 180–200 лет), высокая скорость сборки по месту возведения, возможность реализации практически любых дизайнерских решений, возможность использования низкосортной древесины [1–3].

Самыми востребованными на рынке являются трех-, пяти- и семислойные плиты. Толщины слоев могут отличаться друг от друга. Для производства плит используют ламели как правило хвойных пород толщиной от 20 до 80 мм, для склеивания используются полиуретановые клеи [1, 4, 5]. В рамках этого направления интерес представляют исследования, направленные на использования различных пород в конструкции плит. Так чаще всего внутренние слои состоят из древесины хвойных пород, наружный и внутренний слои выполняются из древесины более стойких и более декоративных пород (например, лиственница, дуб и др.).

Для проведения исследований использовались древесина сосны, липы и осины, а также поливинилацетатный Клейберит 303 и полиуретановый Клейберит 501 клеи.

В рамках проводимых исследований проводились испытания по определению сопротивления выдергиванию шурупов и гвоздей и прочности при статическом изгибе. Определение удельного сопротивления выдергиванию круглых проволочных гвоздей и шурупов про-

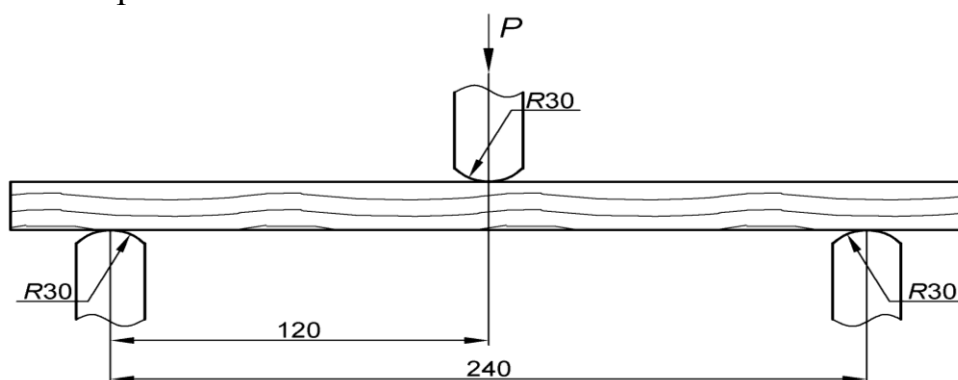
водится в соответствии с ГОСТ 16483.33-97. Образцы изготавливались методом склеивания трех слоев толщиной 17, 16 и 17 мм соответственно в форме прямоугольной призмы с поперечным сечением 50×50 мм и длиной вдоль волокон 150 мм. Схема проведения испытаний представлена на рис. 1.



1 – хомут для укрепления образцов; 2 – образец;  
3 – гвоздь (шуруп); 4 – хомут для захвата гвоздя (шурупа)

**Рисунок 1 – Приспособление для выдергивания гвоздей и шурупов**

Определение предела прочности при статическом изгибе проводится в соответствии с ГОСТ 16483.3-84. Образцы изготавливались методом склеивания трех слоев толщиной 7, 6 и 7 мм соответственно в форме прямоугольной призмы с поперечным сечением 20×20 мм и длиной вдоль волокон 300 мм. Схема проведения испытаний представлена на рис. 2.



**Рисунок 2 – Схема проведения испытаний на статический изгиб**

Результаты определения предела прочности при статическом изгибе и удельного сопротивления выдергиванию гвоздей и шурупов представлены в таблице.

**Таблица – Предел прочности при статическом изгибе и удельное сопротивление выдергиванию шурупов и гвоздей CLT-панелей**

Порода древесины	Предел прочности $\sigma$ , МПа	Удельное сопротивление древесины выдергиванию $PR_{уд}$ , Н/мм	
		шуруп (4×35 мм)	гвозди (2×40 мм)
Сосна–сосна–сосна	90	185	55
Сосна–сосна–сосна (CLT)	83	202	62
Сосна–осина–сосна	75	146	48
Сосна–осина–сосна (CLT)	72	174	54
Сосна–липа–сосна	70	150	45
Сосна–липа–сосна (CLT)	68	180	55

Результаты проведенных исследований показали, что выбор клея не влияет на физико-механические свойства получаемых панелей, так как разрушение всех образцов происходило по древесине, а не по клеевому шву.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мавлюбердинов А.Р. Технологические особенности возведения многоэтажных жилых зданий из CLT-панелей / А.Р. Мавлюбердинов // Известия КГАСУ, 2018, № 1 (43). С. 219–225.
2. Чемоданов А.Н. Перспективные строительные материалы в деревянном домостроении / А.Н. Чемоданов, И.Н. Паргунькин, И.Н. Пуртов // Вестник поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. конструкции. технологии. 2020. №4. С. 33–38.
3. Ван-Хо-Бин Е.А. Перспективы строительства высотных зданий из CLT-панелей в России / Е.А. Ван-Хо-Бин // Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2016. Т.3. С. 213–217.
4. Бойтемирова И.Н. CLT-панели – эффективный материал из древесины для несущих и ограждающих конструкций зданий / И.Н. Бойтемирова, Е.А. Давыдова // Вестник научных конференций. 2016. № 12-1 (16). С. 18–21.
5. Лосик Е.А. Современные конструкции и материалы для экологических домов: дис. ... маг. техн. наук: 1-46 80 01. Минск, 2022. 58 с.

Л.В. Игнатович, доц.канд. тех. наук;  
Е.И. Гордиевич, ассист. (БГТУ, г. Минск)

## **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ МЯГКОЙ МЕБЕЛИ ПО ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ**

Современный ассортимент мягкой мебели весьма разнообразен как по видам изделий, так и по материалам и способам изготовления. Поэтому сведение отдельных показателей качества в единый комплексный показатель даст возможность определить место данного изделия среди его аналогов и определить уровень его качества. Именно органолептическая оценка изделий мягкой мебели порой оказывается решающей и в значительной мере предопределяет выбор покупателя. В данной работе было принято решение определить уровень качества трех изделий мягкой мебели по органолептическим показателям и выявить наиболее качественное из них.

Для этих целей был использован экспертный метод, поскольку ряд параметров качества мягкой мебели с точки зрения органолептики не могут быть выражены в натуральном измерении. Способ экспертных комиссий позволил получить вполне объективное усреднённое мнение коллектива. Порядок проведения оценки состоял в следующем [1]:

### 1. Создание экспертной группы.

В экспертную группу вошло 7 человек, 5 из которых специалисты – эксперты, имеющие опыт работы в области художественного конструирования и 2 покупателя [2].

### 2. Составление перечня единичных органолептических показателей качества мягкой мебели и объединение их в группы.

На основании экспериментального и органолептического методов были определены следующие единичные показатели качества мягкой мебели: оригинальность, соответствие моде, функционально-конструктивная обусловленность, эргономическая обусловленность, колорит и декоративность, вид обивочного материала, запах и шум (скрип).

### 3. Выбор объектов для оценки.

Для выполнения работы были выбраны следующие модели мягкой мебели, изготовленные ЗАО «Холдинговой компанией «Пинскдрев»:

3-х местный диван «Икар» с механизмом трансформации «Клик – кляк». Наполнение дивана – пружинный блок типа Bonnel; пенополиуретан эластичный. Материал обивки – вельвет.



3-х местный диван «Латина Royal» с механизмом трансформации «Тик – так». Наполнение дивана независимый пружинный блок. Материал обивки – жаккард.

3-х местный диван «Мишель» с механизмом трансформации: вперед выкатной. Наполнение дивана - пенополиуретан эластичный; Материал обивки – флок.

4. Оформление анкет и бланков для экспертов.

5. Опрос составляющих экспертную группу лиц.

Для оценки показателей использовалась пятибалльная шкала, так как количество баллов в оценочной шкале может быть различно [2].

6. Обработка полученной от экспертов информации;

Полученные от экспертов оценки весомости  $q_{ij}$  каждого  $j$ -го показателя в баллах для получения коэффициента весомости  $q_{in}$  усредняются и нормируются по формулам [3]:

$$q_i = \frac{\sum_{i=1}^m q_{ij} k_{\varepsilon i}}{\sum_{i=1}^m k_{\varepsilon i}}, \quad (1)$$

$$q_{in} = \frac{q_j}{\sum_{j=1}^n q_j}, \quad (2)$$

где  $n$  – число показателей в группе.

Оценка единичных показателей качества выполнялась по формуле [3]:

$$P_j^* = f\left(\frac{P_j}{P_{j\text{эт}}}\right), \quad (3)$$

где  $P_j$  – значение  $j$ -ого показателя;  $P_{j\text{эт}}$  – эталонное значение показателя, в качестве которого может быть принято наилучшее возможное значение показателя.

Определение комплексных показателей заключается в выборе решающей функции, выражающей данный комплексный показатель  $P^*$  через более простые показатели предшествующего уровня и его расчете. Была принята следующая линейная решающая функция [3]:

$$P^* = \sum_{j=1}^n q_{jH} \bar{P}_j^*, \quad (4)$$

где  $q_{jH}$  – значимость  $j$ -го показателя;  $\bar{P}_j^*$  – оценка  $j$ -го показателя группой экспертов. Результаты расчетов представлены в таблице.

**Таблица – Результаты оценки качества по органолептическим показателям**

№	Групповые показатели качества	Баллы, присвоенные экспертами							Средний бал	Коэф-т весомости, $q_{iH}$	Показатель качества, $P_j^*$
		1	2	3	4	5	6	7			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Диван «Икар»</b>											
1	оригинальность	5	4	5	4	4	5	5	4,6	0,13	0,91
2	соответствие моде	5	5	5	4	5	5	5	4,9	0,14	0,97
3	функционально-конструктивная обусловленность	3	3	4	3	3	4	4	3,4	0,10	0,69
4	эргономическая обусловленность	4	4	4	5	4	4	3	4,3	0,12	0,80
5	колорит и декоративность	5	5	4	4	5	4	5	4,6	0,13	0,91
6	вид обивочного материала	5	5	4	4	4	5	4	4,4	0,12	0,89
7	запах	4	5	5	4	5	5	4	4,7	0,13	0,92
8	шум (скрип, треск)	5	5	5	5	5	5	5	5	0,14	1
Комплексный показатель $P^*$		0,89									
<b>Диван «Латина Royal»</b>											
1	оригинальность	5	4	5	4	4	5	5	4,6	0,13	0,91
2	соответствие моде	4	4	4	5	4	4	5	4,3	0,12	0,85
3	функционально-конструктивная обусловленность	4	4	5	5	4	5	5	4,6	0,13	0,91
4	эргономическая обусловленность	5	5	5	4	5	4	4	4,6	0,13	0,91
5	колорит и декоративность	5	4	4	5	4	4	4	4,3	0,12	0,85
6	вид обивочного материала	4	4	3	4	5	4	4	4,0	0,11	0,80
7	запах	4	5	5	5	5	5	5	4,9	0,13	0,97
8	шум (скрип, треск)	5	5	5	5	5	5	5	5	0,14	1
КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ $P^*$		0,91									

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Диван «Мишель»</b>											
1	оригинальность	5	4	5	4	4	5	5	4,6	0,12	0,92
2	соответствие моде	5	5	4	5	5	4	5	4,7	0,13	0,94
3	функционально-конструктивная обусловленность	5	5	5	5	4	5	5	4,9	0,13	0,97
4	эргономическая обусловленность	5	5	5	4	5	4	5	4,7	0,13	0,94
5	колорит и декоративность	5	4	5	5	4	4	4	4,4	0,12	0,88
6	вид обивочного материала	5	4	5	4	5	4	4	4,4	0,12	0,88
7	запах	5	5	5	5	5	5	5	5	0,13	1
8	шум (скрип, треск)	5	5	5	5	5	5	5	5	0,13	1
Комплексный показатель $P^*$		0,94									

Как видно из таблицы, значение комплексного показателя уровня качества каждого дивана находится в диапазоне от 0,8–1, что свидетельствует об их высоком качестве по органолептическим свойствам [4]. Самым лучшим из них оказался диван «Мишель» с показателем уровня качества равным 0,94.

Используя данную методику оценки качества мягкой мебели по органолептическим показателям, производители мебели смогут при разработке новых образцов оценить их уровень качества и принять дальнейшее решение о производстве данных моделей. Таким образом, анализ и оценку качества изделий органолептическим методом можно провести не только на стадии реализации, но и на стадии проектирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров М. В., Задесенец Е. Е. Оценка качества промышленных товаров. Москва: Экономика, 1977. 110с.
2. Методические указания по оценке технического уровня и качества промышленной продукции: РД 50 –149 – 79. М.: Изд-во стандартов, 1979. 119 с.
3. Евланов Л. Г., Кутузов В. А. Экспертные оценки в управлении. Москва: Экономика, 1978. 133с.
4. Оценка уровня качества продукции. Оценка уровня качества продукции экспертным методом // Интернет-портал. URL: [https://de.ifmo.ru/bk\\_netra/page.php?dir=3&tutindex=18&index=5&layer=4](https://de.ifmo.ru/bk_netra/page.php?dir=3&tutindex=18&index=5&layer=4) (дата обращения: 12.01.2023).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПРУЖИННЫХ МАТРАСОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ СОСТАВА

На протяжении всей истории существования человечество постоянно стремится к повышению уровня комфорта своего быта. Не исключением является и спальное место. Современные технологии и новые материалы позволяют производить совершенно новые изделия, позволяющие обеспечить максимальное удобство во время сна. С этой целью в данной работе было принято решение определить механические свойства (усадку и неравномерность усадки) пружинных матрасов разных составов.

Матрас – съёмный элемент кровати или дивана, обеспечивающий мягкое место для лежания и сидения. В состав матраса входит: основа (обеспечивающая ортопедический эффект); наполнитель (прослойка материалов, защищающая тело человека от прямого воздействия пружин); изолятор (слой наполнителя, предохраняющий пружинный блок от воздействия); чехол (увеличивает комфорт и защищает тело человека от соприкосновения с наполнителем) [1].

С целью исследования эксплуатационных свойств матрасов на соответствие требованиям технического регламента Таможенного союза «О безопасности мебельной продукции» (ТР ТС 025 - 2012) [2] в испытательной лаборатории ПКТБМ ОАО «Минскпроектмебель» были произведены испытания на долговечность трех образцов пружинных мягких элементов. Испытания пружинных матрасов проводились согласно ГОСТ 14314-94. «Мебель для сидения и лежания. Метод испытания мягких элементов на долговечность» [3].

Характеристика образцов пружинных матрасов:

Образец № 1. Матрас пружинный, размером (800×1900×200 мм) мм, двусторонней мягкости, состоит из блока независимых пружин и настилов с двух сторон. Настилы выполнены из эластичного пенополиуретана толщиной 30 мм и войлока. По периметру матраса сформирован блок из пенополиуретана. Чехол матраса выполнен из синтетического жаккарда, стеганого на синтепоне.

Образец № 2. Матрас пружинный двойной, размером (800×1900×240) мм, двусторонней мягкости, сформирован на основе блока независимых пружин и состоит из покровной ткани и настилочных слоев. В качестве настилочных слоев использован спандбонд, ко-

косовая койра толщиной 1 см, пенополиуретан - 2 см. Матрас упакован в чехол из жаккардовой ткани.

Образец №3. Матрас пружинный двойной, размером (800×1900×250) мм, двусторонней мягкости, сформирован на основе блока независимых пружин и состоит из покровной ткани и настилочных слоев. В качестве настилочных слоев использован спандбонд, косовая койра толщиной 1 см, латекс – 3 см. Матрас упакован в чехол из жаккардовой ткани.

Испытания проводились на испытательном стенде, изображенном на рис. 1.



**Рисунок 1 – Испытательный стенд с образцом в лаборатории ПКТБМ  
ОАО «Минскпроектмебель»**

Усадку  $\delta$  в миллиметрах в каждой точке измерения определили по формуле [3]:

$$\delta = H_{\text{нач}} - H_n, \quad (1)$$

где  $H_{\text{нач}}$  – начальная высота мягкого элемента в измеряемой точке, мм;  $H_n$  – высота мягкого элемента в измеряемой точке после 10 тыс. циклов прокатывания, а затем через каждые 2,5 тыс. циклов, мм.

Неравномерность усадки поверхности каждого образца  $\Delta$  в миллиметрах вычисляли по формуле [3]:

$$\Delta = \delta_{\text{max}} - \delta_{\text{min}}, \quad (2)$$

где  $\delta_{\text{max}}$  – максимальная усадка в измеряемых точках, мм;  $\delta_{\text{min}}$  – минимальная усадка в измеряемых точках, мм.

Результаты испытания образцов на механические свойства представ–лены в таблице 1 и 2.

**Таблица 1 – Результаты испытаний пружинных матрасов при усадке**

Количество циклов	Усадка, мм	
	Норма ГОСТ 19917- 2014	факт
29000	30 не более	Образец № 1
		16,9
		Образец № 2
		11,4
		Образец №3
		8,4

**Таблица 2 – Результаты испытаний пружинных матрасов при определении неравномерности усадки**

Количество циклов	Усадка, мм	
	Норма ГОСТ 19917- 2014	факт
29000	15 не более	Образец № 1
		12,9
		Образец № 2
		8,4
		Образец № 3
		6,4

По итогам испытаний можно сказать, что самая большая усадка у образца № 1, в составе которого использован эластичный пенополиуретан толщиной 30 мм, а самая малая усадка – у образца № 3, в составе которого использованы «кокосовая койра» толщиной 1 мм и латекс –30 мм. Самая малая неравномерность усадки также у образца № 3, следовательно, именно он и обладает лучшими эксплуатационными свойствами, по сравнению с другими представленными образцами. Результаты испытаний действительны только для проверенных образцов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Из чего сделаны матрасы // Pelenashka. URL: <https://www.pelenashka.com.ua/news/sostav-matrasov> / (дата обращения: 20.11.2022).
2. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности мебельной продукции»: ТР ТС 025 – 2012.
3. Мебель для сидения и лежания. Метод испытания мягких элементов на долговечность: ГОСТ 14314 – 94. М.: Изд-во стандартов, 1995. 7 с.

С.А. Гриневич, доц., канд. техн. наук;  
А.А. Гришкевич, зав. кафедрой, канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ КОГТЕВЫХ ЗАВЕС СОВРЕМЕННЫХ КРУГЛОПИЛЬНЫХ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ СТАНКОВ**

Завесы из предохранительных упоров являются критически важным элементом безопасности деревообрабатывающих круглопильных станков. Это связано с кинематикой процесса резания, так как направление вращения пилы направлено против направления подачи материала, что при неблагоприятном стечении обстоятельств может привести к обратному выбросу заготовки или ее элементов. Основные нормативные акты, действующие на территории Республики Беларусь, в области безопасности деревообрабатывающего круглопильного оборудования, это ГОСТ 12.2.026.0-93 «Оборудование деревообрабатывающее. Требования безопасности к конструкции» [1] и СТБ ЕН 1870-4-2006 «Безопасность деревообрабатывающих станков. Станки круглопильные. Часть 4. Станки многополотные для продольной резки с ручной загрузкой и/или выгрузкой» [2]. При этом ГОСТ 12.2.026.0-93, касательно требований к когтевым завесам, конкретизирует только угол заклинивания, в то время как СТБ ЕН 1870-4-2006, помимо угла заклинивания, устанавливает требования к параметрам предохранительных упоров (когтей завесы), а также материалу и диаметру осей завес. В остальном конструкция когтевой завесы определяется инженерными решениями организации-изготовителя. Это предопределяет разнообразие конструктивных решений данного узла оборудования.

Так в конструкции современных круглопильных станков для продольной распиловки можно выделить следующие типовые конструкторские решения для узла когтевой завесы:

- а) По типу осей:
  - регулируемые;
  - нерегулируемые.

Завесы из предохранительных упоров на нерегулируемых осях на сегодняшний день самые распространённые. Их исполнение также может быть различным. В большинстве моделей круглопильных станков оси завес смонтированы непосредственно в корпусе станка. В ряде современных конструкций станков оси завес смонтированы в рычажных системах, благодаря чему обеспечивается подъем завес при обратном выводе материала. Например, на рисунке 1 представлена си-

стема предохранительных упоров круглопильного станка TD500-КВА линии Walter.

Системы завес предохранительных упоров с регулируемыми осями встречаются редко. В этих станках предохранительные упоры на осях, поднимаются вместе с суппортом и прижимными вальцами.

б) По способу ограничения упоров от обратного проворота:

- с ограничительными осями;
- с большой длиной упоров.

В подавляющем количестве моделей как отечественных, так и зарубежных круглопильных станков применяется первый способ. На том же рисунке 1 рычажной системы предохранительных упоров круглопильного станка TD500-КВА линии Walter можно видеть ограничительные оси.



**Рисунок 1 – Рычажная система подъема завес предохранительных упоров**

В некоторых станках возможность проворота упоров исключается благодаря тому, что длина самих упоров делается большей, чем расстояние от оси завесы до поверхности базирующего устройства, как, например, это сделано в станке ДСК-55 (рис. 2).

в) По количеству рядов завес.

По количеству рядов завес предохранительных упоров в круглопильных станках встречаются модели с одним, двумя и даже тремя рядами. Так, например, на рис. 3 представлена станок DS-55-1R с тремя рядами предохранительных упоров.

Конструкции с одним рядом завес из предохранительных упоров противоречат требованиям ГОСТ 12.2.026.0-93 «Оборудование деревообрабатывающее. Требования безопасности к конструкции».





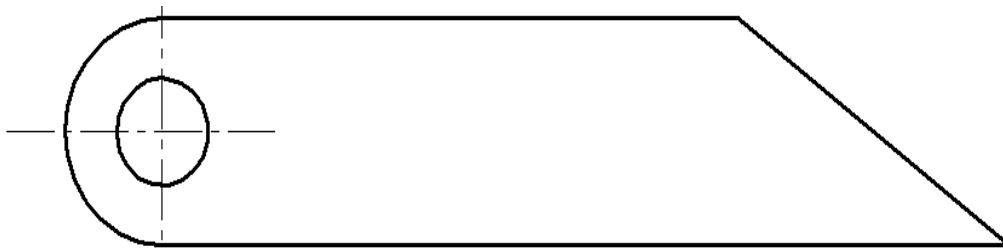
**Рисунок 2 – Когтевая завеса станка ДСК-55**



**Рисунок 3 – Станок DS-55-1R с тремя рядами завес**

г) По профилю предохранительных упоров.

По профилю упоров можно выделить упоры с одним зубом и многозубые. Причем в ряде современных станков вместо «классического» профиля (рис. 4) однозубых упоров применяется другой, несколько видоизмененный утяжеленный профиль (рис. 5).



**Рисунок 4 – «Классический» однозубый профиль**



**Рисунок 5 – Утяжеленный однозубый профиль**

Согласно [3] дополнительная масса такого предохранительного упора положительно сказывается на работоспособности когтевой завесы.

Следует также отдельно выделить оборудование с когтевыми завесами, имеющими разную длину упоров (рисунок 6).



**Рисунок 6 – Когтевая завеса станка SDH D 400**

Использование завес с упорами разной длины не предусмотрено ГОСТ 12.2.026.0-93 и СТБ EN 1870-4-2006.

Таким образом конструктивные решения узла когтевой завесы в современных круглопильных деревообрабатывающих станках весьма разнообразны, а некоторые из них не соответствуют требованиям нормативных актов Республики Беларусь, что необходимо учитывать при приобретении и эксплуатации столь травмоопасного оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оборудование деревообрабатывающее. Требования безопасности к конструкции: ГОСТ 12.2.026.0-93. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 1996. – 46 с.

2. СТБ EN 1870-4-2006. Безопасность деревообрабатывающих станков. Станки круглопильные. Часть 4. Станки многопалочные для продольной резки с ручной загрузкой и/или выгрузкой. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2007. – 36 с.

3. Гриневич С. А., Гришкевич А. А., Волкович Д. С. К вопросу об обеспечении безопасности при эксплуатации круглопильного оборудования // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2020. № 2. С. 325–329.

А.И. Дмитренко, доц, канд. техн. наук  
(ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ);

С.С. Никулин, проф., д-р техн. наук  
(ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, РФ);

Н.С. Никулина, ст. преп., канд. техн. наук  
(ФГБУ ДПО «Воронежский институт повышения квалификации сотрудников ГПС МЧС России», г. Воронеж, РФ);

Е.В. Томина, зав. кафедрой, доктор хим. наук  
(ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, РФ)

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОЛИГОМЕРОВ НА ОСНОВЕ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛИБУТАДИЕНА ДЛЯ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ**

В настоящее время большое внимание уделяется воспроизводству, использованию, сохранению и восстановлению лесов. Практически во всех промышленных отраслях и в быту широко применяется натуральная древесина и изделия на её основе. Однако древесина имеет и целый ряд недостатков: изменчивость свойств, анизотропия, наличие пороков, способность поглощать влагу из окружающей среды, приводящая к увеличению размеров, формы, веса и снижению прочности. Модификация натуральной древесины различными веществами органического и неорганического происхождения и их составами направлена на преодоление этих недостатков [1-3]. Для улучшения ряда показателей древесины в работах [4-7] представлена возможность применения низкомолекулярных сополимеров на основе побочных продуктов нефтехимии. При этом показано, что наилучшими показателями обладают образцы модифицированной древесины, содержащие стирол.

Целью данной работы является изучение влияния технологических показателей пропитки древесины олигомерами на основе побочных продуктов производства полибутадиена с использованием теории планирования эксперимента, изучение влияния этих параметров на свойства модифицированной древесины.

В качестве объектов исследования были выбраны образцы древесины березы обычной, заготовленные в опытном учебном лесничестве ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова». Для пропитки готовили образцы

древесины размером 20 x 20 мм в радиальном и тангенциальном направлениях, высотой вдоль волокон 10 мм.

В качестве пропиточного состава для получения модифицированной древесины использовался низкомолекулярный сополимер, полученный на основе побочных продуктов производства полибутадиена с содержанием стирола 10 и 90 %. Синтез низкомолекулярного сополимера, содержащего стирол, проводили на алюмосиликатном катализаторе при температуре 160-165<sup>0</sup>С по методике, описанной в [8]. Выход низкомолекулярного сополимера составлял не менее 99 %. Молекулярная масса синтезированных продуктов составляла 1100-1300 (при содержании стирола в мономерной смеси 10 %) и 1700-2000 (при содержании стирола в мономерной смеси 90 %). Для пропитки использовали толуольный раствор низкомолекулярного сополимера с концентрацией 50-70 % и содержанием сиккатива НФ-1 4-5 % на олигомер.

Образцы древесины березы погружали в пропиточный состав нагретый до заданной температуры (60 и 120 <sup>0</sup>С) и выдерживали в течение 8 часов. Образцы натуральной древесины подвергали дегазации (удаление толуола и других низкокипящих продуктов) при температуре 90-100 <sup>0</sup>С. После чего проводили термообработку при температурах 100 и 160 <sup>0</sup>С в течение 5 часов.

Оценку пропиточного состава проводили по следующим физическим показателям: содержание пропиточного состава в древесине (ГОСТ 20022.6-93), водопоглощение за одни и тридцать суток нахождения в воде (ГОСТ 16483.20-72), разбухание в тангенциальном и радиальном направлениях (ГОСТ 16483.35-88).

Изучение свойств древесины березы, модифицированной олигомером на основе побочного продукта производства полибутадиена, проведено с использованием полного факторного эксперимента типа 2<sup>n</sup> [9]. В зависимости от трех факторов исследованы следующие свойства композиционного материала:

- способность к водопоглощению  $y^1$ , %;
- разбухание в тангенциальном направлении (по отношению к направлению волокон древесины)  $y^2$ , %;
- разбухание в радиальном направлении (по отношению к направлению волокон древесины)  $y^3$ , %.

Первый фактор (V1) определяет содержание стирола в олигомере, значение которого может варьироваться от 10 до 90 % мас. Второй фактор (V2) связан со значением температуры пропитки, которая может изменяться от 60 до 120 <sup>0</sup>С. Третий фактор (V3) введен для температуры термообработки в диапазоне 100-160 <sup>0</sup>С.

Для исследования каждого свойства модифицированной древесины использован план эксперимента с варьированием факторов в двух уровнях – минимальном и максимальном. Верхний и нижний уровни каждого фактора кодированы на отрезок [-1, +1]. Выполнено 8 опытов (N=23), которые включают все возможные комбинации этих уровней. Для каждого опыта выполнено по 4 повторения (n=4). Измерения проводились по истечению первых и тридцатых суток после получения модифицированной древесины. В таблице приведены значения функций отклика.

**Таблица – Значения функций отклика**

Значения фактора			1 сутки			30 суток		
V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	y'	y''	y'''	y'	y''	y'''
10	60	100	23,4	7,2	5,0	75,3	11,8	9,0
90	60	100	20,5	6,7	4,4	66,3	9,7	7,4
10	120	100	17,3	4,9	4,1	71,6	10,1	8,3
90	120	100	16,1	5,2	4,2	63,7	8,8	6,9
10	60	160	19,9	6,0	4,6	72,9	10,6	8,5
90	60	160	18,0	5,8	4,4	64,2	9,1	7,2
10	120	160	15,7	4,8	3,6	70,0	9,4	7,8
90	120	160	13,9	4,2	2,9	62,9	8,3	5,6

Получены уравнения регрессии, описывающие влияние основных параметров процесса пропитки олигомерным материалом на свойства модифицированной древесины. Определены технологические условия, обеспечивающие максимальную влагостойкость материала. Показано, что для наиболее существенного снижения водопоглощения и разбухания получаемой модифицированной древесины операции пропитки и термообработки необходимо проводить при максимальных для исследованных диапазонов значений температуры (120<sup>0</sup>С и 160<sup>0</sup>С соответственно). При этом содержание стирола должно составлять ~90 % мас.

Таким образом, разработанные составы для обработки натуральной древесины на основе олигомеров полибутадиена для натуральной древесины, которые позволяют существенно улучшить влаго- и водостойкость натуральной древесины, а также понизить её разбухание в радиальном и тангенциальном направлениях. Предлагаемый пропиточный состав улучшает декоративные свойства древесины, не имеет запаха, обладает низкой токсичностью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пилюшина Г.А., Пыриков П.Г., Памфилов Е.А., Данилюк А.Я., Капустин В.В. Модифицирование древесины для создания

подшипников скольжения лесопромышленных машин // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 5. С. 155–165.

2. Шамаев В.А., Никулина Н.С., Медведев И.Н. Модифицирование древесины. М.: Флинта, Наука, 2013. 448 с.

3. Шамаев В.А. Исследование модифицированной древесины методом электронной микроскопии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 190–199.

4. Глазков С.С., Снычева Е.В., Мурзин В.С. Олифа для деревообработки на основе кубовых остатков нефтехимии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2005. № 5. С. 102 - 107.

5. Никулин С.С., Дмитренко А.И., Бутенко Т.Р. Сополимеры на основе кубовых остатков ректификации стирола в производстве древесноволокнистых плит // Изв. вузов. Лесн. журн. 1996. № 3. С. 82 - 86.

6. Никулин С.С., Филимонова О.Н., Никулина Н.С., Цуриков А.И. Повышение формостабильности низкомолекулярными сополимерами из отходов нефтехимии // Химическая промышленность. 2005. Т. 82. № 11. С. 544 - 550.

7. Соколов Л.И. Переработка и использование нефтесодержащих отходов. М.: Инфра-Инженерия, 2017. 128 с.

8. Никулин С.С., Филимонова О.Н., Никулина Н.С., Болдырев В.С. Применение низкомолекулярных сополимеров на основе побочных продуктов производства полибутадиена с низким содержанием стирола как модификаторов древесноволокнистых плит // Химическая промышленность сегодня. 2005. № 4. С. 15-17.

9. Shishlov O. F., Baulina N. S, Glukhikh V. V., El'tsov O. S., Shafran Yu. M., Buryndin V. G., Stoyanov O. V. Synthesis of cardanol-containing resols for producing phenolic films: protective coatings for wood composites // Polymer Science, 2021, Series D, vol. 14, pp. 328–334.

УДК 684.4:502.174.2

Л.Ю. Дубовская, проф., канд. тех. наук (БГАИ, г. Минск);  
Л.В. Игнатович, доц., канд. техн. наук;  
Е.И. Гордиевич, ассист. (БГТУ, г. Минск)

## **ЭКОЛОГИЯ БУДУЩЕГО – СИНТЕЗ ПРИРОДЫ И ПРОИЗВОДСТВА МЕБЕЛИ**

Дизайн мебели – это важный нюанс в создании модной, современной и качественной мебели, желательной из экологически чистого материала. Другими словами, дизайн – это творческая деятельность проектировщика (дизайнера), который при необходимости использует данные науки с целью придания эстетических качеств и оптимизации их взаимодействия с человеком и обществом. При правильном подходе можно сделать привычные вещи красивей, удобней и функциональней.

Если задуматься, из чего же будут изготавливать мебель в ближайшем будущем, то однозначный ответ дать сложно. Сейчас самые популярные материалы для производства мебели – пластик и древесина. Кто-то считает, что будущее – за мебелью и другими изделиями от 3D-принтера. Эти производства часто сопряжены с вредом окружающей среде: вырубка деревьев, токсичность пластиковых и пластмассовых предметов. Однако уже сейчас многие специалисты считают, что ДСП, МДФ или пластик скоро не будут широко востребованы. Их заменят новые технологии, которые уже внедряются в мебельную промышленность и позволяют создавать прочную и долговечную мебель практически любой формы и любых размеров [1]. Этапами жизненного цикла мебели, влияющими на окружающую среду, являются закупка сырья, изготовление мебели, продажа, использование, утилизация и ликвидация отходов по окончании службы мебели. Каждый этап жизненного цикла определённым образом важен с точки зрения окружающей среды.

Биоинженеры разных стран разработали технологию и нашли замену неэкологичным материалам, губительно действующим на окружающую среду. В результате чего появляются экологически чистые материалы, которые не наносят вреда не только человеку, но и окружающей природе. Основная задача таких технологий – получение натуральных и биоразлагаемых материалов, которые можно использовать в производстве мебели. Для создания биомебели не используется формальдегид или другие токсичные смолы, в ее основе – мицелий [2].

В любом месте мира, где растут хвойные деревья можно встре-

тить *Ganoderma Lucidum*. Это род грибов, которые знакомы всем, кто бывал в лесу - твердые, похожие на копыта наросты на стволах деревьев. Мицелий - это та часть гриба, которая постоянно растёт, занимая всё доступное пространство. Именно он и является тем организмом, который позволит получить биомебель [3].

Технология изготовления биомебели состоит из двух основных этапов: первый этап – проектирование полой формы (молда), представляющей контур будущего изделия. Полуую форму – молд, можно изготавливать из полимерной глины, пластика, дерева, гипса, силикона [4].

Второй этап – молд заполняют питательной средой. Это может быть смесь из соломы, сена, опилок, любые другие сельскохозяйственные отходы. Главное, чтобы в них содержались целлюлоза или лигнин, которыми и питается гриб. Такая смесь носит название *Mucoform*. На нее и помещают грибницу *Ganoderma Lucidum*, которая, разрастаясь, заполняет все пространство и принимает заранее заданную форму [5-6].

После, заготовку извлекают из формы и выдерживают при повышенной температуре, чтобы остановить рост мицелия. Затем просушивают, шлифуют и полируют. При этом грибница становится плотной, а сельскохозяйственные отходы превращаются в достаточно прочный биополимер. Форму, внутри которой рос гриб, можно использовать неоднократно.

В зависимости от вида используемых грибов, можно получать материал с различными свойствами – твердый или крошащийся, эластичный или пористый. На ощупь готовый продукт мягкий и похож на натуральную кожу. Таким способом можно выращивать необычные абажуры, кресла, табуретки и другие предметы.



**Рисунок 1 – Пример изделий из мицелия *Ganoderma Lucidum***

Есть мнение, что органический полимер, благодаря прочности, также можно использовать для установки межкомнатных стен или изоляционных систем



В результате изучения источников мы пришли к выводу, что основные преимущества таких изделий – высокая экологичность и достаточно низкая себестоимость производства: процесс не нуждается в больших затратах энергии, нет потребности ни в свете, ни в высокой температуре, потребности в энергозатратах минимальны [7].

Не требуются и большие площади – весь процесс происходит достаточно быстро. В зависимости от габаритов каждое изделие «вырастает» в среднем за 3-6 недель. Само заполнение молда – Musoform является на 100% биоразлагаемым материалом. Такую мебель достаточно вынести на улицу, где она в течение нескольких недель полностью разлагается, превращаясь в компост.

Таким образом, биодизайн позволит создавать мебель и другие изделия, без вреда окружающей среде, применение подобных технологий позволит учитывать не только интересы человека, но и экосистемы в целом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грибная мебель // Мебельный бизнес. URL: <https://fdforp.com/furniture/relax/gribnaja-mebel> (дата обращения: 18.01.2022).

2. В США создают «живую» мебель из мицелия грибов // Великая эпоха URL: <https://www.epochtimes.com.ua/ru/novosti/v-ssha-sozdayut-zhivuyu-mebel-iz-miceliya-gribov-123632> (дата обращения: 18.01.2022).

3. Следуй за мицелием: как вырастить из грибов одежду, мебель и дом // Strelka Mag. URL: <https://strelkamag.com/ru/article/sledui-za-miceliem-kak-vyrastit-iz-gribov-odezhdu-mebel-i-dom> (дата обращения: 18.01.2022).

4. Мебель из грибов // techno.pro. URL: <https://techno.pro/action/items/mebel-iz-gribov.html> (дата обращения: 18.01.2020).

5. Wasser S., Weis A. Medicinal Mushrooms. Reishi Mushroom (*Ganoderma lucidum* (Curtis: Fr.) P. Karst). –Haifa, 1997.–39 p.

6. Kirk, P.M., Cannon, P.F., Minter, D.W. and Stalpers, J.A. Dictionary of the Fungi.–10th Edition, Wallingford, 2008.–784 p.

7. Дизайнеры выращивают мебель из грибов // UzReport. Информационное агенство. URL: <https://www.uzreport.news/technology/dizayneri-virashivayut-mebel-iz-gribov> (дата обращения: 18.01.2022).

О.К. Леонович, доц., канд. тех. наук;  
С.А. Дупанов, асп. (БГТУ, г. Минск)

## **КЛАССИФИКАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАТУРАЛЬНОГО МОРЕНОГО ДУБА**

На данный момент в мире известны лишь частичные максимально обобщенные сведения о мореном дубе, которые невозможно использовать для создания информационной базы о свойствах, основных видовых и возрастных отличиях мореного дуба.

Известны попытки классификации археологической древесины, используемой в строениях и сооружениях древности в основу которых положен степень деградации древесины в зависимости от ее физико-механических показателей. Установлены четыре степени деградации в зависимости от которых принимаются соответствующие методы восстановления и защиты археологических изделий из этой древесины [1]. Однако при рассмотрении классификации натурального мореного дуба ситуация значительно сложнее. В процессе морения натуральный мореный дуб находится в условиях без доступа кислорода, а также весь период накапливает соли металлов из воды или почвы. Этот период морения иногда длится тысячелетиями, что подтверждается радиоуглеродным анализом, фиксирующим накопления  $C^{14}$  во времени. Причем прочность натурального мореного дуба во многих случаях возрастает. Таким образом требуется совершенно другой подход для определения качественных характеристик натурального мореного дуба в сравнении с древесиной других пород и археологической древесины, эксплуатируемой в строениях и сооружениях имеющими прямой контакт с влажностью в различные временные периоды года.

Если провести параллель с древесиной обычного (не мореного) дуба, то можно сделать следующий вывод. Разновидность дуба насчитывает около 600 видов. В странах СНГ распространено около двадцати видов дуба. Каждый из известных видов дуба имеет различные структурные изменения в процессе морения что влечет за собой изменение качественно-технических характеристик материала мореного дуба. Этот факт осложняется возрастной дифференциации древесины мореного дуба, на одной территориальной местности где разведаны залежи мореного дуба могут находиться стволы, части стволов, мореного дуба возрастом от 300 до 8110 лет (максимальный возраст мореного дуба, найденный на территории Беларуси предприятием, специализирующимся на добыче и переработке ГОДО «Транс-Центр»). Воз-

раст мореного дуба напрямую влияет на его будущие качественные характеристики. Также на одной разведанной местности залежи древесины мореного дуба разных возрастных групп могут иметь видовые различия. Так как в промежуток времени в несколько тысяч лет дубовые леса имели видовые изменения в зависимости от климатических условий, изменения минерального состава грунтов и т.д. Еще один факт имеющий ключевое значение в возрастной и видовой дифференциации натурального дуба, это минеральный состав безвоздушной водной среды залегания в которой проходит процесс морения. К примеру, при минимальных изменениях содержания оксида железа в среде залегания ведёт к ускорению либо замедлению соответственно процесса морения древесины дуба. Глубина залегания, место залегание (песок, иловые отложения, глина и т.д.) также имеет свое ключевое значение в процессе морения. Все эти факты о мореном дубе показывают большие видовые и возрастные отличия, для полного понимания древесины мореного дуба и процесса морения необходимо комплексно подходить к его изучению.

Актуальность исследования связана с необходимостью правильной и правомерной оценки ценнейшего природного сырья мореного дуба и разработки оценочных параметров для создания нормативно правового акта регулирующих определение качественных характеристик мореного дуба. Данное исследование соответствует стратегическому направлению развития деревообрабатывающей отрасли по рациональному использованию древесного сырья в производстве мебели и эксклюзивных изделий из ценных пород мореного дуба.

Целью исследования в работе является разработка комплексного метода определения мореного дуба на основе возрастных и видовых отличий.

Для решения данного вопроса поставлены следующие задачи.

Присвоение значения мореного дуба в соответствии с цветом

Произвести анализ среднего аналитического значение концентрации Fe(O) в заданных местах залегания.

Определить зависимости содержания Fe(O) с возрастными группами материала и цветом материала.

Предложить методологию определения качественных характеристик мореного дуба в зависимости от видовых и возрастных показателей мореного дуба.

Стандартизацию требуется начать с ввода начальных параметров исследуемых образцов и поиск следующих ключевых параметров исследования, и установление зависимости.

1. Цвет;
2. Возраст;
3. Структура (Вид)

Цвет мореного дуба: из испытуемых образцов выделены 3 основных цвета: Коричневый, Серый, Черный и 3 дополнительных цвета Коричнево-Серый, Коричнево-Черный, Серо-Черный,

Возраст мореного дуба определяется актом радиоуглеродного анализа.

Для простоты понимания связи возраста мореного дуба и его цвет можно провести следующую аналогию без включения дополнительных факторов влияния.

Взяты образцы мореного дуба похожие по цветовым параметрам со следующих мест: донные отложения реки Днепр, на проточный участок реки Сож в поверхностном слое и в торфяник на территории Гомеля на глубине 3м.

Минимальное и максимальное содержание оксида железа FeO в донных отложениях реки Днепр 0,1–1,9 мг/дм<sup>3</sup>, в поверхностных водах реки Сож 0,05–0,19 мг/дм<sup>3</sup>, и в торфяные отложениях на глубине 3м на территории Гомеля где содержание FeO варьируется от 0,35 до 3,55 мг/дм<sup>3</sup>. (табл. 2) Выберем среднее значение и оценим результат на образцах. Для исследования было отобрано 18 образцов различных цветовых групп с трех условных мест залегания с известным содержанием FeO.

Каждому выбранному цвету присвоим номер (табл. 1).

**Таблица 1 – Присвоение значения мореного дуба в соответствии с цветом**

Цвет мореного дуба	Присвоенное значение
Коричневый	1
Коричнево-серый	2
Коричнево-черный	3
Серый	4
Сер-черный	5
Черный	6

Коричнево-серый = 30% ; Серый = 50%; Черный = 20%

Классификацию решено связать с наличием окиси железа в зависимости от регионов залегания.

Поиск зависимости содержания FeO с возрастными группами материала и цветом материала. Чтобы выявить стандартную зависимость цвета от возраста примем содержание оксида железа FeO = 1 мг/дм<sup>3</sup>. Для простоты понимания и возможного пересчета возраста древесного материала без проведение радиоуглеродного анализа. Точность такого метода визуального определения цвета будет составлять ±500 лет. Для примера возьмем опытное определение возраста мореного дуба в навигационный сезон 2022 года.

**Таблица 2 – Значения средних значений содержания окиси железа  
в зависимости от места залегания**

Место залегания	Содержание Fe(O), мг/дм <sup>3</sup>	Среднее значение содержания Fe(O), мг/дм <sup>3</sup>
Днепр (Донные Отложения)	0,1-1,9	1
Сож (Поверхностные воды)	0,05-0,19	0,12
Торфяник (верхний слой до 3м)	0,35-3,55	1,95

Рассмотрим срез натурального мореного дуба черный цвет визуально занимает периферийный слой примерно 20%, серый цвет является основным 50% и коричнево-серый цвет занимает 30%, содержание оксида железа в месте залегания данного образца FeO=1мг/дм<sup>3</sup>. Древесина ископаемого натурального мореного дуба не покрыта трещинами, ровная и гладкая, в зависимости от условий и среды его нахождения, расчет возрастных и видовых параметров произведем расчет возраста.

Пример расчета

$$Fe\ 0 = 1 \cdot \frac{\text{мг}}{\text{дм}^3}$$

$$30\% = 1000 \text{ лет}$$

$$50\% = 2000 \text{ лет}$$

$$20\% = \frac{3000+4000}{2} \text{ лет}$$

$$\text{Возраст} = (1000 \times 30\%) + (2000 \times 50\%) + (3500 \times 20\%) = 2000 \text{ лет}$$

Итого возраст равен 2000 лет

Впервые предложен комплексный метод определения мореного дуба на основе возрастных и видовых отличий с учетом цвета, концентрации соединений, содержащих железа в взаимосвязи с местоположением, возрастными группами и их цветом.

Разработан методический подход к разработке нормативно-правовой документации по определению качественных характеристик мореного дуба в зависимости от видовых и возрастных показателей.

Результаты полученных исследований могут быть использованы при разработке стандартов о мореном дубе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Леонович О. К., Федосенко И. Г. Оценка характеристик и состояния древесины в конструкциях дома XVIII–XIX веков Лошицкого усадебно-паркового комплекса // Труды БГТУ. Сер. II Лесная и деревообаб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 264–267.

## **ДРЕВЕСНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ШПОНА В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕБЕЛИ**

В связи с изменениями конъюнктуры современного рынка мебельных изделий все более остро ставится вопрос постоянного обновления и расширения ассортимента изделий, соответствующих запросам и возможностям всех слоев населения, а также изделий, которые могли бы успешно конкурировать на мировом рынке.

Для создания удобной, оригинальной и эстетичной мебели приходится прикладывать большие усилия, чтобы постоянно совершенствовать и расширять ассортимент конкурентоспособных изделий, разрабатывать новые дизайнерские линии, внедрять инновационные технологии, оснащать предприятия новым специализированным оборудованием, позволяющим оперативно менять ассортимент изделий с использованием современных экологически чистых материалов. Внедрение подобных технологий и оборудования на мебельных предприятиях Республики Беларусь позволит обеспечить высокий уровень, качества мебели и повысить ее конкурентоспособность.

Несмотря на разнообразие материалов, применяемых в изделиях, появляются их модификации и разновидности, отличающиеся улучшенными эксплуатационными характеристиками. К ним относятся и древесно-композиционные материалы на основе шпона (фанерные изделия: фанера, плоскосклееные детали и гнутоклееные изделия).

В качестве исходного материала для изготовления древесных композиционных материалов и гнутоклееных деталей используется лущеный шпон березы, сосны, ольхи и д. р. Лицевым слоем – может служить строганный шпон из ценных пород древесины, что улучшает дизайн изделия. После обработки слои шпона принимают нужную форму без трещин и заломов. Благодаря соединению деталей путем сращивания габариты элементов не имеют ограничений по размерам.

В настоящее время модной тенденцией стало изготовление изделий мебели из гнутоклееной фанеры. Это слоистый материал из шпона, которому в процессе производства, благодаря эластичности, придают требуемую форму, создавая качественную, практичную мебель оригинальных, нестандартных и сложных по конфигурации форм, необычного дизайна. При конструировании гнутоклееных элементов мебели необходимо знать, какую предельную кривизну можно придавать отдельным слоям шпона, не вызывая разрушения или появления заметных трещин.

Ассортимент изделий из гнutoкклееных деталей из фанеры разнообразен. Это детали для корпусной, мягкой, детской мебели, предметы декора, малые архитектурные формы, полуфабрикаты для изделий различного функционального назначения.

Мебель из гнutoкклееной фанеры – это эксклюзивные, изящные модели, характеризующиеся легкостью, комфортностью и оригинальным дизайном. Эффективность производства такой мебели выражается в минимальной материалоемкости, ведущей к снижению затрат на одну единицу продукции. Требования к такой мебели более жесткие – повышенная стойкость к ударным нагрузкам и наличие торсионной жесткости. Особенно повышены требования к детской мебели – соблюдение основных пропорций изделия пропорциям тела ребенка, его росту, и легкость в перемещении и трансформации, экологическая чистота, травмобезопасность – отсутствие острых углов.

На рис. 1 показан пример мебели – трансформер из плоскостеенных композиционных материалов на основе шпона и из гнutoкклееных деталей для детей школьного возраста.

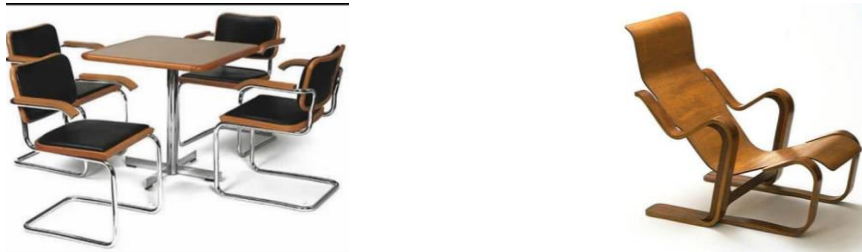


1– стол-кровать из композиционных материалов;  
2– школьный стул из гнutoкклееных деталей

### Рисунок 1 – Изделия детской мебели

На рис. 1 (1) показана дизайн-концепция стола-кроватьи трансформера, состоящая в создании эргономичной, модульной мебели, объединяющей место для сна и рабочий стол, что позволяет экономить пространство. Возможный вариант конструкции кресла для работы и отдыха показан на рис. 1 (2). Модель кресла из гнutoкклееной фанеры, использующееся не только для работы, но и отдыхать, переводя кресло в режим отдыха одним лишь изменением положения тела без особых регулировок [1].

На рис. 2 представлены примеры гнutoкклееных изделий, имеющих оригинальное конструктивное решение, дизайнером которых является Марсель Брейер.



**Рисунок 2 – Пример гнутоклееных кресел**

Разработанные Брейером изделия с использованием алюминия и древесины не теряют своей актуальности. Во всех своих разработках он гармонично объединял функциональность с отточенной пластикой [2]. На рис. 3 представлено кресло Taliesin 1 от Фрэнка Ллойда Райта



**Рисунок 3 – Кресло Taliesin 1**

Винтажное кресло Taliesin 1 изготовлено из фанеры, облицованной строганым шпоном, и имеет угловые компоненты и сложную геометрическую структуру, которая обеспечивает его устойчивость и создает оригинальную форму, напоминая японскую технику складывания бумаги «деревянное оригами» [3].

Таким образом, можно сказать, что производство изделий из композиционных материалов и гнутоклееных деталей это практичное решение для удобной, качественной мебели, с оригинальностью конструкций и плавностью форм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Детская мебель [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.best-mdf.ru/PLITY/detskaya-mebel-iz-gnutoy-faneri.htm> Дата доступа: 08.01.2023.
2. Гнутоклееные изделия от Марсель Брейери. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://midcenturymodernhub.com/marcel-breuer/> Дата доступа: 08.01.2023.
3. Кресло от Фрэнка Ллойда Райта [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://probauhaus.ru/taliesin-1/> Дата доступа: 08.01.2023.



Л.В. Игнатович, канд. тех. наук, доц.;  
Е.И. Гордиевич, ассист. (БГТУ, г. Минск);  
Л.Г. Билаш, маг. тех. наук, преп. (ГППК, г. Гомель)

## **СТИЛЬ «РЕТРО-МЕБЕЛЬ» В СОВРЕМЕННОМ ИНТЕРЬЕРЕ: ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ОСОБЕННОСТИ ДИЗАЙНА**

Стилевая форма мебели тесно связана с архитектурой своего времени и, как правило, следует за ней. С течением времени, под влиянием различных исторических факторов, форма и конструкция мебели неоднократно менялись. Можно отметить, что с развитием материалов и технологии на основные закономерности формообразования в мебели, эволюцию форм оказывали большое влияние изменения в эстетических представлениях и взглядах при оформлении интерьера жилых помещений. Главное, чтобы мебель отображала особенности обстановки эпохи. Она в любом случае будет обладать своей особой «историей» [1, 2].

Ретро-стиль – одно из интересных решений в оформлении интерьеров помещений. Это сложный и разнообразный стиль.

В настоящее время популярен стиль, который называют «новое ретро». К нему можно отнести и временной промежуток – период 50-70-х годов. Дизайн в стиле ретро может быть весьма разнообразным. Интерьеры 50-х – 70-х годов имеют определенные различия и являются своеобразными субнаправлениями ретро-стилистики.

Интерьер, где присутствует несколько винтажных (ретро) изделий мебели, особенность которых подчеркивается цветовыми нюансами отделки жилых помещений, может выглядеть актуально, современно и выразительно.

Направление «Ретро стиль» был востребован всегда, но особую популярность, нашел в последние несколько десятилетий. Основной особенностью стиля ретро можно считать сочетание предметов, которые, сначала кажется, абсолютно не сочетаются, но при грамотном подходе можно создать функциональный и стильный интерьер [2]. Отличительной чертой изделий в стиле ретро – тонкие высокие ножки. На ножках стояло все: тумбы, комоды, буфеты и секретеры. Своеобразие, предметов ретро-мебели – в их необычной форме. К примеру, кресло может быть в форме распустившегося бутона цветка, диваны – в стиле ретро в первую очередь должны быть удобными и мягкими, обитыми кожей или тканью с замысловатым орнаментом, высокие оригинальны спинки и мягкие сиденья у стульев, резные или декорированные элементами инкрустаций фасады шкафов. Актуальность

прошлых лет не теряет верхние строки рейтинга дизайнов несколько десятилетий благодаря легкости воплощения и сохранению теплой и комфортной атмосферы.

Ретро стиль каждого десятилетия имеет свои особенности. Ретро стиль 50-х годов отличают яркие цвета и обилие хромированных деталей. Предметы интерьера, стены, полы имеют сплошную закраску, отсутствуют какие-либо узоры. Мебель с довольно плотными сиденьями имеет простые геометрические очертания – так проявлялся послевоенный рационализм.

Одно из направлений данного стиля – стиль «Mid-century modern», который отличается подчеркнутой функциональностью, четкими линиями и максимально удобными изделиями. Большое значение имеют цвета мебели – яркие, глубокие, часто натуральные. Мебель, созданная под маркой стиля «Mid-century modern» – модерна середины века, вошла в золотую классику дизайна. Большое преимущество стиля в том, что с его помощью можно создавать как образ ретро, так и современный.

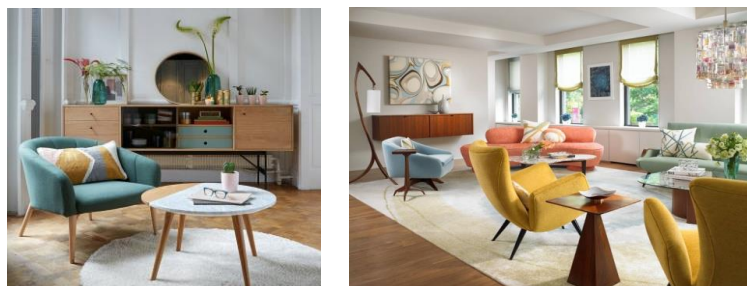
Ретро стиль 60-х годов не так рационален, как 50-х. Мебель, однако, остается такой же. Но в обивке появляются цветочные орнаменты. Ярких цветовых сочетаний становится больше. Появляется все больше затейливых дизайнерских предметов, например, мебель необычных, обтекаемых форм, на тонких ножках.

Ретро стиль 70-х годов это смена сочных оттенков на пастельные, природные тона. На стиль повлияла субкультура хиппи, музыкальное направление Disco, панк-рок, появление цветного телевидения, первых E-mail, флоппи-дисков. Основное направление дизайна мебели этого периода – переход от стандартизации к персонализации интерьера.

Одна из разновидностей дизайна семидесятых – стиль хай-тек, появившийся в Англии в это же время. Основой этого направления стал промышленный дизайн с характерными для него прямыми линиями, обилием стеклянных, металлических, пластиковых элементов, высокой функциональностью и технологичностью. Конструкция и дизайн мебели – легкие, правильных форм, с гладкими глянцевыми фасадами [3].

На рисунках 1–3 показаны примеры особенности стилизации под ретро-стиль интерьера современной квартиры.

Таким образом, анализируя стиль «ретро-мебель» в современном интерьере, можно сделать вывод, что ретро эпоха стала промежуточным вариантом, дизайнерской «буферной зоной» между направлениями, кардинально отличающимися друг от друга.



**Рисунок 1 – Дизайн интерьера современной гостиной в стиле ретро 50-х**



**Рисунок 2 – Интерьер современной гостиной в стиле ретро 60-х.**



**Рисунок 3 – Интерьер современной гостиной в стиле ретро 70-х.**

Именно, благодаря этому, переход между контрастами ретро-стиля, в настоящее время, стал мягким, без элементов шоковой терапии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барташевич А. А., Аладова Н. И., Романовский А. М. История интерьера и мебели. Учебн. /под общ. ред. А. А. Барташевича. – Мн.: УП «Технопринт», 2002. –284с
2. Интерьер с винтажными изделиями [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://novate.ru/blogs/200317/40530/> Дата доступа: 08.01.2023.
3. Ретро-мебель в современных квартирах [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.mebelok.com/retro-mebel-v-sovremennuh-kvartirah>. Дата доступа: 08.01.2023.

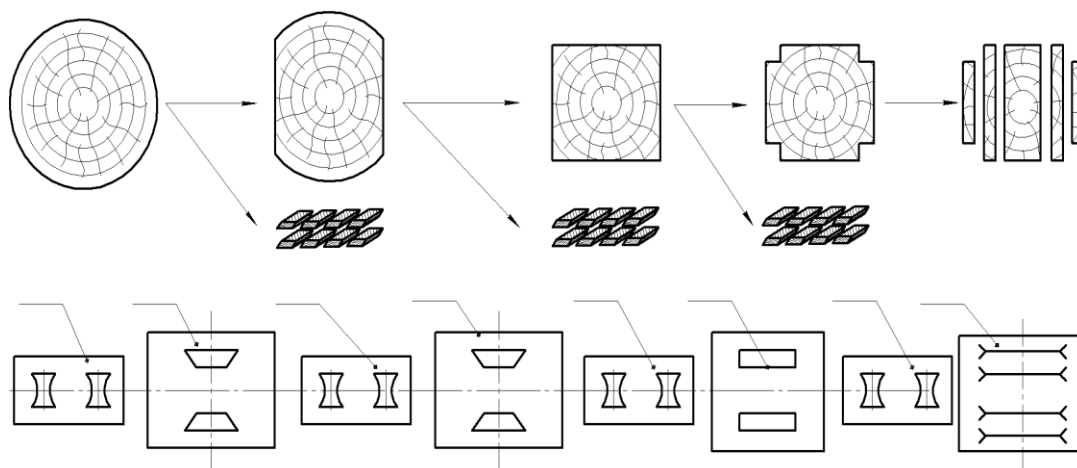
## **ВЛИЯНИЕ ПОТЕРИ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НОЖЕЙ ДЛЯ АГРЕГАТНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ НА КАЧЕСТВО ТОРЦЕВОГО СРЕЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЩЕПЫ**

Эффективность измельчения круглого древесного сырья зависит от различных факторов, в частности – от износа ножей перерабатывающего оборудования [1]. Износ ножей был определен в ходе долгосрочного исследования, проведенного на лесопильном заводе по переработке древесного сырья ОАО «Борисовский ДОК». Высокое качество древесной щепы приводит к получению целлюлозы высокого и однородного качества, в то время как низкое качество древесной щепы приводит к низкокачественной целлюлозе или даже к дорогостоящим производственным негативным последствиям [2].

На рис. 1. цепной транспортер 1 подает окоренное бревно на фрезерно-брусующий узел первого прохода 2, который служит для получения 2-кантного бруса и технологической щепы. Далее цепной транспортер 3 подает 2-кантный брус во фрезерно-брусующий узел второго прохода 4, служащий для получения 4-кантного бруса и технологической щепы. После этого цепной транспортер 5 перемещает брус в профилирующий агрегат 6, предназначенный для увеличения объемного выхода пиломатериалов из пиловочного сырья. Последняя операция происходит после загрузки цепным транспортером 7 пиломатериала в пильный агрегат 8, результатом переработки которого является обрезная доска.

Положительной особенностью малоножевых фрез (рис. 2) является простота их конструкции и сравнительно низкие затраты на подготовку и эксплуатацию режущего инструмента – ножей (рис. 3).

Для определения динамики (рис. 4) потери режущей способности ножей (сталь 65Х) торцово-конических фрез были проведены экспериментальные исследования на ФБС LINK V25. Методом слепков определялся радиус округления  $\rho$ , мкм, режущей кромки ножа (рис. 5) с момента заточки (при  $\rho_{\min} = \rho_0$ ), далее после каждой рабочей смены (через 8 ч) до последующей переподготовки инструмента (по прошествии 5 смен или 40 ч, соответственно значения  $\rho_1, \dots, \rho_5$ ) [4].



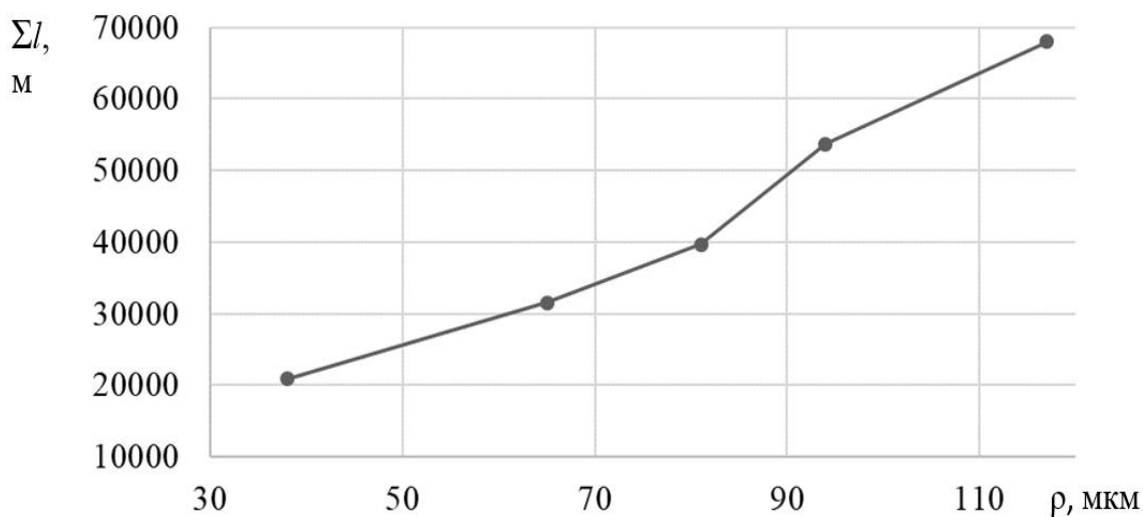
**Рисунок 1 – Технологическая схема получения щепы на фрезерно-брусующей линии LINK V25**



**Рисунок 2 – Малоножевая торцово-коническая фреза фрезерно-брусующего станка**

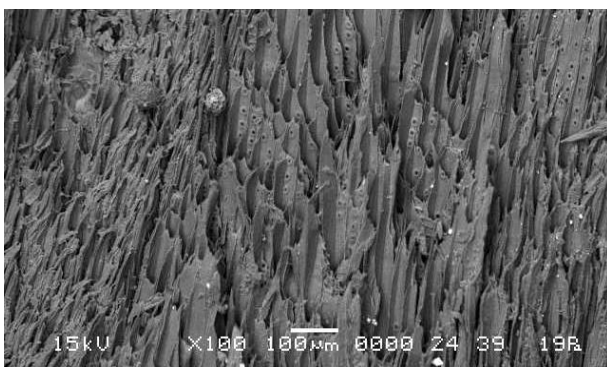


**Рисунок 3 – Режущий инструмент малоножевой торцово-конической фрезы**



**Рисунок 4 – Зависимость радиуса округления режущей кромки  $\rho$ , мкм, от пройденного суммарного пути резания  $\Sigma l$ , м**

Из представленных рисунках 5–9 показано, что радиус округления режущей кромки ножа во многом определяет качество торцевого среза элемента технологической щепы. С увеличением радиуса округления режущей кромки ножа структура среза торца щепы становится более заглаженной (закрыта) и при достижении критического ее значения торцевой срез полностью закрыт.



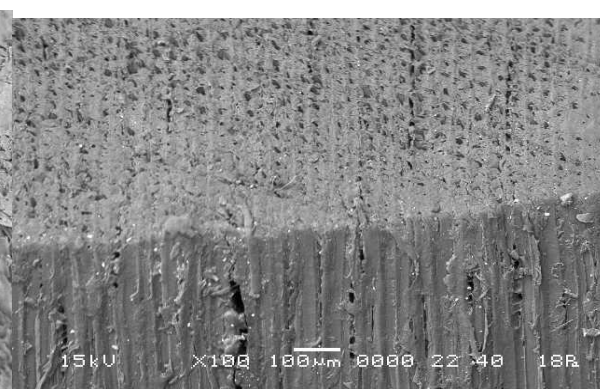
**Рисунок 5 – Срез технологической щепы при  $\rho = 38$  мкм**



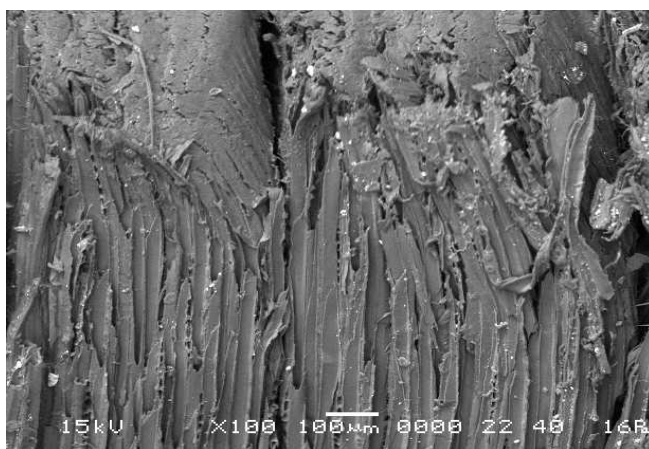
**Рисунок 7 – Срез технологической щепы при  $\rho = 81$  мкм**



**Рисунок 6 – Срез технологической щепы при  $\rho = 65$  мкм**



**Рисунок 8 – Срез технологической щепы при  $\rho = 94$  мкм**



**Рисунок 9 – Срез технологической щепы при  $\rho = 117$  мкм**

Технологическая щепка как полуфабрикат для большинства производств должна соответствовать определенным требованиям, предъявляемым к ней конечным переработчиком. Наиболее существенное влияние на выходные характеристики получаемой продукции, производимой из щепки, оказывают ее качество среза и геометрические размеры. Согласно ГОСТ 15815 [5] торцы щепки должны быть без мятых кромок.

Полученные экспериментальные данные значений радиусов округления позволили графически отобразить динамику износа лезвий ножей фрез малоножевого фрезерно-брусующего оборудования.

Повышение производительности фрезерного инструмента и повышения качества производимой пилопродукции связано с совершенствованием его конструкции, оптимизацией режимов фрезерования, повышением износостойкости ножей и созданием новых современных методов контроля качества.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Раповец В. В., Гриневич С. А., Бурносков Н. В. Конструкция и расчеты фрезерно-брусующих станков. Минск: БГТУ, 2015. 82 с.
2. Кряжев Н. А. Фрезерование древесины. М.: Лесная промышленность, 1979. 200 с.
3. Клепацкий И. К. Эффективные методы повышения технологической стойкости ножей для агрегатной переработки древесины // Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 1(204). С. 190–195.
4. Повышение эксплуатационных свойств дереворежущих ножей комбинированным методом нанесения вакуумных упрочняющих покрытий и магнитно-импульсной обработки / А.В. Алифанов [и др.] // Литье и металлургия. 2014. № 2. С. 95–100.
5. Щепка технологическая. Технические условия: ГОСТ 15815-83. Введ. 01.01.85. М.: Гос. комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1983. 12 с.

## **ВТОРИЧНАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ, ПРОПИТАННОЙ АНТИСЕПТИКАМИ**

В настоящее время древесина является одним из наиболее широко используемых материалов для строительства, дизайна, целлюлозно-бумажной промышленности, а также она используется для изготовления опор линий электропередач, шпалопродукции т. д. Для обеспечения продолжительного срока службы древесины ее пропитывают различными антисептиками, которые обеспечивают ее защиту от поражения грибками и насекомыми, от гниения и растрескивания. Одним из основных способов продления срока службы деревянных изделий является их глубокая пропитка.

Данный способ позволяет продлить эксплуатационный срок древесины от 10 до 20 лет в жестких условиях эксплуатации и до 60 лет при отсутствии прямого контакта древесины с землей и водой. Но по истечению эксплуатационного периода древесины, пропитанной антисептиками, становится вопрос о ее вторичной переработке [1].

В настоящее время способы переработки древесины можно классифицировать на: механические, химико-механические и химические. Но при переработке древесины, пропитанной антисептиками, следует учитывать наличие в ее структуре компонентов пропиточных составов, которые остаются в ней после пропитки.

При химическом и химико-механическом способе переработке токсичные вещества, содержащиеся в пропитанной древесине, могут оказывать негативное воздействие на экологию и здоровье человека. В настоящее время известно большое количество антисептических средств, относящихся к различным классам опасности (от 2-ого до 4-го). В связи с этим при выпоре способа вторичной переработки древесины следует учитывать данные факторы.

В Республике Беларусь большая часть ассортимента глубоко пропитываемой древесины приходится на деревянную шпалопродукцию. Деревянная шпалопродукция пропитывается маслянистыми и водорастворимыми антисептиками в автоклавах методом вакуум-давление-вакуум.

Данный метод обеспечивает 100% пропитку заболони антисептиком, который надежно фиксируется в структуре древесины и остается в ней по истечению эксплуатационного срока службы. После выхода деревянной шпалопродукции из строя она не подлежит повтор-



ному использованию для бытовых нужд. Одним из способов вторичной переработки данной деревянной продукции является ее сжигание. Переработка деревянных шпал методом сжигания является эффективной и экологичной.

Основными параметрами при сжигании твердого топлива являются нормы выбросов твердых частиц, углерода оксида, азота оксидов, серы диоксида в соответствии с ЭкоНиП 17.01.06-001-2017 [2].

**Таблица 1 – Нормы выбросов при сжигании твердых топлив в котлах номинальной мощностью менее 0,1 МВт**

Вид топлива	Норма выброса, мг/м <sup>3</sup>		
	твердых частиц	углерода оксида (CO)	азота оксидов (NO <sub>2</sub> )
Биомасса	100	2000	350

**Таблица 2 – Нормы выбросов при сжигании биомассы для котлов номинальной тепловой мощностью более 0,1 МВт, введенных в эксплуатацию с 1 января 1975 г. до 1 июля 2006 г.**

Теплопроизводительность котельной установки, МВт	Норма выброса, мг/м <sup>3</sup>			
	твердых частиц	углерода оксида (CO)	азота оксидов (NO <sub>2</sub> )	серы диоксида (SO <sub>2</sub> )
От 0,1 до 0,3 включ.	1100	15000	Не нормируется	Не нормируется
« 0,3 « 2 «	400	2000	750	800
« 2 « 25 «	300	1500	600	800
« 25 « 50 «	150	750	500	800
« 50 « 100 «	50	500	500	800

**Таблица 3 – Нормы выбросов при сжигании биомассы для котлов номинальной тепловой мощностью более 0,1 МВт, введенных в эксплуатацию с 1 июля 2006 г. до 31 декабря 2018 г.**

Теплопроизводительность котельной установки, МВт	Норма выброса, мг/м <sup>3</sup>			
	твердых частиц	углерода оксида (CO)	азота оксидов (NO <sub>2</sub> )	серы диоксида (SO <sub>2</sub> )
От 0,1 до 0,3 включ.	600	7500	Не нормируется	Не нормируется
« 0,3 « 2 «	300	1000	500	800
« 2 « 25 «	150	750	500	600
« 25 « 50 «	100	500	400	200
« 50 « 100 «	50	500	400	200

**Таблица 4 – Нормы выбросов при сжигании биомассы для котлов номинальной тепловой мощностью более 0,1 МВт, введенных в эксплуатацию с 1 января 2019 г.**

Теплопроизводительность котельной установки, МВт	Норма выброса, мг/м <sup>3</sup>			
	твердых частиц	углерода оксида (CO)	азота оксидов (NO <sub>2</sub> )	серы диоксида (SO <sub>2</sub> )
От 0,1 до 0,3 включ.	150	1000	не нормируется	не нормируется
« 0,3 « 2 «		750	500	600
« 2 « 25 «	50	500	400	400
« 25 « 50 «	50	500	300	300
« 50 « 100 «	50	400	300	300

В результате планового обслуживания из железнодорожного полотна были изъяты деревянные шпалы, пропитанные средством защитным СМПС и биозащитным раствором на основе антисептика Tanalith E 3475, которые были заложены в путь в 2005 году. После изъятия данные образцы деревянных шпал, вышедших из эксплуатации, были направлены на проведение испытаний по соответствию показателей качества отходящих дымовых газов на соответствии с нормативами экологических норм и правил ЭкоНиП 17.01.06-001-2017 [2]. Сжигание топливных деревянных шпал осуществлялось на котельной установке КВГТ-25 (мощностью 25 кВт). В результате проведения испытаний были получены данные, представленные в таблице 5.

В результате проведенных испытаний нормы выбросов при сжигании деревянных шпал, пропитанных средством защитным СМПС и биозащитным раствором на основе антисептика Tanalith E 3475, не превышают нормативные значения и не значительно отличаются от показателей выбросов при сжигании дров. При вторичной переработке методом сжигания древесина, пропитанная антисептиками и вышедшая из эксплуатации, не попадает в водоемы и почвы, тем самым не загрязняет их.

В результате сжигания вырабатывается тепловая энергия и электрическая энергия, которая в дальнейшем используется для обогрева воды и помещений.

Годовой объем шпал, подлежащих замене, в соответствии с выходом из эксплуатации, составляет более 10000 м<sup>3</sup>/год. Низшая теплота сгорания топливных деревянных шпал, в соответствии с проведенными испытаниями, при влажности 15% и зольности 3,0% составляет 15,69 МДж/кг. В результате при сжигании вышедших из эксплуатации деревянных шпал можно вырабатывать более 70000 ГДж/год.

**Таблица 5 – Показатели выбросов при сжигании топливных  
деревянных шпал на Волковысской дистанции пути**

Источник выделения (цех участок, наименование технологического оборудования)	Режим работы технологического оборудования Параметры, расход топлива, кислород	Наименование определяемого вещества	Концентрация определяемого вещества при нормальных условиях, мг/м <sup>3</sup>
Пункт обогрева бытовых помещений станции Волковыск-Центральный (КВГТ-25)	Режим работы: Номинальный  Топливо: Деревянные шпалы для топливных нужд  О <sub>2</sub> ср = 11,93% О <sub>2</sub> макс = 12,00%	Твердые частицы (недифференцированная по составу пыль / аэрозоль) суммарно	средняя: 48,07 максимальная: 49,49
		Углерод оксид (окись углерода, угарный газ)	средняя: 1951,86 максимальная: 1986,33
		Азот (IV) оксид (азота диоксид)	средняя: 341,93 максимальная: 345,69
		Сера диоксид (ангидрид сернистый, сера (IV) оксид, сернистый газ)	средняя: 17,66 максимальная: 19,82
		Углеводороды предельные алифатического ряда C1-C10 (суммарно)	средняя: 18,21 максимальная: 19,11

Таким образом вторичная переработка древесины является перспективным направлением в деревообрабатывающей отрасли и позволяет не только экономить древесные ресурсы, но и заботиться о экологии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Защита древесины. Параметры защищенности: ГОСТ 20022.0–2016. М.: Стандартинформ, 2017. 59 с.
2. Охрана окружающей среды и природопользование. Требования экологической безопасности: ЭкоНиП 17.01.06-001-2017. М.: Минприроды, 2017. 189 с.

И.К. Божелко, канд. тех. наук, зав. кафедрой;  
А.А. Коновалова, асп., (БГТУ, г. Минск)

## **СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ДЛЯ ОТБЕЛИВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ**

Древесина – природный материал, используемый в производстве различных изделий и конструкций. Несмотря на большое количество достоинств древесина обладает рядом определенных недостатков таких как: подверженность загниванию и поражению насекомыми, невысокая огнестойкость, изменение физико-механических характеристик под воздействием внешних факторов, усушка, разбухание, коробление и растрескивание под действием атмосферных воздействий.

При использовании древесины для производства различных изделий и конструкций очень важен ее внешний вид. Наиболее востребованной и широко используемой в производстве является чистая, непораженная древесина. Грибные споры могут попадать на незащищенную древесину в процессе хранения и во время эксплуатации. Споры легко переносятся людьми, животными и ветром. Древесина мягких пород более подвержена нападкам деревоокрашивающих и дереворазрушающих грибков, чем древесина твердых пород.

Споры деревоокрашивающих и дереворазрушающих грибков проявляются и активно развиваются в следующих условиях:

- температурные перепады (за счет чего случается скопление конденсата на поверхности древесины);
- повышенная влажность;
- осадки;
- отсутствие вентиляции;
- постоянный контакт с водой и землей.

Для устранения поверхностных (плесневых) окрасок и заболонных грибных окрасок древесины широко применяются различные средства для отбеливания древесины [1].

Отбеливатели для древесины могут быть представлены как в виде готового раствора для применения, так и в виде концентрата. В настоящее время на рынке Беларуси представлен огромный ассортимент средств для отбеливания древесины.

Далее рассмотрим средств для отбеливания древесины, наиболее широко применяемые в Беларуси, и проведем их сравнительный анализ. Если рассматривать характеристики данных составов исходя из информации, представленной производителями, то можно сделать вывод, что они обладают одинаковыми отбеливающими свойствами, а

между собой различаются лишь фасовкой, стоимостью и химическим составом.

**Таблица – Средства для отбеливания древесины, применяемые в Республике Беларусь**

Наименование состава	Расход	Период фиксации	Условия обработки
Отбеливатель для дерева Сенеж ЭФФО	не менее 150-200 г/м <sup>2</sup> рабочего раствора	2–3 ч	температура окружающего воздуха и поверхности не ниже +5°С
Отбеливатель для древесины Белмастер Нео	100-300 г/м <sup>2</sup> рабочего раствора	1–12 ч	температура окружающего воздуха и поверхности не ниже +4°С
Отбеливающий и защитный комплекс для древесины «Иней»	120-400 г/м <sup>2</sup> рабочего раствора	полное высыхание – до 12 ч	температура окружающего воздуха и поверхности не ниже +5°С
Отбеливатель древесины NEOMID 500	100-200 г/м <sup>2</sup> рабочего раствора	24 ч	температура окружающего воздуха и поверхности не ниже +5°С

Для оценки эффективности данных составов в одинаковых условиях были проведены лабораторные испытания. Для этого в розничном строительном магазине были приобретены все вышеуказанные составы. Перед использованием были проверены сроки годности и герметичность упаковок. Существуют несколько способов нанесения составов для отбеливания древесины: кистью, распылителями (пульверизаторы), окунанием. Окунание чаще всего используется при необходимости отбелить большие объемы пораженной древесины в кратчайшие сроки, но при таком использовании значительно увеличивается расход используемого состава. Чаще для нанесения отбеливающего состава на пораженные участки древесины используется кисть или валик. При таком способе обрабатываются только пораженные участки древесины и сокращаются потери, которые образуются при распылении или окунании.

На рисунке 1 представлены сухие образцы древесины, пораженные грибами, на которые наносились испытываемые составы для отбеливания древесины.



**Рисунок 1 – Сухие образцы древесины, пораженные грибами**

На рисунке 2 представлены свежеспиленные образцы древесины, пораженные грибами.



**Рисунок 2 – Свежеспиленные образцы древесины, пораженные грибами**

Спустя 12 часов после нанесения испытываемых составов был проведен сравнительный анализ, по результатам которого отбеливатель для дерева Сенеж ЭФФО, отбеливающий и защитный комплекс для древесины «Иней» и отбеливатель для древесины Белмастер Нео проявили одинаковые отбеливающие свойства, а отбеливатель древесины NEOMID 500 не показал никаких отбеливающих свойств.



**Рисунок 3 – Пораженные образцы древесины, обработанные составами для отбеливания древесины через 12 часов после обработки**

Испытания отбеливающих составов проводились в соответствии с рекомендациями производителей, а именно готовые рабочие растворы Сенеж ЭФФО, Иней и Белмастер Нео наносились кистью вдоль волокон, а NEOMID 500 предварительно перед нанесением на образцы разбавлялся с водой в соотношении 1:1, а далее наносился аналогичным образом, как и другие испытываемые составы.

В соответствии с тем, что по истечению 12 часов после обработки испытываемые отбеливающие составы не обеспечили достаточной эффективности, то было принято решение, исходя из рекомендаций производителей, провести повторную обработку.

После нанесения второго слоя отбеливающих средств, спустя 12 часов был проведен повторный сравнительный анализ образцов обработанных испытываемыми составами. По результатам данного анали-

за отбеливающий и защитный комплекс для древесины «Иней» в большей степени проявил свои отбеливающие свойства как на сухих, так и на свежеспиленных образцах пораженной древесины. Немного хуже проявили свои отбеливающие свойства отбеливатель для дерева Сенеж ЭФФО и отбеливатель для древесины Белмастер Нео. В свою очередь отбеливатель древесины NEOMID 500 даже спустя сутки после обработки испытываемых составов не проявил никаких отбеливающих свойств.



**Рисунок 4 – Пораженные образцы древесины, обработанные составами для отбеливания древесины через 24 часа после обработки**

Стоит отметить, что все испытываемые составы обеспечили лишь поверхностное отбеливание, но не смогли достичь отбеливания глубокой заболонной сини. Помимо этого, после полной фиксации и высыхания составов для отбеливания, древесина требуется обработка древесины бизащитными средствами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Божелко И. К., Коновалова А. А. Полигонный способ оценки эффективности транспортных антисептиков для древесины // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 85-й науч.-технич. конференции с международным участием, Минск, 1–13 февраля 2021 г. – Мн: БГТУ, 2021. – С. 118–119.

О.К. Леонович, канд. тех. наук, доц.;  
И.К. Божелко, канд. тех. наук, зав. кафедрой ТДП;  
Д.В. Божко, магистрант; О.В. Коныхина, магистрант  
(БГТУ, г. Минск);  
А.Н. Шернаев, д-р тех. наук, начальник центра научной подготовки;  
Б.Т. Джалалов, магистрант  
(ТХТИ, Ташкент, Узбекистан)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕРЕЗОВЫХ КРЯЖЕЙ ПРИ ЛУЩЕНИИ ШПОНА РАЗЛИЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

Целью работы является: определение оптимальных параметров температуры и продолжительности гидротермической обработки кряжей березы при лущении шпона различной толщины для фанерного сырья.

Гидротермическая обработка древесины придает древесине пластичности, необходимой для получения гладкого, плотного и прочного шпона. Получение надлежащего качества поверхности шпона требует поддержания температуры на поверхности древесины

Тепловую обработку древесного сырья перед лущением проводят по мягким и жестким режимам. Мягкие режимы характеризуются температурой воды 35–45°C и большой длительностью обработки. Жесткие режимы предусматривают высокую (70–80°C) температуру. Для получения качественного шпона в литературе рекомендуется следующая температура древесины перед лущением: ольхи и березы не менее 20, у сосны 25 – 35, у лиственницы 30 – 40°C. [1, 2]

В процессе производства лущеного шпона от 2.4 мм до 4 мм на нем в конце лущения образуются боковые трещины. Исследованию подверглась древесина различных пород и диаметров. Определялись параметры температур в центре образца (в зоне карандаша) в зависимости от диаметров и пород древесины.

Хорошее качество шпона обеспечивается предварительным прогревом древесины до определенной температуры, определяемой по уравнению:

$$t = (7S + 20)K_t,$$

где поправочный коэффициент  $K_t$ , в зависимости от породы древесины. Береза, ольха, сосна  $K_t = 1,0$ . Бук, лиственница  $K_t = 1,5$ . Осина, липа, павловния  $K_t + 0,5$

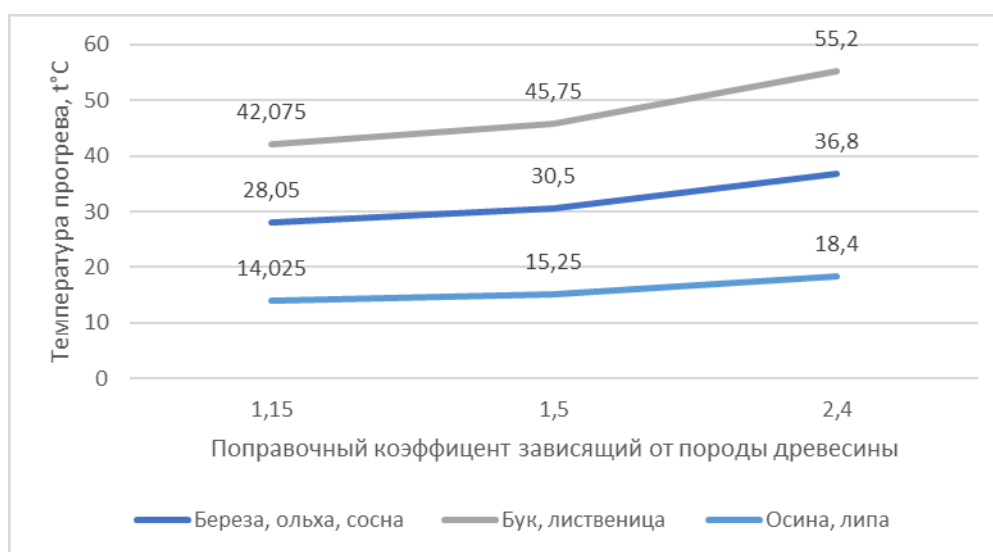
Результаты расчета температуры прогрева древесины в зависи-



мости от породы и толщины вырабатываемого лущеного шпона приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Температура прогрева древесины в зависимости от породы древесины и толщины шпона**

Толщина шпона S, мм	Температура прогрева t для различных пород древесины, °С		
	Береза, ольха, сосна	Бук, лиственница	Осина, липа, павловния
1,15	28,05	42,075	14,025
1,5	30,5	45,75	15,25
2,4	36,8	55,2	18,4



**Рисунок 1 – График зависимости породы древесины и толщины шпона на температуру прогрева**

Полученные оптимальные температуры березовых кряжей для лущения позволили рассчитать необходимые параметры их гидротермической обработки: параметр продолжительности оттаивания и прогрева древесины, определить режимы гидротермической обработки березового сырья в бассейнах с температурой воды 45°С и 60°С на основании теоретического расчета продолжительности гидротермической обработки.

Режим тепловой обработки чураков включает температуру нагревающей среды и продолжительность выдержки их в этой среде. При этом продолжительность обработки чураков зависит как от температуры нагревающей среды, так и от физических свойств древесины; диаметра чураков и их начальной температуры; желаемой температуры на поверхности карандаша, остающегося после лущения.

При разработке технологических процессов, связанных с нагрева-

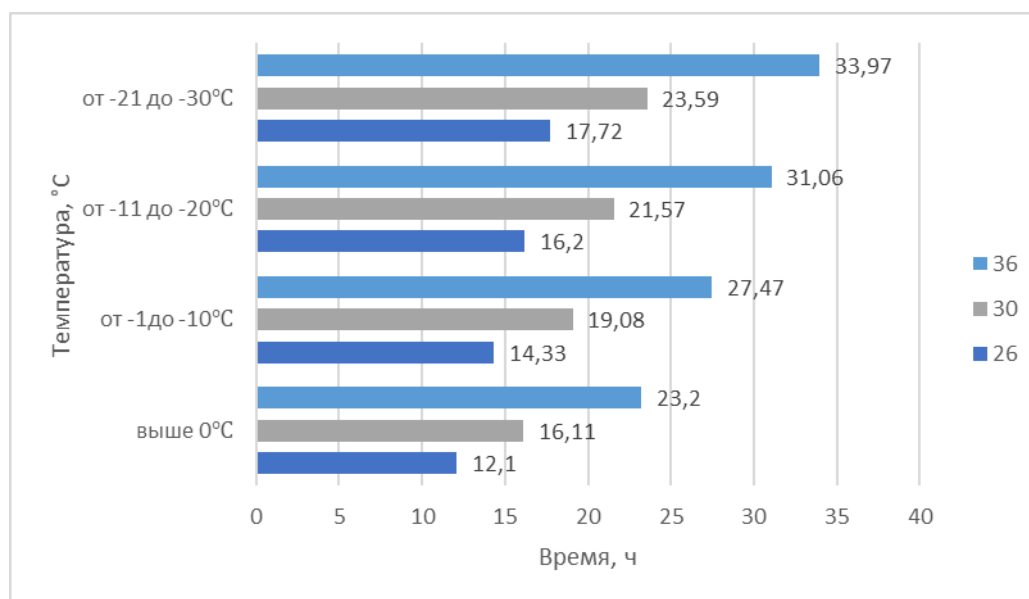
нием замороженной древесины, как правило, решаются следующие задачи: определение времени, необходимого для оттаивания сортамента на заданную глубину и определение времени, необходимого для нагревания заданной точки сортамента до требуемой температуры после его полного оттаивания. Результаты исследований приведены в табл. 2–3.

**Таблица 2 – Режимы гидротермической обработки березового сырья в бассейнах с температурой воды 45°C**

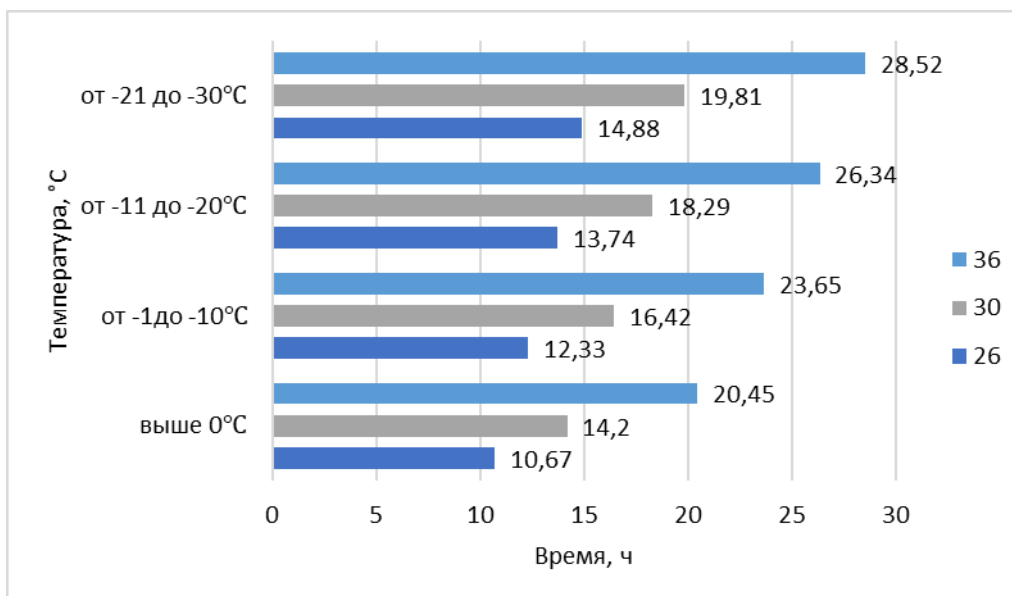
Диаметр	Суммарное Время			
	выше 0°C	от -1 до -10°C	от -11 до -20°C	от -21 до -30°C
26	12,10	14,33	16,20	17,72
30	16,11	19,08	21,57	23,59
36	23,20	27,47	31,06	33,97

**Таблица 3 – Режимы гидротермической обработки сырья лиственных пород древесины (береза, ольха) в бассейнах с температурой воды 60°C**

Диаметр сырья, см	Продолжительность гидротермической обработки, ч, при температуре наружного воздуха, °C			
	выше 0	от 0 до -10	от -11 до -20	от -21 до -30
26	10,67	12,33	13,74	14,88
30	14,20	16,42	18,29	19,81
36	20,45	23,65	26,34	28,52



**Рисунок 2 – Сводная диаграмма продолжительности ГТО в бассейнах температурой воды 45°C**



**Рисунок 3 – Сводная диаграмма продолжительности ГТО в бассейнах температурой воды 60°C**

В результате выполненной научно-исследовательской работы разработаны рекомендации по подготовке березового фанерного сырья к лущению, были определены основные параметры, связанные с нагреванием и размораживанием древесины, такие как: время, необходимое для оттаивания сортимента на заданную глубину; удельный расход теплоты на оттаивание замороженной древесины; время, необходимое для нагрева от заданной точки сортимента до требуемой температуры после его полного оттаивания.

Составлены режимы гидротермической обработки березового сырья в бассейнах с температурой воды 45°C и 60°C по расчетам продолжительности гидротермической обработки. Изучены зависимости породы древесины и толщины шпона на продолжительность гидротермической обработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. 1987. – 360 с.
2. Снопков В.Б. Гидротермическая обработка древесины. Примеры и задачи: учеб. Пособие для студентов специальности «Технология деревообрабатывающих производств», Мн: БГТУ, 2005. – 240 с.

## **ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МОРЕНОГО ДУБА И СОСНЫ**

Археологическая древесина натурального мореного дуба и сосны имеют ряд существенных отличий в силу своего строения и устойчивости при различных условиях хранения в природной среде. Важным является устойчивость дуба и сосны до их попадания в среду, закрытую от попадания кислорода и изменений температурно-влажностных параметров среды, влияющих на повреждение плесневыми, деревоокрашивающими, дереворазрушающими грибами и техническими вредителями.

Цель исследований заключается в особенностях защиты изделий из археологической древесины натурального мореного дуба и сосны после его добычи и попадания в температурно-влажностные условия окружающей среды.

Поставлены основные задачи:

- охарактеризовать условия развития плесневых, деревоокрашивающих и дереворазрушающих грибов и методы защиты древесины от разрушения грибами;
- определить основные параметры физико-механических свойств археологической древесины натурального мореного дуба и сосны;
- охарактеризовать параметры среды в которой находился археологический объект из древесины мореного дуба и сосны до испытания и в период добычи и последующего хранения;
- определить методы защиты археологических объектов из натурального мореного дуба и сосны;
- показать практические результаты биозащиты археологических объектов из древесины сосны на примере археологического музея «Берестье»;
- предложить варианты защиты археологической древесины из натурального мореного дуба и сосны на примере челнов музея АН Беларуси.

Защита от биоповреждений. В климатических условиях Беларуси биологических повреждения и разрушения древесины обусловлены главным образом, ее дереворазрушающими и плесневыми грибами. Развитие достоинств грибов, использующих древесину как питательную среду возможно лишь при длительных температурах, влажност-

ных условиях: минимальная температура 0–5 °С, максимальная – 45–60 °С, минимальная влажность древесины 18–20%, максимальная 120–150%. Таким образом, для того, чтобы защитить древесину от поражения грибами достаточно вывести ее за пределы указанных диапазонов температуры и влажность. Собственно, различают следующие методы защиты:

Существующие методы защиты здоровой древесины такие как повышение температуры путем пропаривания, понижения температуры до замораживания, повышение влажности за счет затопливания или полива, понижения влажности путем атмосферной или камерной сушки пиломатериалов носят временный характер и в силу гигроскопичности древесины последняя восстановит влажность в соответствии с параметрами среды.

Наиболее действенным, а значит и тем более применимым методом защиты древесины от биоповреждений является использование токсичных веществ (антисептиков). Этот метод существует в 2-х вариантах: а) антисептирование; б) консервирование.

Антисептирование заключается в нанесении тонкого слоя антисептика на поверхность древесины с целью кратковременной её защиты от поражения грибами в процессе атмосферно сушки, хранения или транспортирования. Консервированием называется длительная защита древесины от биоповреждений, обеспечиваемая её прочностью, т. е. введением антисептиков на определенную глубину в толщу сортамента. Отдельные результаты исследований приведены в работах [1–2].

Наиболее эффективным методом защиты археологических находок является модифицирование древесины. Модифицирование древесины как способ улучшения ее свойств предусматривает: модифицирование древесины путем введения в ее макроструктуру олигомерных синтетических смол с их последующим отверждением; - модифицирование древесины при введении в макроструктуру ее мономерных соединений с их последующей прививкой на полимерные компоненты радиационно-химическим или термокаталитическим способами.

Различают термомеханическое, химикомеханическое, радиационно-химическое и термохимическое модифицирование древесины.

Наиболее широкое применение получило термохимическое модифицирование древесины согласно ГОСТ 24329-80 «Способы модифицирования» состоит из следующих операций: пропитки смолами или олигомерами, сушки и отверждения пропиточного состава в древесине. Пропитка древесины ведется в автоклавах под давлением и

другими способами. Класс полимеров очень обширен. Древесине придается ряд ценнейших свойств, повышаются такие физико-механические показатели, как: стабильность, атмосферостойкость, устойчивость к агрессивным средам, биостойкость. Основные исследования ведутся в области поиска новых пропиточных составов, катализаторов, более совершенных технологий.

Ниже приводим результаты определения предела прочности при статическом изгибе и сжатии древесины мореного дуба различных возрастных групп (Таблица 1, 2).

Усредненный предел прочности на изгиб у древесины мореного дуба составил 91,8 МПа, что на 2% больше чем у древесины натурального дуба. Это отличный показатель для использования древесины мореного дуба в ответственных изделиях

Усредненный предел прочности на сжатие вдоль волокон у древесины мореного дуба на 2,5% больше чем у древесины натурального дуба

Археологическая древесины сосны в значительной степени теряет свопрочность и подвергается разрушению. Степень деградации принята в зависимости от процента потери плотности и прочности археологической древесины. Выделены 4 степени деградации в зависимости от процентного показателя плотности и прочности археологической древесины в сравнении с среднестатистическими показателями по породе I – 0–20%; II – 21–40%; III – 41–60% IV – выше 61%. Результаты представлены в табл. 3.

В Республике Беларусь защите археологических объектов уделяется серьезное внимание. Особо следует рассмотреть методы и способы защиты объектов археологического музея «Берестье» Брестского краеведческого музея.

Обработке подвергалась древесина строений археологического музея «Берестье» филиала Брестского государственного краеведческого музея методом термохимического модифицирования фенолоспиртами с этиленгликолем. В таблице 3 приводим данные физико-механических свойств археологической древесины в зависимости от степени деградации.

Работы велись под руководством профессора В. Е. Вихрова. Основные исследования по защите объектов археологического музея, разработке технологий и защитных составов выполнялись в Проблемной научно-исследовательской лаборатории БТИ им. С.М. Кирова под научным руководством Шутова Г. М. Основные исследования и методология были разработаны Вихровым Ю.В. и Казанской С. Ю. Защита объектов музея велась в конце 70-х начале 80-х годов прошлого века.

В 1999 году в БГУ была организована научно-исследовательская лаборатория огнезащиты строительных материалов, которую возглавил д.т.н. Тычино Н.А. Под его руководством в 2005 году были обследованы объекты археологического музея «Берестье» и выполнены огнебиозащитные мероприятия средством СПАД-10. В 2007 году НИЛ ОСКиМ возглавил к.т.н. Леонович О.К. Под его руководством были проведены обследования объектов, определены очаги грибных поражений и поражений ряда объектов техническими вредителями [2]. В течение 4 лет объекты обрабатывались биозащитным составом «Бохемит» и в течение 3 лет дважды биоцидным средством для древесины «Антижук». Модификация фенолоспиртами с этиленгликолем обеспечила надежную защиту археологических объектов археологического музея «Берестье», однако в дальнейшем потребовалась дополнительная капиллярная обработка объектов для обеспечения их сохранности от повреждения грибами и техническими вредителями.

Археологическая древесина сосны имеет плотности от 450 до 100 кг/м<sup>3</sup> в отличие от нее археологические находки из мореного дуба имеют более устойчивую и постоянную структуру по плотности древесины. Отдельные образцы имеют плотность равную плотности натуральной древесины дуба, равную базисной плотности 570-800 кг/м<sup>3</sup>. Для надежной биозащиты археологических объектов из древесины дуба предлагается термохимическая модификация метилметакрилатом, образцы древесины предварительно вакуумируют, а затем пропитывают под атмосферным давлением и термообрабатывают. В процессе модификации археологическая древесина дуба в несколько раз увеличила прочность древесины при изгибе. От 180 до 250 МПа. По сравнению с натуральной непропитанной древесиной водопоглощение образцов, обработанных метилметакрилатом, снижается в 10 раз при вымачивании в дисцилированной воде 60 суток. Полученные образцы являются устойчивыми к биоповреждениям и не повреждаются техническими вредителями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Леонович, О. К. Определение поражения древесины различными видами грибов путем выделения ДНК и сравнения их с ДНК-маркерами / О. К. Леонович, И. К. Божелко // Труды БГТУ. Сер. II. Лесн. и деревообр. пром-сть. – 2009. – Вып. XVII. – С. 190–193;

2. Леонович О. К., Федосенко И. Г. Оценка характеристик и состояния древесины в конструкциях дома XVIII–XIX веков Лошицкого усадебно-паркового комплекса // Труды БГТУ. Сер. II Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 264–267.

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДЕПОЛИМИРИЗОВАННЫХ ГИДРОЛИЗНЫХ ЛИГНИНОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ФАНЕРЫ**

Одним из направлений переработки растительного сырья является применение кислотного гидролиза древесной биомассы, которое исторически было направлено на использование углеводной части с получением этанола. В ходе гидролиза древесины образуется отход – технический гидролизный лигнин (ТГЛ). К настоящему времени на предприятиях накоплены большие запасы гидролизного лигнина. Лигнин, наряду с целлюлозой и белковыми веществами, является одним из наиболее распространенных природных полимеров, что уже само по себе определяет значимость исследований, направленных на его поведение в химических реакциях. В настоящее время в деревообрабатывающей промышленности применяются жидкие смолы горячего отверждения. Но наряду с достоинствами карбамидоформальдегидные смолы имеют ряд существенных недостатков, заключающихся в высокой эмиссии формальдегида из плит и невысокой водо- и теплостойкости их смоляных композиций. Поэтому улучшение свойств клеев на основе карбамидоформальдегидных смол является актуальной задачей и способствует продолжению исследовательских работ в данном направлении.

Особое внимание уделяется разработкам, направленным на снижение токсичности древесных материалов при сохранении высоких физико-механических характеристик.

Приведенные в литературе материалы не позволяют предложить фанерной промышленности отработанные составы карбамидоформальдегидных смол, модифицированных гидролизным лигнином и технологии для их применения в народном хозяйстве. Исходя из изложенного, решение проблемы использования отхода гидролизного производства для модификации карбамидоформальдегидных смол является актуальной и востребованной

Целью работы является: использование деполимеризованных гидролизных лигнинов фирмы СООО «СинерджиКом» для отверждения карбамидоформальдегидных смол и снижения эмиссии формальдегида при склеивании плитной продукции.

Для склеивания пятислойной водостойкой фанеры ФК были



отобраны листы шпона по ГОСТ 3916.1-2018 [1] размером: 320×320 мм и влажностью шпона  $6\pm 2\%$ . Вязкость клея должна быть в пределах 140–150 секунд по ВЗ-4 при температуре  $20\pm 0,5$  °С. Норма расхода клея на 1 м<sup>2</sup> намазываемой поверхности шпона при изготовлении фанеры марки ФК: 140–145 г/м<sup>2</sup>. Склеивание пакетов шпона производится в автоматическом гидравлическом прессе ПСУ-50, который включает в себя два отдельных агрегата: собственно, пресс и пульт управления. Прессование фанеры производится согласно технологическому режиму при заданной температуре  $T=125$  °С, давлении  $p = 1,8\text{--}1,9$  МПа, времени выдержки в прессу  $t = 8,5$  мин.

Для приготовления растворов клеев к смоле добавлялись различные модификаторы. К добавкам в виде порошка вводилась вода.

Для определения предела прочности при скалывании применяют испытательную машину по ГОСТ 28840 для проведения испытаний на растяжение, оборудованную клиновыми захватами с нарезанными на них мелкими зубьями, способную работать непрерывно и измерять нагрузку с точностью  $\pm 1\%$ .

Отбор образцов и подготовку их к испытаниям проводят по ГОСТ 9620-94.

По длине образцы должны соответствовать направлению волокон древесины наружных слоев, также должны быть без каких-либо видимых дефектов в зоне скалывания. Длина образца  $l = 135$  мм; длина плоскости скалывания  $l_1 = (25\pm 0,5)$  мм; минимальное расстояние между зажимами  $l_2 = 50$  мм; ширина плоскости скалывания (ширина образца для испытаний)  $b_1 = (25\pm 0,5)$  мм; ширина пропилов  $b_2$  от 2,5 до 4 мм.

Скалывание образцов проводят по наиболее удаленным от наружных слоев клеевым слоям образца. Испытания проводят на образцах, прошедших специальную влажностную обработку: выдерживание в воде в течение 24 ч.

При проведении испытаний на скалывание для каждого образца всех видов продукции фиксируют разрушающую нагрузку, а для образцов фанеры и фанерных плит – дополнительно степень разрушения по древесине посредством сравнения плоскости скалывания со стандартными значениями когезионного разрушения древесины в зоне скалывания с точностью до  $\pm 10\%$ .

Среднее значение предела прочности при скалывании определенной пары клеевых швов для каждой группы образцов, МПа вычисляют по формуле. В результате проведения испытаний были получены следующие результаты:

Одним из обязательных испытаний, регламентируемых

ГОСТ 3916.1-2018, является определение класса эмиссии формальдегида в образцах готовой продукции. Отбор образцов для испытаний на эмиссию формальдегида проводят не ранее чем через 24 ч после изготовления материала. Образец вырезают из середины листа размерами, мм:  $(200+2) \times (50+2) \times 6$ . Кромки образца заделываются алюминиевым скотчем.

Испытания проводятся в газовой камере GA -4m1E.nt. Выходящий из камеры воздушный поток пропускается через устройство для выделения формальдегида из воздуха (импинджер): основными элементами данного прибора являются две последовательно соединенные стеклянные колбы с дистиллированной водой, растворяющей содержащийся в атмосфере формальдегид.

Поглощательную способность растворов определить фотометрическим способом при длине волны 412 нм и толщине слоя 50 мм в сравнении с дистиллированной водой с помощью спектрофотометра ПЭ-5300 ВИ. Содержание формальдегида (мкг) в каждой колбе с поглотительным раствором (т. е. для каждого часового периода испытаний) определяют по измеренной оптической плотности раствора, используя калибровочный график, или вычисляют с использованием калибровочных коэффициентов. За результат испытания принимают среднеарифметическое значение почасовых измерений.

Анализ результатов, полученных в ходе проведения испытаний предела прочности при скалывании образцов по клеевому слою, показывает положительное влияние модификаторов клеевых композиций S-DrillTMBND 40 на способность плитного материала воспринимать разрушающую нагрузку. При этом при использовании карбамида в качестве акцептора формальдегида сопутствующим фактором является снижение физико-механических свойств. Альтернативное использование лигнин содержащего реагента S-DrillTMBND 40 (4,0 г по сухим веществам) позволяет получить достаточно высокие значения предела прочности, составляющие 3,8 МПа, что значительно выше композиций с применением в качестве отвердителя хлористого аммония, сульфата аммония в смеси с карбамидом, мелом и лигносульфонато, а также при добавке композициями S-DrillTMBND 40 с более низким содержанием сухих остатков.

В испытании на определение выделения формальдегида все образцы показали результаты, соответствующие классу эмиссии E0,5 по ГОСТ 3916.1-2018 «Фанера общего назначения с наружными слоями из шпона листовых пород». При этом образцы с применением исследуемой добавки S-DrillTMBND 40 (4,0 г по сухим веществам) в качестве модификатора карбамидоформальдегидной смолы показали

самый низкий результат по данному показателю. Так почасовое выделение формальдегида составило 0,03 мг\м, что значительно ниже чем в композициях карбамидоформальдегидных смол, использующих в качестве акцептора формальдегида карбамид.

В результате промышленных испытаний была выявлена невозможность использования рецептуры исследуемой клеевой композиции с применением жидкой формы реагента в технологии прессования фанеры с холодной подпрессовкой по причине недостаточной вязкости клея. В ходе дальнейшего исследования была опробован опытный образец в порошкообразной форме, что решило проблему несоответствия параметров клеевой композиции. При этом на сегодняшний день использование данного реагента является экономически нецелесообразно по причине увеличения себестоимости продукции при смене рецептуры

Модифицированные гидролизные лигнины могут быть использованы в фанерном производстве в качестве альтернативы сухим лигносульфонатам при изготовлении фанеры марки ФК, они в составе клеевых композиций увеличивают предел прочности при скалывании по клеевому слою, а также снижают эмиссию формальдегида и уменьшают влаго- и водопоглощение фанеры. Добавка модифицированного лигнина работает как отвердитель и акцептор формальдегида.

Жидкая форма компонента может быть использована в технологии прессования фанеры без холодной подпрессовки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коняхина О. В. Получение фанеры повышенной водостойкости и экологичности с применением модифицированного гидролизного лигнина / тезисы 73 науч.техн. конф студентов и магистрантов БГТУ, Минск ,апрель 2022 г. [Интернетресурс].

2. Леонович О. К., Коняхина О. В. Новый отвердитель и акцептор формальдегида карбамидоформальдегидных смол из древесных отходов гидролизного производства. / тезисы докладат «Лес-Наука-Инновации-2022» и МНТК «Состояние и перспективы развития лесного комплекса в странах СНГ» 6–9 декабря 2022 года, Минск [Интернетресурс].

## **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАПОЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРМИНЕРАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

При обустройстве деревообрабатывающих и других промышленных зданий используются различные виды полов. При проектировании пола промышленных зданий учитывают воздействия, передаваемые на него, санитарно-гигиенический режим регламентируемый в помещении, технико-экономические показатели конструкции пола, расположение и размеры оборудования, которое устанавливается непосредственно на пол, наличие каналов и инженерных сетей. Тип и конструкцию пола выбирают в соответствии с указаниями норм (СН 5.09.09–2020 «Полы»).

Основными конструктивными элементами промышленного пола являются: покрытие; выравнивающая стяжка (устраивается для создания жесткой корки по нежестким и пористым материалам или для придания полу уклона); подстилающий бетонный слой, распределяющий нагрузки на основание (для полов производственных зданий – не менее 100 мм); гидроизоляция; бетонная подготовка (не менее 50 мм); теплоизоляция (по необходимости); грунтовое основание [1].

К полам промышленных предприятий предъявляются ряд требований. Они должны быть устойчивы к ударным и механическим нагрузкам, воздействию воды и химических веществ, колебаниям температуры, являться непылящими, нескользкими, мало изнашиваемыми, легко ремонтируемыми, негорючими и недорогими.

Одним из видов таких полов, которые обладают такими свойствами являются наливные полы на основе полимерминеральных композиций. Именно поэтому их все чаще используют в качестве напольного покрытия в деревообрабатывающих цехах.

Полимерминеральные покрытия пола подразделяются по следующим признакам: типу полимера (эпоксидные, полиуретановые, акриловые и т.д.), химической стойкости, паропроницаемости, светостойкости и т.п. Но наиболее важно классифицировать и разделить полимерные полы на виды по степени наполнения песком, а, соответственно, и по толщине:

1. Тонкослойные полимерные покрытия – это малонаполненные системы, толщиной от 1,5 до 3 мм.

2. Средненаполненные полимерные наливные полы толщиной от 3 до 5 мм, степень наполнения по массе до 50%.

3. Высоконаполненные полы толщиной от 6 до 15 мм, степень наполнения по массе до 85%.

Тонкослойные покрытия применяются в случае, если необходимо выполнить экономичный полимерный пол. Такие покрытия применяются для промышленных полов с механическими нагрузками малой тяжести, для предотвращения пыления, для защиты полов из бетона от действия агрессивных сред и для придания им декоративного вида. Толщина подобных покрытий небольшая, поэтому возможно их процарапывание, истирание с течением времени. В связи с этим, нагрузки на полы не должны быть значительными, воздействие же агрессивных сред должно быть в виде случайных проливов.

Средненаполненные полимерные наливные полы предназначены для эксплуатации в средних условиях промышленно-производственной среды: постоянного пешеходного движения, транспортных средств и погрузчиков на пневмоходу, единичное (в смену) движение тяжело нагруженных тележек на пластиковых колесах.

Высоконаполненные полы применяют в помещениях с большой интенсивностью ударных, истирающих и вибрационных нагрузок. Введение значительного количества наполнителя (до 85%) даёт возможность значительно понизить коэффициент температурного расширения покрытия, и приблизить его к соответствующему показателю бетонного основания. Сравнительно высокая толщина слоя этого вида покрытий (до 15 мм) даёт возможность компенсировать отдельные неровности основания [2].

В большинстве случаев, чтобы наполнить полимерминеральные наливные полы, применяется кварцевый сухой песок, как наиболее доступный и прочный материал. Для получения искробезопасных покрытий в качестве наполнителя используется доломитный или мраморный песок.

Основными показателями качества напольных покрытий на основе полимерминеральной композиции являются: истираемость (сопротивление износу); прочность сцепления с основанием (адгезия); твердость (сопротивление вдавливанию твердого тела) и т. д.

В настоящей работе были проведены исследования по определению эксплуатационных показателей полимерминеральных покрытий полов белорусского производителя. Были изготовлены образцы толщиной 2, 4 и 6 мм, со степенью наполнения кварцевым песком 15, 45 и 75% соответственно. Для этого в емкости смешали компоненты композиций в соответствующих пропорциях с помощью электриче-

ской мешалки.

После приготовления композицию наливали на магнизиальную плиту и распределили с помощью металлического шпателя. После распределения смеси, слой прокатывали игольчатым валиком (для облегчения процесса его нивелирования и удаления пузырьков воздуха) до тех пор, пока поверхность покрытия не приобретала гладкий, однородный, одноцветный внешний вид. В течение 28 суток образцы выдерживались при температуре  $(20\pm 5)$  °С и относительной влажности воздуха  $(65\pm 5)$  %.

Стойкость к истиранию – одна из важных эксплуатационных характеристик покрытий любого пола. Этот показатель определяет срок службы полимерминерального напольного покрытия. Кроме срока службы, износостойкость влияет на внешний вид пола и санитарно-гигиенические показатели полов (в царапинах могут развиваться бактерии). Производители напольных покрытий довольно редко указывают в технических характеристиках износостойкость наливных полимерминеральных полов.

Для определения стойкости к истиранию покрытий использовали абразиметр Табер (США), абразивные ролики Н-22 (материал роликов – абразивные частицы размером от 20 мкм до 102 мкм), весы и образцы размером 100×100 мм [3].

В процессе испытаний определяли величину потери массы образца покрытия при истирании на абразиметре. Для этого образец закрепляли на платформе прибора, который вращался с частотой 60 об/мин. Абразивные ролики прижимались к образцу с общей нагрузкой в 1000 г. Общее количество циклов составляло 1000 оборотов платформы, через каждые 200 оборотов при помощи волосяной щетки абразивные ролики очищали. Образец взвешивали до и после испытаний, с допускаемой погрешностью измерений  $\pm 0,001$  г.

Результат испытаний выражали как потеря массы образца (разница при взвешиваниях) в мг. Оценку стойкости к истиранию одного покрытия проводили по трем образцам. За показатель стойкости к истиранию покрытия принимали среднее арифметическое значение по трем образцам.

Определение адгезионной прочности полимерминерального покрытия осуществляли методом отрыва [4]. Сущность способа заключалась в том, что к поверхности покрытия приклеивали цилиндрическую заготовку, которая с помощью разрывной машины отрывалась от поверхности, при этом регистрировалось усилие отрыва, необходимое для разрушения адгезионной связи покрытия с основанием.

Твердость по Шору определяли по ГОСТ 24621 [5]. Результаты испытаний представлены ниже.

**Таблица – Результаты определения физико-механических показателей напольных покрытий на основе полиминеральных композиций**

Номер образца	Средние параметры исследуемых напольных покрытий на основе полимерминеральных композиций				
	Толщина, мм	Степень наполненности кварцевым песком, %	Твердость по Шору А, усл. ед.	Стойкость к истиранию, мг	Адгезионная прочность, МПа
1	2	15	93	680	1,69
2	4	45	94	575	1,72
3	6	85	96	504	1,75

На основании полученных результатов можно констатировать то, что наиболее высокими эксплуатационными показателями обладают высоконаполненные полимерминеральные полы. Это может объясняться тем, что кварцевый песок входящий в состав такой композиции является тем фактором, который повышает эксплуатационные характеристики покрытий, что необходимо учитывать при выборе условий эксплуатации полов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Полы: СН 5.09.01–2020. – Введ. 14.09.2020. – Минск: Министерство во архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. – 19 с.
2. Наливные полы. Полимерные наливные полы [Электронный ресурс] / teohim.ru. – URL: <https://teohim.ru/polymer/info/vidy-polimernyh-polov/> (дата обращения: 16.01.2023).
3. Бетоны. Методы определения истираемости: ГОСТ 13087–2018. – Введ. 01.03.2020. – Минск: Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2020. – 16 с.
4. Защита от коррозии в строительстве. Конструкции бетонные и железобетонные. Методы испытаний адгезии защитных покрытий: ГОСТ 28574-2014. Введ. 01.01.2015. – Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2015. – 12 с.
5. Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору): ГОСТ 24621-2015. – Введ. 01.01.2017. – Москва: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2017. – 11 с.

## **АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ ПО ТОЛЩИНЕ ПРИ ПРОГРЕВЕ В НЕНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ**

Лесная промышленность Беларуси – комплекс отраслей по заготовке, обработке, и переработке древесины. Наибольший объем выпуска продукции приходится на деревообрабатывающую отрасль и составляет около 69,5%. Основная задача деревообработки – подготовка древесины как основного сырья к дальнейшему производству изделий. Непосредственно подготовка древесного сырья обязательно включает процесс сушки, поскольку древесина является природным сырьем и обладает некоторыми свойствами, оказывающими значительное влияние и на процессы обработки, и на качество готовой продукции.

Сушка древесины – это сложный процесс, поскольку:

- 1) древесина различных пород имеет разные физико-механические свойства;
- 2) анизотропия строения древесины предполагает различные значения основных механических и физических свойств;
- 3) используются различные по размерам древесные сортименты;
- 4) различны качественные требования к сушильному процессу;
- 5) имеет место сложность физических процессов, возникающих при сушке;
- 6) большая длительность процесса [1].

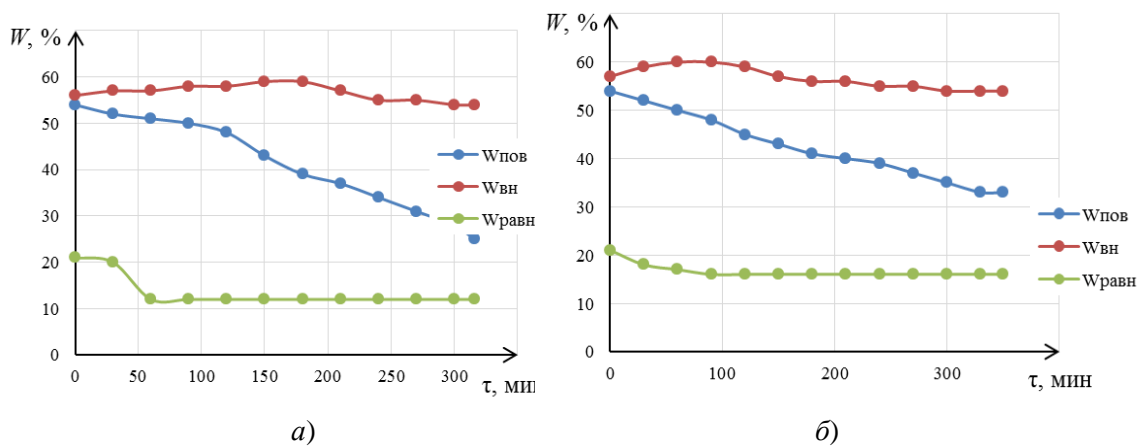
Известно, что первой технологической операцией, предшествующей сушке, является начальный прогрев. Основная цель операции начального прогрева – это подготовка влагопроводящей системы древесины к операции сушки. Для этого необходимо создать условия для равномерного испарения влаги по толщине пиломатериала.

Известно, что в период начального прогрева в ненасыщенной среде происходит испарение влаги с поверхности пиломатериалов и, как следствие, уровень температуры поверхностных слоев меньше температуры обрабатываемой среды. Кроме этого, влага, находящаяся в наружных зонах, нагревается сильнее, чем во внутренних, и это вызывает движение ее снаружи внутрь. Данный факт можно объяснить тем, что при прогреве в ненасыщенной среде возникает два совместно протекающих явления переноса тепла: теплопроводность внутри материала и теплообмен с обрабатываемой средой.



Известно, что при неизотермических условиях в древесине имеет место перенос влаги из мест с большей температурой в места с меньшей. Если образец древесины с влажностью, одинаковой по сечению, поместить в неравномерное температурное поле, в результате чего будет наблюдаться перепад температур на противоположных сторонах образца, то начнется перераспределение влажности на поверхности и внутри. На участках с меньшей температурой влажность древесины увеличится, а с большей – уменьшится. При этом в образце возникает градиент влажности, под действием которого влага будет стремиться к перемещению в направлении, противоположном направлению потока влаги. Влага по объему сортамента всегда движется в сторону убывающей влажности. При определенном соотношении между влажностным и температурным градиентами эффект влагопроводности полностью компенсирует эффект термовлагопроводности, и по сечению образца установится стационарное поле температуры и влажности.

Для анализа изменения влажности в поверхностных и внутренних слоях были проведены специализированные экспериментальные исследования. В ходе эксперимента применялись образцы древесины сосны определенной толщины, начальной влажности и температуры, которые помещались в климатическую камеру ТХВ, оснащенную датчиками влажности древесины, а также датчиками влажности и температуры обрабатывающего агента. В комплекте климаткамеры предусмотрены датчики влажности, позволяющие фиксировать ее изменение с точностью  $\pm 1\%$ . Частота измерения – каждые 5 с. Все значения выводятся на экран контроля камеры. Результаты исследований по условиям были представлены в виде графических зависимостей, отраженные на рисунке 1.



**Рисунок 1 – Характер изменения кривых влажности при прогреве при  $W_{\text{нач}}=55\%$ ,  $S=20$  мм: а – прогрев при  $T_{\text{ср}}=40 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\phi=0,7$ ; б – прогрев при  $T_{\text{ср}}=80 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $\phi=0,9$**

Анализ результатов эксперимента свидетельствует, что изменение влажности поверхностных слоев образцов древесины начинается через 30–60 мин после начала прогрева, а внутренних – с некоторым опозданием. Перепад влажности на поверхности и внутри образцов  $\Delta W$  достигает максимальной величины к концу процесса прогрева и составляет  $\Delta W_1 = 28\%$  и  $\Delta W_2 = 19\%$  при степени насыщенности среды  $\phi = 0,7$  и  $\phi = 0,9$  соответственно. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что на характер изменения влажности поверхностных слоев древесины существенное влияние оказывает температура прогрева, степень насыщенности обрабатываемой среды, начальная влажность образцов.

Также стоит отметить, что влажность внутренних слоев увеличивается на 2–4 % именно в период, когда наблюдается достаточно интенсивное снижение влажности поверхностных слоев. Данное явление можно объяснить следующим образом. В период прогрева пиломатериалов под воздействием перепада температур возникает интенсивный поток влаги от более горячих зон к более холодным даже в тех случаях, когда холодная зона оказывается более влажной. Влажность же поверхностных слоев с течением времени уменьшается, достигает значения, близкого к равновесной влажности, после чего не изменяется.

Нетрудно заметить, что стабилизация влажности на поверхности прогреваемых сортиментов происходит на уровне значения устойчивой влажности при десорбции, соответствующей заданным параметрам обрабатываемой среды. Перепад влажности по толщине пиломатериалов изменяется от 5–7% в начале процесса до 24–29% – в конце. Следовательно, в образце возникает градиент влажности, под действием которого влага будет стремиться к перемещению в направлении, противоположном направлению потока влаги.

Полученные данные можно использовать при разработке режимов начального прогрева древесины в ненасыщенной среде. Для оптимальной подготовки влагопроводящей системы древесины к испарению влаги можно рекомендовать проводить прогрев древесины при температуре среды выше 50–60°C и  $\phi = 0,75–0,85$  для пиломатериалов с начальной степенью влажности  $W_{\text{нач}} > 30\%$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рудак О. Г. (2021) Исследование процессов тепломассопереноса при прогреве древесины в ненасыщенной среде // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2(246), С. 277-283.

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА НА СКОРОСТЬ НАГРЕВАНИЯ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В ПЕРИОД НАЧАЛЬНОГО ПРОГРЕВА**

Деревообрабатывающая отрасль является одной из крупнейших производственных отраслей Беларуси, состоящая из полного цикла переработки: от заготовки делового сырья до процесса отделки готового изделия. Доля производства изделий из древесины составляет около 5,8% в структуре обрабатывающей промышленности Республики Беларусь.

С целью повышения эффективности использования древесины необходимо сосредоточить усилия на разработке новых технологий, позволяющих сокращать энергетические затраты, образование значительного количества отходов и повысить качественные характеристики готовой продукции.

Сушка пиломатериалов – одна из важнейших и наиболее энергозатратных операций в технологическом процессе деревообработки, состоящая из нескольких обязательных этапов. Первой и необходимой технологической операцией перед сушкой является начальный прогрев, который проводится с целью доведения температуры древесины до уровня температуры сушильного агента и для подготовки влагонепроводящей системы к последующему испарению влаги.

В Республике Беларусь эксплуатируются сушильные камеры отечественного и зарубежного производства, теплоносителем и увлажнителем в которых является вода. В таких камерах степень насыщенности среды  $\phi$  поддерживается на уровне 0,8–0,85 ( $\Delta t = 2,5–3,5$ ). Для оценки влияния относительной влажности сушильного агента (или степени насыщенности среды  $\phi$ ) на скорость нагревания пиломатериалов были проведены исследования механизмов начального прогрева древесины в ненасыщенной среде в климатической камере модели ТХВ, оснащенной датчиками температуры древесины, а также датчиками влажности и температуры обрабатывающего агента. Датчики измерения температуры устанавливались на глубину 2–3 мм на поверхности и на  $\frac{1}{2}$  толщины образца. В качестве экспериментального материала для исследования использовались сосновые образцы радиальной распиловки толщиной  $S = 20, 40, 60$  мм; ширина пиломатериалов  $b$  равнялась 250 мм; начальная влажность составляла  $W_{нач} > 30\%$  и  $W_{нач} < 30\%$ . Прогрев образцов осуществлялся в ненасыщенной среде

при следующих параметрах обрабатывающего агента:  $\phi$  устанавливали на 3 уровнях – 0,7; 0,8; 0,9, а температура  $T$  составляла 40 °С; 60 °С, 80 °С. Нагревали образцы до тех пор, пока температура поверхностных и внутренних слоев не станет равной температуре обрабатывающей среды.

Результаты эксперимента представлены в виде графических зависимостей, на которых отражены изменения температуры поверхностных и внутренних слоев образцов; перепад температур по толщине, а также продолжительность прогрева при разных значениях относительной влажности сушильного агента.

Анализ кинетики прогрева показал, что при нагревании различие температур поверхностных и внутренних слоев древесины остается практически постоянным вплоть до момента достижения поверхностью образца температуры обрабатывающей среды. При постоянной температуре поверхностных слоев увеличивается только температура внутри образца, что приводит к их полному выравниванию.

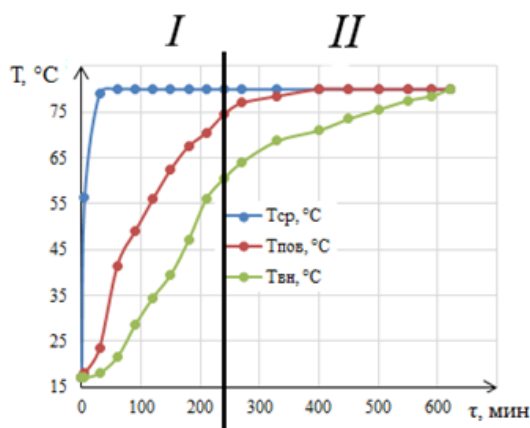
Также стоит отметить, что разница температур на поверхности и внутри образцов достигает максимальной величины и составляет 20 °С и 38 °С при  $\phi = 0,7$  и  $\phi = 0,9$  соответственно. Характер изменения температуры поверхностных слоев древесины при прогреве с  $\phi = 0,9$  близок к нагреванию в насыщенной среде ( $\phi \approx 1$ ). Также интересен тот факт, что продолжительность прогрева при  $\phi = 0,9$  меньше, чем при  $\phi = 0,7$ . Это явление можно объяснить тем, воздух, насыщенный водяным паром не способен воспринимать дополнительное количество воды, испарившейся из древесины. Соприкасаясь с образцом, он расходует свою тепловую энергию только на нагревание. По мере уменьшения степени насыщенности воздуха возникают два параллельно протекающих процесса: нагревание и сушка древесины.

Исследования механизма проведения начального прогрева древесины в ненасыщенной среде показывают, что интенсивность изменения температуры экспериментальных образцов на протяжении всего периода обработки происходит неравномерно. Сначала прогрев древесины происходит достаточно быстро и в некоторых случаях скорость достигает 30,6 °С/час, потом резко снижается и составляет около 6,8 °С/час. Причем переход от периода быстрого нагревания к медленному происходит при достижении внутренними слоями древесины температуры, отличающейся от температуры смоченного термометра на 5°С (рис. 1). Следовательно, технологическая операция начального прогрева древесины в ненасыщенной среде может быть разделена на два периода – быстрого и медленного нагревания [1]. Следует обратить внимание, что скорость нагревания поверхностных и внутренних

слоев также различна. В таблице приведены результаты эксперимента, отражающие перепады температур поверхностных и внутренних слоев древесины, а также скорость их нагревания в разные периоды прогрева. Данный факт необходимо учитывать при разработке энергоэффективных режимов начального прогрева.

**Таблица – Результаты исследования процесса нагревания древесины**

	$S = 20 \text{ мм}, W_{\text{нач}}=55 \%, t_0 > 0^\circ\text{C}$						
	$\Delta T_1, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$U_{1\text{пов}}, ^\circ\text{C/ч}$	$U_{2\text{пов}}, ^\circ\text{C/ч}$	$U_{1\text{вн}}, ^\circ\text{C/ч}$	$U_{2\text{вн}}, ^\circ\text{C/ч}$
<i>Температура прогрева <math>T = 40^\circ\text{C}</math></i>							
$\varphi=0,7$	16	2,5	7	15	5	7	3
$\varphi=0,9$	8,5	9,5	10,5	21,5	2	10	4



**Рисунок 1 – Характер изменения температурных кривых при прогреве с  $T=80^\circ\text{C}$ ,  $W_{\text{нач}}=55\%$ ,  $S=60 \text{ мм}$ ,  $\varphi=0,7$**

Результаты исследования влияния относительной влажности сушильного агента на скорость нагревания пиломатериалов в период начального прогрева позволили получить следующие выводы:

1. С повышением температуры обрабатывающей среды увеличивается продолжительность процесса прогрева, а также возрастает перепад температур на поверхности и внутри древесины, что является причиной возникновения явления влагопереноса.

2. С повышением степени насыщенности среды уменьшается продолжительность процесса прогрева, а также возрастает скорость изменения температуры как на поверхности, так и внутри древесины.

3. Прогрев древесины в ненасыщенной среде проходит в два периода – быстрого и медленного нагревания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рудак О. Г. Исследование механизмов начального прогрева древесины сосны в ненасыщенной среде // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого, № 2 (2021), С. 78-86.

А.С. Чуйков, канд. тех. наук, зав. кафедрой;  
С.В. Шетько, канд. техн. наук, доц.;  
О.Г. Рудак, ст. преп. (БГТУ, г. Минск)

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ПО ИЗГОТОВЛЕНИЮ МЕБЕЛЬНОГО ЩИТА**

В Республике Беларусь широко развита лесная, деревообрабатывающая (включая мебельную) и целлюлозно-бумажная промышленность. В свою очередь мебельная промышленность является не только одной из наиболее успешно развивающихся направлений отрасли, но и конкурирует на равных с зарубежными производителями мебели.

На сегодняшний день одним из главных условий конкурентоспособности предприятия (естественно помимо высокого качества) является низкая себестоимость продукции. Резервы снижения себестоимости заложены, прежде всего, в экономии сырья и материалов, снижении трудозатрат и повышении эффективности использования оборудования.

Перспективным направлением переработки малоценной, низкокачественной древесины является современная технология производства мебельного щита как одного из материалов в производстве мебели и столярно-строительных изделий (далее – ССИ).

Усовершенствование технологии изготовления мебельного щита может положительно сказаться на увеличении доли продукции на рынке мебели и ССИ. Поиски усовершенствований направлены на улучшение эксплуатационных характеристик мебельного щита, сокращения расходов на его производство и т.д.

В производстве мебельного щита можно выделить 3 основных этапа:

1. Подготовка сырья на линиях оптимизации (вырезка дефектов и торцовка, сортировка).
2. Сращивание древесины по длине.
3. Склеивание ламелей в мебельный щит.

Переработка древесины невозможна без ее торцовки. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что раскрой материала по длине является одной из важнейших технологических операций. Правильно сделанный начальный раскрой материала может существенно увеличить коэффициент выхода готовой продукции из входного сырья, а, следовательно, и рентабельность всего производства в целом. Автоматизированные линии пришли на смену позиционным торцов-

кам с ручной и механической подачей. Линии состоят из станции загрузки заготовок, блока считывания информации о дефектах заготовки, непосредственно торцовочного станка для осуществления поперечного раскроя заготовок, станции сортировки заготовок на выходе. Также следует обратить внимание на системы сканирования дефектов, установленные перед линиями оптимизации.

Оптимизация раскроя заготовок осуществляется с целью получения необходимого сортамента по длинам и их автоматическая сортировка на выходе из линии не только по размерам, но и по качеству, в соответствии с заданной программой. Современные компьютерные технологии позволяют не только оптимизировать выход материала по длине и качеству(ам), но и учитывать дополнительные параметры сортировки. Также стоит отметить, что линии оптимизации производят раскрой материала на основании компьютерного расчета. Этот расчет позволяет раскроить заготовку оптимальным образом с наименьшим количеством отходов по внесенным заранее размерам из спецификации производственной программы.

В связи с сокращением запасов древесины больших диаметров велика вероятность увеличения потребности в оборудовании для сращивания пиломатериалов, склеивания мебельного щита, бруса и др.

Следует отметить, что линии сращивания древесины по длине могут быть оснащены позиционной торцовкой либо проходной; пресс для склеивания на мини-шип по длине также может быть позиционным либо проходным. Кроме этого, фрезерный узел для нарезки мини-шипа может быть, как позиционного, так и проходного типа. В первом случае в линии сращивания будет установлен один фрезерный узел, оснащенный возвратной поворотной кареткой, а во втором случае – два фрезерных узла с автоматическим устройством базирования и выравнивания отрезков.

Важнейший показатель работы линий сращивания древесины по длине – точность формирования шипов и склеивания заготовок: это влияет на расход сырья. Например, при обработке коротких заготовок малого сечения (20×55 мм) и средней длины в 200 мм в процессе приторцовки концов заготовок может быть израсходовано 2 мм с каждой из сторон, а может и 7 мм. Таким образом, в сумме потери (или экономия) на каждой заготовке могут достигать 10 мм. При том что в 6 метровой доске может быть до 30 соединений, это сразу дает 5% экономии. Точность сращивания заготовок в системе набора и в прессе так же позволяет сэкономить на материале. Как правило, ламели после сращивания проходят этап строгания или выравнивания сечения. Если мы сращиваем предварительно калиброванные заготовки, то хорошие

линии сращивания дают возможность уменьшить припуски на обработку (съемы) при этой операции до 0,5-1 мм на сторону. К сожалению, большинство производителей не уделяют этому параметру должного внимания, поэтому величина съема может достигать 2-3 мм на сторону. Например, для заготовок сечением 20×80 мм можно «выиграть» 4 мм по высоте и 4 мм по ширине. В одном случае на входе используются заготовки 21,5×81,5мм, в другом – 24×84мм. Разница в объеме составляет 15%. На качество готовой продукции – клеенного мебельного щита – существенное влияние оказывает температура склеивания. Рекомендуется прессование при низких температурах. При повышенных температурах в результате нагревания из поверхностных слоев древесины происходит испарение влаги, что в свою очередь может стать причиной коробления и даже растрескивания [1].

Также следует отметить, что разница температур в 5°С между верхней и нижней нагревательными плитами также может привести к короблению щита. Чем выше при этом температура прессования, тем большая опасность деформации.

Для производства щита мебельного оптимальным способом является холодное прессование или прессование с использованием токов высокой частоты, которое в свою очередь отличается достаточно коротким временем прессования (около 7-10 сек). Стоит отметить, что токи высокой частоты не нагревают древесину, а только сам клей. Поскольку клей имеет высокую влажность, он нагревается сильнее и быстрее, чем окружающая его древесина (селективное нагревание).

Производственные предприятия все чаще ориентируются на готовые автоматические комплексы, которые предусматривают непрерывный технологический поток с автоматическими устройствами загрузки-разгрузки, сортировки, сканированием дефектов, операционным контролем. Такие комплексы представляют собой полностью автоматизированные линии, работающие в безостановочном режиме, без перерывов на переналадку оборудования. Не требуется промежуточное хранение материалов и заготовок.

Современное производство мебельного щита ориентируются на использование автоматизированных и компьютерных технологии, позволяющих не только оптимально обрабатывать древесный материал, но и повысить качество готовой продукции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рудак, О.Г. (2021). «Исследование параметров технологии начального прогрева древесины в ненасыщенной среде», Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2(246), С. 268-276.



## **КОМПОЗИЦИОННЫЕ ДРЕВЕСНЫЕ ПЛАСТИКИ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ОТХОДАМИ ОБУВНЫХ КАРТОНОВ**

Любые отходы по своему химическому составу, агрегатному состоянию и физическим параметрам являются потенциальным возобновляемым ресурсом. Данные показатели могут служить основой для новой классификации и экспертизы отходов как сырья для изготовления продукции с использованием традиционных или вновь создаваемых современных технологий переработке отходов.

Актуальность в сфере обращения с отходами обусловлена двумя причинами: во-первых, отходы, как правило, содержат полезные вещества и материалы, неэффективное использование которых означает их потерю для экономики; во-вторых, они загрязняют окружающую природную среду.

Переработка отходов позволит снизить количество первичных сырьевых ресурсов, расширить ассортимент выпускаемой продукции, снизить материалоемкость продукции, уменьшить количество отходов, подлежащих захоронению и обезвреживанию, что, в свою очередь, сократит отрицательную нагрузку на окружающую среду, позволит перевести предприятие в разряд ресурсосберегающих, мало- и безотходных [1].

На основе разработанных дополнительных признаков классификации производственных отходов деревообрабатывающих предприятий и предприятий легкой промышленности (физическая структура и химический состав, отношение к температуре, влаге и др.) [2] ОАО «Витебскдрев» и УО «ВГТУ» ведут работы по изготовлению из отходов конструкционных и теплозвукоизоляционных материалы для строительства.

Разработана технология по совместному использованию древесных отходов и отходов кожевенных картонов, образующихся на обувных предприятиях.

Состав композиции для изготовления композиционных древесных пластиков – волокно отходов производства МДФ + измельченный обувной картон; клей КФС; отвердитель; карбамид (для снижения токсичности изделий). Образцы изготавливались методом термоформования с использованием горячего гидравлического пресса. Регулировалось давление, температура и время прессования.

Использованное сырье для производства композитных плит приведено на рис. 1.



**Рисунок 1 – Использованное сырье для производства композитных плит (слева направо: обувной картон марки СЦМ; обувной картон марки З-1; кожкартон марки КПЖ; древесное волокно)**

Технологический процесс изготовления композиционных материалов из древесных отходов с добавлением отходов обувных картонов состоит из следующих технологических операций:

- 1) подготовка отходов;
- 2) приготовление связующего;
- 3) формирование композиционной смеси;
- 4) горячее прессование;
- 5) послепрессовая обработка (охлаждение, обрезка);
- 6) упаковка.

В ходе исследования возможности изготовления композиционных материалов из отходов получены материалы с разными массовыми долями отходов. В качестве связующего вещества использовали фенольную смолу. Менялись также технологические параметры прессования – давление, температура и длительность прессования. Получено около 30 образцов композиционных материалов с разными физико-механическими свойствами.

Анализ результатов испытаний и внешнего осмотра полученных образцов показал, что изменения температурного режима, давления и его время воздействия, по-разному влияют на плотность. Высокая температура отрицательно влияет на внешний вид плит состоящих из картонов с высоким наличием кожевенных волокон – появляются прогоревшие черные пятна. Волокна перегреваются и начинают плавиться это плохо влияет на товарный вид, а также на прочностные характеристики изделия.

Плиты, состоящие из картонов с высоким содержанием кожевенных волокон наиболее хрупки, это накладывает определенные

трудности при транспортировке, а также при непосредственном использовании потребителем. Эта проблема решена путем введения дополнительных технологических процессов.

В дальнейшем планируется изучение влияния каждого параметра на качественные характеристики готового изделия, такие как: прочность на изгиб, прочность на разрыв, класс эмиссии формальдегида и пр. Однако уже сейчас можно признать, что отходы обувных картонов пригодны в качестве сырьевой добавки материалов строительного назначения.

Исследования рынка использования полученных материалов показал, что листовые материалы, полученные из отходов обувного картона и древесного волокна, могут использоваться в строительстве в качестве подкладки для настила полов из ламинированного покрытия и в качестве перегородок в помещениях с отделкой декоративными обоями или покраской, где не происходит долговременного контакта материала с влагой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Волкович А. Н., Грошев И. М., Дойлин Ю. В., Кожемяко А. А., Дубоделова Е. В. Анализ развития деревообрабатывающей отрасли Республики Беларусь // Древесные плиты и фанера : теория и практика: материалы XXIV Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 2021. С. 14-16.

2. Грошев И. М., Соколова Е. М., Зимина Е. Л. Товароведная экспертиза и классификация отходов легкой и деревообрабатывающей промышленности и направления их использования в Республике Беларусь // Новое в технике и технологии в текстильной и легкой промышленности: материалы докладов Международной научно-технической конференции. Витебск, 2015. С. 337-339.

**СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА  
ТРЕНИЯ В ВОЗДУХОВОДАХ СИСТЕМ АСПИРАЦИИ**

При проектировании систем аспирации производится расчет потерь давления в воздуховодах с учетом коэффициента сопротивления трения воздушного потока о внутренние стенки трубы на основе методик и формул, которые разрабатывали и совершенствовали ученые (Блазиус, Никурадзе, Рейнольдс, Блесс, Альтшуль и другие) на протяжении десятков лет.

В отраслевых проектных организациях и учебных заведениях нашей страны для определения коэффициента потерь давления в прямых стальных тонкостенных круглых фальцованных прямошовных воздуховодах систем аспирации измельченной древесины возможны разные подходы и нередко еще используется простая формула Блесса [1].

$$\lambda = 0,0125 + \frac{0,0011}{d}, \quad (1)$$

на основе ее вычисляется безразмерный коэффициент потерь давления на одном метре длины прямой трубы определенного материала и диаметра без учета скорости воздушного потока

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{0,0125 + \frac{0,0011}{d}}{d}, \quad (2)$$

где  $d$  – внутренний диаметр трубы, м.

Расчет потерь давления в круглых трубах постоянного сечения осуществляется по формуле Дарси-Вейсбаха

$$H = \frac{\lambda}{d} l \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – безразмерный опытный или вычисляемый коэффициент гидравлического трения воздушного потока в трубе;  $l$  – длина трубы, м;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – скорость воздушного потока, м/с.

Коэффициент  $\lambda/d$  зависит от шероховатости внутренних стенок воздуховодов, которая может изменяться по отношению к исходному состоянию материала труб в процессе эксплуатации (шлифование транспортируемым материалом, коррозия в периоды хранения или отключения системы аспирации при высокой влажности среды и другие

виды воздействий).

На основе результатов анализа информации о проведенных исследованиях [1] были сделаны выводы о возможности применения формулы Блесса для расчета  $\lambda/d$  с незначительной погрешностью в пределах скоростей потока 15–20 м/с и, с допустимыми отклонениями значений коэффициента трения, в более широком диапазоне – 15–25 м/с. В качестве условия применимости формулы (1) были принята средняя абсолютная шероховатость внутренних стенок труб –  $D = 0,1$  мм, наличия продольных и поперечных фальце тонкостенных стальных труб.

Определенный интерес представляет сопоставление значений коэффициентов сопротивления трения воздушных потоков в прямых стальных тонкостенных трубах при использовании различных известных и распространенных подходов в области теории гидравлики.

При определении коэффициента трения воздушного потока о стенки труб  $\lambda$  с учетом числа Рейнольдса скорости и некоторых других параметров условиях турбулентности используется формула [2]

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{K_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0.25}, \quad (4)$$

где  $K_s$  – абсолютная эквивалентная шероховатость внутренней поверхности трубы, для воздуховодов из оцинкованной тонколистовой стали при стандартной плотности воздуха  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup> принимается  $K_s = 0,1$  мм;  $Re$  – число Рейнольдса.

Расчет числа Рейнольдса осуществляется по формуле [2, 3, 4, 5]

$$Re = \frac{vd \cdot 10^6}{14,9}, \quad (5)$$

где  $v$  – средняя скорость воздушного потока в трубе, м/с.

Для определения коэффициента трения воздушного потока  $\lambda$  при применении круглых труб с различной степенью шероховатости может быть использована формула [1] Прандтля-Никурадзе

$$\lambda = \frac{1}{2 \lg \left( \frac{3,7}{\Delta} \right)^2}, \quad (6)$$

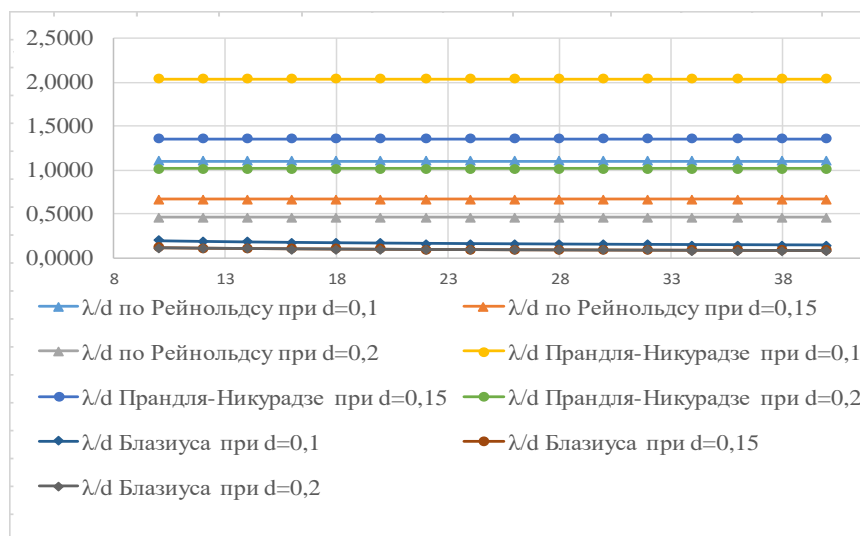
где  $D$  – шероховатость внутренних стенок воздуховодов, мм.

При  $Re < 10^5$  (ста тысяч) может быть применена формула Блазиуса

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (7)$$

Для указанных вариантов рассмотрена степень различия результатов расчета  $\lambda/d$  в зависимости от применяемых формул для трех

диаметров труб  $d$  и определенного диапазона скоростей воздушных потоков. Результаты анализа отражены на графике, рис. 1.



**Рисунок 1 – Отношение  $\lambda/d$  вычисленное по различным формулам**

В зависимости от формул для расчета отношения  $\lambda/d$  результаты расчетов могут отличаться в несколько раз при одинаковых условиях, что требует проведения дополнительных аналитических исследований. Технический регламент установившейся практики [5] предлагает использовать коэффициент потерь давления на 1 метре воздуховода  $1/d$  с учетом числа Рейнольдса и скорости воздушного потока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Святков, С.Н. Пневмотранспорт измельченной древесины / С.Н. Святков. – М.: Лесная пром-сть, 1966. – 320 с.
2. Александров, А.Н. Пневмотранспорт и пылеулавливающие сооружения на деревообрабатывающих предприятиях / А.Н. Александров, Г.Ф. Козориз. – М.: Лесная пром-сть, 1988. – 248 с.
3. Воскресенский, В.Е. Системы пневмотранспорта, пылеулавливания и вентиляции на деревообрабатывающих предприятиях. Теория и практика. Т. 1. Аспирационные и транспортные пневмосистемы / В. Е. Воскресенский. – СПб.: Политехника, 2008. – 430 с.
4. Lachenmayr, G. Energy technology for wood industry / G. Lachenmayr, H. Kreimes. – Rosenheim: Eigenverlag Prof. Dr. G. Lachenmayr, 2009. – 471 p.
5. ТКП 510–2014. Системы пневмотранспорта и аспирации в деревообрабатывающем производстве, включая производство древесных топливных гранул (пеллет) и древесных брикетов. Нормы проектирования / С.П.Трофимов, П.И. Дячек. – Минск: концерн «Беллесбум-пром», 2014 – 78 с.

## РЕТРОДРЕВЕСИНА В ДЕРЕВЯННОМ ДОМОСТРОЕНИИ

Древесина используется в домостроении с незапамятных времен, как довольно дешевый, разнообразный, легкий в обработке, возобновляемый и доступный в заготовке материал. В период индустриализации и развития производств он был значительно потеснен на наших территориях применением недревесных материалов. Однако в последнее время растет интерес к использованию экологически безопасных в производстве, потреблении и утилизации материалов, возобновляемых природой [1], а также к обеспечению разнообразных архитектурно-строительных и декоративных решений.

Принципы применения «зеленых» технологий и материалов становятся все более актуальными. Во многих странах внедряются соответствующие стандарты международных систем сертификации зданий на предмет их экологической эффективности, например, уже часто используемые межгосударственные BREEAM и LEED.

Древесина может быть применена в качестве основного конструкционного и отделочного материала при строительстве усадебных домов и коттеджей, многоквартирных малоэтажных, многоэтажных и повышенной этажности жилых домов, общественных и других зданий различного назначения, церковных и эксклюзивных построек, мобильных и модульных объектов. В странах, обладающих лесными ресурсами, нередко принимаются специальные постановления о стимулировании применения древесины в строительстве [1].

Объектом рассмотрения является старая массивная цельная древесина (далее – ретродревесина), присутствующая в деревянных домах, построенных много лет назад [2]. На протяжении длительного периода она была основным материалом домостроения (бревна сруба, тесанный и пиленый брус, доски и колотая дранка), который использовался в конструкциях стен, перегородок, перекрытий и кровли, покрытий полов, в облицовке и декоре, в элементах каркаса (балки, стойки-колонны), в плотницких и столярно-строительных изделиях (детали окон, дверей, ворот, лестниц и др.).

В технологии строительства и конструкции современных деревянных домов появилось большое разнообразие [3]: каркасная; каркасно-панельная; панельная на основе импортных материалов CLT (Cross-Laminated Timber) и МНМ (Massiv-Holz-Mauer); с применением бревенчатого сруба, оцилиндрованного бревна, пиленого и клееного бруса, чурки со связующим в стенах (так называемого «чуркобетона»).

Практический интерес представляет также применение стеновых панелей любой толщины с торцовым наполнителем среднего слоя [4, 5].

На рис. 1 приведены примеры возможного использования ретродревесины в стеновых панелях с торцовым наполнителем среднего слоя, многослойных досчатых панелей МНМ и стен из «чуркобетона».



**Рисунок 1 – Примеры использования ретродревесины: торцовой шашки в среднем слое, досок в строительных панелях МНМ «чуркобетона» в стене**

В новом деревянном домостроении могут быть использованы бревна сруба, брус и доски из старых строений, разбираемых по причине непригодности или не востребуемости к продолжению эксплуатации. Выдержанная на протяжении многих лет, сухая и сохранившаяся в хорошем состоянии ретродревесина формоустойчива, может иметь достаточно высокие физико-механические показатели и привлекательно выглядеть [2]. Повторное использование этого материала способствует решению задач охраны окружающей среды и сохранения лесных ресурсов.

Проблемы, тенденции и перспективы развития деревянного домостроения активно обсуждаются на конференциях и в публикациях в некоторых зарубежных странах, так в статьях [1–3] приводятся анализ ситуации и прогнозы развития.

Старая древесина – строительный материал для стен, перегородок и отделки интерьера помещений. В Западной Европе и США имеется предложение на рынке старой древесины под названием *altholz* (нем.) и *reclaimed wood* (англ.), а также услуг по ее механической обработке и использованию в строительстве. Применение этого материала за рубежом соответствует требованиям «зеленых» стандартов.

В некоторых странах с длительным периодом и масштабами в истории деревянного домостроения появились рынки предложений на сбыт ее (например, США, северные территории ЕС и России).

В России появились фирмы, осуществляющие разборку старых строений, заготовку, обработку и продажу ретродревесины с оплатой владельцу сносимых домов [5, 6]. К заготавливаемому материалу предъявляется ряд требований: порода, размеры, физическое состоя-



ние, внешний вид и цвет, отсутствие металла и краски, местоположение в строении (например, облученная солнцем и срок предшествовавшей эксплуатации (50 или более лет). В Интернете можно встретить предложения о продаже старой российской древесины в Беларуси [7], местный ресурс такого материала весьма ограничен.

Ретродревесина в современном домостроении подчас представляет собой антиквариат. Ее могут характеризовать: изменения и цвета, ходы древоточца, трещины, неровности поверхности от пиления или ручной обработки, которые весьма привлекательны. Ведь не случайно, что иногда в новостройках древесину подвергают искусственному старению, но они все равно становятся новоделом.

В далекие времена дома строили древесины сезонной заготовки, естественной сушки и длительной выдержки, при этом материал не деформировался, а позже стабилизация свойств продолжалась.

На рис. 2 и 3 приведены примеры старых домостроений, потенциальных источников заготовки ретродревесины при их демонтаже.



**Рисунок 2 – Заброшенные крестьянские дома постройки 19 века в процессе обследования**



**Рисунок 3 – Процесс сбора образцов ретродревесины в домах постройки 19 века**

При заготовке ретродревесины и ее осмотре, в случае необходимости, должно быть проведено фитосанитарное обеззараживание материала, к примеру, согласно требований международного стандарта ISPM 15 (МСФМ №15), [8]. Он предусматривает термообработку с нагревом до 56°C и тридцатиминутной выдержкой в сушильной камере, альтернативой применению экологически небезопасных антисептиков. В некоторых случаях применения старой древесины становится

актуальной оценки ее физико-механических показателей.

Использование ретродревесины от разборки старых строений требует изучения источников информации о результатах ранее выполненных работ в области древесиноведения, материаловедения, археологии, практического опыта и проведения специальных научных лабораторных исследований в рассматриваемой предметной области с освоением и использованием различных методик и технических средств [9, 10].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Деревянное домостроение сегодня и завтра // «ЛесПромИнформ». №7 (161). – 2021. – С. 76–79.
2. Лукичѳв, А. Как заработать на старой древесине // «ЛесПромИнформ» №6 (128), 2017 г. – С. 92–95.
3. Первый информационно-аналитический портал о частном домостроении [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.zaggo.ru/article/materialy/>. – Дата доступа – 07.12.2022.
4. Кузьмич, Н. С., Трофимов С. П. Трехслойные строительные щиты с наполнителем из неликвидной древесины / Н.С. Кузьмич, С.П.Трофимов. – Труды БГТУ. Серия II. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. Выпуск XII. – 2004. – С. 185–187.
5. Щитовое изделие: пат. на полезную модель 5046 Респ. Беларусь, МПК (2006) E04C 2/10 B27M3/08 / Н.С. Кузьмич, С.П. Трофимов; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. – ВУ № 5046 U 2009.02.28; заявл. 17.04.08; опубл. // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 1 (66).
6. Ретро Доска – Покупаем старую амбарную доску по всей России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://retrodoska.ru/>. – Дата доступа: 07.12.2022.
7. Амбарная доска в Беларуси [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://flagma.by/products/>. – Дата доступа: 07.12.2022.
8. МСФМ 15, 2018-05. Регулирование древесного упаковочного материала в международной торговле. Рим, МККЗР, ФАО.
9. High, K.E. A review of analytical methods for assessing preservation in waterlogged archaeological wood and their application in practice / K.E. High, K.E.H. Penkman. – Heritage Science 2020; 8: 83. – 33 p.
10. Никитина, Т.А. Технический ресурс ретродревесины хвойных пород в элементах деревянных конструкций: автореф. дис. канд. техн. наук спец. 05.21.05 / Т.А.Никитина / САФУ. – Архангельск, 2021. – 20 с.

## СЕГРЕГАЦИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СЛОЯ В ОТСУТСТВИЕ ВИБРАЦИИ

Сегрегация (расслоение) – это позонное изменение гранулометрического состава сыпучих материалов в объеме первоначально однородной смеси, из-за отдельных перемещений частиц крупной и мелкой фракций в процессах накопления, хранения, формирования слоя или транспортирования смеси. Она происходит под действием сил гравитации, динамики падения, давления прижима сверху и/или динамических воздействий, в результате которых частицы разделяются в слоях из-за различий их размеров, формы, шероховатости, плотности и ряда других показателей. Процесс сегрегации твердых частиц связан с явлениями отсеивания, псевдооживления и пыления.

Необходимость учета явления сегрегации материала может возникать в некоторых технологических процессах, осуществлении бункеровки, обеспечении нормальной работы гравитационных желобов, конвейерного механического и пневматического транспорта, загрузки и разгрузки транспортных средств. Знание поведения частиц ИД позволяет совершенствовать конструкцию и режимы работы оборудования, предотвращать либо использовать явление разделения материала для обеспечения или поддержания качества продукции.

При рассмотрении сегрегации выделяют случаи: отсева (из стороны в сторону механизма – крупные частицы скатываются к периферии) и флюидизации (мелкие частицы в аэрированном состоянии скапливаются в верхней части слоя ИД, в то время как крупные частицы деаэрации быстро оседают на дно слоя сыпучего материала) [1]

Тенденции сегрегации просеивания и псевдооживления могут быть исследованы и измерены в ходе лабораторных испытаний. Материал, подвергаемый испытаниям на сегрегацию, анализируется на распределение частиц по размерам. Результаты испытаний материала на сегрегацию после их обработки могут быть представлены в графически (рис. 1) и табличном виде.



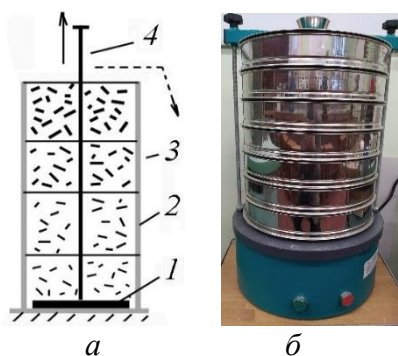
Рисунок 1 – Пример, фоторегистрации сегрегации сыпучего материала в куче [1]

Реологические свойства ИД необходимо учитывать при проектировании бункеров, питателей, гравитационных спусков, конвейеров и погрузочно-разгрузочного оборудования, а также при выявлении причин остановки потока, снижения скорости и неравномерности движения сыпучего материала вследствие явления сегрегации.

ИД может быть разнообразной по виду и своим характеристикам (порода, влажность, гранулометрический состав и форма частиц и др.). Если частицы и объемные характеристики их слоя и потока не изучены или выводы по результатам исследований недостаточно обоснованы могут возникать проблемы функционирования некоторых технологических процессов, производственных объектов и оборудования. Например, это часто касается истечения груза из бункера, когда высыпается некоторая часть материала, а другая висит [2–4]. Это своего рода поток в потоке.

Характеристики текучести сыпучего материала и явлений сегрегации касаются также работы средств конвейерного механического [5–8] и пневматического трубопроводного транспорта. С ними могут быть связаны нежелательные явления: ограничение пропускной способности, отложения слоя материала или закупорка трубопровода, измельчение и обеспечение качества частиц в слое; износ фасонных элементов трассы.

В порядке отработки методики и средств технического обеспечения опытных работ была изготовлена простая установка (рис. 2) в виде вертикального стального цилиндра (высота 800, диаметр 220 мм) с поршнем для пошагового подъема и съема слоя ИД.



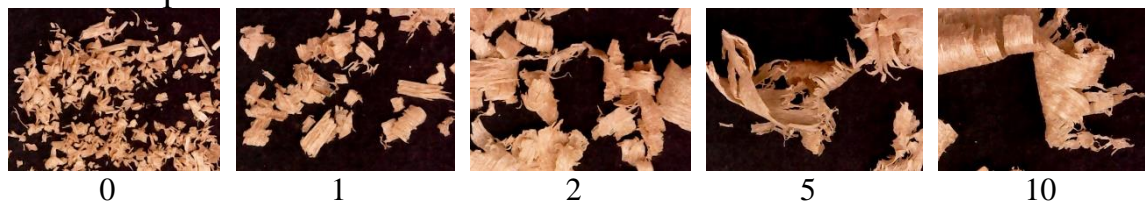
*а* – схема и вид установки для формирования слоя ИД  
(1 – поршень, 2 – цилиндр, 3 – слой материала, 4 – шток);  
*б* – ситовый анализатор А 30 ООО «ВИБРОТЕХНИК»

### Рисунок 2 – Лабораторное оборудование

На начальном этапе проведения исследований сегрегации ИД использованы отходы фрезерования сухой древесины массива сосны и мягких лиственных пород (стружка с примесью мелких частиц, отно-

сительная влажность около 6%), полученные с предприятия.

На рис. 3 приведены микрофотографии разных фракций опытного материала.



**Рисунок 3 – Микрофотографии стружки бука разных фракций, осажденные на ситах анализатора, соответственно: 0; 1; 2; 5; 10 мм**

Опытные работы предусматривали медленное заполнение цилиндра (рис. 2а) без уплотнения сыпучего материала прижимом сверху и вибрационных воздействий, т.е. с формированием слоя ИД практически только при наличии сил гравитации. После заполнения цилиндра испытуемый материал поднимался поршнем с последующим съемом порций с четырех уровней слоя ИД (рис. 2а и 3).



**Рисунок 4 – Фотоиллюстрация результатов опыта распределения ИД в слое**

Гранулометрический состав ИД определялся для каждой порции материала с использованием ситового анализатора (рис. 2б) в ходе неоднократного просеивания материала, оставшегося на каждом из сит и взвешивания с применением электронных лабораторных весов «WPS 510/C/2» (Radwag). Фрагмент результата опыта по формированию слоя и сегрегации сыпучего материала в цилиндре приведен в таблице

**Таблица – Фрагмент результатов опыта формирования слоя ИД**

Уровень слоя	Масса ИД на ситах № (размер ячеек, мм), г					Сумма, г
	1(10)	2(5)	3(2)	4(1)	Поддон	
Верхний (2)	0,315	14	53	43	158	268,315
Нижний (1)	0,126	7	51	42	104	197,127

Результаты проведенных опытных работ визуально и численно подтверждают наличие явления сегрегации ид, даже в отсутствие ди-

намических воздействий встряхивания. Однако полученные данные являются лишь предварительными на стадии отработки методики и технических средств экспериментов.

Актуальность темы очевидна, что подтверждается системностью, периодичностью выполнения работ и появления соответствующих новых публикаций в разных странах, а также деятельностью специализированных [1], других организаций и высших учебных заведений. Необходимо продолжение исследований с увеличением объема опытного материала и более детальным учетом факторов воздействия на процесс сегрегации, с получением рекомендаций для практического использования в проектной, конструкторской деятельности и на производстве.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сайт JENIKE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jenike.com/bulkmaterialtesting/particle-prop>. Состояние на 28.12.2016 г.

2. Куди, А. Н. Сегрегация и миграция в гравитационных потоках зернистых материалов: механизмы, интенсификация и технологии : монография / А.Н.Куди, В.Н.Долгунин. – Тамбов: Изд. центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. – 136 с.

3. Бачериков, И.В. Совершенствование функционирования закрытых складов древесных сыпучих материалов. Автореф. дисс. к.т.н. – СПб.: ГЛТУ, 2017. – 20 с.

4. Лозовецкий, В.В. Закономерности распределения структурных и физико-механических характеристик засыпок измельченной древесины в бункерах при гравитационном движении / В.В.Лозовецкий, А.А.Шадрин, В.В.Лебедев. – Лесотехнический журнал, Том 6, № 3 (23). – Воронеж: ВГЛТУ, 2016. – С. 100–108.

5. Василевский, М.В. Транспортировка и осаждение частиц в технологиях переработки дисперсных материалов: монография / М.В.Василевский, В.И.Романдин, В.Г.Зыков. – Томск: Томский политехнич. университет, 2013. – 288 с.

6. Захаров, А.Ю. Метод экспериментального исследования сегрегации сыпучих грузов на ленточном конвейере / А.Ю. Захаров, Н.В. Ерофеева // Вестник КузГТУ. – 2012. – №5. – С. 51–53.]

7. Захаров, А.Ю. Исследование интенсивности формирования прослойки из мелкой фракции между крупным куском и конвейерной лентой под действием устройства для сегрегации груза / А.Ю.Захаров, Н.В.Ерофеева // Вестник КузГТУ. – 2010 – №1. – С. 134–136.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ АЗОТА В ТВЕРДОМ БИОТОПЛИВЕ

В настоящее время широко используется в топливных целях биомасса, к которой согласно ЭкоНиП 17.01.06-001 относятся: щепка топливная, отходы лесозаготовок и деревообработки, побочные продукты лесной и деревообрабатывающей промышленности, отходы сельскохозяйственной деятельности и прочие виды природного топлива, побочные продукты сельскохозяйственного производства и пищевой промышленности, биотопливо, древесный уголь, древесные гранулы, пеллеты, брикеты, сульфатные и сульфитные щелока целлюлозно-бумажной промышленности.

В Республике Беларусь для обеспечения экологической безопасности при сжигании биомассы в котельном оборудовании различной номинальной мощности, установлены нормы выбросов по азотсодержащим соединениям в виде оксидов азота, что требует определения общей доли элементарного азота в исходной биомассе. Наиболее экспортоориентированным видом биомассы, в связи с ее высокой плотностью и транспортной прочностью, являются древесные гранулы (пеллеты) и брикеты.

Однако, четких рекомендаций по выбору методики для определения содержания азота в древесных гранулах (пеллетах) и брикетах нет. Действующий в ЕАЭС ГОСТ 32985-2014 [1], опирающийся на европейские нормы EN 15104:2011 [2], не содержит ссылочных стандартов на методики определения содержания азота, а дает лишь общие рекомендации к ним. В ГОСТ 32985-2014 отмечено, что при определении азота используемые химические реагенты должны быть сухими и иметь высокую степень чистоты ( $> 99,9\%$ ), а также обладать стабильностью по химическому составу и свойствам. Отмечается также, что должны применяться средства измерения, зарегистрированные в Государственных реестрах средств измерений, допущенных к применению в стране, а также оборудование с установленными метрологическими характеристиками.

Определение содержания атомарного азота в твердом биотопливе в виде древесных гранул определяли по ГОСТ 13496.4–2019 [3], в связи с тем, что материал характеризуется растительным происхождением, что прописано в области применения данной стандартной мето-

дики. Навеску 2,0–2,1 г исследуемого воздушно-сухого материала взвешивали в маленькой пробирке (0,5×3 см), которую затем вставляли в резиновую трубку соответствующего диаметра и переносили в колбу Кьельдаля, вводя пробирку почти до основания перевернутой вверх дном колбы, затем ее резко переворачивали для достижения максимального перемещения массы образца в систему. По разности масс пробирки с навеской и пустой пробирки, после ее переноса в колбу Кьельдаля, определяли массу навески биотоплива для анализа:

$$m_n = m_1 - m_{пр}, \quad (1)$$

где  $m_n$  – масса навески, г;  $m_1$  – масса пробирки с навеской, г;  $m_{пр}$  – масса пробирки, г.

В колбу Кьельдаля добавляли две таблетки смешанного катализатора InKjel (состав таблетки: 5 г  $K_2SO_4$ ; 0,15 г  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ; 0,15 г  $TiO_2$ ) и приливали цилиндром 15 мл минерализатора в виде концентрированной  $H_2SO_4$ . Перемешивали содержимое колбы и помещали ее в гнездо штатива установки InKjel 625 в вытяжном шкафу. Колбу постепенно нагревали, регулируя прогрев в целях контроля пенообразования на начальном этапе процесса мокрого озоления. После прекращения вспенивания, нагрев вели до слабого непрерывного кипения высокотемпературной реакционной смеси.

Кипятили содержимое колбы Кьельдаля до исчезновения черной массы на ее стенке и приобретения смесью светло-голубого цвета, свидетельствующего о полном протекании процесса мокрого озоления. Проводили четыре параллельных измерения и один контрольный опыт, отличающийся отсутствием биотоплива в процессе мокрого озоления.

Для отгонки образовавшегося аммиака остывшую колбу с закристаллизованным минерализатором помещали в дистиллятор InKjel M. Дистиллятором автоматически дозировался избыток раствора NaOH концентрацией 33%<sub>масс.</sub>. Отгоняемый острым паром аммиак собирали в коническую колбу объемом 250 мл с предварительно помещенными в нее 50 мл раствора борной кислоты концентрацией 4%<sub>масс.</sub> и 5 каплями индикатора Таширо. Образовавшуюся при отгонке соль титровали 0,1 н раствором серной кислоты.

Расчет содержания атомарного азота в пересчете на абсолютно сухую массу  $w_{N(i)}$  проводили по формуле:

$$w_{N(i)} = \frac{0,0014 \cdot (V_i - V_0) \cdot K}{m_n \cdot K_{сух.}} \quad (2)$$

где  $V_i$  – объем титранта, пошедший на титрование испытуемого  $i$ -го



образца, мл;  $V_0$  – объем титранта, пошедший на титрование холостого образца, мл;  $K = 1$  – поправка к титру (раствор фиксанала),  $K_{\text{сух.}}$  – коэффициент сухости образца.

Для определения коэффициента сухости использовали рекомендации ГОСТ 24816–81 [4]. При определении влажности образцов по методу высушивания до постоянной массы рассчитали усредненный коэффициент сухости  $K_{\text{сух.}} = 0,945$ .

За результат принимали среднее арифметическое всех измерений.

Данный результат может быть применен для расчета содержания азотсодержащих соединений (при условии, что состав этих соединений известен) по формуле:

$$W = K_c \cdot w_{N(\text{ср.})}, \quad (3)$$

где  $K_c$  – коэффициент пересчета содержания азота на азотсодержащие соединения.

Метод был опробован на типичных образцах древесных гранул, в результате испытания которых среднее содержание атомарного азота в пересчете на абсолютно сухую массу  $w_{N(i)}$  составило более 0,1 %. Это обусловило необходимость оценки приемлемости и повторяемости, которую проводили в соответствии с ГОСТ ИСО 5725.6–2003 [5].

Установлено, что расширенная неопределенность составила менее 3%, что позволяет рекомендовать ГОСТ 13496.4–2019 [3] для определения атомарного азота в древесных гранулах различных марок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 32985-2014 Биотопливо твердое. Определение углерода, водорода и азота инструментальными методами. Стандартиформ. М. – 2014. 12 с.
2. EN 15104:2011 Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen - Instrumental methods. European committee for standardization. Brusel. – 2011. 13 p. [English]
3. ГОСТ 13496.4–2019 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина (с Поправками). Стандартиформ. М. – 2019. 23 с.
4. ГОСТ 24816–81 Материалы строительные. Метод определения сорбционной влажности. Изд-во стандартов. М. – 1981. 4 с.
5. ГОСТ ИСО 5725.6–2003 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике. Стандартиформ. М. – 2003. 48 с.

## **ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ ВОСТРЕБОВАННОГО СОРБЕНТА, ПУТЕМ УЛУЧШЕНИЯ СТРУКТУРЫ ДРЕВЕСНОГО УГЛЯ**

Вопрос переработки отходов деревообработки в продукцию с высокой добавленной стоимостью сейчас стоит очень остро. Это связано и с увеличением ценности древесины как материала в нашем менталитете, и с задачей импортозамещения в РБ, а также осуществлением безсанкционного экспорта готовой продукции из древесины на запад. Санкционный запрет на импорт в ЕС лесоматериалов 44 товарной группы ТН ВЭД ЕАЭС оказал влияние на производство таких товаров деревообработки, как: древесина, изделия из дерева и древесный уголь.

Современная промышленность, а также медицина не может существовать без сорбентов, помогающих очищать газы и жидкости, поглощая вредные компоненты из них. В качестве сорбентов самым универсальным, химически-инертным и условно обратимым является активированный уголь. В отличие от кремниевых солей, соединений алюминия или глинистых минералов, это самый доступный вид сорбентов. Активированный уголь имеет большую внутреннюю поверхность (500–1500 м<sup>2</sup>/г) за счет увеличенного количества пор в структуре, что отличает его от обыкновенного угля, который не способен также эффективно очищать жидкости и газы. Если рассматривать различное сырье для его производства, то наиболее привлекательным в нашей стране будет именно древесина, т.к. каменный уголь, кокосовая и ореховая скорлупа, а также косточки плодовых деревьев менее доступны для использования. Кроме того, каменный уголь содержит побочные продукты, содержание которых не желательно в пищевой промышленности и медицине. Поэтому именно древесина должна стать основным сырьем для производства безопасного активированного угля. Активированный уголь является востребованным сорбентом в производстве медпрепаратов, продуктов питания (напитки), косметики, лаков и красок, топлива и др.

По данным анализа потребления активированного угля в соседней Российской Федерации на 2019 г., химическая промышленность использует 32,6% всего потребляемого объема, табачная промышленность – 12,5%, производство бытовых фильтров для очистки воды – 11,3%, нефтепереработка – 7,5%, золотодобыча – 7%, обработка сточ-

ных вод – 5,8 %, фармацевтическая промышленность – 5 %, пищевая промышленность – 3,1 %, производство промышленных фильтров – 0,2 %, алкогольная промышленность – 0,1 %, прочее – 14,9 %.

Учитывая значительные объемы кусковых отходов, образуемых при механической переработке древесины, гораздо целесообразней не измельчать их в щепу или более мелкие частицы, а производить кусковой уголь-сырец, который в дальнейшем активировать до сорбента. Стоимость тонны готового активированного угля находится в пределах 1 400–2 000 долларов США.

В процессе производства активированного угля количество древесного вещества в объеме сильно снижается, что связано с окислением химических компонентов древесины с превращением в газообразные продукты при горении. Чтобы получить плотный и устойчивый к механическим воздействиям уголь требуется достаточно плотная исходная макроструктура. Такой структурой могут похвастаться твердые и плотные породы древесины. Самой плотной из произрастающих в наших условиях породой является граб. При этом стоимость дров граба и березы сопоставима, а стоимость дров из дуба и ясеня несколько выше. Поэтому именно дровяную древесину граба и березы выгодно использовать для получения активированного угля.

Отечественной промышленностью из древесины производят активированный уголь марок: БАУ-А (для очистки спиртов), БАУ-Ац (для ацетиленовых баллонов), БАУ-МФ (для водных фильтров), а также ДАК (для очистки парового конденсата). Самые мягкие требования по адсорбционной способности к углю ДАК (адсорбционная активность по йоду не менее 30%). Самая большая пористость и прочность требуется для угля БАУ-Ац (суммарный объем пор не менее 1,7 см<sup>3</sup>/г, прочность не менее 60%).

Активированный уголь выпускают в следующих формах: порошок, гранулы, ткань, экструдированный, формованный.

По фракционному составу активированный уголь или изделия из него, такие как гранулы не превышает линейных размеров в 5 мм. Именно такая крупность способствует технологическому использованию активированного угля в фильтрах – равномерному слою фильтрующего барьера.

В процессе переработки древесины в активированный уголь важной стадией является карбонизация, т.е. процесс углежжения. В результате последнего происходит превращение древесины в уголь. Но получаемый при сжигании не выше 500 °С уголь не имеет достаточной пористости и не может адсорбировать малые и средние молекулы загрязнителей. После карбонизации уголь подвергается воздей-

ствию активаторов, в роли которых может выступать как перегретый пар с температурой 700–1000 °С, так и химические вещества с последующим нагревом среды. В результате в объеме исходного угля появляются дополнительные поры микро-, мезо- и макро-размеров. Появление разветвленной системы пустот (пор) в угле увеличивает площадь внутренней поверхности частиц, что способствует накапливанию и удержанию внутри материала большого количества вредных примесей от которых требуется очистка. Реактивация угля также возможна при сжигании органических примесей, застрявших в пористой структуре активированного угля.

Традиционный способ производства активированного угля из древесного сырья сводится к дроблению древесины до размеров менее 5 мм, карбонизации частиц при температуре до 400 °С, где для уменьшения потерь массы сырья (до 85 %) следует создать анаэробные условия. После самого грязного процесса карбонизации, т. к. идет удаление основных органических веществ из древесины, приступают к активации угля при температуре 800–850 °С в парогазовой среде или среде оксида углерода. После этого следует охлаждение, дополнительная обработка, сортировка и упаковка активированного угля. Также возможно импрегнирование специальными составами для дальнейшей агломерации в экструдере или прессах различной конструкции. Химическая активация угля наиболее технологичный процесс, позволяющий моделировать свойства конечного продукта, однако до сих пор для этого применяют достаточно агрессивные составы: хлорид цинка, серная кислота, сульфиды щелочи.

Учитывая основной недостаток традиционной технологии, решено попробовать уменьшить температуру активации углей. Это позволит увеличить их выход из сырья и сэкономить на энергии, затрачиваемой на высокотемпературный нагрев реакторов и реторт. Стоит обратиться к химико-физическим способам активации, т.е. использовать катализаторы в виде кислот, но рассмотреть менее агрессивный их класс, например, пищевую добавку E330 – лимонную кислоту, которая позволит активировать карбонизированный уголь при меньших температурах, не нарушая экологии сорбента. На основании предварительных теоретических исследований, предполагается, что благодаря такой предварительной обработке, активация пройдет в условиях температур, не превышающих 600 °С. Планируется получить необходимые лабораторные образцы и проверить их на адсорбционную способность по йоду, оценить их пористость, насыпную плотность, массовую долю влаги и прочность.

## СВОЙСТВА НАПОЛНЕННЫХ КОРЬЕВЫХ ПЛИТ НА МИНЕРАЛЬНОМ ВЯЖУЩЕМ

Для получения композитных плит была взята измельченная кора сосны и выделены фракции с размером частиц 2–5 мм и 1–2 мм. В качестве вяжущего использовали портландцемент ПЦ-500Д0 и гипс строительный Г-4. Во избежание появления пузырьков воздуха в смеси, значительно снижающих прочность гипсовых плит [1], в качестве добавки при изготовлении композиционных материалов был выбран пеногаситель Sofexil-520А (далее пеногаситель), производства ООО «СОФЭКС-Силикон» по ТУ 2251-011-42942526-00 с изм. 1–5.

Кора с гипсом или цементом смешивались в сухом соотношении 7/3, 3/2, 1/1 и 45/55 по объему соответственно. Для получения формовочной массы сухую смесь затворяли водой и снова перемешивали, затем заполняли формы и, создавая вибрацию, уплотняли до полного распределения. Для получения такой же смеси, но с добавлением пеногасителя, смешивание производилось аналогично предыдущему, но на этапе введения воды в нее был добавлен концентрированный раствор пеногасителя.

Для дополнительного укрепления материала и возможности создания полноразмерных плит использована армирующая стекловолоконная сетка (далее сетка), крафт-бумага (далее бумага) или полипропиленовая фибра (далее фибра). Сетка использовалась для плит на основе гипса и цемента, а бумага – только для плит на основе гипса. Этими материалами покрывались обе противоположные пласти образцов во время формования. Добавление фибры происходило в момент сухого смешивания вяжущего и коры.

Формовка плит производилась в формах в винтовом необогреваемый прессе. В течение 30 дней композиция доходила до полного созревания вяжущего. Полученные заготовки раскраивали по размеру для испытаний. Коэффициенты теплопроводности и термического сопротивления определяли на образцах размером по пласти 100×100 мм с помощью прибора ИТП МГ-4.

Испытания плит на прочность проводили в соответствии с ГОСТ 26816–2016. Использовали испытательную машину MTS INSIGHT 100, имеющую автоматический контроль нагрузки и перемещения захватов. Испытания плит на водо- и влагопоглощение проводились в соответствии с ГОСТ 10634–88. Результаты определения

физико-механических свойств были сгруппированы для анализа и представлены в табл. 1–4.

**Таблица 1 – Характеристики плит, полученных из коры 2–5 мм минерального вяжущего при соотношении 3/2 соответственно**

Показатель	Гипс	Цемент
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	527	1134
Прочность на изгиб, МПа	0,776	2,074
Влагопоглощение, %	7,37	5,45
Водопоглощение, %	78,4	33,7
Теплопроводность, Вт/м×К	0,109	0,283
Начальная влажность, %	4,81	5,37

**Таблица 2 – Сравнение характеристик плит на основе цемента, в зависимости от размеров коры и ее удельной доли в композите**

Показатель	Размеры частиц коры, мм			
	2–5		1–2	
	Соотношение по объему кора/вяжущее в рабочем состоянии			
	7/3	3/2	1/1	45/55
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	974	1134	1110	1250
Прочность на изгиб, МПа	1,36	2,07	3,49	3,67
Теплопроводность, Вт/м×К	0,139	0,283	0,203	0,260
Начальная влажность, %	4,89	5,37	3,60	2,42

**Таблица 3 – Влияние добавок и армирующих покрытий на свойства плит из коры 2–5 мм и гипса при соотношении 3/2 соответственно**

Показатель	Добавки		Армирующие покрытия	
	нет	Sofexil-520A	сетка	картон
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	527	501	–	–
Прочность на изгиб, МПа	0,776	0,295	2,019	1,719
Влагопоглощение, %	7,37	9,83	–	–
Водопоглощение, %	78,4	395,5	–	–
Теплопроводность, Вт/м×К	0,109	0,134	–	–
Начальная влажность, %	4,81	5,84	–	–

**Таблица 4 – Влияние добавок и армирующих покрытий на свойства плит из коры 2–5 мм и цемента при соотношении 3/2 соответственно**

Показатель	Добавки			Сетка
	нет	Sofexil-520A	фибра	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1134	1183	–	–
Прочность на изгиб, МПа	2,074	2,405	0,339	2,348
Влагопоглощение, %	5,448	5,507	–	–
Водопоглощение, %	33,7	33,3	–	–
Теплопроводность, Вт/м·К	0,283	0,286	–	–
Начальная влажность, %	5,37	4,63	–	–

Как показали исследования, прочность при изгибе плит на цементном вяжущем в 2,7 раза превышает этот показатель для плит на гипсовом. Плотность плит на цементном вяжущем превышает в 2,2 раза плотность плит на гипсовом. При этом влагопоглощение плит с цементом ниже на 26%, а водопоглощение – в 2,3 раза. Однако теплопроводность цементных плит в 2,6 раза выше, чем гипсовых. С увеличением содержания коры в составе цементных плит всего на 10% (с 60 до 70%) их плотность снижается на 14,1%, прочность на изгиб – на 34,3%, а теплопроводность – примерно в 2 раза. Использование более мелкой фракции увеличивает плотность и прочность [2], но также увеличивает теплопроводность при тех же соотношениях компонентов. Добавка пеногасителя отрицательно сказалась на прочности плит из гипса (снижение в 2,6 раза), но дала наилучший эффект в плитах из цемента (увеличение на 16%). В гипсовом композите пеногаситель плохо показал себя по отношению к воде: влагопоглощение увеличилось в 1,3 раза, а водопоглощение и вовсе в 5 раз. Теплопроводность при этом увеличилась на 22,9%. В цементном композите пеногаситель не оказал влияние на отношение к воде и не изменил теплопроводность, следовательно, он только увеличил прочность.

Поглощение воды как цементной, так и гипсовой композицией происходит быстрее в первые 3 сут. контакта с водой, но после этого процесс заметно затухает. Плотность цементного вяжущего не позволяет идти процессу также интенсивно, как у гипса. Так, за полчаса гипсовые плиты набрали 70% от предела насыщения, в то время как цементные – 56%.

Поглощение влаги корьевыми плитами на минеральных вяжущих происходит несколько иным способом. В первой фазе идет медленное увлажнение, во второй – интенсивное и в третьей – увлажнение затухает. Время, характеризующее границы этих фаз – 1 сут. и 18 сут. Увлажнение цементной композиции происходит медленнее, чем гипсовой. Так, за полчаса цементные плиты набрали 3% от предела гигроскопичности, что в 2 раза ниже чем у гипсовых плит (6%).

Использование фибры не помогло и без того наполненному на 60% корой композиту на цементном вяжущем и только ухудшило положение (снижение прочности на изгиб в 6 раз).

Сетка из стекловолокна увеличила прочность цементных плит на 13%, а гипсовых – в 2,6 раза, при том что крафт-бумага увеличила прочность гипсовых плит лишь в 2,2 раза.

Исследования показали, что с целью увеличения теплоизоляционных свойств следует предпочесть более крупную фракцию коры с максимально возможным ее содержанием в композите. Однако необ-

ходимо помнить, что при этом снижается самонесущая способность плит и допустимые размеры изделий также снижаются.

Цементные композиты следует использовать для производства крупногабаритных изделий, эксплуатируемых в более агрессивных условиях, а гипсовые – для изделий небольших размеров для использования внутри помещения. При использовании стекловолоконной сетки размеры изделий из гипса можно выбирать такие же как из цемента при прочих равных условиях.

Пенегаситель Sofexil-520А использовать для гипсовых вяжущих нельзя, так как он увеличивает гидрофильность вяжущего после отверждения и снижает его прочность.

Для армирования поверхности плит из коры на минеральных вяжущих предпочтительно использовать стекловолоконную сетку, но для снижения себестоимости допустимо применение крафт-бумаги, также обеспечивающей значительный эффект.

Использовать дополнительные полимерные волокна в составе композиционного материала из коры на минеральных вяжущих опасно, однако в случае должной гомогенизации при смешивании возможно получить удовлетворительные результаты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Федосенко, И. Г., Веретиков, И. И. Применение коры деревьев в производстве изолирующих и конструкционных плит // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2020. № 2 (234). С. 239–243.

2. Федосенко И. Г., Усович А. В. Производственное планирование свойств древесных материалов на основе минеральных вяжущих // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновленных ресурсов. 2018. № 2 (210). С. 224–229.



А.С. Чуйков, канд. тех. наук, зав. кафедрой;  
В.О. Куневич, мл. науч. сотр.; О.Г. Рудак, ст. преп.  
(БГТУ, г. Минск)

## **КОМПЬЮТЕРНАЯ АНИМАЦИЯ ПОДВИЖНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕБЕЛИ В УСЛОВИЯХ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ**

Виртуальная реальность (VR) – искусственно созданный мир, в который человек может полностью «погрузиться» не только как наблюдатель, но и как участник. Для достижения высокого уровня иммерсивности, система виртуальной реальности должна выдавать пользователю в ответ на совершаемые действия картинку, звук, а также комплекс осязательных и прочих ощущений моментально, без заметных задержек во времени [1].

Интерактивность - возможность взаимодействия с виртуальным миром. Пользователь должен иметь возможность взаимодействовать с виртуальным окружением, а оно в свою очередь будет опираться на действия пользователя [2, 3].

Существуют различные способы наделяния интерактивностью виртуальных объектов, которые зависят от условий реализации проекта. Примером таких условий является программное обеспечение, в нашем случае это Unreal Engine. Данное ПО дает возможность использовать как стандартные сценарии анимации подвижных объектов, так и задействовать скриптовую анимацию, реализуемую с помощью визуального языка программирования – Blueprint.

Blueprint – визуальный скриптовый язык, который позволяет написать логику без применения языков программирования. Проект состоит из узлов (nodes), которые соединены линиями передачи данных. Каждый узел может представлять функцию, событие, оператор и так далее [4].

Создавая анимацию на примере фасадов (ящичков) кухонной мебели были выполнены следующие шаги:

1. Щелкнув правой кнопкой мыши на подвижный элемент – фасад, необходимо создать Blueprint из меню. Работая с элементом, можно дублировать, поворачивать его, и сценарий будет работать правильно. В созданный Blueprint можно добавлять и другие составные части одного объекта. Данные изменения можно вносить во вкладке Viewport.

2. Объединив все элементы в единый объект, взаимодействие происходит с подвижным фасадом. Необходимо добавить объем пере-

крытия охватывающего фасада через Add Component, который будет действовать как триггер.

3. Далее, перейдя в раздел Event Graph, следует выбрать в настройках коллизии объекта узел On Component Begin Overlap. Нода «On Component Begin Overlap» позволяет запустить имитацию движения объекта, как только один из контроллеров попадет в область коллизии. Добавляя функцию «Get Player Controller» и подключите ее к слоту «Player Controller», мы указываем какой объект должен попасть в коллизию для проигрывания анимации как показано на рисунке 1.

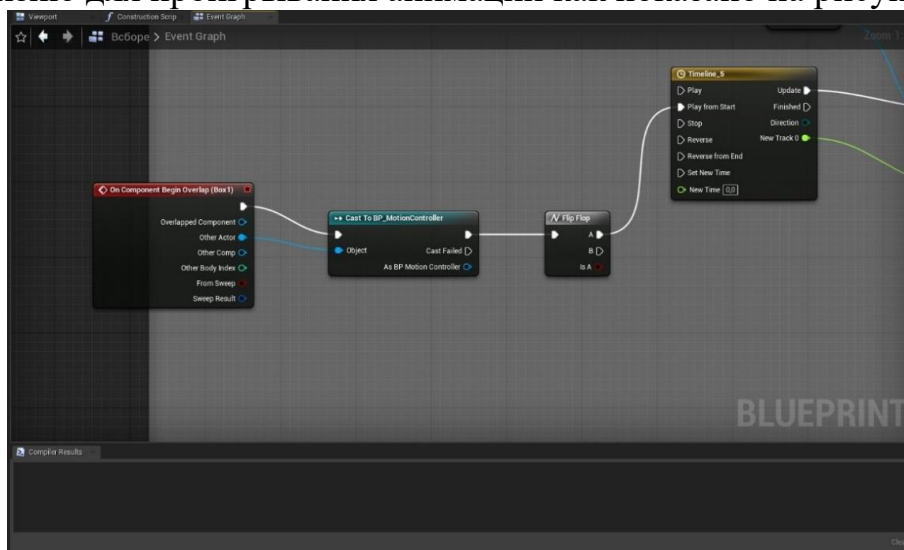


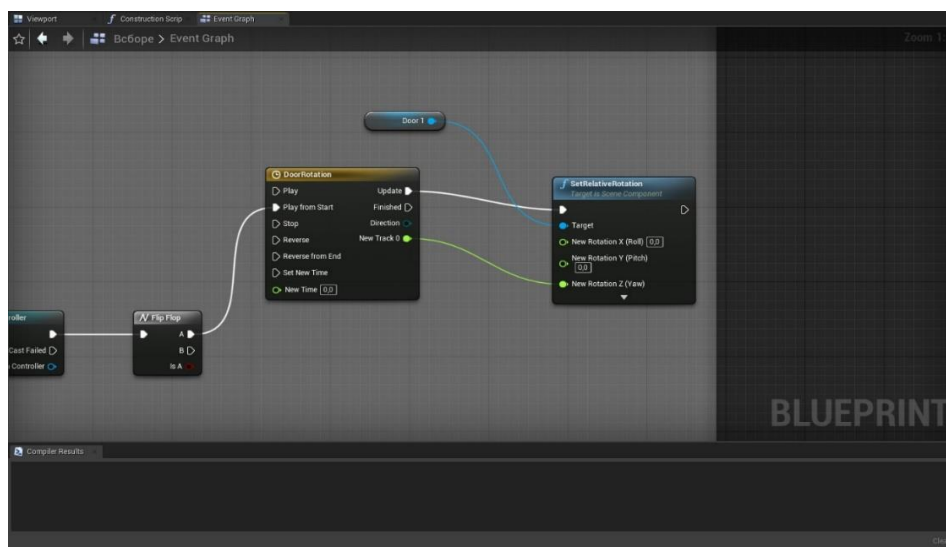
Рисунок 1 – Скриншот интерфейса настроек узла FlipFloп

4. FlipFloп – переключатель, который при первом вызове функции запускает ветку А, при следующем вызове запускает ветку В. Для первой ветки А в нашем случае будет вызываться следующее событие: будет воспроизводиться анимация движения соответствующего открытию фасада или шуфлядки.

Далее необходимо задать параметры изменения положения анимируемого объекта в пространстве с течением времени. Для этого, если двойным щелчком открыть узел «Timeline», можно создать трек с помощью кнопки «Float Track» и добавить на координатное поле 2 точки. Устанавливаем «Time» и «Value» первой точки на 0 и -90 соответственно, второй – на 1 и -210. Данные параметры являются диапазоном перемещения фасада во времени (соответствует 1 секунде) и в пространстве (соответствует углу открывания фасада от -90 (закрытое положение) до 210 (полностью открытое положение)). После создания «Timeline», необходимо вызвать функцию «Set Relative Rotation».

5. Из раздела Components в область графиков перенесем объект, анимацию которого осуществляем. Объединим образовавшийся узел со слотом «Target» функции «Set Relative Rotation». Подключая слот

«Timeline» под названием «DoorRotation» к узлу «Set Relative Rotation», мы получаем замкнутую систему слотов как показано на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Скриншот интерфейса подключения функции Rotation к ветке Timeline**

Анализируя взаимодействия человека с подвижными частями изделий в условиях виртуального пространства можно сделать вывод, что программное обеспечение Unreal Engine позволяет поддерживать большое количество функций, благодаря чему в нём можно создать практически любой вид анимации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чуйков А. С., Куневич В. О., Игнатович Л. В. Особенности иммерсивных технологий, применяемых при проектировании мебели // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2022. № 1 (252). С. 174–180.

2. Увлекательная реальность [Электронный ресурс] // URL: [https://funreality.ru/technology/virtual\\_reality/](https://funreality.ru/technology/virtual_reality/) (дата обращения 20.01.2023).

3. Махалова А. С., Поспелова Н. В. Разработка конфигуратора дизайна интерьера в виртуальной реальности // КОГРАФ-2021. Сборник материалов 31-й Всероссийской научно-практической конференции по графическим информационным технологиям и системам. – 2021. – с. 130-135.

4. Unreal Engine 4 Documentation [Электронный ресурс] // Epic Games. New York, 2004. URL: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/> (дата обращения 23.01.2023).

## **КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБЛЕГЧЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ СПОРТИВНОГО ИНВЕНТАРЯ**

Масса спортивного инвентаря, является важным параметром для спортсмена, так как при ее уменьшении игрок будет меньше уставать, сохраняя свои силы, а также такое снаряжение позволит с большей легкостью совершать сложные маневры. В следствии чего спортсмен будет получать преимущество в процессе игры, относительно соперника, имеющего такое же снаряжение, но с большей массой. Это особенно актуально в определенных видах спорта, где наибольший упор делается на выносливость игроков, таких как лыжный спорт, различные виды хоккея и др.

Производители спортивного инвентаря достигают высоких показателей механических и эксплуатационных свойств, сохраняя при этом легкость изделия все чаще за счет использования композиционных материалов – многокомпонентных материалов, состоящих из полимерной, древесной, металлической, волокнистой, или другой основы (матрицы), армированной наполнителями из волокон, нитевидных кристаллов, тонкодисперсных частиц и др. Подбирая состав, свойства наполнителя и матрицы, а также их соотношение и ориентацию наполнителя, можно получить материалы с требуемым сочетанием эксплуатационных и технологических характеристик. Композиты изготавливают, объединяя два или более различных материала в общую структуру. Свойства полученного в результате объединения материала сильно отличаются от свойств его компонентов по отдельности [1].

Многие композиты превосходят традиционные материалы и сплавы по своим механическим свойствам и в то же время они легче, то есть использование композиционных материалов обычно позволяет уменьшить массу конструкции при сохранении или улучшении её механических характеристик.

В качестве примера рассмотрим конструкцию лыжи. Она включает в себя такие элементы как скользящий слой, армирующий слой, склеивающий слой, верхний (декоративный) слой, средний клин, при прочих равных условиях наибольшее влияние на увеличение ее массы оказывает средний клин. Поэтому материалы и конструкции среднего клина используемые для производства лыжи, оказывают наибольшее влияние на ее массу, а также существенное влияние на их физико-

механические и эксплуатационные показатели [2].

Рассмотрим композиционные материалы используемые для облегчения конструкции лыж. К ним относятся композиты в которых матрицей служит полимерный материал. Их можно разделить на следующие типы:

Стеклопластики – полимерные композиционные материалы, армированные стеклянными волокнами, которые формируют из расплавленного неорганического стекла

Углепластики – наполнителем в этих полимерных композитах служат углеродные волокна. Для изготовления углепластиков используются те же матрицы, что и для стеклопластиков – чаще всего – терморезистивные и термопластичные полимеры. Основными преимуществами углепластиков по сравнению со стеклопластиковыми является их низкая плотность и более высокий модуль упругости, углепластики – очень лёгкие и, в то же время, прочные материалы [1].

Композиционные материалы позволяют улучшить функциональные и физические характеристики изделия. Так как для спортивного инвентаря и оборудования важна лёгкость, прочность, упругость и устойчивость к постоянным и циклическим нагрузкам, то композиты на основе углеволокна и стекловолокна с каждым годом заменяют «традиционные» материалы во все большем количестве видов спорта. В конструкции лыжи данные композиты могут, применяться для изготовления армирующего слоя, и др. частей спортивного инвентаря.

Для облегчения конструкции спортивного инвентаря так же используют композиционные материалы на основе сотового наполнителя. Сотовая структура представляет собой тип ячеистых материалов с регулярными и периодически повторяющимися наборами ячеек различной формы, образованных между тонкими вертикальными стенками. Ячейки в основном имеют шестиугольную форму или расположены в виде столбцов. Сотовые наполнители изготавливаются, используя различные виды материалов (алюминий, нержавеющая сталь, арамид, кевлар, термопластик, картон). Жесткость сотовых конструкций позволяет использовать меньше материала и снизить массу. Сотовые материалы широко используются как при плоских, так и при изогнутых поверхностях.

Алюминиевые соты представляют собой лёгкий материал, пригодный для вторичной переработки, который имеет отличные механические свойства: небольшой вес, высокую прочность, устойчивость к сжатию, стойкость к коррозии и огнеупорность Соты из алюминия используются для изготовления композитных сотовых сэндвич панелей и конструкций. Такие инновационные сэндвич конструкции ши-

роко применяются при изготовлении: перегородок, полов, дверей, потолков, фасадов т. е. везде, где требуется низкий вес и жесткость конструкции. Диаметр ячеек от 3 до 25 мм, плотность ячеек зависит от толщины фольги и диаметра ячейки.

Бумажный сотовый наполнитель (гофрокартон). Гофрокартон представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из внутреннего слоя бумаги «флутинга», сформированного на гофроагрегате так, что бумаге придается волнистая форма, и из одного или нескольких плоских слоев картона, называемого «лайнером», приклеенных к вершинам гофров. Гофрокартон отличается от других видов картона малым весом, дешевизной и высокими физическими параметрами.

Термопластик. Ячеистые клинья из термопластика легкие и легко поддаются переработке. Основным недостатком является сложность создания прочной связи между сотами и облицовкой. Они бывают нескольких типов:

Сотовый наполнитель из полиэфиримида. Является термопластичным материалом. Этот полимер отличается от других термопластов высокой термостойкостью и прочностными характеристиками.

ABS, использование которого предполагает жесткую структуру, ударную вязкость, твердость поверхности, ударопрочность и размерную стабильность;

Полипропиленовый сотовый наполнитель. Полипропиленовые соты являются полуфабрикатом и используются для производства легких композитных сэндвич панелей, обладают стабильностью, низким весом и коррозионной стойкостью. В соответствии с последующим применением материалы могут быть в виде открытых сот, сэндвич материала с вуалью или с вуалью и пластиковой пленкой.

Сотовый наполнитель из поликарбоната. Представляет собой термопластичный материал, доступный разных размеров, толщины, цвета и диаметра ячеек. Сотовые дефлекторы повышают эффективность воздушного потока, кроме того, они устраняют турбулентность, уменьшают загрязнение, влажность, а также шум и потребление энергии.

Сотовый наполнитель из арамидной бумаги. Представляет собой чрезвычайно легкий, прочный неметаллический продукт, изготовленный из арамидной бумаги, пропитанной термостойкой фенольной смолой [3].

Основой для композиционного материала позволяющего облегчить конструкцию спортивного инвентаря, могут так же выступать вспененные материалы (пенопласты, поропласты, сотопласты), модифицированная древесина, а также древесина низкой плотности (баль-

са). В качестве вспененного материала при изготовлении среднего клина могут применять пенополиуретан – это синтетическое вещество ячеистой структуры из группы газонаполненных пластмасс. По сути, пенополиуретан можно охарактеризовать как разновидность пластмассы. Основным сырьем, используемым для получения пенополиуретана, являются ди- и триизоцианаты и полиолы. Другие технологические добавки вводятся для изменения свойств полимера [2].

Конструкцию спортивного инвентаря так же можно облегчить, за счет формирования пустотных каналов в среднем клине, уменьшая тем самым его массу.

Спортивный инвентарь, изготовленный из композита зачастую более дорогой в сравнении с традиционными материалами, но при этом дает неоспоримые преимущества спортсмену при его эксплуатации. В связи с чем, профессиональные игроки по всему миру предпочитают более дорогой, но качественный продукт. Стоит учесть, что некоторые материалы могут негативно влиять на физико-механические свойства изделия, например, уменьшая упругость спортивного инвентаря. На основании этого дальнейшее изучение, применение и разработка новых композиционных материалов, позволяющих сохранить или повысить механические свойства спортивного инвентаря, при этом облегчив его конструкцию, является актуальным направлением, необходимым для разработки отечественной технологии изготовления спортивного инвентаря способного удовлетворить требования спортсменов и налаживания дальнейшего промышленного производства в Республике Беларусь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Композитный материал // Wikipedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Композитный\\_материал](https://en.wikipedia.org/wiki/Композитный_материал) (дата обращения: 07.02.2023). <https://polymall.com.ua/ru/produkczia/sotovye-napolniteli/>
2. Полховский А. В., Прохорчик С. А., Шетько С. В., Ручкина Е. В. Разработка конструкции облегченных спортивно-беговых пластиковых лыж // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2021. № 2 (246). С. 250–259.
3. Сотовые наполнители // POLYMALL URL: <https://polymall.com.ua/ru/produkczia/sotovye-napolniteli> (дата обращения: 07.02.2023).

УДК 634.377

М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук;  
С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук;  
Ф.Ф. Царук, доц., канд. техн. наук;  
П.В. Журба, студ. ф-та ТОВ  
(БГТУ, г. Минск)

### **ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ ДИФФУЗИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ**

Лесная промышленность Республики Беларусь представлена лесными и лесопромышленными предприятиями, которые оснащены различной техникой: агрегатными лесосечными машинами, трелевочными тракторами, лесовозными автопоездами и другим оборудованием. Условия эксплуатации ряда сложнагруженных деталей машин характеризуются значительным трением, интенсивным износом на их рабочих поверхностях, а также вибрациями широкого амплитудно-частотного диапазона.

Работа трелевочного трактора постоянно сопровождается наездами на препятствия разного рода: пни, валежник, неровности, валуны, и т.д. Нагрузки на трансмиссию также создаются при трогании с места и при трелевке пачки деревьев. Доказано, что динамические крутящие моменты в трансмиссии колесного трактора имеют наибольшее значение при интенсивном трогании с места [1].

Для повышения надежности и срока службы подобных изделий возникает необходимость применения различных способов поверхностного упрочнения. Одним из наиболее простых и доступных способов повышения поверхностной твердости, а также износостойкости деталей является их диффузионное упрочнение, которое проводится следующим образом. Деталь помещается в контейнер, выполненный из жаростойкой стали. На зубья шестерни наносится специально приготовленная обмазка на расстоянии 2 см. от поверхности контейнера с каждой стороны, далее контейнер вместе с шестерней помещаются в нагревательную печь на 3–4 часа для образования необходимой толщины диффузионного слоя. Упрочнению подвергались только зубья шестерни.

Для осуществления низкочастотного и высокочастотного нагружения был разработан, а позднее модернизирован комплекс маг-



нитострикционных резонансных установок, позволяющий проводить испытания различных конструкционных материалов (как металлических, так и неметаллических) на больших базах испытаний в широком диапазоне частот (0,3 кГц – 18 кГц) и температур (300 – 1000°К) [2]. Учитывая специфику исследований и особенно резонансный режим нагружения, с целью уменьшения разброса результатов экспериментов особое внимание обращалось на качество и механические свойства материала заготовок.

С целью исключения влияния разброса химического состава на результаты испытаний, образцы вырезались из металла одной поставки. Технология механической обработки предусматривала на заключительной стадии съем минимальной толщины слоя с целью предотвращения влияния технологической наследственности, а термообработка образцов проводилась одной партией.

Для ускоренного определения усталостных характеристик, упрочненных образцов как в условиях знакопеременного изгиба, так и при растяжении-сжатии использовалась магнитострикционная установка (резонансная частота 18,0 кГц) [3]. Исследования проводились для разного времени и температур насыщения, что соответствует формированию в диффузионных слоях разных уровней остаточных напряжений сжатия.

На основании исследований, проведенных на рентгеновском дифрактометре Bruker 08 Advance было установлено, что в поверхностном слое упрочненных борированием и боросилицированием образцов стали 5ХНМ преобладают напряжения сжатия.

Результаты испытаний позволили установить повышение предела выносливости  $\sigma_{-1}$  боросилицированных образцов по сравнению с улучшенными и закаленными ТВЧ в 1,4–1,9 раза, по сравнению с цементированными в 1,6–1,7 раза и по сравнению с борированными в 1,4–1,6 раза при меньшем разбросе долговечности благодаря более однородной структуре упрочненного слоя. Повышение усталостных характеристик при боросилицировании связано в основном с образованием в упрочненном слое остаточных напряжений сжатия, которые замедляют образование усталостной трещины. Снижение усталостных характеристик при борировании, отмечаемое при увеличении времени и температуры насыщения, связано с высокой хрупкостью упрочненного данным методом диффузионного слоя.

На основании полученных результатов по усталостной прочности упрочненной поверхности были определены допускаемые контактные напряжения и допускаемые напряжения при изгибе при боросилицировании зубчатых колес, которые увеличиваются по сравне-

нию с цементированными соответственно в 1,45 и 1,4 раза и достаточны для работы конических передач трансмиссий трелевочного трактора. Полученные значения допускаемых напряжений могут использоваться при проектных и проверочных расчетах зубчатых колес.

На основании полученных данных установлено, что оптимальным для повышения усталостных характеристик является время насыщения 2,5 – 3,5 часа при температуре процесса 900 – 1000. При этом образуется упрочненный слой толщиной от 120 – 250 мкм достаточной для работы зубчатых передач трансмиссий в условиях интенсивного изнашивания и динамических нагрузок. Повышение времени обработки свыше 3,0 часов приводит к постепенному снижению величины  $N_{ц}$  вследствие коагуляции Fe<sub>2</sub>V, а также образования в поверхностном слое фазы FeV, обладающей повышенной хрупкостью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Калякин, Л. А. Исследование динамических нагрузок трансмиссии колесного трелевочного трактора: автореф. дис. ... канд. техн. наук: / Л. А. Колякин. – Йошкар-Ола, 1972. – 23 с.

2. Царук Ф.Ф., Довгялло И.Г., Долбин Н.А., Горновский Д.А. Высокочастотные колебания как метод ускорения усталостных испытаний элементов конструкций. Научн.-техн. конф. "Повышение технического уровня и надежности машин". (Минск, 28-29 октября 1993 г): Тез. докл.- Минск: ИНДМАШ, 1993. – С. 47-48.

3. Немцов В.Б., Долбин Н.А., Царук Ф.Ф., Довгялло И.Г., Кондеев Ю.Н. К расчету напряженного состояния пластин, колеблющихся на низких ультразвуковых и звуковых частотах. - Теоретическая и прикладная механика, вып. 16. - Минск, "Вышэйшая школа", 1989. С. 113-117.

С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук;  
М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук;  
А.И. Сурус, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск).

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗНАШИВАНИЮ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ**

Для изделий, работающих в условиях термосмен, а также высоких механических нагрузок (штампы горячей объемной штамповки, рубильные ножи) традиционно применяются штамповые стали. Стойкость такого инструмента зависит не только от его конструкции и режимов эксплуатации, но и от качества (структуры и механических свойств) применяемой для него стали. Результаты наших предварительных исследований показали, что для оптимизации структуры и повышения механических свойств штамповых сталей необходимо проведение ряда исследований по изменению и оптимизации технологических режимов термической обработки для обеспечения сопротивления изнашиванию поверхности при высоких нагрузках.

Для обеспечения необходимой твердости, а также износостойкости поверхностного слоя штампов проводилась цементация штамповой стали 45ХЗВЗМФС в среде природного газа при температуре 950 °С и выдержке от 10 до 20 часов.

Для определения эксплуатационных характеристик упрочненных слоев в разработанных насыщающих составах и оптимизации температурно-временных параметров процесса упрочнения исследована кинетика изнашивания экспериментальных образцов после проведения различной ХТО. Необходимо отметить, что как показали проведенные исследования, диффузионные слои характеризуются неоднородностью структуры и химического состава, наличием дефектов в виде пор, микротрещин, а также значительными колебаниями по толщине и твердости. В связи с этим сопротивление изнашиванию является важным критерием физико-механических и эксплуатационных свойств, так как позволяет оценить служебные свойства материалов, упрочненных при различных условиях.

Исследования износостойкости упрочненных различными составами экспериментальных образцов проводились в лабораторных условиях. Созданная на кафедре деталей машин и ПТУ БГТУ установка для проведения испытаний по сопротивлению изнашиванию

экспериментальных образцов частично моделирует реальные условия работы инструментальной оснастки.

Режим испытаний при возвратно-поступательном движении был следующий: величина амплитуды—110 мм; максимальная скорость скольжения  $V_{\max} = 0,67$  м/с; число циклов—452 тысяч, что соответствует—59,72 км пройденного пути; температура в месте контакта поддерживалась не выше 70–100°C. При этом удельная нагрузка на поверхности трения изменялась от 1,5 МПа до 5,5 МПа, что позволило в достаточно широком диапазоне оценивать параметры износостойкости упрочненных образцов.

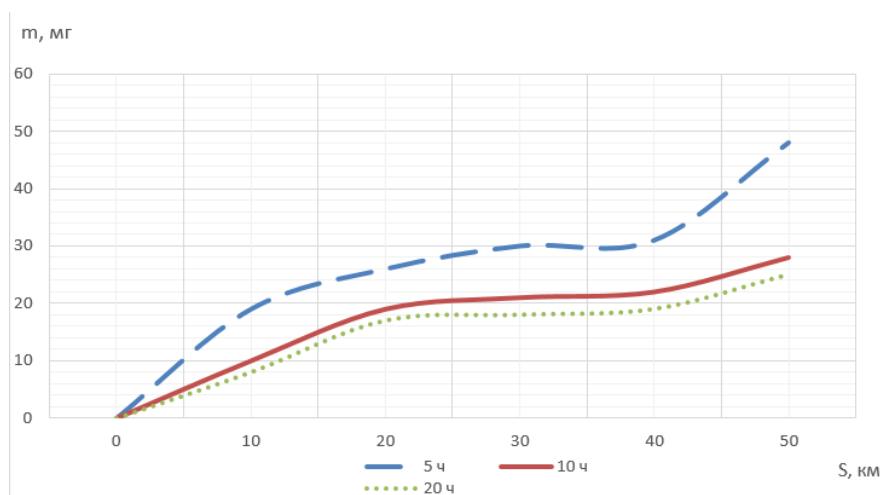
Исследования упрочненных образцов проводились в режиме сухого трения с минимальным добавлением индустриального масла 20 для исключения явления задира. Испытывались образцы размеров 10x10x10 мм из стали 45Х3В3МФС прошедшей цементацию по различным режимам.

В связи с тем, что структура и фазовый состав поверхностных слоев по глубине в значительной степени отличаются неоднородностью, показатели износостойкости различных слоев существенно отличаются друг от друга. Для получения достоверных результатов испытаний, в отличие от традиционно применяемых методик, отсутствовал период приработки образца и контртела. Поэтому при проведении исследований шероховатость контртела, выполненного из инструментальной быстрорежущей стали Р6М5 с твердостью HRC 64–66, поддерживалась постоянной в пределах Ra 1,25 мкм. После испытаний трех образцов рабочая поверхность контртела периодически перешлифовывалась на заданную шероховатость; для более интенсивного износа неровности выполнялись в направлении перпендикулярном движению образца.

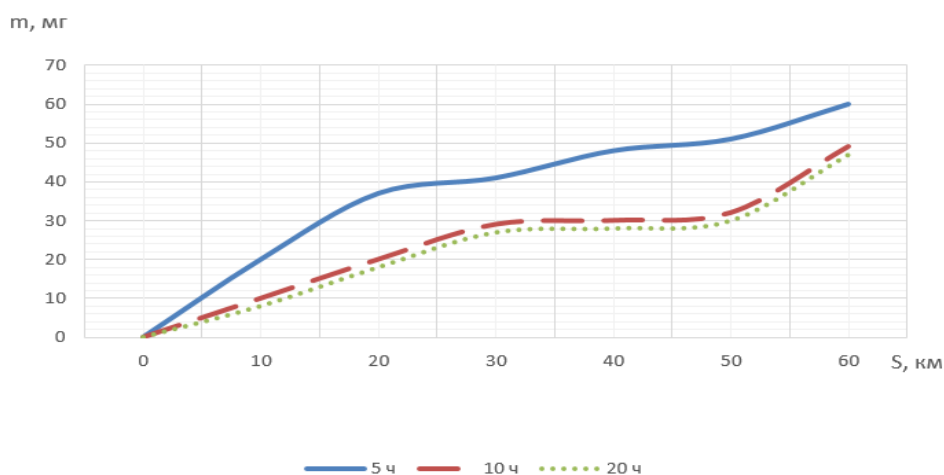
При анализе результатов испытаний была определена зависимость интенсивности изнашивания образцов от пути трения при упрочнении их с различным временем ХТО (рисунки 1, 2). Кривые износа, приведенные на рисунках 1, 2 вполне отражают общепринятые представления и зависимости характерные для эксплуатации деталей, работающих в условиях интенсивного нагружения. Было установлено, что при цементации в течение 5 часов образцов из стали 45Х3В3МФС существуют, как уже было отмечено, участки приработки и ускоренного изнашивания, при которых значения интенсивности изнашивания достигают максимальных значений (рисунок 1, кривая 1). При этом наиболее опасной является зона катастрофического изнашивания, которая находится на пути трения 45–60 км, так как здесь происходит основное разрушение поверхности.

При увеличении времени обработки интенсивность изнашивания на всем протяжении пути трения остается почти постоянной. При этом на некоторых участках пути трения наблюдается ее уменьшение, что вероятно связано со стабильностью поверхностной твердости и остаточных напряжений сжатия.

С увеличением нагрузки до 5,5 МПа (рисунок 2) интенсивность изнашивания возрастает в первую очередь при малом времени цементации. Кривые изнашивания сохраняют те же характерные участки, как и при более низкой нагрузке.



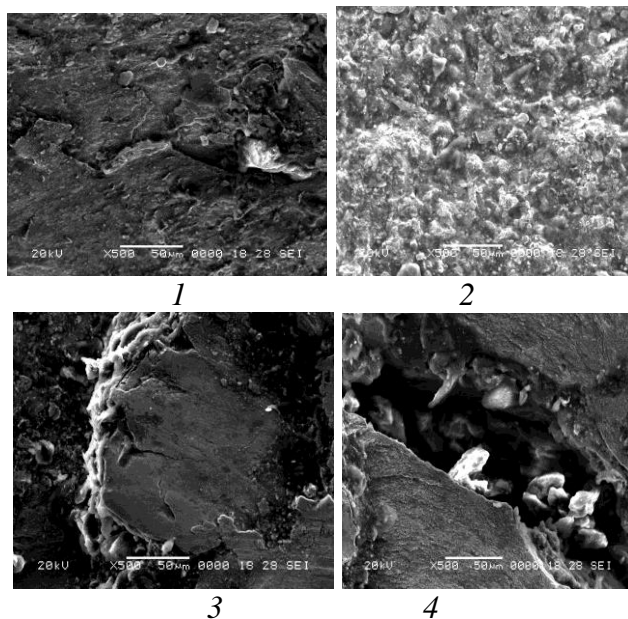
**Рисунок 1 – Изменение величины изнашивания образцов из стали 45Х3В3МФС при различном пути трения и нагрузке 1,5 МПа в зависимости от времени цементации: (5 ч; 10 ч; 20 ч)**



**Рисунок 2 – Изменение величины изнашивания образцов из стали 45Х3В3МФС при различном пути трения при нагрузке 5,5 МПа в зависимости от времени цементации: (5 ч; 10 ч; 20 ч)**

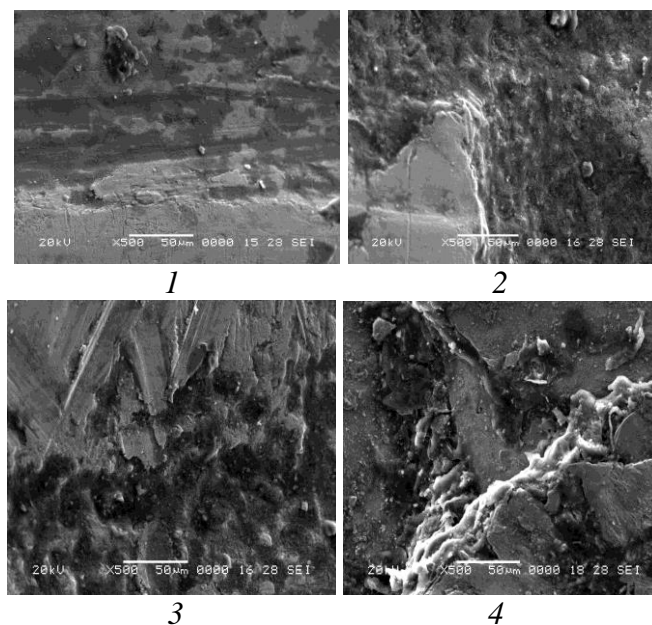
С увеличением времени обработки до 10 ч изменяется и картина разрушения поверхности. Элементы смятия участков поверхности и

выкрашивания отдельных ее фрагментов наблюдаются только при пути трения 50 км (рисунок 3, 4), что подтверждает результаты испытаний на сопротивление изнашиванию.



1 – путь трения 5 км, 2 – 20 км, 3 – 40 км, 4 – 50 км

**Рисунок 3 – Кинетика изнашивания образцов стали 45Х3В3МФС, упрочненных цементацией при времени 5 ч при нагрузке 3,5 МПа**



1 – путь трения 5 км, 2 – 20 км, 3 – 40 км, 4 – 60 км

**Рисунок 4 – Кинетика изнашивания образцов стали 45Х3В3МФС, упрочненных цементацией (10 ч) при нагрузке 3,5 МПа**

Результаты исследований позволяют определить рациональные параметры процесса поверхностного упрочнения, обеспечивающие требуемую износостойкость инструмента.

М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук;  
С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук;  
А.И. Сурус, доц., канд. техн. наук;  
А.В. Блохин, доц., канд. техн. наук;  
Ф.Ф. Царук, доц., канд. техн. наук, (БГТУ, г. Минск);  
Адель Рашид (Ливан)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ИЗНАШИВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ 5ХНМ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ**

Условия эксплуатации ряда сложнагруженных инструментов, а также деталей машин и механизмов характеризуются значительным трением, сопровождаемым интенсивным износом на их рабочих поверхностях. В связи с этим для повышения надежности и срока службы подобных изделий возникает необходимость использования различных способов поверхностного упрочнения. Применяемые для этой цели процессы должны обладать минимальными стоимостью, продолжительностью, трудо- и энергозатратами, не требовать финишной механической обработки изделий.

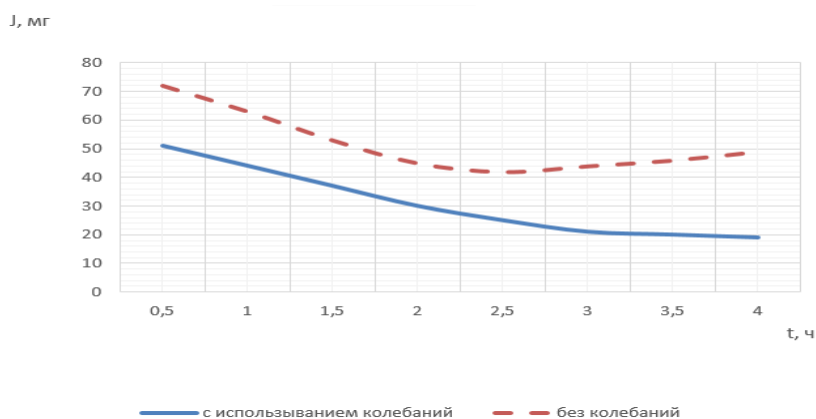
Процесс низкотемпературной карбонитрации в расплаве азотсодержащих солей в значительной степени отвечает вышеуказанным требованиям. Данный процесс не приводит к изменению размеров и короблению обрабатываемых деталей; шероховатость их практически не ухудшается [1], что дает возможность применять его в качестве финишного. Однако, его широкому использованию препятствуют недостаточная толщина, твердость и износостойкость поверхностного слоя. Для решения этой проблемы предложено вызывать в расплаве механические колебания различной частоты [2].

Модели из прошедшей улучшения стали 5ХНМ, обрабатывались в расплаве кальцинированной соды и мочевины при температурах 550–570°C и продолжительности процесса от 0,5 до 5 часов. Ультразвуковые колебания частотой 3 и 18 кГц генерировали в расплаве с помощью грибкового концентратора.

Зависимость величины износа от времени карбонитрации представлена на рисунке 1. Как видно из приведенных данных, использование колебаний существенно повышает износостойкость поверхностного слоя, определяемую по потере массы образцов. При времени обработки до 2 часов это объясняется в первую очередь ускорением протекания химических процессов в расплаве и адсорбции азота и углерода, а также диффузии их в сталь, что приводит к более интенсив-

ному образованию мелкодисперсных карбонитридных частиц и в целом к формированию плотного поверхностного слоя повышенной износостойкости. С увеличением времени насыщения свыше 3 часов износостойкость при отсутствии колебаний несколько снижается: это связано с тем, что поверхностный слой становится грубым и шероховатым. Очевидно, что при определенных условиях испытаний в слое происходит выкрашивание некоторых участков, при этом крупные карбиды и нитриды могут играть роль абразива в зоне трения.

При использовании колебаний кривая износа имеет существенно меньший участок приработки и более продолжительный участок, соответствующий зоне установившегося изнашивания. Исследования, проведенные на сканирующем электронном микроскопе, показали, что при обработке без использования колебаний на этапе приработки наблюдается смятие и сглаживание отдельных неровностей шлифованной поверхности [3].



**Рисунок 1 – Зависимость величины износа образцов стали 5ХНМ от способа и времени карбонитрации**

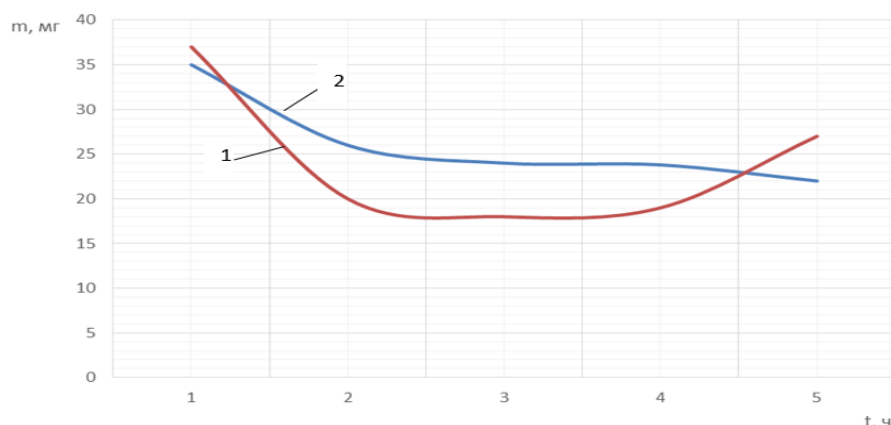
На стадии установившегося изнашивания происходит постепенное увеличение поврежденных фрагментов поверхности с образованием достаточно больших участков выкрашивания карбонитридного слоя. Отмечается, как следствие развития усталостных процессов, микротрещинообразование. При использовании колебаний, обеспечивающих образование более развитого и прочного карбонитридного слоя, практически полностью отсутствует выкрашивание участков поверхности. Преобладает постепенное окислительно-абразивное истирание материала, то есть один из наименее агрессивных видов износа, что и обеспечивает значительное увеличение участка установившегося изнашивания.

Полученные результаты показывают существенное повышение износостойкости при использовании жидкостной карбонитрации в комбинации с возбуждением в расплаве колебаний частотой 18 кГц.



Это может способствовать повышению надежности и ресурса деталей машин и технологической оснастки.

В работе также исследовано влияние температурно-временных параметров процессов комплексного борирования на сопротивление изнашиванию поверхностного слоя стали 5ХНМ. Для определения рациональных параметров процесса поверхностного упрочнения технологической оснастки определено их влияние на сопротивление изнашиванию экспериментальных образцов. С увеличением времени борирования образцов из стали 5ХНМ от 1 часа до 2 часов сопротивление изнашиванию возрастает в 1,8–1,9 раза (рисунок 2) и стабилизируется при времени обработки до 4 часов. Дальнейшее увеличение времени (до 5 часов) приводит к возрастанию потери массы, что очевидно связано с коагуляцией фазы FeV и увеличением размера ее игл на поверхности [4, 5]. Потеря массы боросилицированных образцов больше чем у борированных образцов до времени обработки 4,5 часа. Однако, с дальнейшим увеличением ее продолжительности изнашивание снижается (рисунок 2). Это можно объяснить, как более плотным поверхностным слоем боросилицированных образцов, так и существенно меньшей микрохрупкостью [6, 7].



**Рисунок 2 – Влияние времени процесса борирования (1) и боросилицирования (2) на сопротивление изнашивания образцов стали 5ХНМ (путь трения 50 км)**

Для исследования влияния составов и параметров процессов упрочнения на сопротивление изнашиванию поверхностного слоя проведено исследование остаточных напряжений после поверхностного упрочнения. Установлено, что после борирования и боросилицирования возникают остаточные напряжения сжатия, возрастающие с повышением как времени, так и температуры обработки [8].

Поскольку напряжения сжатия в пределах поверхностного слоя благоприятны для повышения износостойкости, контактной выносливости и усталостной долговечности, следует предположить повыше-

ние эксплуатационной надежности, упрочненной боросилицированием технологической оснастки, например, штампов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бельский С.Е. Влияние параметров диффузионного упрочнения на шероховатость поверхности обработанных деталей и стабильность их размеров // Труды БГТУ. Сер. II лесн. и деревообраб. пром-сти. 2002. Вып. X. – С. 204–207.

2. Довгялло И.Г., Каледин Б.А., Сурус А.И., Бельский С.Е. Влияние механических колебаний на качество диффузионного слоя стальных деталей при низкотемпературной карбонитрации // Труды БГТУ. Сер. II лесн. и деревообраб. пром-сти. 2000. Вып. II. – С. 207–213.

3. Бельский С.Е., Сурус А.И. Влияние высокочастотных механических колебаний при поверхностном упрочнении на формирование и структуру упрочненных слоев конструкционных сталей // Литье и металлургия, 2003. № 2. – С. 124–127.

4. Ворошнин Л.Г. Борирование стали / Л.Г. Ворошнин, Л.С. Ляхович // – М.: Металлургия, 1978. – 230 с.

5. Ляхович Л.С. Многокомпонентные диффузионные покрытия / Л.С. Ляхович, Л.Г. Ворошнин, Г.Г. Панич. – Мн.: Наука и техника, 1974. – 289 с.

6. Ситкевич М.В. Влияние комплексного боридного упрочнения на структуру и свойства поверхностных слоев сталей для изготовления деталей зубчатых передач трелевочных лесных машин / М.В. Ситкевич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Литье и металлургия. Мн., 2008. – С. 140–146.

7. Пищов М.Н. Кинетика изнашивания деталей трансмиссии лесных машин, упрочненных комплексным борированием // Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных конструкционных материалов и сплавов: материалы Междунар. научн. конф., Москва, 2009. – М., 2009. – С. 179–187.

8. Макаревич С.С. Модель напряженного состояния зубьев деталей трансмиссий трелевочных тракторов // С.С. Макаревич, М.Н. Пищов, С.Е. Бельский // Труды БГТУ. Серия П «Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2009. Выпуск XVII. – С. 327–330.

В.Р. Соболев, д-р техн. наук;  
А.В. Блохин, доц., канд. техн. наук;  
М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук;  
С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук, (БГТУ, г. Минск);  
Адель Рашид (Ливан)

## **ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Многими исследованиями усталостного разрушения деталей установлено, что после образования пластических деформаций в локальном объеме образуются микротрещины, развитие которых зависит от величины и знака остаточных напряжений. Так, остаточные напряжения растяжения в ходе длительного воздействия на микротрещины вызывают их увеличение до критических значений, при которых резко снижается прочность и износостойкость деталей, что в итоге приводит к разрушению.

В ряде работ показано, что остаточные напряжения сжатия существенно замедляют рост образования усталостных трещин. Таким образом, остаточные напряжения сжатия в области локальных пластических деформаций будут замедлять процессы разрушения, протекающие, как правило, с образованием остаточных напряжений растяжения. С учетом остаточных напряжений сжатия можно оценивать предельные размеры, а также скорость развития усталостных трещин, а, следовательно, и долговечность всей детали в целом.

В ходе исследований на примере поверхностного упрочнения конструкционных сталей комплексным борированием было изучено влияние составов смеси, а также температурно-временных параметров процессов упрочнения на распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя. Определялся как уровень остаточных напряжений, так и их знак.

На рис. 1 представлены графики распределения остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненных боросилицированием слоев при различных температурных параметрах процесса ХТО. Из графиков видно, что в результате изменения удельных объемов при фазовых превращениях, различных коэффициентов линейного расширения материалов упрочненного слоя и основы металла возникают остаточные напряжения сжатия с большим градиентом по глубине поверхностного слоя, величина которого зависит от режима ХТО.

Наибольших значений остаточные напряжения сжатия достигают при проведении боросилицирования с температурой насыщения 1020 °С. Для всех температурных параметров поверхностного упрочнения максимальных значений остаточные напряжения достигают на поверхности образцов и уменьшаются при переходе к основе металла. При этом важно, чтобы переход к основе металла осуществлялся без каких-либо скачков уровня остаточных напряжений сжатия. Для оценки влияния напряжений сжатия в поверхностном слое на усталостные характеристики материалов предпринята попытка теоретического анализа частотной зависимости эволюции элементов дислокационной структуры на первом этапе развития процесса усталостной повреждаемости. Рассмотрена динамика развития дефектов структуры дислокационным источником Франка-Рида в условиях циклического нагружения и напряжений сжатия. Выбор данного источника дислокаций обусловлен не только изученностью этой модели, но и его вкладом в механизм размножения дислокаций.

При оценке движения источника Франка-Рида необходимо: проанализировать влияние частоты и асимметрии цикла знакопеременного циклического напряжения на движение дислокационного сегмента, особенно в процессе «срабатывания» источника при достижении критической дислокации от амплитудного значения знакопеременного напряжения в широком спектре частот.

При дополнительных напряжениях сжатия возмущающая сила по модели Келера дополняется статическим напряжением, как следствием статической нагрузки. Для упрощения исходной схемы нагружения принято, что плоскость напряжений сжатия совпадает с плоскостью знакопеременного циклического напряжения.

Уравнение, моделирующее анализируемый процесс, представим в форме (1).

$$A \frac{\partial^2 \xi}{dt^2} + B \frac{\partial^2 \xi}{dt^2} + C \frac{\partial^2 \xi}{dt^2} = b \sigma \sin \omega t - b \sigma_1 \quad (1)$$

где  $A$  – эффективная масса на единицу длины,  $A = \rho b^2 / \pi$ ;  $w$  – частота нагружения, Гц;  $\rho$  – плотность материалов, г/см<sup>3</sup>;  $b$  – вектор Бюргера, см;  $B$  – коэффициент, определяющий силу динамического вязкого трения (г/см);  $C$  – коэффициент, определяющий величину силы на единицу длины, обусловленную натяжением изогнутой дислокации;  $b\sigma$  – знакопеременная сила (ее амплитуда), действующая на единицу длины за счет внешнего сдвигового напряжения;  $\sigma$  – амплитуда внешнего напряжения, дин/см<sup>2</sup>;  $G$  – упругий модуль сдвига среды, дин/см<sup>2</sup>;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $b\sigma_1$  – статическая сила на еди-

ницу длины, обусловленная поверхностными напряжениями сжатия;  $\sigma_1$  – величина статического сдвигового напряжения, дин/см<sup>2</sup>.

Цель теоретического анализа заключается в определении смещения дислокаций  $\xi = f(\rho, G, b, \sigma_1, \sigma, \omega, B)$ , а затем при фиксированном  $\xi$  в определении  $\sigma$  как функции всех остальных параметров ( $\sigma_1, \omega, G$  и т. д.). Это позволит определить пороговое напряжение срабатывания источника Франка-Рида в присутствии знакопеременного нагружения образца и поверхностных напряжений сжатия.

Решение уравнений позволяет определить критические напряжения  $\sigma$  начала развития процесса усталостного разрушения

$$\sigma = \left[ \langle \xi \rangle + \frac{\pi \sigma_1 l^2}{2Gb^3} (1 - \mu l^2) \right] \left[ \frac{1 + \frac{\omega^2 B^2 l^4}{4G^2 b^4}}{\pi(1 - \mu) l^2} Gb \right] \left[ 1 + \frac{2\pi B l^2}{Gb^2} \right] \quad (2)$$

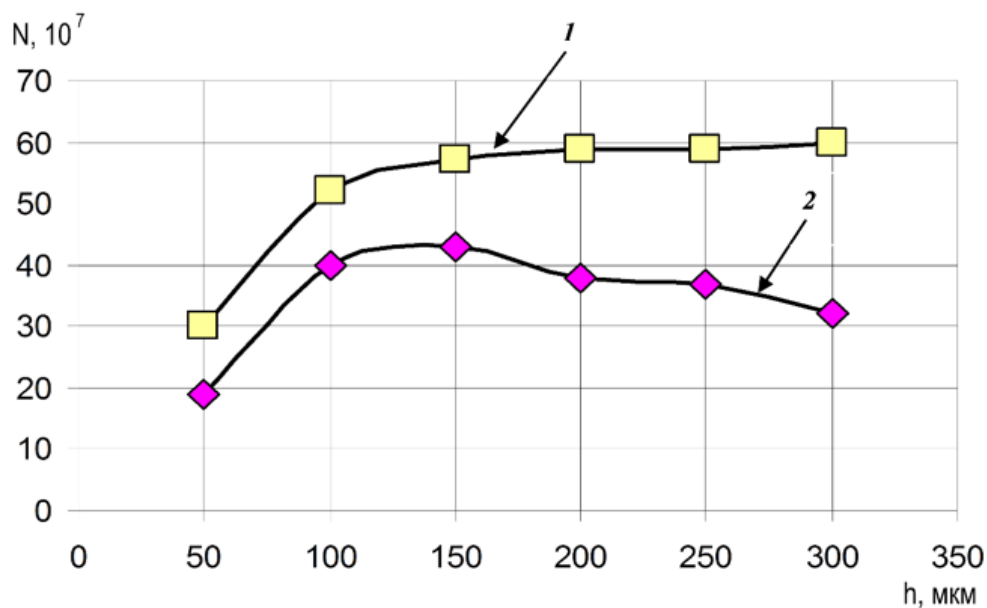
Напряжение, превышающее критическое «пороговое» сопряжено с образованием характерной ячеистой структуры, уменьшением размеров блоков и ростом микротвердости отожженных материалов уже на ранних стадиях нагружения. В этом процессе поверхностные напряжения на каждом уровне нагружения «определяют» свое семейство пороговых напряжений.

Очевидно, что с возрастанием поверхностных напряжений сжатия возрастает величина критических напряжений  $\sigma$ . В большей степени частотная зависимость и влияние дополнительных напряжений выражена у сталей (например, таких как 10 и 40Х), то есть у материалов с решеткой ОЦК. При значительно меньших по модулю напряжениях накопление повреждаемости наблюдается у меди М1 и сплава Д16, обладающих гранцентрированной решеткой.

Для экспериментальной проверки влияния напряжений сжатия, обеспечиваемых поверхностным упрочнением, проведены сравнительные испытания образцов из стали 20ХН3А, прошедших боросилицирование и борирование, в условиях знакопеременного изгиба при температуре 20оС на частоте 18,0 кГц в условиях резонансного нагружения. Нагружение всех образцов проводилось до появления усталостной трещины заданного размера, возникновение которой оценивали по падению резонансной частоты колебаний.

Результаты усталостных испытаний (рисунок 2) показывают, что при циклическом нагружении образцы, упрочненные борированием и боросилицированием, имеют различную способность к сопротивлению усталостному разрушению. Объясняется это в первую очередь неодинаковой чувствительностью материалов покрытий к дисло-

кационному скольжению, а также различным распределением в слое остаточных напряжений сжатия.



1 – боросилицирование (25 % Si); 2 – борирование

**Рисунок 1 – Влияние толщины упрочненного слоя на усталостную прочность стали 20ХНЗА**

Результаты испытаний позволили установить повышение предела выносливости  $\sigma-1$  боросилицированных образцов (содержание Si от 20 %) по сравнению с борированными в 1,4–1,6 раза при меньшем разбросе долговечности благодаря более однородной структуре упрочненного слоя. Повышение усталостных характеристик при боросилицировании связано в основном с образованием в упрочненном слое остаточных напряжений сжатия, которые замедляют образование усталостной трещины. Снижение усталостных характеристик при борировании, отмечаемое при увеличении толщины упрочненного слоя, связано с высокой хрупкостью упрочненного данным методом диффузионного слоя.

Ф.Ф. Царук, доц., канд. техн. наук;  
С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук;  
М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК УСТАЛОСТИ ВТОРИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОСЛЕ ИХ УПРОЧНЕНИЯ**

Влияние химсостава на служебные свойства неизбежно присутствующих различного рода примесей во вторичных алюминиевых сплавах препятствует их использованию в качестве заменителей первичных. Существенный экономический эффект при решении данной проблемы вынуждает проводить исследования в данном направлении.

Объектом исследований являлись плоские балочные образцы толщиной 2,0 мм из алюминиевых сплавов типа АК8МЗ с содержанием железа в пределах 0,4–1,45%. Для партии образцов была оплавлена поверхность лазерным излучением на глубину 0,2 мм с обеих сторон.

Нагружение материалов по второй собственной форме колебаний осуществлялось на специально разработанной исследовательской установке, работавшей с резонансной частотой колебаний 18 кГц [1].

Результаты исследований показывают, что содержание легирующих материалов наиболее существенно сказывается на поведении пределов усталости данных литейных сплавов. Так, железо немонотонно изменяет данную характеристику, причем как для сплава в исходном состоянии, так и после лазерной обработки. Величина предела усталости достигает максимума при содержании железа около 1%.

В результате проведенных экспериментов установлен характер влияния величины процентного содержания железа, кремния и меди в исследуемых вторичных литейных сплавах. Используемые в данной работе установки и методы исследований могут быть рекомендованы для оптимизации уровня усталостных характеристик конструкционных материалов.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Tsaruck, F. Method of the accelerated prediction of fatigue properties of metals at normal and heightened temperatures by results of high-frequency tests, Proceedings of III international symposium on tribofatigue ISTF 2000 / F. Tsaruck, A. Novitskiy – China; 2000. Hunan University Press. – P. 193 – 195.

М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук;  
С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук;  
П.В. Журба, студ. (БГТУ, г. Минск)

## **АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ДИФфуЗИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ**

Многими исследованиями разрушения деталей установлено, что после образования пластических деформаций в локальном объеме образуются микротрещины, развитие которых зависит от величины и знака остаточных напряжений. Так, остаточные напряжения растяжения в ходе длительного воздействия на микротрещины вызывают их увеличение до критических значений, при которых резко снижается прочность и износостойкость деталей, что в итоге приводит к разрушению всей поверхности.

С учетом остаточных напряжений сжатия можно оценивать предельные размеры, а также скорость развития усталостных трещин, а, следовательно, и долговечность всей детали в целом. В ряде работ показано, что остаточные напряжения сжатия существенно замедляют рост образования усталостных трещин. Таким образом, остаточные напряжения сжатия в области локальных пластических деформаций будут замедлять процессы разрушения, протекающие, как правило, с образованием остаточных напряжений растяжения.

В ходе исследований было изучено влияние составов смеси, а также температурно-временных параметров различных процессов упрочнения на распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя. Определялся как уровень остаточных напряжений, так и их знак.

Экспериментальное определение характера распределения остаточных напряжений в упрочненных различными методами диффузионных слоях на косых шлифах образцов размерами  $10 \times 10 \times 10$  мм методом рентгеноструктурного анализа проведено на установке фирмы Bruker. Микронапряжения связаны с неоднородной упругой деформацией кристаллической решетки металла и характеризуются величиной относительной микродеформации решетки [8] по формуле (1):

$$\sigma_{II} = E \cdot \left( \frac{\Delta a}{a} \right) + \frac{E_{\beta}}{4 \cdot R \cdot \operatorname{tg} \Theta} \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;  $\beta$  – физическое уширение интерференционной линии;  $R$  – радиус камеры или радиус окружности, по ко-



торой движется счетчик (дифрактометр и т.д.), мм;  $\Theta$  – угол отражения соответствующей интерференционной линии.

Диаметр блоков когерентного рассеяния в направлении, перпендикулярном кристаллографической плоскости, отражение от которой зафиксировано на дифрактограмме, определяется из соотношения по формуле (2):

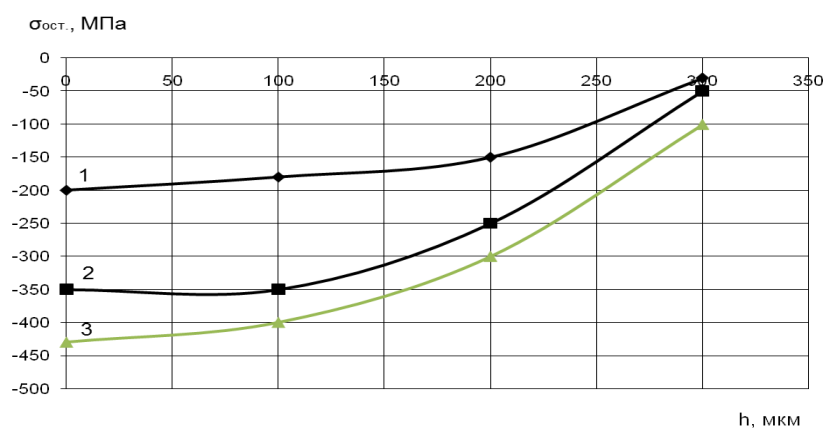
$$D = \frac{0,94 \cdot \lambda \cdot R}{\beta \cdot \cos \Theta}. \quad (2)$$

Физическое уширение интерференционной линии  $\beta$  может быть определено при обработке рентгенограммы исследуемого образца и сравнении ее с рентгенограммой эталонного. Уширение вызвано неоднородностью излучения, геометрическими условиями съемки или структурными особенностями материала (микронапряжения, измельчение блоков, неоднородность химического состава и т. д.).

При обработке результатов рентгеновского анализа определяли ширину интерференционной линии на дифрактограмме, ее ширину с поправкой на монохроматичность излучения и физическое уширение  $\beta$ , полученное после внесения поправки на геометрические условия съемки, так как ширина одноименной линии эталона обусловлена только геометрическими условиями съемки – инструментальным фактором. Для этого предварительно отжигом добивались снятия микронапряжений в эталоне и обеспечения величины блоков  $D$  более  $10^{-7}$  м.

Таким образом, физическое уширение интерференционной линии на рентгенограмме металла или сплава обусловлено только физическими факторами, т.е. связанными с реальной структурой сплава. Уровень микродеформаций и величину блоков когерентного рассеивания находили с использованием методики. Съемки проводились с использованием излучения Сока; анализировалось физическое уширение линий (110) и (211).

На рисунке 1 представлен график распределения остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненных слоев с исследованием изучаемых составов насыщения при различных температурно-временных параметрах процессов ХТО. Из графиков видно, что в результате изменения удельных объемов при фазовых превращениях, различных коэффициентов линейного расширения материалов упрочненного слоя и основы металла возникают остаточные напряжения сжатия с большим градиентом по глубине поверхностного слоя, величина которого зависит от способа ХТО.



1 – 900 °C; 2 – 950 °C; 3 – 1020 °C

**Рисунок 1 – Распределение остаточных напряжений сжатия по глубине упрочненного боросилицированием слоя на стали 20X при различных температурах насыщения**

Наибольших значений остаточные напряжения сжатия достигают при проведении борирования с температурой насыщения 1020 °C. Для всех рассматриваемых составов и температурно-временных параметров поверхностного упрочнения максимальных значений остаточные напряжения достигают на поверхности образцов и уменьшаются при переходе к основе металла.

При этом важно, чтобы переход к основе металла осуществлялся без каких-либо скачков уровня остаточных напряжений сжатия. Было установлено, что с увеличением времени и температуры насыщения при проведении борирования и боросилицирования уровень остаточных напряжений сжатия повышается.

При этом с повышением температуры насыщения происходит увеличение уровня остаточных напряжений сжатия как на поверхности, так на глубине 150–200 мкм, что дополнительно повышает прочность и износостойкость упрочненного слоя.

Экспериментальные результаты свидетельствуют о достаточно равномерном распределении остаточных напряжений сжатия по глубине слоя, особенно при упрочнении методом боросилицирования, что хорошо согласуется с распределением микротвердости и микрохрупкости по глубине поверхностного слоя.

Можно высказать предположение, что у такого упрочненного слоя должна быть прочная связь с основой металла. Это важно для работы деталей, работающих при высоких динамических нагрузках.

М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук;  
С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук;  
Ф.Ф. Царук, доц., канд. техн. наук;  
А.М. Лось, ст. преп. (БГТУ, г. Минск)

## **ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ СТАЛИ ПОВЕРХНОСТНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ**

Для изготовления изделий, работающих в условиях циклических нагрузок, а также термосмен обычно используются стали типа 5ХНМ. Стойкость подобной оснастки во многом определяется комплексом механических свойств, особенно усталостными характеристиками материала. Определение таких характеристик необходимо также для выбора рациональных параметров термической и химико-термической обработки таких изделий. Однако используемые в настоящее время методики низкочастотных испытаний являются весьма длительными и энергоемкими, особенно при наработке большого числа циклов нагружения ( $10^6$ – $10^7$  циклов). Поэтому рассмотрена возможность использования высоких частот нагружения (18,0 кГц) для реализации усталостных испытаний штамповой стали.

Для определения влияния частоты нагружения на характеристики усталости материалов, а также характера изменений их физико-механических свойств были использовано испытательное оборудование, позволяющее нагружать образцы для испытаний механическими колебаниями со следующими частотами: 0,15; 3; 9; 18 кГц.

Проведенные исследования кинетики физико-механических характеристик при проведении усталостных испытаний стали 5ХНМ показали, что наиболее интенсивно изменения структурно-чувствительных характеристик для выбранных уровней переменных напряжений происходят при циклическом нагружении до 107 циклов. Так, например, увеличение микротвердости штамповой стали 5 ХНМ отмечалось уже после 105 циклов нагружения.

Для тонкой структуры, исследованных материалов, также характерно наиболее существенное изменение относительной плотности дислокаций в течение первых циклов нагружения. В дальнейшем, с наработкой циклов наступает насыщение, сменяющееся на стадии развития микротрещин постепенным переходом через экстремум.

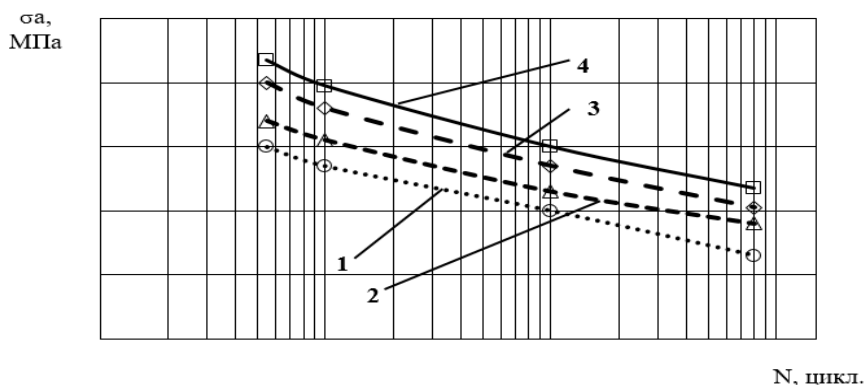
В трансформации физико-механических характеристик материалов просматриваются определенные закономерности. При циклическом деформировании происходит упрочнение материалов на началь-

ных этапах нагружения, что находит свое отражение в повышении микротвердости, увеличении плотности дислокаций и микронапряжений. Затем наступает стадия насыщения, сменяемая на больших базах испытаний стадией разупрочнения, характеризующейся падением значений вышеперечисленных характеристик. При достижении определенного числа циклов нагружения происходит насыщение материала вакансиями, которые эффективно взаимодействуя с движущимися дислокациями обуславливают их закрепление и исчезновение. При дальнейшем увеличении числа циклов нагружения происходит образование группы вакансий с большой энергией активации. Кроме того, повышение микротвердости связано с интенсивным пластическим деформированием микрообъемов материала. При этом в стенках дислокационных ячеек происходит зарождение и развитие субмикротрещин. По мере нарастания пластического деформирования материала развивается процесс разупрочнения, характеризующийся уменьшением плотности дислокаций, снижением уровня микронапряжений и микротвердости. Отсутствие существенных качественных различий в характере развития дислокационной структуры при высоких и низких частотах нагружения приводит к аналогии кинетики изменений рассматриваемых величин в исследованном диапазоне частот.

Очевидно, что с увеличением частоты происходит возрастание скорости деформации металлов при одном и том же числе циклов нагружения. Тем самым, релаксационные процессы, играющие существенную роль при статическом нагружении, с ростом частоты нагружения замедляются. Пропорционально частоте нагружения увеличивается и количество циклов до начала протекания процесса разупрочнения. Увеличение частоты, приводящее к повышению скорости упругой деформации, способствует и росту скорости движения дислокаций; при этом повышается эффективность их размножения. Кроме того, с повышением частоты увеличивается и количество вакансий, и возникает их исключительно высокая концентрация, в результате чего происходит конденсация их в диски, параллельные наиболее плотно упакованным плоскостям. При достижении некоторого критического размера диска его стороны сплюсциваются и соединяются вместе, образуя дислокационную петлю. Все это приводит к упрочнению, в результате чего повышается плотность дислокаций и микротвердости.

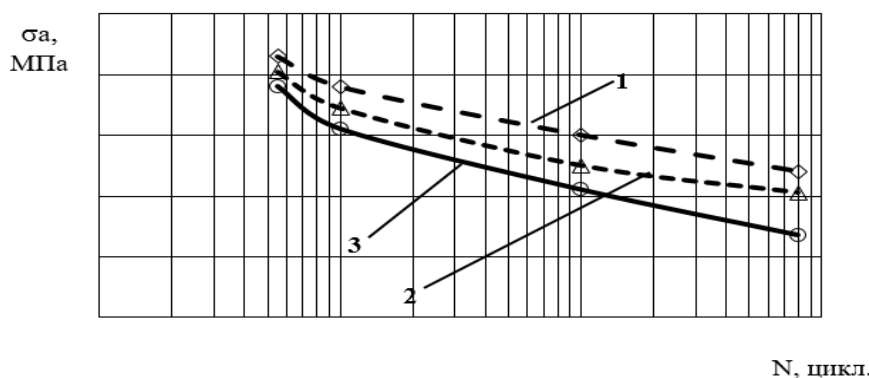
Следует отметить, что подобные зависимости характерны и для повышенных температур испытаний стали 5ХНМ. Повышение температуры способствует более раннему протеканию процессов упрочнения-разупрочнения в связи с активацией взаимодействия дислокаций и точечных дефектов, а также передвижения дислокаций.

Результаты усталостных испытаний также показали, что форма кривых усталости с увеличением частоты не изменяется (рисунок 1). Кривые усталости для разных частот располагаются практически эквидистантно. Можно отметить монотонное увеличение усталостной долговечности с ростом частоты нагружения. Аналогичные данные были получены при различных температурах (рисунок 2).



1 – 0,3 кГц; 2 – 3,0 кГц; 3 – 9,0 кГц; 4 – 18 кГц

**Рисунок 1 – Усталостные кривые для стали 5ХНМ при испытаниях на различных частотах нагружения**



1 – 20 °С; 2 – 200 °С; 3 – 250 °С

**Рисунок 2 – Усталостные кривые для стали 5ХНМ при различных температурах испытаний (частота нагружения 18,0 кГц)**

Приведенные исследования показали, что, несмотря на определенные количественные различия кинетики физико-механических характеристик рассматриваемых материалов, процесс усталостного разрушения у них развивается по одним и тем же закономерностям, характеризующаясь сочетанием процессов упрочнения-разупрочнения. Это подтверждает единую физическую природу развития усталостной повреждаемости в рассмотренном диапазоне частот и температур и, следовательно, принципиальную возможность реализации ускоренных усталостных испытаний с использованием высоких частот нагружения.

М.Н. Пищов, доц., канд. техн. наук;  
С.Е. Бельский, доц., канд. техн. наук;  
Ф.Ф. Царук, доц., канд. техн. наук;  
А.М. Лось, ст. преп.; П.В. Журба, студ.  
(БГТУ, г. Минск)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПРИ ИХ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРУЖЕНИИ**

Целью данной работы является разработка методики ускоренного прогнозирования низкочастотных характеристик циклической прочности конструкционных материалов по результатам усталостных испытаний и изменений физико-механических характеристик на высокой частоте нагружения. Для достижения этой цели проводились усталостные испытания различных материалов (стали 20Х13, меди М1, алюминиевых сплавов Д16 и АМг2Н) в широком частотном диапазоне (0.3 - 18 кГц) знакопеременного изгиба при регулярном нагружении с использованием электродинамического вибростенда (0.3 кГц) и специально созданных магнитострикционных испытательных установок (2.8, 8.8 и 18 кГц).

Все испытательное оборудование работало в автоколебательном режиме с автоматическим поддержанием амплитуды колебаний образцов, которые представляли собой балочки прямоугольного сечения (2х6 мм), вырезанные вдоль направления проката, подвергнутые затем шлифовке, электрополировке и термообработке.

Статистическая обработка результатов усталостных испытаний, осуществленная на основании гипотезы нормального закона распределения, позволила установить, что частота нагружения практически не влияет на характеристики рассеяния усталостной долговечности исследованных материалов. Увеличение частоты нагружения практически не сказалось на форме усталостных кривых, при сохранении их эквидистантности и приводило к монотонному росту усталостной долговечности на всех базах испытаний. При этом увеличение базы испытаний приводило к уменьшению разницы между пределами ограниченной выносливости для всех материалов.

Все вышеперечисленное позволило предположить отсутствие значимых различий в физике процесса усталостного повреждения на низких и высоких частотах нагружения, для подтверждения чего были проведены исследования кинетики физико-механических характеристик (ФМХ) материалов в процессе нагружения на различных частотах.

тах. Перед испытаниями и после наработки определенного числа циклов определялись следующие структурно-чувствительные свойства (микротвердость, электросопротивление, магнитные характеристики, а также характеристики тонкой структуры: плотность дислокаций, напряжения второго рода, размер блоков).

Установлено, что ФМХ являются частотнозависимыми, причем с ростом частоты колебаний характерные точки кривых изменения монотонно сдвигаются в сторону увеличения числа циклов при одинаковой форме этих кривых и отражает факт некоторого запаздывания процесса усталостного повреждения с ростом частоты из-за меньшего времени действия максимальных напряжений. Сохранение конфигурации кривых говорит об отсутствии коренного отличия процесса усталостного нагружения на существенно различных скоростях приложения циклических напряжений.

Данные обстоятельства позволяют предложить физически обоснованную методику ускоренного прогнозирования низкочастотных характеристик циклической прочности конструкционных материалов. Для этого было введено понятие пороговых напряжений, т.е. величины циклических напряжений  $\sigma_{пн}$ , ниже которых не происходит каких-либо необратимых изменений ФМХ на данной базе испытаний. Результаты исследований данной характеристики показали монотонный ее рост с увеличением частоты, а также, что весьма ценно, существование постоянной разности между ней и величиной ограниченных пределов выносливости во всем исследованном диапазоне частот для каждого материала.

Методика прогнозирования предполагает определение усталостных характеристик материала на возможно более высокой частоте с соблюдением ограничений по температуре саморазогрева и одновременным определением величины высокочастотного порогового напряжения  $\sigma_{пв}$  (например, по результатам исследования микротвердости). Одновременно испытаниям подвергаются образцы на низкой частоте с целью определения низкочастотного порогового напряжения  $\sigma_{пн}$ . По завершению высокочастотных испытаний определяется величина  $\Delta\sigma$  – разность между ограниченным пределом выносливости на высокой частоте  $\sigma_{-1в}$  и величиной порогового циклического напряжения  $\sigma_{пв}$ . Затем с помощью величины  $\Delta\sigma$  и находится искомый предел низкочастотной выносливости как  $\sigma_{-1н} = \sigma_{пн} + \Delta\sigma$ .

Экспериментальная проверка данной методики прогнозирования на вышеназванных материалах показала ее достаточную точность при значительном сокращении длительности и трудоемкости определения усталостных характеристик.

А.В. Блохин, канд. техн. наук., доц.;  
С.Е. Бельский, канд. техн. наук. доц.;  
Адель Рашид (БГТУ, г. Минск)

## **ПОВЫШЕНИЕ КОМПЛЕКСА МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АІ-СПЛАВОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ, ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

Введение. Одним из востребованных сплавов по применяемости в самых разных отраслях промышленности являются сплавы на основе алюминия. Анализируя информацию Международного института алюминия [1], производство первичного алюминия сегодня достигло десятков млн. т в год и его мировое потребление уступает только сплавам на основе железа.

В мире наиболее крупными потребителями алюминия и, соответственно, поставщиками его скрапа, являются: транспорт, строительная и пищевая промышленность, машиностроение. Широкое применение алюминия и сплавов на его основе в транспортном машиностроении определяется высокими показателями удельной прочности, повышенной коррозионной стойкостью, а также способностью к демпфированию колебаний и большому поглощению энергии. Особенно важны эти показатели при производстве отдельных деталей, узлов и агрегатов в транспортном машиностроении. В связи с этим темпы роста использования деталей из алюминиевых сплавов в автотранспорте показывают устойчивую тенденцию к увеличению.

Следует отметить, что сегодня в мировой практике наблюдается неуклонный рост производства алюминиевых сплавов из вторичного сырья с использованием лома и отходов самых различных производств путем их переплавки. Учитывая, что доля затрат электроэнергии в себестоимости производства первичного алюминия высока (составляет не менее 25-30%), широкое внедрение использования алюминиевых сплавов, полученных из вторичного сырья является весьма перспективным. Одним из факторов, определяющих постоянный интерес к переработке алюминийсодержащих отходов, являются относительно малые энергозатраты – для изготовления таких сплавов при плавке в электропечах составляют около 0,4-0,5 кВт·ч. [2], что в 30-40 раз ниже, чем при производстве первичного алюминия методом электролиза. Кроме того, необходимо помнить, что при производстве первичного алюминия примерно 10-20% себестоимости включают затраты на углеродные аноды.



Одной из основных проблем рециклинга алюминийсодержащих отходов является более низкое качество получаемых сплавов по сравнению со сплавами, полученными из первичного алюминия. Основной причиной этого является высокая степень загрязнения алюминиевого лома и алюминийсодержащих отходов посторонними материалами, такими как полимеры, органические и неорганические масла, деталями из других металлических и неметаллических конструкционных материалов. В связи с этим, алюминиевые сплавы, полученные после переработки вторичного сырья, характеризуются повышенным содержанием интерметаллидных фаз, неметаллических включений, растворенных газов, отличаются гетерогенностью структуры и поэтому уступают по широкому перечню характеристик, в том числе – механических, по сравнению с первичным.

Для обеспечения высокого качества алюминиевых сплавов, изготовленных из вторичного сырья, общепринятыми технологическими процессами [3] являются: сортировка скрапа, обеспечивающая получение требуемого состава при минимуме примесей, отрицательно влияющими на механические характеристики (железа, магния и др.); рафинирование, легирование и модифицирование сплавов; плавка в дуговых печах постоянного тока, дающая возможность отказаться от процессов рафинирования и модифицирования, в три раза снизить затраты на переплав по сравнению с газовыми печами.

Авторы работы предлагают для повышения ряда механических характеристик деталей, изготовленных из вторичных алюминиевых сплавов, использовать термоциклическую обработку. Целью данной работы было исследование влияния различных режимов термоциклической обработки на характеристики усталости образцов, изготовленных из вторичных алюминиевых сплавов.

Основная часть. Исследования проводились на образцах из сплава по химическому составу близком к сплаву АК9М2 со следующим химическим составом: 9,1-9,9 % Si, 1,9-2,4 % Cu, 0,02-0,06 % Mn, 0,05-0,15 Mg, до 1,5%Fe, остальное – Al.

Образцы для испытаний вырезались из слитка, полученного литьем в кокиль, и представляли собой плоские балочки с прямоугольным поперечным сечением (2×6 мм) с уширением на одном из концов до 15 мм для обеспечения надежного крепления на хвостовике концентраторе.

Для повышения механических характеристик, в том числе усталостных, алюминиевых сплавов, полученных из вторичного сырья, предполагается обеспечить совершенствованием технологии термической обработки, включающим термоциклирование до закалки, закалку

и старение, проводимое путем термоциклирования [4]. Авторами было предложено увеличить как температурный диапазон термоциклирования, проводимого до закалки, так и другие режимы обработки.

После обработки по предлагаемому и известному [4] способам были определены ряд физико-механических характеристик сплава (предел прочности  $\sigma_B$ , относительное удлинение  $\delta$ , усталостная долговечность  $N_{ц}$  при частоте испытаний 18 кГц и нагрузке  $\sigma_i = 0,7 \sigma_B$ ), представленные в таблице наряду с режимами термической обработки.

Полученные результаты показывают, что предложенный способ обеспечивает повышение усталостной долговечности испытываемых образцов из вторичного литейного сплава на 20-25 %, повышение предела текучести не менее чем на 15%, при сохранении пластичности как у известного способа [4].

**Таблица 1 – Режимы термообработки образцов изготовленных из вторичного алюминиевого сплава типа АК9М2, обработанного известным и предложенным способами**

Способ обработки	Режимы обработки										Результаты испытаний		
	Термоциклирование до закалки					Старение							
	Число циклов	Температура, °С		Скорость, °С/с		Число циклов	Температура, °С		Скорость, °С/с		$\sigma_s$ , МПа	$\delta$ , %	$N_{ц}$ , ( $10^5$ )
		Нагрев	Охлаждение	Нагрев	Охлаждение		Нагрев	Охлаждение	Нагрев	Охлаждение			
Известный	15	525	350	2,0	3,0	15	250	20	2,0	5,0	185	2,4	7,2
Предложенный	20	525	200	4,0	7,0	15	250	20	2,0	5,0	225	3,5	13,4
	30	525	200	3,0	7,0	15	250	20	2,0	5,0	217	4,2	14,7
	25	525	200	5,0	10,0	15	250	20	2,0	5,0	255	3,8	15,3
	25	525	200	4,5	7,5	15	250	20	2,0	5,0	250	4,5	12,5
	25	525	200	2,0	3,0	15	250	20	2,0	5,0	252	3,1	10,5
	27	525	200	7,0	7,0	15	250	20	2,0	5,0	230	2,7	9,4
	24	525	200	4,5	12,0	15	250	20	2,0	5,0	190	3,0	10,9
	18	525	200	3,5	7,5	15	250	20	2,0	5,0	220	2,5	8,7
	34	525	200	3,4	6,5	15	250	20	2,0	5,0	212	2,9	9,5

Для достижения заявленного эффекта повышения механических характеристик, термоциклирование до закалки было предложено про-

водить в интервале температур 200-525 °С со скоростью нагрева 3-5 °С/с и охлаждения 5-10 °С/с при количестве циклов 20-30, причем охлаждение в каждом цикле до закалки, осуществлять с одновременным наложением ультразвуковых колебаний с частотой 18-24 кГц (см таблицу).

Заклучение. Предложенный способ термической обработки может быть использован на предприятиях машиностроительного, станкостроительного и приборостроительного профиля для отливки деталей, работающих в условиях динамических нагрузок (блоки двигателей, кронштейны, поршни, радиаторы и т.п.).

Для дальнейшего совершенствования и обоснования более рациональных режимов предложенной термической обработки алюминиевых сплавов, полученных с использованием вторичного сырья, необходимы дополнительные исследования.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. International Aluminium Institute [Electronic resource] – Mode of access: [https://stats.world-aluminium.org/iai/stats\\_new/index.asp](https://stats.world-aluminium.org/iai/stats_new/index.asp). – Date of access: 12.12.2021.

2. Макаров, Г.С. Российский рынок вторичного алюминия / Г.С. Макаров // Рынок вторичных металлов. – 2004. – № 5/25. – С.70-73.

3. Рязанов, С.Г. Тенденции и проблемы использования вторичных алюминиевых сплавов / С.Г. Рязанов, А.А. Митяев, И.П. Волчок // Nauka i Technologia: Труды VI конференции. – Zakopane. – 2003. – С. 99–102.

4. Патент РБ на изобретение № 12582 (прототип). Опубл. 25.09.2009 Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуальн. уласнасці. – 2009. – № 6. – С. 119.

А.В. Блохин, канд. техн. наук., доц.;  
С.Е. Бельский, канд. техн. наук., доц.;  
Адель Рашид (БГТУ, г. Минск)

## РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПЛОСКИХ БАЛОЧНЫХ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ В РЕЗОНАНСНОМ РЕЖИМЕ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ КОЛЕБАНИЙ ЧЕРЕЗ ЗАДЕЛКУ

**Введение.** При проведении усталостных испытаниях образцов на установках резонансного типа (установки с магнитострикционными возбудителями, электродинамическими вибраторами) при нагружении знакопеременным изгибом консольно закрепленных образцов, используют балочки прямоугольного или круглого сечения. При этом испытания проводят как на первой, так и на второй формах собственных колебаний. В таких случаях напряжения в опасном сечении определяют одним из следующих методов [1]: определение напряженного состояния путем предварительной динамической тарировки, путем анализа упругой линии образца. Недостатком первого способа является невозможность его использования на высоких частотах нагружения (10 кГц и более) из-за сравнимых размеров тензодатчиков и образцов, подвергаемых испытаниям. Во втором случае изгибающий момент и напряжения, действующие в опасном сечении, определяются на основании уравнения, описывающего колебания балки с заземленным концом. Применение образцов в виде балок постоянного сечения при усталостных испытаниях обладает тем преимуществом, что наряду с относительной простотой в определении напряженно-деформированного состояния, позволяет использовать технологичные образцы призматического сечения, которые можно вырезать как из листового материала (для испытаний деформируемых сплавов), так и из слитков (для испытаний литейных сплавов).

При исследовании колебаний балки без учета сдвига и инерции вращения в случае жесткой заделки уравнения упругой линии для первой и второй формы колебаний, полученные на основании общего уравнения технической теории стержней [2], будут иметь вид:

$$y(x) = \frac{1}{2} Am[(chkx + \cos kx) - 0,734(shkx + \sin kx)] \quad (1)$$

$$y(x) = \frac{1}{2} Am[(chkx + \cos kx) - 1,0185(shkx + \sin kx)] \quad (2)$$

Уравнение изгибающих моментов и изгибающих напряжений:

$$M(x) = \frac{\partial^2 y(x)}{\partial x^2}, \quad (3)$$

$$\sigma(x) = \frac{M(x)}{W_x}, \quad (4)$$

Как уже выше отмечалось, полученные выражения будут справедливы для незакрученной балки с прямолинейной осью и малым, остающимся плоским поперечным сечением, при исследовании колебаний без учета сдвига и инерции вращения сечения в случае жесткой заделки. При высокочастотном нагружении образцов для испытаний исследование процесса усталости усложняется трудностями с определением величины напряжений методами тензометрирования. В связи с этим возникает необходимость усовершенствовать теоретические методы расчета напряженного состояния образцов для испытаний.

Для смещения места усталостного разрушения от заделки используются образцы с увеличенной площадью поперечного сечения в районе заделки [3], что приводит к изменению жесткости прикорневого участка образца. Кроме того, при сравнении экспериментальных и расчетных частот колеблющихся объектов, установлено, что действительная частота колебаний закрепленных объектов, всегда меньше частоты, вычисленной теоретически из условия абсолютной жесткости заделки. Несовершенство заделки объясняется влиянием таких факторов, как сила трения, качество обработки сопрягаемых поверхностей, упругое взаимодействие тел и т. д.

Для повышения точности определения напряжений в опасном сечении необходимо учесть ряд следующих факторов: депланация поперечного сечения образца, инерция вращения элементов балки, деформация сдвига, влияние податливости заделки на напряжения в опасном сечении, влияние жесткости прикорневого участка образца, влияние смещения опасного сечения от заделки. Для учета влияния податливости заделки на напряженно-деформированное состояние образцов, колеблющихся по второй форме, автор [1] предварительно прибегали к расчетно-экспериментальному определению коэффициента жесткости заделки, с помощью которого затем корректировались граничные условия для сечения, примыкающего к заделке. Для этого экспериментально определяли частоту резонансных колебаний балки, ее толщину, координаты характерных точек (свободного края образца и узлов колебаний для высших форм) и вычисляли значение волнового коэффициента  $k$ . Замерив микроскопом величину прогиба (амплитуду) колебаний на краю образца ( $x=0$ ) и определяя одно из неизвестных, т. е.  $A = y_0$ . Второе неизвестное – постоянную  $B$  определя-

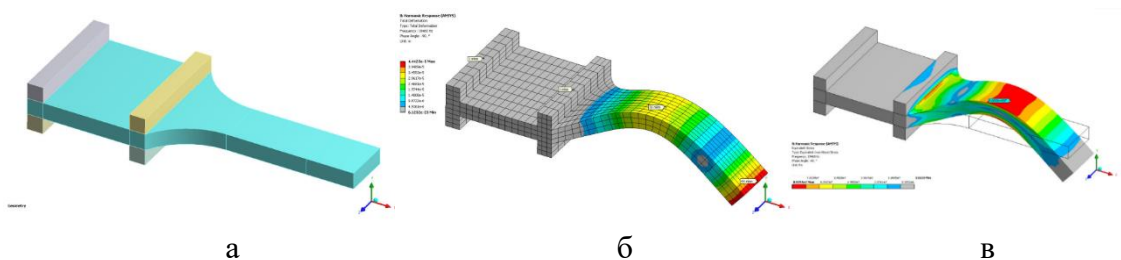
ли, выразив ее аналогично  $A$  через амплитуду колебаний характерных точек сечения  $x = b$  колеблющейся балки  $y(b)$ . Тогда

$$B = \frac{J}{T(kb)} (y(b) - y_0 S(kb)), \quad (5)$$

В случае, когда  $b$  – координата узла колебаний, то  $y(b) = 0$  и тогда

$$B = -y_0 \frac{S(kb)}{T(kb)}. \quad (6)$$

**Основная часть.** Для анализа влияния вышеназванных факторов на величину напряжений в опасном сечении была создана твердотельная модель образца с учетом физико-механических характеристик материала [4, 5], из которого он изготовлен (рис. 1).



а – твердотельная модель образца; б – деформированное состояние образца колеблющегося на второй форме; в – напряжения в опасном сечении

**Рисунок 1 – Моделирование напряженно-деформированного состояния плоского балочного образца методом конечных элементов**

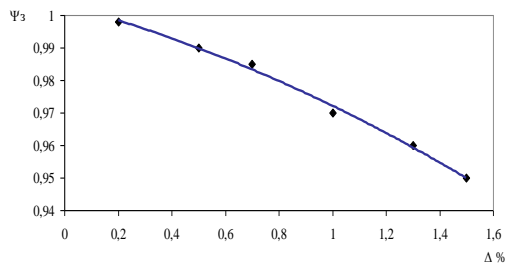
В результате исследований этой модели были установлены эмпирические зависимости, которые графически представлены на рис. 2.

Таким образом, выражения для определения напряжений в опасном сечении можно представить в следующем виде [5]:

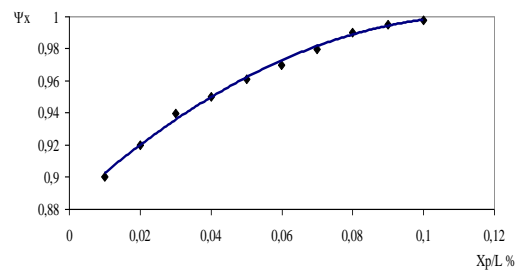
$$\sigma_a(x = x_p) = \psi_3 \cdot \psi_{II} \cdot \psi_X \cdot A_m \cdot \sigma(x = x_p), \quad (7)$$

где  $A_m$  – амплитуда колебаний свободного конца образца;  $\sigma(x=x_p)$  напряжения, рассчитанные на основании уравнения технической теории стержней;  $\psi_3$  – коэффициент учитывающий влияние податливости заделки;  $\psi_{II}$  – коэффициент учитывающий влияние увеличения площади поперечного сечения переходного участка образца (для второй формы колебаний коэффициент  $\psi_{II}=1$ );  $\psi_X$  – коэффициент учитывающий влияние жесткости прикорневого участка образца.

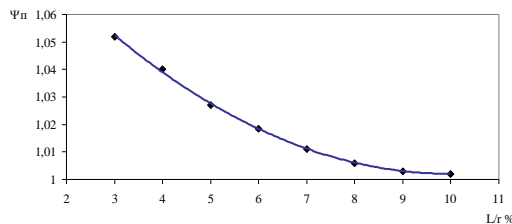
Сравнение результатов расчетов по выражениям (6) и (7) с исследованиями других авторов показали высокую степень их сходимости, а сравнение результатов испытаний модельных образцов с использованием методов тензометрирования с предлагаемым расчетным методом показало разбежку не более 3-5% в определении напряженно-деформированного состояния.



*a* – влияние податливости заделки на напряжения в опасном сечении



*б* – влияние жесткости прикорневого участка образца



*в* – влияние смещения опасного сечения от заделки

**Рисунок 2 – Влияние различных факторов на напряжения в опасном сечении образца**

Использование такого метода определения напряжений в опасном сечении позволяет учесть геометрические параметры реального образца, податливость устройства крепления при относительной простоте и высокой точности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / В. А. Кузьменко [и др.]; под общ. ред. В.А. Кузьменко – Киев.: Наукова думка, 1979. – 335 с.
2. Бабаков, И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков – М.: Наука, 1968. – 560 с.
3. МР 91-83. Методические рекомендации: Расчеты и испытания на прочность: Метод испытаний на усталость при высоких звуковых частотах поперечных колебаний образцов. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 25 с.
4. Блохин, А.В. Использование методов конечно-элементного моделирования для расчета напряженно-деформированного состояния элементов конструкций при циклическом изгибе / А.В. Блохин, А. М. Лось // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 288–290.
5. Блохин, А.В. Методика расчета напряжений в опасном сечении плоских балочных образцов, нагружаемых знакопеременным изгибом / А.В. Блохин // Труды БГТУ. №2(140), Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2011. – С. 291–294.

А.В. Блохин, канд. техн. наук., доц.;  
А.И. Сурус, канд. техн. наук., доц.;  
М.Н. Пищов, канд. техн. наук., доц.;  
Я.И. Нестерова, студ.  
(БГТУ, г. Минск)

## **ОСОБЕННОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫМ ИЗГИБОМ**

Введение. Специфика использования литейных алюминиевых сплавов связана с необходимостью учета их структуры после литья, а также пористости при оценке возможности использования таких материалов для изготовления деталей машин и элементов конструкций, работающих в условиях циклического нагружения. Неоднородность структуры, особенно характерная для сплавов с использованием вторичного сырья, не может не сказаться и на механизме усталостного разрушения данных материалов.

Основная часть. Целью работы было на основании фактографического анализа усталостных изломов образцов для испытаний, установить какое влияние оказывает изменение технологии плавки на развитие процесса усталостного повреждения. Для этого использовался сканирующий микроскоп на изломах образцов, которые подвергались нагружению знакопеременным изгибом в диапазоне частот 0,3-18 кГц. Нагружение образцов проводилось на выбранных уровнях напряжений вплоть до полного их разрушения. В качестве базового варианта исследовались образцы из сплава 0051, близким по химическому составу АК8МЗ, выполненного под покровным флюсом (33% KCl, 67% NaCl с продувкой рафинирующим флюсом (45 % NaCl, 15% KCl, 40% AlF<sub>3</sub>). Подобную обработку применяют на многих предприятиях, изготавливающих детали из литейных алюминиевых сплавов. Также были изучены образцы из сплава 0052, также близкого по составу АК8МЗ, но обработанного дополнительно модифицирующе-рафинирующим комплексом, в количестве 0,05% от массы расплава. Образцы для испытаний вырезались из слитков, полученных литьем в кокиль, и представляли собой плоские балочки с прямоугольным поперечным сечением (2×6 мм) с уширением на одном из концов до 15 мм для обеспечения надежного крепления на хвостовике концентратора.

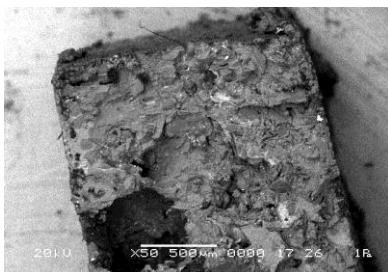


На снимках изломов образцов для испытаний видны поры и неметаллические включения (рис. 1, а; 2, а; 3, а и 4, а), являющиеся концентраторами напряжений и снижающие усталостные характеристики материалов. Следует отметить, что у образцов, полученных из сплава 0052 размер пор существенно меньше. Для всех рассматриваемых образцов в связи с повышенной хрупкостью литейного сплава характерны участки циклического скола. Для центральной части образца характерен ямочный рельеф. Долом в большинстве случаев происходит по механизму межзеренного хрупкого разрушения.

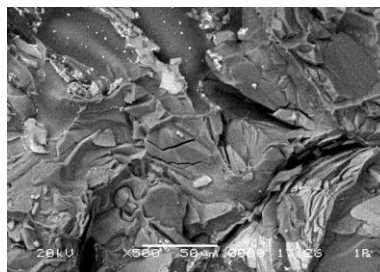
Для образцов из материала 0051, испытанных на низкой частоте (0,3 кГц) в очаге разрушения можно наблюдать зону сдвига, ориентированную под некоторым углом к плоскости излома (рис. 1, б). Обращает на себя внимание большое количество микротрещин. В зоне роста трещины участки циклического скола становятся все более крупными. Это связано с тем, что вблизи очага разрушения из-за малого уровня напряжений в устье трещины скольжение происходит по одной из кристаллографических плоскостей. При дальнейшем росте трещины скольжение охватывает все новые и новые плоскости и происходит по всему зерну. При большом увеличении (рис. 1, б и 2, б) на участках циклического скола можно наблюдать усталостные бороздки. С повышением частоты испытаний, из-за меньшего времени пребывания материала под нагрузкой, в каждом цикле в большей мере проявляются признаки пластической деформации. Участки циклического скола уступают место ямочному микрорельефу. Подобный вид излома согласуется с результатами испытаний, показывающих существенное повышение усталостной долговечности материала с возрастанием частоты. В целом частота испытаний не повлияла существенно на механизм усталостного разрушения.

Технология выплавки сплавов в значительной мере меняет картину усталостного разрушения. Рис. 3 и 4 показывают, что на всех стадиях разрушения развитие трещины сопровождается определенной пластической деформацией, о чем свидетельствует преобладание ямочного микрорельефа (рис. 4, б) и большое количество полос скольжения (рис. 3, б). В зоне усталостного разрушения участки циклического скола почти не встречаются. С повышением частоты испытаний полосы скольжения сменяются участками вязкого разрушения, наиболее характерными на определенном удалении от первичных пар. Это свидетельствует о большей циклической деформации на поверхности излома сплава 0052, а, следовательно, о лучшем сопротивлении данного материала развитию трещины, что подтверждается результатами усталостных испытаний. Применение модифицирующе-

рафинирующих комплексов обеспечило не только дробление фаз  $Al_3Fe$ , но и лучшую связь игл железосодержащей фазы с матрицей. Как видно на рисунке 4 б иглы  $Al_3Fe$  (светлого цвета) практически не участвуют в зарождении и развитии усталостных трещин, что также повышает сопротивление данного материала разрушению.



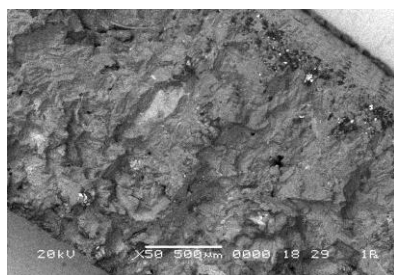
*a*



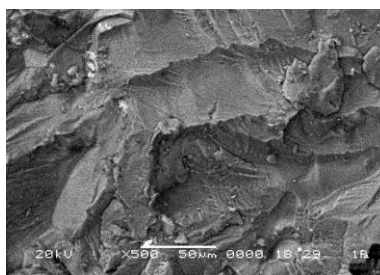
*б*

*a* – x50; *б* – x500

**Рисунок 1 – Усталостный излом сплава 0051 частоте испытаний 0,3 кГц**



*a*



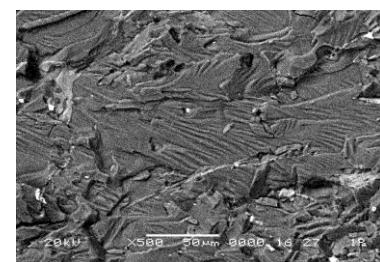
*б*

*a* – x50; *б* – x500

**Рисунок 2 – Усталостный излом сплава 0051 при частоте испытаний 18 кГц**



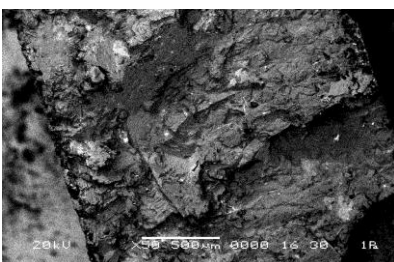
*a*



*б*

*a* – x50; *б* – x500

**Рисунок 3 – Усталостный излом сплава 0052 при частоте испытаний 0,3 кГц**



*a*



*б*

*a* – x50; *б* – x500

**Рисунок 4 – Усталостный излом сплава 0052 при частоте испытаний 18 кГц**

Заключение. Таким образом, результаты исследования свидетельствуют об определенном различии процесса развития усталостного разрушения образцов для испытаний, изготовленных из сплавов 0051 и 0052. Начальная стадия разрушения сплава 0051 особенно при низкой частоте нагружения связана с образованием фасеток циклического скола, а на более поздних стадиях развития трещины доминирует ямочный микрорельеф. Усталостное разрушение сплава 0052 на всех стадиях развития трещины сопровождается большей пластической деформацией, о чем свидетельствует ямочный микрорельеф поверхности излома, а межзеренное разрушение обусловлено предварительным наклепом материала в процессе циклического деформирования. Такой механизм разрушения, по сути, мало чем отличается от разрушения деформированных алюминиевых сплавов, что коррелирует с результатами усталостных испытаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Усталостные испытания на высоких частотах нагружения / В. А. Кузьменко [и др.]; под общ. ред. В.А. Кузьменко – Киев.: Наукова думка, 1979. – 335 с.
2. Бабаков, И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков – М.: Наука, 1968. – 560 с.
3. МР 91-83. Методические рекомендации: Расчеты и испытания на прочность: Метод испытаний на усталость при высоких звуковых частотах поперечных колебаний образцов. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 25 с.
4. Блохин, А.В. Использование методов конечно-элементного моделирования для расчета напряженно-деформированного состояния элементов конструкций при циклическом изгибе / А.В. Блохин, А.М. Лось // Труды БГТУ. Сер. II, Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2008. – Вып. XVI. – С. 288–290.
5. Блохин, А.В. Методика расчета напряжений в опасном сечении плоских балочных образцов, нагружаемых знакопеременным изгибом / А.В. Блохин // Труды БГТУ. № 2 (140), Лесная и деревообраб. пром-сть. – 2011. – С. 291–294.

А.И. Сурус, канд. техн. наук., доц.;  
А.М. Лось, ст. преп.;  
А.В. Блохин, канд. техн. наук., доц.;  
М.Н. Пищов, канд. техн. наук., доц.;  
М.И. Пархимович, студ.  
(БГТУ, г. Минск)

## **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ**

Соединения с натягом относятся к неподвижным соединениям деталей и предназначены для передачи нагрузок между ними.

Указанные соединения могут препятствовать осевому сдвигу, проворачиванию или испытывать комбинированную нагрузку, предотвращая одновременно осевой сдвиг и проворачивание. Недостаточная прочность соединений может привести к относительному сдвигу элементов и вызвать отказы в работе механизма в целом.

В силу достоинств соединений с натягом, таких как: сопрягаемые детали могут воспринимать значительные нагрузки, как статические, так и динамические, обеспечивают хорошее центрирование соединяемых деталей, их выполнение не требует больших затрат, они применяются в тяжело нагруженных соединениях механизмов при действии динамических нагрузок, соединениях, требующих хорошего центрирования соединяемых деталей (высокоточные и высокоскоростные механизмы) и т.д. Однако для них, как и для других соединений существуют факторы, влияющие на их надежность в процессе их эксплуатации. Показателем их надежности является долговечность при определенных режимах и условиях эксплуатации.

В связи с этим целью настоящей работы является анализ причин, влияющих на снижение долговечности соединений с натягом для поиска возможных путей ее повышения.

Одним из основных факторов, влияющих на надежность соединений с натягом, удовлетворяющих условию передачи заданных нагрузок является величина необходимого натяга, полученная после сборки соединения. Эта задача решается на стадии проектирования на основании статического расчета по теории упругих деформаций и перемещений (задача Ляме). Однако, как показывает ряд многочисленных исследований, на практике в процессе эксплуатации кроме величины проектного натяга в различных условиях эксплуатации на надежность соединения влияет ряд других факторов таких как точность изготовления соединяемых деталей, точность макро- и микрогеометрических параметров соединяемых поверхностей, материалы

сопрягаемых деталей, наличие промежуточных слоев между сопрягаемыми поверхностями из основных материалов (покрытия, смазка и т.д.).

Так в работе [1] рассмотрено влияние на соединение с натягом геометрии соединяемых поверхностей. Исследования прочности соединений с натягом в зависимости от различных факторов также описаны в публикациях [2, 3].

Большинство соединений при работе испытывают переменные нагрузки, как пульсирующие, так и ударные. В результате детали машин и механизмов подвергаются действию вибрационных нагрузок, что является причиной механических колебаний в контакте [4].

Как известно, механические колебания в контакте являются основной причиной развития фреттинга. Поэтому еще одной из основных причин снижения долговечности соединений с натягом является фреттинг, возникающий в результате высокой концентрации напряжений и склонности к контактной коррозии [5].

Кроме того, известно также, что долговечность деталей снижается из-за появления усталостных трещин. Как показывает практика, усталостные трещины начинают появляться в местах концентрации напряжений в соединениях. Для соединений с натягом наличие таких мест зависит от точности формы сопрягаемых поверхностей и действующих нагрузок.

Наличие фреттинга и одновременно зарождение усталостных трещин приводит к фреттинг-усталости.

Другим важным обстоятельством, влияющим на надежность соединения, является температурный фактор. В зоне отрицательных температур у некоторых сталей и сплавов происходят фазовые превращения, приводящие к изменению размеров, и как следствие, к ослаблению натяга. В связи с этим при выборе посадки для таких соединений по величине натяга на стадии проектирования следует учитывать температурную поправку на размеры сопрягаемых поверхностей и повышать класс чистоты обработки поверхностей. Таким образом, обоснованный выбор посадки с натягом с учетом приведенных выше результатов различных исследований повышает надежность соединения в различных условиях эксплуатации

Кроме того, в связи с уменьшением пластичности материалов деталей при отрицательных температурах происходит увеличение скорости распространения усталостных трещин. Воздействие отрицательных температур увеличивает вероятность фреттинг-коррозии. Фреттинг-усталость и фреттинг-коррозия являются основной причи-

ной снижения долговечности соединений с натягом при переменных нагрузках и отрицательных температурах.

При этом следует отметить, что повышение твердости поверхностей препятствуют развитию процесса образования усталостных трещин.

Кроме того, известно, что долговечность соединений зависит также от контактной жесткости рабочих поверхностей, которая определяется не только свойствами материалов, но и микрогеометрией рабочих профилей, поскольку финишная обработка поверхностей определяет не только фактическую площадь контакта в соединении, но и поверхностную твердость, а также наличие остаточных напряжений в поверхностном слое.

Таким образом, для повышения несущей способности соединений с натягом в осложненных условиях эксплуатации рекомендуется:

повышение точности изготовления соединяемых деталей, точности макро- и микрогеометрических параметров соединяемых поверхностей, повышение класса точности и чистоты обработки поверхностей, поверхностное упрочнение деталей и нанесение покрытий, позволяющих повысить антикоррозионные свойства, износостойкость и усталостную прочность сопрягаемых поверхностей.

В результате проведенных нами ряда исследований по повышению эффективности поверхностного упрочнения методом жидкостной карбонитрации установлено, что упрочнение указанным методом с дополнительным использованием энергии высокочастотных механических колебаний по соответствующим режимам позволяет увеличить поверхностную твердость, усталостную прочность, износо- и коррозионную стойкость упрочненных поверхностей, что может быть использовано для повышения надежности соединений с натягом с учетом выше изложенных причин снижения их долговечности.

Исследования показали, что применение колебаний при диффузионном упрочнения существенно повышает усталостную долговечность по числу циклов  $N$  до полного разрушения образца. Усталостные характеристики улучшаются даже при непродолжительном времени обработки (0,5 ч). Применение колебаний, обеспечивает повышение числа циклов до разрушения образца на 20-25 % при использовании частоты колебаний 18 кГц при оптимальном времени обработки 2-3 ч.

Зависимость величины износа от времени карбонитрации показывает, что использование колебаний существенно повышает износостойкость поверхностного слоя, определяемую по потере массы образцов. при времени обработки до 2 часов. Это объясняется в первую

очередь ускорением протекания химических процессов в расплаве и адсорбции азота и углерода, а также диффузии их в сталь, что приводит к более интенсивному образованию мелкодисперсных карбонитридных частиц и в целом к формированию плотного поверхностного слоя повышенной износостойкости. При использовании колебаний кривая износа имеет существенно меньший участок приработки и более продолжительный участок, соответствующий зоне установившегося изнашивания. Исследования, проведенные на сканирующем электронном микроскопе, показали, что при обработке без использования колебаний на этапе приработки наблюдается смятие и сглаживание отдельных неровностей поверхности. На стадии установившегося изнашивания происходит постепенное увеличение поврежденных фрагментов поверхности с образованием достаточно больших участков выкрашивания карбонитридного слоя. Отмечается, как следствие развития усталостных процессов, образование микротрещин.

При использовании колебаний, обеспечивающих образование более развитого и прочного карбонитридного слоя, практически полностью отсутствует выкрашивание участков поверхности.

Выводы. Полученные результаты показывают существенное повышение износостойкости и усталостных характеристик при использовании жидкостной карбонитрации в комбинации с возбуждением в расплаве колебаний частотой 18 кГц. Это может способствовать повышению надежности и ресурса деталей машин, работающих в условиях сочетания трения и контактных динамических нагрузок, что характерно для соединений с натягом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Куприянов, А.В. Прочность соединения с натягом при наличии погрешности геометрии формы / А.В. Куприянов // Вестн. ХНТУ. – 2015. – № 3(54). – С. 145–150.
2. Кравцов, М.К. Промежуточные среды в соединениях с натягом / М.К. Кравцов, А.А. Святуха, В.В. Чернов. – Х.: Штрих, 2001. – 200 с.
3. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог / А.А. Воробьев [и др.]. – М.: Инфра-М. – 2012. – 264 с.
4. Котенева Н.В., Перфильева Н.В., Перфильева А.Д. Исследование контактного взаимодействия твердых тел в условиях вибрационных нагрузок. Вестник ТГУ т.18, Вып. 4. 2013.

А.М. Лось, ст. преп.;  
А.И Сурус, канд. техн. наук., доц.;  
А.В. Блохин канд. техн. наук., доц.;  
М.Н. Пищов, канд. техн. наук., доц.  
(БГТУ, г. Минск)

## **ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАЛЬНЫХ ГРУЗОНЕСУЩИХ ГИБКИХ ОРГАНОВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ**

Стальные гибкие грузонесущие органы (канаты) при нормальных условиях эксплуатации представляют собой надёжные и безопасные элементы грузоподъёмного оборудования, однако, возникают и некоторые проблемы при их эксплуатации.

Одной из серьёзных проблем, возникающих в процессе эксплуатации, является концентрация разрывов нитей на маленьком участке каната. Такое явление может происходить в результате неправильного использования или местного механического повреждения. В канатах с большой концентрацией разрывов нитей или прядей уменьшение грузоподъёмности достигает критического значения и такие канаты подлежат отбраковке.

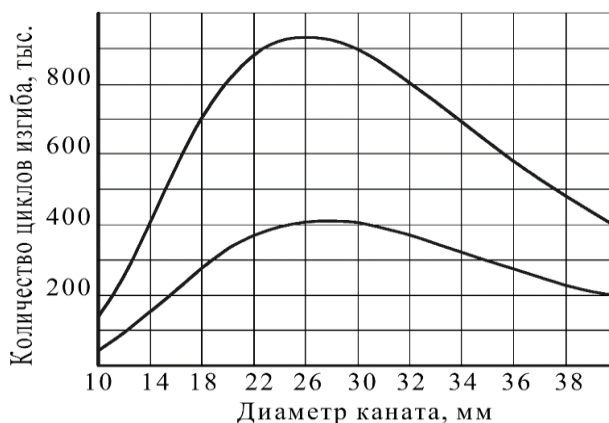
Следующей возможной проблемой является наличие внутренних разрывов прядей каната. При визуальном исследовании каната можно оценить состояние только видимых частей внешних нитей. Суммарная площадь поперечного сечения проволок расположенных снаружи, достигает 35–45% от площади сечения всех несущих элементов каната, а в зоне видимости расположено не более половины длины этих проволок. В связи с этим можно сделать вывод, что при визуальном осмотре можно изучить состояние не более 1/5 части сечения грузонесущих нитей каната. Добиться повышения эксплуатационных характеристик каната в таком случае позволяет применение полимерного слоя между стальным сердечником и внешними прядями. Полимерный слой будет эффективно защищать сердечник от коррозии и предотвратит непосредственное взаимодействие между двумя соседними прядями и снизит между ними давление.

Кроме этого, одной из проблем эксплуатации стальных грузонесущих гибких органов является их коррозия. Известно, что суммарная площадь поверхности всех проволок, составляющих грузовой канат примерно в 10-20 раз больше, чем площадь поверхности стальной проволоки такого же диаметра. То есть при эксплуатации в тяжелых условиях внешней среды стальной канат подвергается коррозии во



много раз быстрее. Данную проблему следует решать путем использования в качестве грузонесущих нитей каната специальных оцинкованных проволок. При повреждении цинкового покрытия в какой-то части каната проволоки без покрытия будут защищены катодной защитой. Для защиты нитей от коррозии и повышения срока эксплуатации каната необходимо регулярно применять смазочные материалы.

При работе в механизмах подъема гибкие грузонесущие органы испытывают сложнапряженное состояние, однако, наибольшие значения будут иметь напряжения растяжения и изгиба. Срок эксплуатации грузонесущих органов сильно зависит от соотношения диаметра блока к диаметру каната. На рис. 1 представлен график долговечности каната в зависимости от его диаметра. По нижней кривой следует производить отбраковку грузонесущего органа, а по верхней можно определить количество циклов изгиба до полного разрушения.



**Рисунок 1 – Кривые долговечности каната**

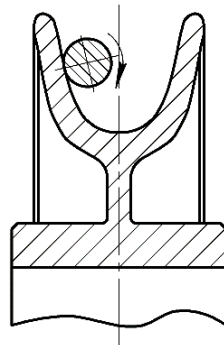
Проанализировав график на рис. 1 видно, что оптимальным решением всегда будет применение каната, у которого количество циклов изгиба имеет максимальное значение. Однако если это не выполнимо, то следует предпочитать, при одной и той же долговечности, использование гибкого органа с меньшим диаметром, но изготовленного из материала с более высоким пределом выносливости.

Срок службы любого каната может быть увеличен за счет применения в крановых и других механизмах блоков больших диаметров. Применение блоков большего диаметра существенно снижает изгибные напряжения в проволоках.

Кроме того, усталостная прочность каната сильно уменьшается при его обратном перегибе, поскольку нити испытывают циклический знакопеременный изгиб. Поэтому, при проектировании грузоподъемной машины, необходимо во всех ее механизмах спроектировать та-

кие системы расположения обводных блоков, в которых гибкие органы будут двигаться без обратного перегиба.

При неправильно подобранном профиле ручья блока встречается такой вид деформации каната, как выдавливание прядей или сердечника. Главным образом это происходит в результате кручения каната вокруг своей оси. Для примера можно рассмотреть канат с закрепленными ветвями на обоих концах. Если захватить этот канат по середине и прокрутить вокруг его оси, то он удлинится с одной стороны и укоротится с другой. При этом пряди с внешней стороны станут слишком длинными с одной стороны, а внутренние пряди – слишком короткими. Кручение каната вокруг своей оси происходит в крановых механизмах при контакте каната с любым блоком или барабаном. Если канат входит в блок даже под минимальным углом, он сначала ложится на фланец, а затем скатывается вниз в желоб (см. рис.2). В процессе этого канат прокручивается. С увеличением угла контакта, прокручивание увеличивается.



**Рисунок 2 – Кручение каната при контакте с блоком**

Движение каната вниз по желобу сочетает в себе качение и скольжение, а величина закручивания будет значительно зависеть от коэффициента трения между канатом и блоком. Для решения данной проблемы также необходимо обеспечить нормальное смазывание каната. Качественно смазанный канат будет значительно меньше подвергаться кручению, в сравнении с сухим или ржавым. Также лучше будет применить блоки, имеющие широкий желоб с углом наклона бокового профиля ручья не менее 45 градусов. Увеличение угла профиля на 25 градусов приводит к снижению скручивания каната в два раза.

Иногда гибкие стальные канаты повреждаются при намотке на барабан. Это может происходить, если канат накручивается под небольшим углом и тогда он может притереться к соседнему витку и внешние пряди повреждаются. Данная проблема в большинстве случаев решается применением нарезки желобов для намотки каната в один слой.

Г.И. Касперов, доц., канд. техн. наук;  
У.В. Зязюля, магистрант; В.Д. Анашкевич, студ. (БГТУ, г. Минск);  
В.Е. Левкевич, проф., д-р техн. наук (БНТУ, г. Минск)

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КАРЬЕРОВ ГРОДНЕНСКОЙ ОБЛАСТИ КАК ОСНОВА БЕЗОПАСНОСТИ РЕГИОНА

Обеспечение безопасности населения и территорий при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера является неотъемлемой частью работы органов управления разных уровней власти [1]. Деятельность по предупреждению чрезвычайных ситуаций имеет приоритет по сравнению с другими видами работ по противодействию этим ситуациям. Поэтому установление и исключение причин возникновения чрезвычайных ситуаций, а также существенное снижение потерь и ущерба в случае их возникновения является актуальной задачей. В данной работе рассматривается карьерное хозяйство Гродненской области. По данным Минприроды Республики Беларусь на территории Гродненской области эксплуатируются 364 промышленных и внутрихозяйственных карьеров общей площадью 1347 га [2]. Распределение карьеров по районам Гродненской области приведено в табл. 1.

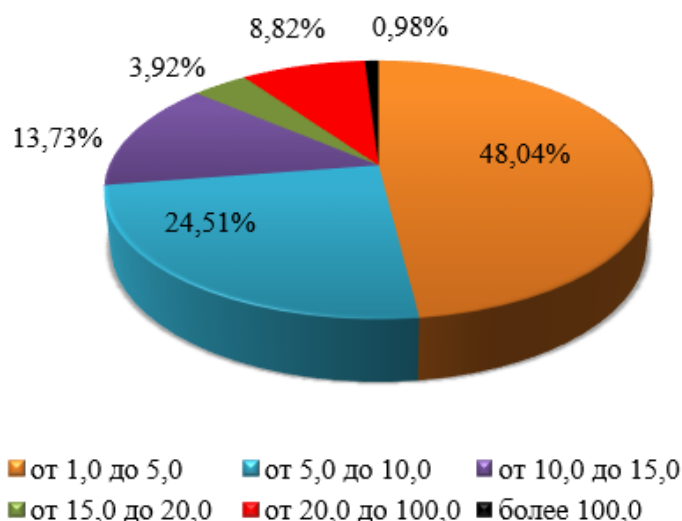
**Таблица 1 – Распределение карьеров по районам Гродненской области**

Кол-во карьеров	Название района																
	Берестовицкий	Волковысский	Вороновский	Гродненский	Дятловский	Зельвенский	Ивьевский	Кореличский	Лидский	Мостовский	Новотрудский	Островецкий	Ошмянский	Свислочский	Слонимский	Сморгонский	Щучинский
Промышленные	7	11	7	20	2	4	2	2	9	5	7	5	5	2	6	4	4
Внутрихозяйственные	14	20	13	13	12	19	16	12	11	9	39	10	15	13	15	10	21
Всего	21	31	20	33	14	23	18	14	20	14	46	15	20	15	21	14	25
Площадь района, км <sup>2</sup> х100	7,4	11,9	14,2	25,9	15,4	8,7	18,4	10,9	15,7	13,4	16,7	15,7	12,2	14,5	14,7	14,9	19,1

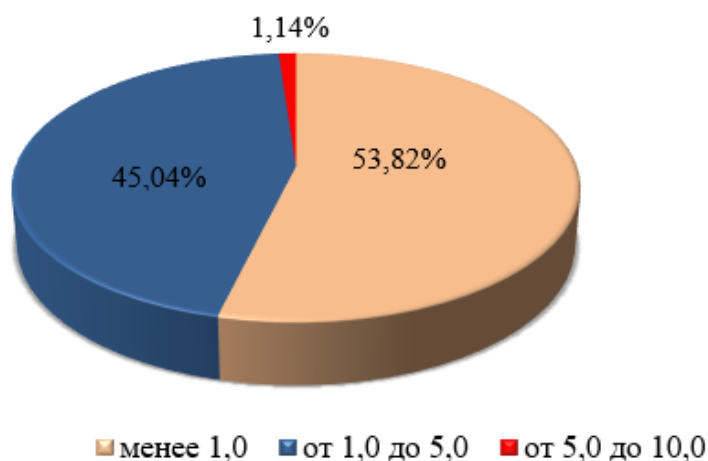
В рамках проводимых исследований оценивались площади, занимаемые промышленными и внутрихозяйственными карьерами. По ранее проведенным исследованиям [3] для промышленных карьеров были предложены следующие группы, в зависимости от установленного интервала численного значения занимаемой площади одним карьером, га: Iпр – менее 1,0, IIпр – от 1,0 до 5,0; IIIпр – от 5,0 до 10,0;

IVпр – от 10,0 до 15,0; Vпр – от 15,0 до 20,0; Vпр – от 20,0 до 100,0. Соответственно, для внутрихозяйственных карьеров, га: Iвх – менее 1,0; IIвх – от 1,0 до 5,0; IIIвх – от 5,0 до 10,0, IVвх – от 10,0 до 20,0; Vвх – от 20 до 100.

Процентное соотношение количества карьеров Гродненской области по группам площадей приведено для: промышленных на рис. 1, внутрихозяйственных на рис. 2.



**Рисунок 1 – Распределение промышленных карьеров по группам площадей**



**Рисунок 2 – Распределение внутрихозяйственных карьеров по группам площадей**

Площадь, занимаемая промышленными и внутрихозяйственными карьерами для Гродненской области, составляет, соответственно, 1114,6 и 281,9 га. Распределение площадей, занимаемых промышленными и внутрихозяйственными карьерами, по группам представлено в табл. 2.

**Таблица 2 – Распределение карьеров по группам площадей**

Общая площадь, га	Группа площадей					
	Iпр / Iвх	IIпр / IIвх	IIIпр / IIIвх	IVпр	Vпр	VIпр
1114,6 / 281,9	135,9 / 78,7	171,4 / 184,1	154,7 / 19,1	68,7	342,1	242,2

Примечание. В числителе приведены значения для промышленных карьеров, в знаменателе – для внутрихозяйственных.

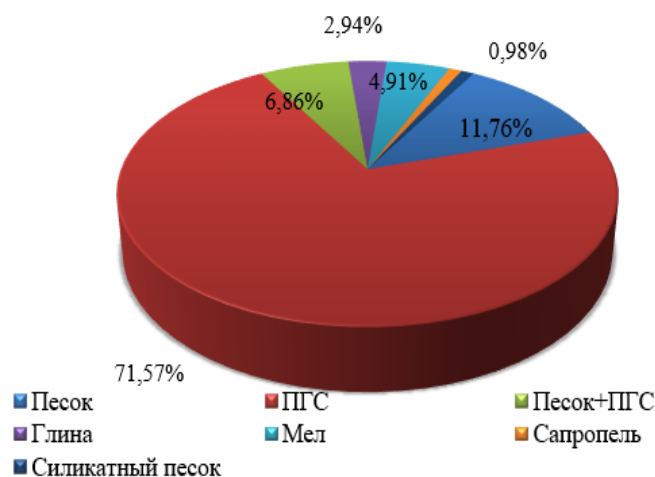
Полезные ископаемые, добываемые на территории Гродненской области, представлены следующими строительными материалами: песок, песчано-гравийная смесь (ПГС), песок + ПГС, глина, мел, сапропель и силикатный песок. Площади промышленных и внутрихозяйственных карьеров Гродненской области по добыче строительных материалов приведены в табл. 3.

**Таблица 3 – Распределение строительных материалов по карьерам**

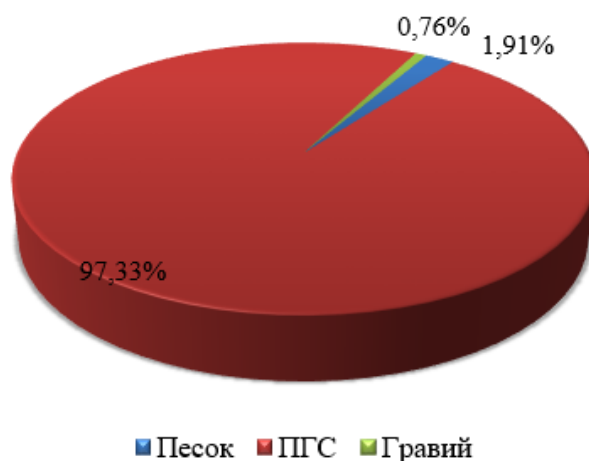
Площадь, га	Строительный материал							
	ПГС	Песок	Песок+ПГС	Глина	Мел	Сапропель	Гравий	Силикатный песок
1114,6 / 281,9	473,3 / 267,9	46,6 / 11,1	28,8 / -	117,4 / -	<b>354,4 / -</b>	56,4 / -	- / 2,9	37,7 / -

Примечание. В числителе приведены значения для промышленных карьеров, в знаменателе – для внутрихозяйственных

Распределение добываемых строительных материалов по карьерам приведено для: промышленных на рис. 3, внутрихозяйственных на рис. 4.



**Рисунок 3 – Добываемые строительные материалы в промышленных карьерах**



**Рисунок 4 – Добываемые строительные материалы во внутрихозяйственных карьерах**

Проведенная оценка геометрических параметров карьеров служит основой для дальнейших исследований для принятия управленческих решений по защите территории Гродненской области от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Закон Республики Беларусь «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 14 июня 2005 года № 23–3.

2. Разработать комплексную оценку влияния карьерных водоемов на безопасность эксплуатации карьеров в местах добычи полезных ископаемых: отчет о НИР (заключ.) /БГТУ; рук. темы Г.И.Касперов. – Минск, 2020. –192 с. – ГР №20192245.

3. Касперов Г.И., Новиков М.Э., Зязюля У.В. Оценка параметров карьеров Могилевской области – основа безопасности региона. / Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XVI междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов), В 2 т. Т.1. ч.1. – Минск: УГЗ, 2022. – С. 72-75.

Г.И. Касперов, доц., канд. техн. наук;  
 У.В. Зязюля, магистрант;  
 В.Д. Анашкевич, студ. (БГТУ, г. Минск);  
 В.Е. Левкевич, проф., д-р техн. наук  
 (БНТУ, г. Минск)

## СОСТАВ И СТРУКТУРА КАРЬЕРОВ ПО ДОБЫЧЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ

Технологии открытого способа разработки карьеров, применяемые в Республике Беларусь на современном этапе, характеризуются усложнением геологических условий при добыче строительных материалов с одновременного возрастания законодательных требований по уменьшению их отрицательного воздействия на окружающую территорию. В настоящее время на территории Брестской области эксплуатируются 482 промышленных и внутрихозяйственных карьеров общей площадью 975 га [1]. Распределение карьеров по районам Брестской области приведено в табл. 1.

**Таблица 1 – Распределение карьеров по районам Брестской области**

Кол-во карьеров	Название района															
	Барановичский	Березовский	Брестский	Ганцевичский	Дрогичинский	Жабинковский	Ивановский	Ивацевичский	Каменецкий	Кобринский	Лунинецкий	Ляховичский	Малоритский	Пинский	Пружанский	Столинский
Всего	44	27	21	26	32	17	41	34	22	36	21	23	20	37	50	31
Промышленные	5	4	3	2	4	1	2	8	7	5	5	1	5	3	9	8
Внутрихозяйственные	39	23	18	24	28	16	39	26	15	31	16	22	15	34	41	23
Площадь района, км <sup>2</sup> x1000	2,1	1,4	1,5	1,7	1,9	0,7	1,6	2,9	1,7	2,1	2,7	1,4	1,4	3,2	2,8	3,3

В рамках проводимых исследований по составу и структуре карьеров выполнялась оценка карьеров по назначению (табл. 1) по строительным материалам (табл. 2), добываемых на территории Брестской области. На территории области добываются следующие строительные материалы: песчано-гравийная смесь (ПГС), песок, мел, глина, песок + ПГС, гравий и камень. Распределение строительных материа-

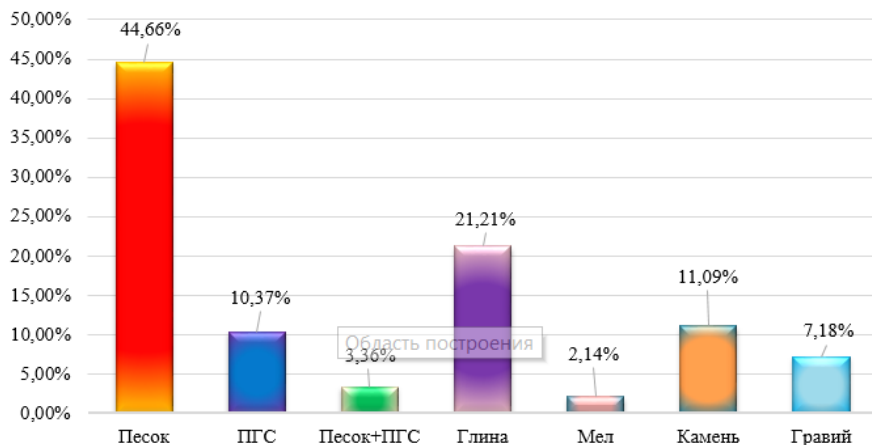
лов по количеству промышленных и внутрихозяйственных карьеров и их площадям приведено в табл. 2.

**Таблица 2 – Распределение строительных материалов по карьерам**

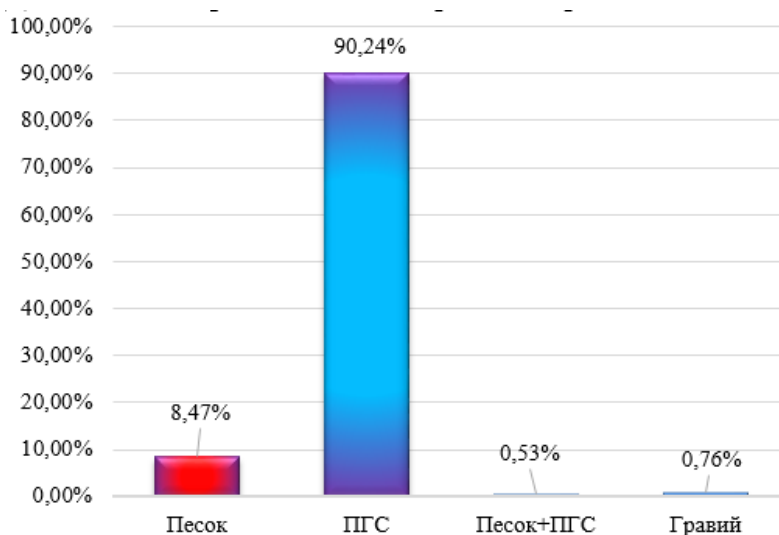
Строительный материал	ПГС	Песок	Песок + ПГС	Глина	Мел	Камень	Гравий
Количество	8 / 42	53 / 360	2 / 2	4 / -	2 / -	1 / -	2 / 6
Площадь, га	43,87 / 46,75	188,84 / 498,03	14,19 / 2,9	89,67 / -	9,05 / -	46,89 / -	30,36 / 4,2

Примечание. В числителе приведены значения для промышленных карьеров, в знаменателе – для внутрихозяйственных

Структура добываемых строительных материалов по карьерам приведено для: промышленных на рис. 3, внутрихозяйственных на рис. 4.



**Рисунок 3 – Добываемые строительные материалы в промышленных карьерах**



**Рисунок 4 – Добываемые строительные материалы во внутрихозяйственных карьерах**



По ранее проведённым исследованиям [2] для промышленных карьеров были предложены следующие группы, в зависимости от установленного интервала численного значения занимаемой площади одним карьером, га: I<sub>пр</sub> – менее 1,0, II<sub>пр</sub> – от 1,0 до 5,0; III<sub>пр</sub> – от 5,0 до 10,0; IV<sub>пр</sub> – от 10,0 до 15,0; V<sub>пр</sub> – от 15,0 до 20,0; VI<sub>пр</sub> – от 20,0 до 100,0. Соответственно, для внутрихозяйственных карьеров, га: I<sub>вх</sub> – менее 1,0; II<sub>вх</sub> – от 1,0 до 5,0; III<sub>вх</sub> – от 5,0 до 10,0, IV<sub>вх</sub> – от 10,0 до 20,0; V<sub>вх</sub> – от 20 до 100.

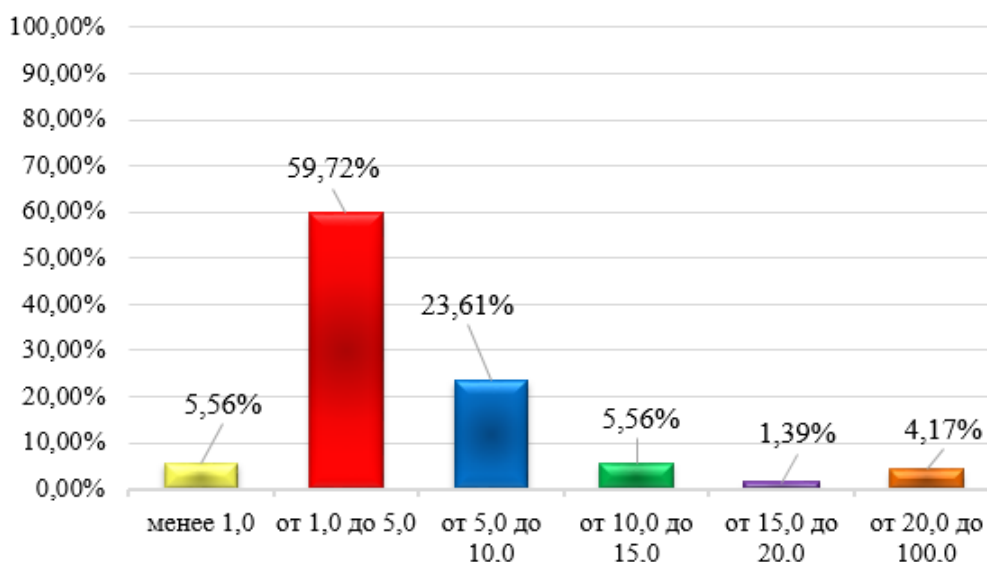
Для Брестской области общая площадь, занимаемая промышленными и внутрихозяйственными карьерами, составляет соответственно 422,87 и 551,88 га. Распределение площадей промышленных и внутрихозяйственных карьеров по группам представлено в табл. 3.

**Таблица 3 – Распределение карьеров по группам площадей**

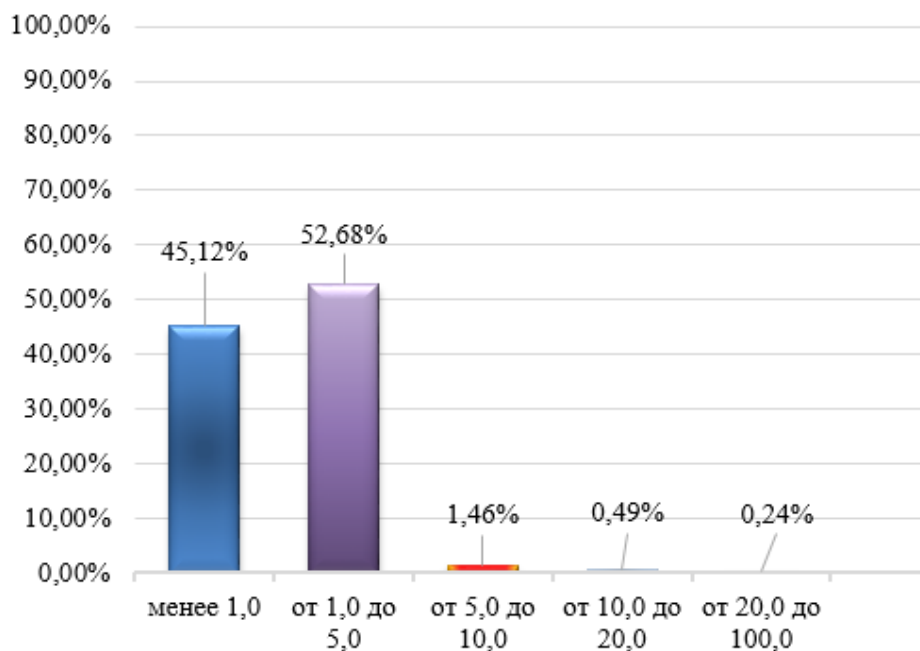
Группа площадей	I <sub>пр</sub> / I <sub>вх</sub>	II <sub>пр</sub> / II <sub>вх</sub>	III <sub>пр</sub> / III <sub>вх</sub>	IV <sub>пр</sub> / IV <sub>вх</sub>	V <sub>пр</sub> / V <sub>вх</sub>	VI <sub>пр</sub>
Количество карьеров	4 / 185	43 / 216	17 / 6	4 / 2	1 / 1	3
Общая площадь, га	2,56 / 93,96	103,50 / 378,26	118,79 / 33	46,83 / 20,16	17,00 / 26,50	134,19

Примечание. В числителе приведены значения для промышленных карьеров, в знаменателе – для внутрихозяйственных.

Процентное соотношение количества карьеров по группам площадей приведено для промышленных карьеров на рис. 5, для внутрихозяйственных – на рис. 6.



**Рисунок 5 – Распределение промышленных карьеров по группам площадей**



**Рисунок 6 – Распределение внутрихозяйственных карьеров по группам площадей**

Проведенная оценка состава и структуры промышленных и внутрихозяйственных карьеров служит методической основой для дальнейших исследований по принятию управленческих решений по защите территории Брестской области от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Разработать комплексную оценку влияния карьерных водоемов на безопасность эксплуатации карьеров в местах добычи полезных ископаемых: отчет о НИР (заключ.) /БГТУ; рук. темы Г.И.Касперов. – Минск, 2020. –192 с. – ГР №20192245.

2. Касперов Г.И., Новиков М.Э., Зязюля У.В. Оценка параметров карьеров Могилевской области – основа безопасности региона. / Обеспечение безопасности жизнедеятельности: проблемы и перспективы: сб. материалов XVI междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых: курсантов (студентов), слушателей магистратуры и адъюнктов (аспирантов), В 2 т. Т.1. ч.1. – Минск: УГЗ, 2022. – С. 72-75.

А.А. Гарабажиу, канд. техн. наук, доц.;  
 В.С. Исаченков, ст. преп.;  
 Д.В. Клоков, канд. техн. наук, доц. (БНТУ, г. Минск);  
 М.П. Лощакова, студ. (БГТУ, г. Минск)

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ МАТЕРИАЛА В МЕЖЛОПАСТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОГО СМЕСИТЕЛЯ

Для определения оптимальных конструктивно-технологических параметров роторно-центробежного смесителя [1, 2] необходимо провести математическое моделирование процесса перемешивания в нем сухих сыпучих материалов. При этом, на первом этапе, большой практический интерес представляет характер движения частиц основного компонента смеси в межлопастном пространстве ротора смесителя.

Рассмотрим движение одиночной частицы материала по наклонной разгонной лопатке смесителя. Для этого воспользуемся схемой, представленной на рис. 1.

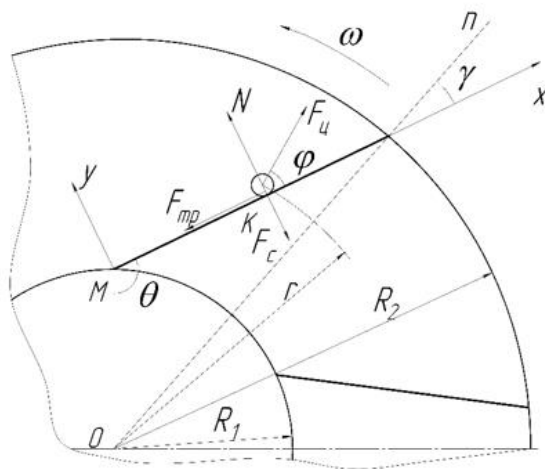


Рисунок 1 – Движение частицы материала по наклонной лопатке смесителя

Пусть частица находится в произвольной точке (К) на поверхности лопатки (рис. 1). На нее действуют: центробежная сила инерции  $F_{ц}$ , кориолисова сила инерции  $F_{с}$ , сила трения частицы о поверхность лопатки  $F_{тр}$  и реакция опорной поверхности  $N$ . С учетом сил, действующих на движущуюся частицу, были приняты следующие допущения. Пренебрегали силой аэродинамического сопротивления вследствие ее малой величины по сравнению с массовыми силами. Так как величина силы тяжести при рабочих частотах вращения ротора смеси-

теля на порядок меньше величины инерционных сил, то силу трения частицы о диск ротора также не учитывали.

С учетом вышесказанного система уравнений движения частицы по наклонной лопатке будет представлена в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = F_u \cdot \cos \varphi - F_{mp} \\ m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} = F_u \cdot \sin \varphi + N - F_c \end{array} \right\}, \quad (1)$$

где  $y$  – текущая ордината частицы, м;  $r$  – текущий радиус движения частицы материала, м.

При этом  $F_u = m\omega^2 r$ , Н;  $F_{mp} = fN$ , Н;  $F_c = 2\omega(dx/dt)$ , Н.

Величина угла  $\varphi$  определяется по геометрическим соотношениям при известных углах  $\gamma$  и  $\theta$  (см. рис. 1), характеризующих наклон лопатки относительно радиального направления.

Так как частица движется вдоль лопатки, то  $m \cdot (d^2 y / dt^2) = 0$ . Следовательно, опорная реакция лопатки согласно второму выражению системы уравнений (1) будет равна

$$N = 2m\omega \frac{dx}{dt} - m\omega^2 \cdot R_1 \cdot \sin \theta, \quad (2)$$

где  $R_1$  – внутренний радиус ротора по концам лопаток, м;  $R_1 = 0,12$  м.

С учетом выражения (1) уравнение движения частицы примет вид

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \omega^2 \sqrt{R_1^2 \cdot \cos^2 \theta + x^2} - 2R_1 \cdot x \cdot \cos \theta - f \left( 2\omega \frac{dx}{dt} - \omega^2 R_1 \sin \theta \right), \quad (3)$$

где  $dx/dt = V_r$  – радиальная скорость движения частицы материала в межлопастном пространстве смесителя;  $t$  – время движения частицы материала в межлопастном пространстве, с;  $\theta$  – угол наклона лопатки (см. рис. 1);  $f$  – коэффициент трения материала частицы о стенку смесителя.

Тангенциальная скорость ( $V_\tau$ ) движения частицы материала в межлопастном пространстве смесителя определяется по формуле

$$V_\tau = r \cdot \omega. \quad (4)$$

Тогда абсолютная скорость ( $V_a$ ) движения частицы материала в межлопастном пространстве смесителя и на выходе из него будет равна

$$V_a = \sqrt{V_\tau^2 + V_r^2}. \quad (5)$$

Чтобы частицы материала приближались к стенке цилиндрической обечайки смесителя по касательной траектории, угол  $\gamma$  (см. рис. 1) должен быть минимальным.

Треугольник скоростей движущейся частицы материала, при ее вылете из ротора смесителя, представлен на рис. 2.

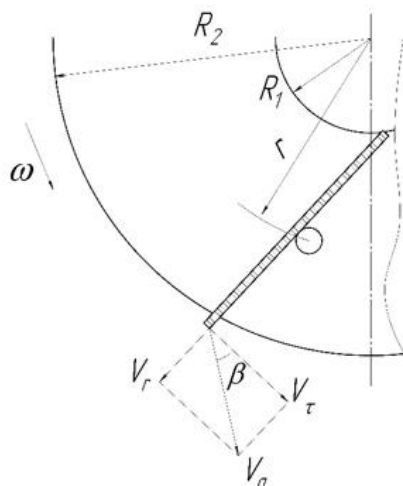


Рисунок 2 – Треугольник скоростей движущейся частицы материала, при ее вылете из ротора смесителя

Направление вектора полной скорости движения частицы материала на выходе из ротора смесителя определяется углом вылета  $\beta$  [4]

$$\beta = \arctg \frac{V_r}{V_\tau} . \quad (6)$$

Расчет тангенциальной, радиальной и абсолютной скоростей движения одиночной частицы материала в межлопастном пространстве и угла вылета  $\beta$  осуществлялся численными методами при помощи ЭВМ. Результаты расчета представлены на рис. 3.

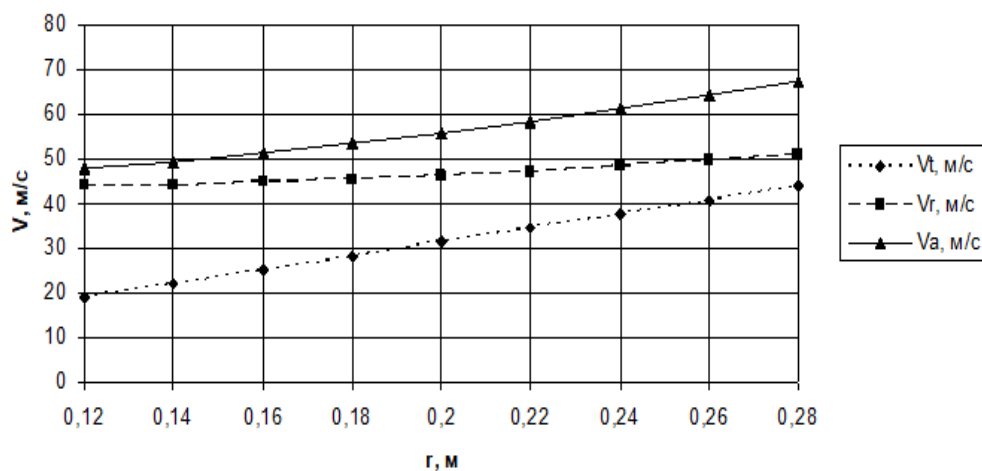


Рисунок 3 – Зависимость тангенциальной, радиальной и абсолютной скоростей движения частицы материала в межлопастном пространстве смесителя от текущего радиуса лопатки (при n=1500 об/мин)

Как видно из рис. 3, с увеличением текущего радиуса лопатки скорость движения частицы материала также возрастает.

На втором этапе математического моделирования процесса перемешивания сухих сыпучих материалов в роторно-центробежного смесителе необходимо определить характер движения частиц основного компонента смеси в кольцевом зазоре между выходной кромкой лопаток и стенкой цилиндрической обечайки смесителя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гарабажиу, А. А. Интенсификация процессов перемешивания сухих сыпучих материалов в современных конструкциях смесителей / А. А. Гарабажиу // Строительная наука и техника. - 2010. - № 4. - С. 27-42.

2. Гарабажиу А. А., Исаченков В. С., Клоков Д. В., Трусков В. С. Основные параметры роторно-центробежного смесителя, влияющие на степень перемешивания в нем сухих сыпучих материалов / Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 87-й науч.-техн. конф. профес.-препод. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 31 января - 12 февраля 2022 г. [Электронный ресурс] / отв. за издание И. В. Войтов; УО БГТУ. – Минск: БГТУ, 2022 – С. 302-304.

УДК 378.147

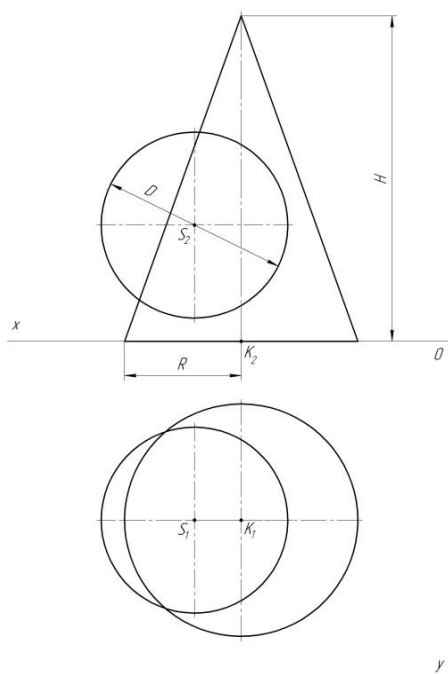
С.М. Анохин, доц.  
(ИХТИ ФГБОУ ВО УГНТУ, г. Стерлитамак, Башкортостан, РФ)

#### **ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОЦЕССЕ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОМЕТРО-ГРАФИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН**

Графическая подготовка студентов основывается на общенаучных знаниях, приобретаемых учениками еще в процессе изучения школьных дисциплин: понятийное представление и сущность фигуры, тела, поверхности, пропорции и масштаба; совокупность знаний, составляющих основу техники проецирования; знания основных геометрических положений, таких как свойства проекции прямого угла, нормали к плоскости, пространственное расположение точки и прямой и другое. В процессе преподавания геометро-графических дисциплин преподаватели сталкиваются с проблемами, вызванными рядом обстоятельств: низким уровнем начальной графической подготовки студента; слабым развитием у обучающихся пространственного вооб-

ражения, технического и технологического мышления; отсутствием усидчивости и концентрации внимания у многих студентов.

Из-за данных трудностей, особенно при изучении некоторых разделов таких учебных дисциплин, как «Начертательная геометрия» и «Инженерная графика», преподаватели геометро-графических дисциплин все чаще включают в учебный процесс наглядный материал в виде информационных (виртуальных) моделей, как правило, созданных своими силами посредством специального компьютерного программного обеспечения [1]. К таким программам относятся системы проектирования Компас-3D, AutoCad, SolidWorks и другие. Построение моделей требует больших временных затрат, особенно с учетом индивидуальной работы студентов по вариантам.



**Рисунок 1 – Схема расположения конуса и шара**

При изучении вопросов пересечения поверхностей вращения нами используется способ создания трехмерной модели с помощью программы Компас-3D, вариативность которой достигается путем включения в модель переменных и условий параметризации. Данный способ позволяет без больших временных затрат получить виртуальную объемную модель пересекающихся тел по заданным параметрам, с возможностью ее дальнейшей демонстрации и изменения [2, с. 1819]. Это создает удобства при вариативных значениях параметров поверхностей вращения. Под параметрической моделью мы понимаем формальное описание связей между функциональными и вспомогательными параметрами какой-либо системы или объекта. В таких моделях изменение значения одного из параметров влечет изменения значений других, связанных с ним параметров, описанных в этой модели.

Примерами реализации параметрических моделей в геометро-графических дисциплинах могут служить чертежи деталей и их трехмерные представления, объемные тела и поверхности с указанием численных значений параметров.

Рассмотрим принцип проектирования параметрической модели в Компас-3D, на примере пересечения двух тел, образованных враще-

нием – конуса и шара, по заданным параметрам. Значения параметров берутся студентами из таблицы с вариантами. Общая схема представлена на рисунке 1.

Для построения конуса задаются следующие параметры:

- положение центра основания конуса – точка  $K(x, y, z)$ ;
- радиус основания –  $R$  и высота –  $H$ .

Для построения шара:

- положение центра шара – точка  $S(x, y, z)$ ;
- диаметр шара –  $D$ .

Для описания переменных и ввода их значений в Компас-3D используем специальное окно переменных. Введем необходимые переменные в таблицу окна и для удобства построения геометрических фигур присвоим им произвольные значения.

В плоскости  $XZ$  строим эскиз первого тела вращения. Он представляет собой прямоугольный треугольник с произвольными размерами сторон и местоположением, у которого катет, расположенный вдоль оси  $Oz$  имеет ограничение Вертикальность, а катет, расположенный вдоль оси  $Ox$  имеет ограничение Горизонтальность. Все три точки вершин треугольника имеют ограничения – Совпадение точек. Такая параметризация позволит сохранить прямоугольность треугольника при изменении значений любого из его параметров: высоты, радиуса основания, местоположения центра основания.

Далее расставляем все необходимые размеры. И задаем им параметризацию – Установить значение размера, с указанием в поле Выражение, появляющегося диалогового окна, соответствующих переменных. На рисунке 2 представлен эскиз для построения конуса на этапе указания переменной  $H$  для вертикального катета прямоугольного треугольника. Остальным размерам аналогично задаем значения в виде переменных.

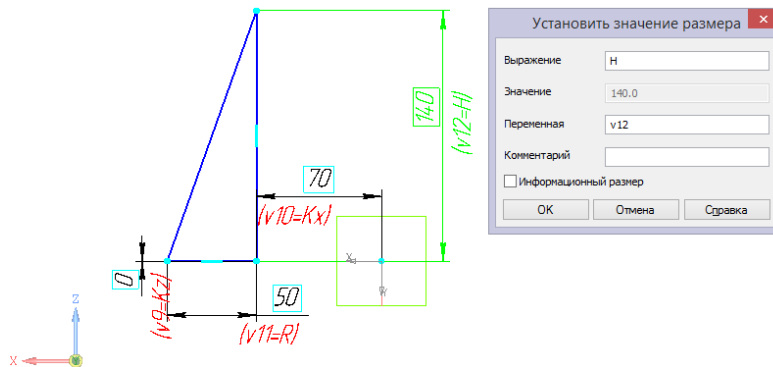


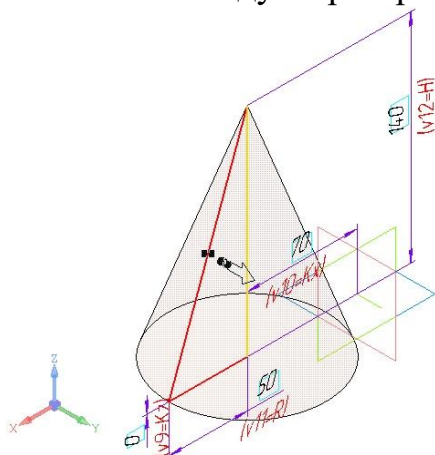
Рисунок 2 – Параметризация эскиза конуса



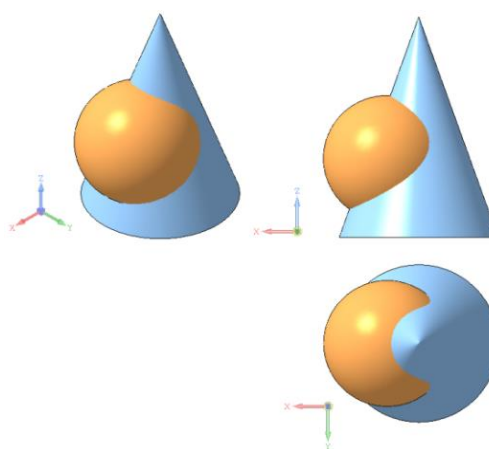
Завершаем построение конуса, используя команду Операция вращения. Для выполнения операции выбираем созданный эскиз. Ось вращения будет служить вертикальный катет прямоугольного треугольника, как показано на рисунке 3.

Аналогично строим второй объект – шар. Эскиз выполняется в виде полуокружности замкнутой отрезком – хордой, проходящей через центр окружности. Окончательный вариант модели представлен на рисунке 4.

В последующем для перестроения фигур и изменения их размеров достаточно изменить значения переменных в Окне переменных и выполнить команду Перестроить (клавиша F5).



**Рисунок 3 – Использование операции вращения**



**Рисунок 4 – Трехмерная модель «Пересечение конуса и шара»**

Такой подход к разработке и созданию виртуальных моделей для преподавания геометро-графических дисциплин, основанный на использовании возможностей Компас-3D, позволяет снизить временные затраты и организовать учебный процесс более эффективно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анохин С.М. Использование трехмерного моделирования при изучении компьютерной графики // Проблемы и перспективы технологического образования на современном этапе развития: сб. материалов VII Междунар. заоч. науч.-практ. конф. Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ, 2017. С. 75.

2. Анохин С.М. Создание трехмерной модели «Пересечение конуса и шара» в Компас-3D // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования – 2017: Сб. научных статей международной конференции. Барнаул: ФГБОУВО «Алтайский государственный университет», 2017. С. 1819-1822.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ПРИВОДАХ ТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ**

К одному из наиболее перспективных направлений исследований и разработок в области стабильного обеспечения технических характеристик прецизионного оборудования можно отнести создание «интеллектуальных» автоматизированных систем мониторинга технического состояния основных компонентов оборудования [1-5].

Современные программные средства управления и связанные с ними исполнительные устройства обеспечивают в достаточно широком диапазоне корректировку параметров функционирования прецизионного оборудования. Это позволяет не только прогнозировать изменение его технического состояния в процессе эксплуатации и осуществлять техническое обслуживание по фактическому состоянию, но и, в ряде случаев, значительно продлить срок службы. Для реализации этого подхода необходима достоверная информация о реальных параметрах функционирования оборудования, включая механические, в том числе собственные, колебания, возникающие при их работе. Наиболее достоверная информация о параметрах этих колебаний может быть получена с использованием натуральных образцов.

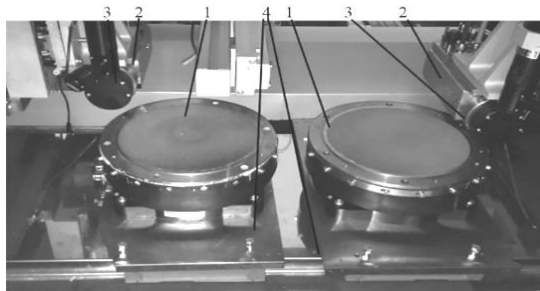
В качестве базового оборудования для проведения исследований был принят двухшпиндельный двухпозиционный прецизионный автомат ЭМ-2165 ОАО «Планар» для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы, рабочая зона которого показана на рисунке 1. Для проведения исследований был создан программно-аппаратный комплекс (рисунок 2), в состав которого вошли первичные преобразователи:

– круговой энкодер ЛИР-362А СКБ ИС 10000-05-ПИ 07.108791, обеспечивающий регистрацию параметров вращения ведущего шкива зубчато-ременной передачи, ведомого электродвигатель-редуктором;

– линейный энкодер SW-270-3 FAGOR для регистрации перемещений стола, ведомого зубчато-ременной передачей;

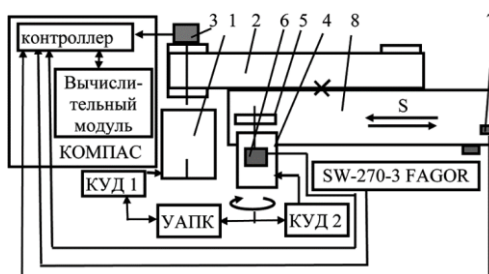
– двухкоординатные прецизионные модули съема диагностической информации о колебаниях соответственно корпуса электрошпинделя в вертикальном и горизонтальном направлениях и рабочего

стола в направлении движения и перпендикулярно ему в горизонтальной плоскости.



1 – планшайба; 2 – программно-управляемые электрошпиндели с аэростатическими опорами; 3 – режущий диск; 4 – рабочий стол

**Рисунок 1 – Рабочая зона двухшпиндельного двухпозиционного прецизионного автомата ЭМ-2165 ОАО «Планар» для одновременного разделения полупроводниковых пластин на кристаллы**



1 – электромотор-редуктор; 2 – зубчато-ременная передача; 3 – круговой энкодер; 4 – электрошпиндель на аэростатических опорах; 5 – режущий алмазный диск; 6, 7 – двухкоординатные прецизионные модули съема диагностической информации; 8 – рабочий стол; УАПК – универсальный аппаратно-программный комплекс синхронного управления прецизионными приводами (до 64 приводов); КУД-1, КУД-2 – контроллеры; «КОМПАС» – комплект модульных программно-аппаратных средств со встроенным специальным многоканальным контроллером CONTROLLER-V4 и вычислительным модулем на базе ПЭВМ с монитором; SW-270-3 FAGOR – линейный энкодер

**Рисунок 2 – Схема программно-аппаратного комплекса для исследований параметров функционирования прецизионного оборудования ЭМ-2165 ОАО «Планар»**

Первичные преобразователи связаны со специальным многоканальным контроллером CONTROLLER-V4, входящим в состав размещенного в одном корпусе комплекта образцов модульных программно-аппаратных средств «КОМПАС», имеющего встроенный вычислительный модуль на базе ПЭВМ с жестким диском и монитором.

Управление параметрами функционирования автомата ЭМ-2165 осуществляется УАПК через контроллеры управления двигателями КУД-1 и КУД-2, обеспечивающими программно-управляемое вращение соответственно электромотор-редуктора и электрошпинделя по командам, поступающим из УАПК. Регистрация параметров тока осуществляется путем снятия информации с КУД-1 и КУД-2.

Обработка результатов исследований включала следующее:

а) УАПК посредством управления электромотор-редуктором создавались: постоянное ускорение стола автомата ЭМ-2165  $a = 0,125; 0,25; 0,375$  и  $0,5 \text{ м/с}^2$ , с его разгоном до рабочей скорости подачи  $V = 0,05; 0,1; 0,15$  и  $0,2 \text{ м/с}$ ; разгон стола с S-образным изменением скорости; движение стола с постоянной скоростью  $V = 0,05; 0,1; 0,15$  и  $0,2 \text{ м/с}$ , а также движение стола с синусоидальным изменением скорости  $V$  с круговой частотой  $\omega = 65 \text{ рад/с}$  и амплитудой изменения скорости  $V = 0,005; 0,01$  и  $0,015 \text{ м/с}$ ;

б) осуществлялось движение стола в режиме холостого хода и при резании полупроводниковой пластины на полную глубину с регистрацией показаний с первичных преобразователей с частотой 250 Гц.

Каждый цикл движения повторялся три раза. Результаты контроля сохранялись в виде файлов данных с регистрируемыми с привязкой к реальному масштабу времени данными.

Полученные результаты исследований параметров функционирования прецизионного оборудования ОАО «Планар» на примере автомата ЭМ-2165 позволили определить параметры возникающих механических колебаний стола и электрошпинделя, а также установить влияние на них инерционно-жесткостных характеристик редуктора и зубчато-ременной передачи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Muller, A. Proactive maintenance for industrial system operation based on a formalised prognosis process / A. Muller, M.-C. Suhner, B. Iung // *Reliability Engineering and System Safety*. – 2006. – Vol. 93. – Pp. 234-253.
2. Intelligent prognostics tools and e-maintenance / J. Lee [et al.] // *Computers in Industry*. – 2006. – Vol. 57. – Pp. 476-489.
3. Тугенгольд, А.К. Гибкий мониторинг мехатронных технологических машин / А.К. Тугенгольд, Р.Н. Волошин // *Вестн. Дон. гос. техн. ун-та*. – 2016. – № 4. – С. 51-58.
4. Контроль состояния и диагностика машин. Общее руководство по организации контроля состояния и диагностирования: ГОСТ Р ИСО 17359-2009 / Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – М.: Стандартинформ, 2010. – 20 с.
5. Басинюк, В.Л. Программно-аппаратный комплекс и методика исследований параметров функционирования прецизионного оборудования ОАО «Планар» / В.Л. Басинюк, А.Е. Ковенский, М.П. Лобкова, А.В. Козинец, Е.А.Морожанов // *Актуальные вопросы машиноведения: сб. научн. трудов / ОИМ НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]*. – 2019. – Вып. 8. – С. 121–124.

А.В. Козинец, инж. (ОАО «Планар», г. Минск);  
А.С. Калиниченко, проф. (БГТУ, г. Минск);  
М.П. Лобкова, научн. сотр. (ОИМНАН Беларуси, г. Минск)

## **ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОГО ЗОНДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ**

По мере развития микроэлектроники и постоянного расширения ее функциональных возможностей автоматизация всех видов деятельности становится одной из основных характерных особенностей технического прогресса. Пропорционально этому возрастают требования к качеству электронной техники и, как следствие, к ее основным компонентам – быстродействующим микро- и наносистемам на пластинах, лежащих в основе больших интегральных схем (БИС) [1-5]. К одному из наиболее важных путей повышения их качества можно отнести уровень и технические возможности зондового контроля при производстве микросхем на всех этапах изготовления. Это необходимо для верификации основных параметров микросхем перед их корпусированием и осуществления разбраковки и сортировки по параметрам [2] для уменьшения дополнительных затрат и снижения себестоимости.

Оборудование для зондового контроля обеспечивает автоматическое позиционирование, установку и последующее тестирование полупроводниковых пластин с помощью тестеров параметрического и функционального контроля. При этом зондовый контроль статических и динамических параметров БИС на пластине осуществляется контактированием зондов с элементами, имеющими размер 0,3...0,5 мкм, причем контроль осуществляется в течение нескольких наносекунд [1]. Для реализации этого технически сложного процесса используются многокоординатные приводные системы. В их состав входит измерительная часть, а также программное обеспечение для управления координатными перемещениями, процессом регистрации контролируемых параметров, их обработки и представления в удобном для оператора виде.

К одной из наиболее важных составляющих координатных систем можно отнести систему позиционирования. В работе [1] предложены новые принципы построения этих систем и их структур, основанные на применении программно-управляемых линейных шаговых двигателей (ЛШД) в сочетании с аэростатическими опорами, обеспечивающими погрешность позиционирования  $\pm 2...3$  мкм, и наличие

переходного многоконтактного программируемого устройства, позволяющего создать более универсальное и удобное в эксплуатации зондовое оборудование.

Вместе с тем, кроме приведенных выше задач возникают новые, связанные с выходом микроэлектроники на наноуровень, расширением областей ее использования во всех областях техники, включая технику для экстремальных условий и существенным повышением требований к надежности.

Анализ источников научно-технической информации и современных тенденций развития оборудования зондового контроля показал, что использование такого оборудования в точном электронном машиностроении предусматривает следующее:

– на первом этапе контроль качества изготовления кристаллов на полупроводниковой пластине осуществляется по постоянному или низкочастотному сигналу путем импульсных измерений и определения вольт-амперной (ВАХ) и вольт-фарадной (ВФХ) характеристик;

– на втором этапе контроля определяется весь комплекс характеристик объекта, позволяющий селективно разбить выборку по группам, обеспечивающих возможность достижения заданного уровня точностных параметров изготавливаемого изделия.

Достоверность контроля во многом зависит от характеристик СВЧ зондовых головок и их калибровки, требования к которым могут быть сформулированы следующим образом [2]:

- размеры наконечника должны быть, по возможности, минимизированы для снижения паразитной емкости между зондовой головкой и измерительным устройством;
- зондовая головка должна иметь постоянное сопротивление;
- необходимо минимизировать потери СВЧ-сигнала и обеспечить необходимую для тестирования полосу пропускания;
- необходимо исключить влияние паразитных емкостей зондовых головок и измерительного устройства и минимизировать сопротивление связывающих их кабелей.

На основе проведенного анализа источников научно-технической информации сформированы основные тенденции развития зондового оборудования точного электронного машиностроения, включающие:

– увеличение диаметров тестируемых пластин, что соответствует современным тенденциям развития электронной промышленности, которая в перспективе планирует работу с их размерами 450...500 мм, при этом к важной особенности требований к зондовому оборудова-

нию можно отнести сохранение возможностей тестирования пластин меньшего диаметра;

– увеличение скоростей координатных перемещений, для чего необходимы комплексные решения, связанные с механическими колебаниями, точностью координатных систем и созданием специализированного программного обеспечения для эффективного решения этих задач;

– наращивание числа дополнительных опций в сочетании с разработкой программного обеспечения, позволяющих их эффективно реализовать;

– уменьшение размеров кристаллов и контактных площадок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рябик, А. Автоматическая установка АРТ-9411 компании ТАКАУА для тестирования смонтированных печатных плат зондовым методом // Технологии в электронной промышленности С.61-63. – Режим доступа: [http://www.tech-e.ru/pdf/2007\\_06\\_61.pdf](http://www.tech-e.ru/pdf/2007_06_61.pdf). – Дата доступа: 17.05.2018.

2. Васильев, И. Зондовые измерения параметров полупроводников: комплексные решения / И.Васильев. Электроника: НТБ. – №2, 2017. – С.72-77. – Режим доступа: <http://www.electronics.ru/journal/article/5937>. – Дата доступа 01.05.2018.

3. Смирнов, К.К. Организация прослеживаемости предметов труда при проведении функционального контроля СБИС / К.К. Смирнов, Е.Н. Ефимов. – М.: Труды НИИСИ РАН. – 2014. – Т. 4. – № 1. – С. 40-44.

4. Hudec, J. Methodology of functional test synthesis and verification for VLSI Systems/ J. Hudec // TI 2000. Proceedings of the 22nd International Conference on Information Technology Interfaces (Cat. No.00EX411), 2000, pp. 61-66.

5. Добряков, В.А. Начальное размещение базовых элементов комплементарных металл-окисел-полупроводниковых больших интегральных схем методом случайных назначений / В.А. Добряков, А.Н. Енгальчев, А.В.Назаров. – М.: Труды МАИ. – 2014. – № 72. – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=47562>. – Дата доступа: 17.05.2018.

А.С. Калиниченко, проф. (БГТУ, г. Минск);  
А.В. Козинец, инж. (ОАО «Планар», г. Минск);  
А.А. Глазунова, науч. сотр. (ОИМНАН Беларуси, г. Минск)

## **АППАРАТНО–ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

Различные виды аппаратно-программных средств достаточно широко применяются в прецизионном оборудовании ОАО «Планар» для микроэлектроники, например, микросхем.

Программно-аппаратные средства должны обеспечивать стабильность работы в течение длительного времени без обслуживания человеком в системе управления, мониторинга параметров функционирования и оценки технического состояния основных компонентов и узлов оборудования в автоматизированном режиме (так называемых систем электронного обслуживания «*e-Maintenance*»).

Использование аппаратно-программных средств в режиме «онлайн» позволяет не только прогнозировать изменение технического состояния оборудования в процессе его эксплуатации и осуществлять техническое обслуживание по фактическому состоянию, но и в ряде случаев обеспечить значительное продление его срока службы [1 – 3]. Однако использование таких программных средств содержит большие риски потери информации из-за неисправности оборудования или сетевых атак на облачные технологии.

Для разработки современных аппаратно-программных средств автоматизированной прецизионной обработки ОИМ НАН Беларуси и ОАО «Планар» совместно были проведены следующие работы:

– осуществлен анализ основных параметров функционирования оборудования точного электронного машиностроения на примере прецизионной установки для утонения пластин механической обработкой:

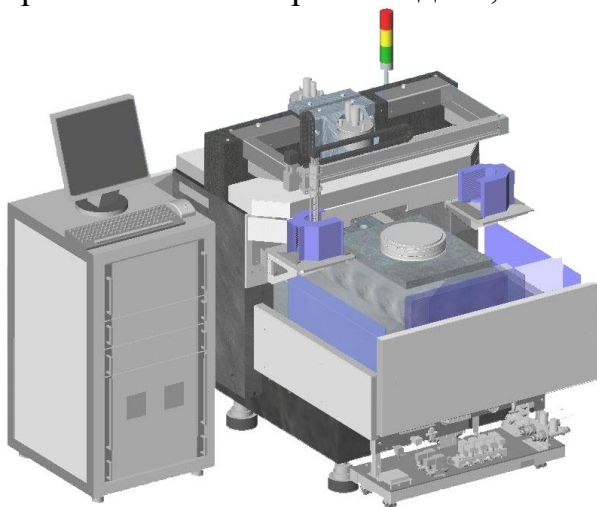
– определены требования к качеству обработки и основным факторам, оказывающим на него наиболее существенное влияние;

– разработаны аппаратно-программные средства автоматизированной прецизионной обработки, обеспечивающие управление параметрами, оказывающими наиболее существенное влияние на качество обработки.

В качестве базового было выбрано оборудование для механического утонения пластин на ОАО «Планар», в частности вертикальная установка (ЭМ-2060) с числовым программным управлением (рисунок 1).



Установка ЭМ-2060 содержит: гранитную станину с двумя вертикальными стойками и поперечной балкой, на которой установлен на кронштейне электрошпиндель; планшайбу на аэростатической опоре



**Рисунок 1 – Установка ЭМ-2060**

с приводом; резцовую головку, закрепленную на электрошпинделе; устройства для подачи сжатого воздуха в аэростатические подшипники и подшипниковые опоры и охлаждающей жидкости в электрошпиндель.

Аппаратно-программные средства (АПС) автоматизированной прецизионной обработки, блок схема которых показана на рисунке 2, включают:

а) блоки контроля:

- вертикальных перемещений и колебаний вдоль оси  $Z$  электрошпинделя с бесконтактными датчиками;

- горизонтальных перемещений и колебаний вдоль осей  $X$  и  $Y$  вала электрошпинделя относительно его корпуса с бесконтактными датчиками;

- вертикальных перемещений и колебаний вдоль оси  $Z$  и горизонтальных перемещений и колебаний вдоль осей  $X$  и  $Y$  планшайбы относительно стола;

- давления сжатого воздуха в аэростатических подшипниках и подшипниковых опорах электрошпинделя;

- давления сжатого воздуха в аэростатических подшипниковых опорах планшайбы;

- температуры охлаждающей жидкости;

- температуры корпуса электрошпинделя.

б) блоки регулирования:

- давления сжатого воздуха в аэростатических подшипниках и подшипниковых опорах электрошпинделя;

- давления сжатого воздуха в аэростатических подшипниковых опорах планшайбы;

- объема подачи охлаждающей жидкости.

Аппаратно-программные средства (АПС) выполнены на базе микрокомпьютера с внутренней памятью и имеют по меньшей мере десять цифровых и аналоговых входов с АЦП и пять выходов с ЦАП. При их использовании:

– при включении станка с ЧПУ с устройства подачи сжатого воздуха подается воздух в аэростатические подшипники и подшипниковые опоры электрошпинделя, далее сигналы с датчиков о давлении поступают в блок предварительной обработки, после чего передаются в АПС, где окончательно обрабатываются и передаются в вычислительное средство;



Рисунок 2 – Схема аппаратно-программных средств автоматизированной прецизионной обработки

– в вычислительном средстве величины давлений сравниваются с эталонными, результаты вычислений поступают в АПС, где преобразуется и передается в блок управления давлением сжатого воздуха, посредством которого устанавливаются его требуемые параметры;

– электрошпиндель приводится во вращение с максимальной частотой, в процессе которого с бесконтактных датчиков горизонтальных перемещений и колебаний вдоль осей X и Y нижней части вала электрошпинделя информация о положении и колебаниях его оси поступает в блок контроля, затем в АПС, где предварительно обрабатывается и передается на вычислительное средство, где осуществляется их окончательная обработка с расчетом необходимой величины коррекции массы элемента для балансировки резцовой головки и величина этой массы передается на монитор, где визуализируется;

– после этого электрошпиндель останавливается, система ЧПУ отключает подачу сжатого воздуха в азростатические подшипники и подшипниковые опоры электрошпинделя и осуществляется коррекция массы элемента для балансировки резцовой головки;

– при обработке пластины данные о давлении сжатого воздуха передаются в АПС и вычислительное средство, где сравниваются с эталонными и формируются команды на их корректировку;

– с использованием бесконтактных датчиков осуществляется регистрация информации о перемещениях и амплитудах колебаний соответственно вала электрошпинделя, которая поступает в соответствующие блоки контроля, где предварительно обрабатывается и передается в АПС, где окончательно обрабатывается и передается на вычислительное средство, в котором полученные значения перемещений и амплитуд колебаний сравниваются с заданными или эталонными и определяется наличие или отсутствие механических колебаний с собственными частотами;

– блоками контроля определяются температуры охлаждающей жидкости и корпуса электрошпинделя, информация о величинах которых поступает в АПС, откуда, после обработки, передается на вычислительное средство, где анализируется и при необходимости формируется команда на корректировку объема поступающей в шпиндель охлаждающей жидкости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ан Ж. Датчики измерительных систем / Ж. Ан. – М.: Мир, 1992. – 560 с.
2. Виноградов, М.В. Обеспечение параметрической надежности приводов подачи высокоточных автоматизированных станков / М.В. Виноградов // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. – Саратов: СГТУ, 2010. – С. 25-28.
3. Точность и надежность автоматизированных прецизионных металлорежущих станков / А.А. Игнатъев, М.В. Виноградов, В.А. Добряков и др. – Саратов: СГТУ, 1999. – 124 с.

А.С. Калиниченко, проф.;  
В.Г. Лугин, канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);  
В.С. Нисс, канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск);  
А.Ю. Королев, канд. техн. наук  
(НТП БНТУ «Политехник», г. Минск)

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОЕВ НА ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ ПРИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ**

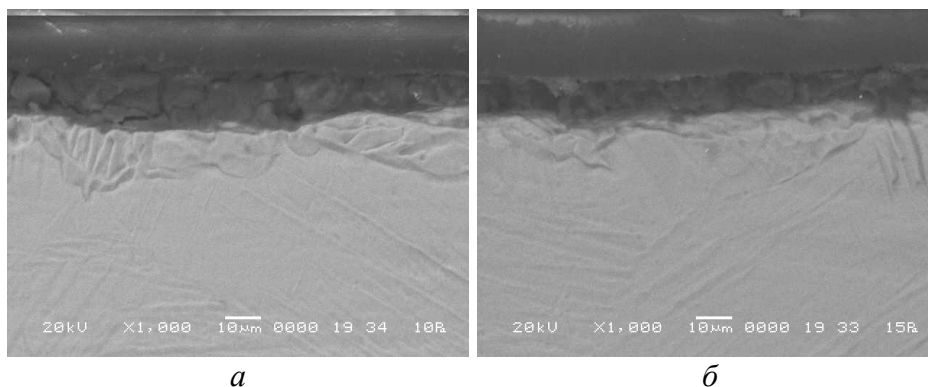
Производство изделий медицинского назначения является в последнее время одной из важнейших сфер применения титана и его сплавов благодаря биосовместимости к человеческим тканям. Титан пассивирован, и, следовательно, его сплавы имеют высокую степень устойчивости к воздействию большинства минеральных кислот. Он нетоксичен и совместим с биологическими тканями и минералами. Титановые сплавы обладают уникальным спектром свойств, благодаря сочетанию высокой прочности и жесткости, ударной вязкости и аникоррозионности, что обеспечивает широкий спектр применения для работы в средах, как с низкими, так и высокими температурами. Важным достоинством титановых сплавов, определяющих их преимущества для ортопедических имплантов, является невысокий модуль Юнга (110 ГПа), который в 2 раза меньше, чем у стали. Это значение только в 5-6 раз превышает значение для живой костной ткани (18-20 ГПа). Как результат, упругие деформации системы кость-имплант снижают нагрузки в 2 раза и уменьшают вероятность некроза или разрушения кости [1].

В связи с тем, что титановые сплавы характеризуются низкой износостойкостью и усталостной прочностью, плохими антифрикционными свойствами, важной задачей является модифицирование поверхности титановых изделий для преодоления упомянутых недостатков. Для улучшения триботехнических свойств деталей из титановых сплавов используют те же технологии обработки трущихся поверхностей, что и для других металлов: химико-термическую обработку, гальванопокрытие, напыление, лазерное и электроискровое поверхностное легирование и др. Однако эффективность этих технологий на титановых сплавах, как правило, невысокая и не отвечает необходимым требованиям. Так, при химико-термической обработке толщина слоя не превышает 100 мкм, гальванопокрытия быстро разрушаются, при плазменном покрытии толщина наносимого слоя не превышает 0,35 мкм, при лазерном и электроискровом поверхностном легирова-

нии глубина расплавленной зоны составляет не более 120 мкм. Существенными недостатками таких покрытий являются ограничение толщины наносимого слоя, а также его растрескивание [2].

В качестве альтернативы существующим методам модифицирования поверхности титана и титановых сплавов предложен метод электролитно-плазменной обработки [3]. Проведенные исследования по модифицирующей обработке титановых изделий в азот- или углеродсодержащем электролите с последующей закалкой показали перспективность процесса. Преимуществами разработанных методов перед другими существующими методами термической обработки являлась высокая скорость нагрева заготовки (до 250 К/с), а также высокая скорость диффузионного насыщения [4]. В работе исследовались особенности формирования модифицированного слоя на образцах из ВТ1-0 и ОТ4 в электролитах на водной основе, которые содержали хлорид аммония – 10%, аммиак – 5% (электролит № 1), а также хлорид аммония – 10%, глицерин – 10%, нитрат аммония – 5% (электролит № 2). Подаваемое напряжение менялось от 225 до 275 В, а время обработки составляло 2,5, 5,0 или 7 минут.

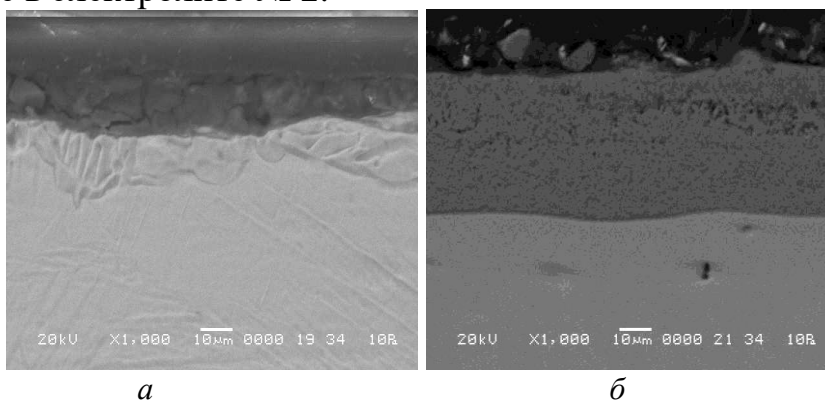
На Рис. 1 приведена микроструктура образца из титанового сплава ОТ4 при различной подводимой мощности.



**Рисунок 1 - Микроструктура поверхностных слоев, сформированных на поверхности титанового сплава при номинальной мощности (а) и при увеличении электрической мощности на 22% (б)**

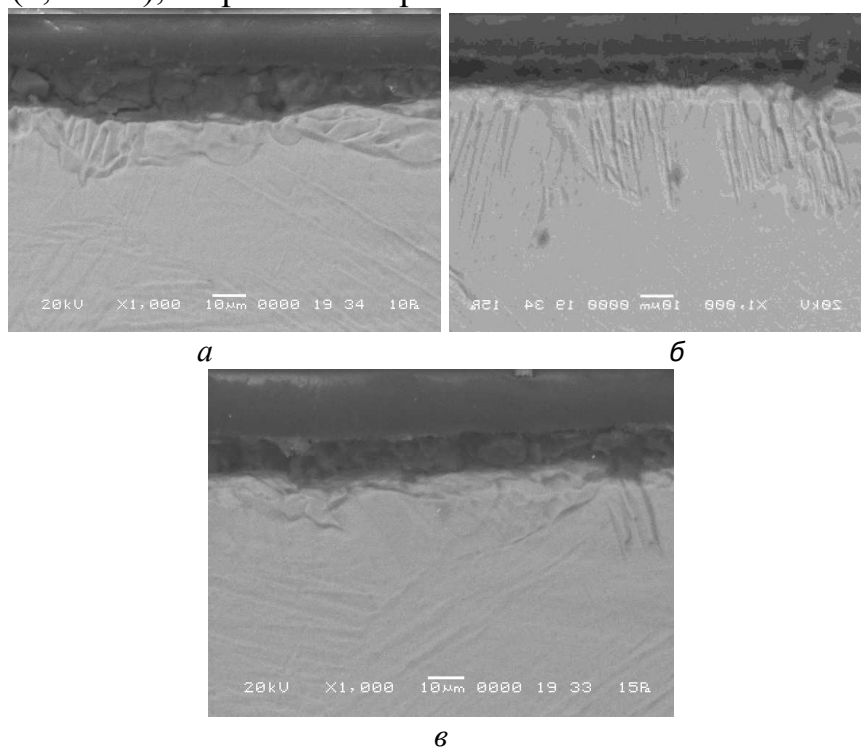
Анализ микроструктур показывает, что увеличение выделяемой мощности на 15% приводит к формированию более тонкого модифицированного слоя из-за роста толщины парогазового слоя. Однако, микроструктура модифицированного слоя становится более однородной и плотной. Отсутствуют трещины, видимые для процесса, проводимого при номинальной электрической мощности. Это можно объяснить отрицательным влиянием пузырьков электролита, которые разрушаются при более высокой мощности.

На Рис. 2 приведены фотографии микроструктур поверхности титанового сплава ОТ4 при обработке в электролите №1 (Рис. 2а) и электролите № 2 (Рис. 2б). Анализ микроструктур показывает, что состав электролита оказывает существенное влияние на толщину модифицированного слоя. При одинаковой подводимой мощности толщина модифицированного слоя больше при электролитно-плазменной обработке в электролите № 2.



**Рисунок 2 – Влияние состава электролита на толщину и характер структуры модифицированного поверхностного слоя:  
а – электролит №1, б – электролит №2.**

На Рис. 3 приведены фотографии образцов из сплава ОТ4, полученных при обработке в электролите №1 при одинаковом времени обработки (2,5 мин), но разным напряжении.



**Рисунок 3 – Микроструктуры образцов, полученных при напряжении 225 В (а), 250 В, (б) и 275 В (в)**

Анализ показывает, что характер и толщина модифицированного слоя зависит от подаваемого напряжения и характера электролита. При прочих равных параметрах толщина модифицированного слоя больше при обработке в электролите № 2. Однако, влияние времени выдержки и напряжения (выделяемой мощности) не так однозначно проявляются. Толщина модифицированного слоя меняется от 5 мкм до 70 мкм.

Анализ структуры модифицированных слоев, показывает сложную зависимость между толщиной слоя и другими параметрами процесса. Вероятнее всего, это обусловлено особенностями формирования парогазовой оболочки, а также изменением химического состава в модифицированном слое.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Савич В.В., Сарока Д.И., Киселев М.Г., Макаренко М.В. Модификация поверхности титановых имплантатов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах. – Минск: Беларуская навука, 2012. – 244 с.
2. Прилуцкий В.П., Руханский С.Б., Ахонин С.В., Гадзыра Н.Ф., Давидчук Н.К. Повышение износостойкости титана аргонодуговой наплавкой//Автоматическая сварка. – 2012. – №1. – С. 18–20
3. Козлов И.А., Крит Б.Л., Морозова Н.В., Герасимов М.В., Суминов И.В. Плазменно-электролитические покрытия, полученные на титане VT1-0 при малой продолжительности обработки//Электронная обработка материалов. – 2022. – 58(6). – 13–18.
4. Алексеев Ю.Г., Королёв А.Ю., Нисс В.С., Паршутто А.Э., Будницкий А.С. Электролитно-плазменное полирование титановых и ниобиевых сплавов//Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 211–219.

А.В. Полховский, ассист.; А.Л. Наркевич, доц.;  
С.В. Шетько, доц.; С.А. Прохорчик, доц.;  
А.В. Максимцова, студ. (БГТУ, г. Минск)

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЫЖ: РАЗРУШАЮЩАЯ НАГРУЗКА И ЖЕСТКОСТЬ СРЕДНЕЙ ЧАСТИ**

В Республике Беларусь в филиале «Телеханы» государственного предприятия «Беларусьторг» после технологического переоснащения лыжного цеха освоен выпуск спортивно-беговых пластиковых лыж с применением армированных композиционных материалов по разработкам и при непосредственном участии БГТУ. В процессе исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также на стадии выпуска продукции необходимо определение и контроль показателей качества лыж.

Цель работы – сформировать номенклатуру показателей механических характеристик для средней части спортивно-беговых лыж, а также выявить взаимосвязь между ними.

Испытания по определению механических характеристик осуществляются в условиях специализированной лаборатории БГТУ. Нагружение при статических испытаниях производят на плоской горизонтальной поверхности (рис. 1, а) и на опорах (рис. 1, б).

ГОСТ 30045-93 устанавливает методы определения механических характеристик для спортивно-беговых лыж. При испытании на плоской горизонтальной поверхности определяют следующие характеристики жесткости лыжи:

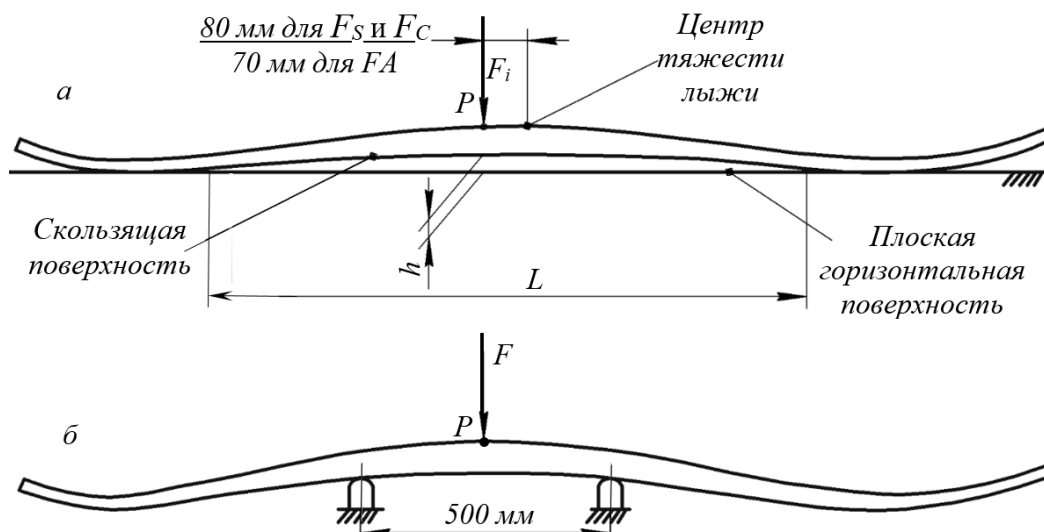
– высота остаточного прогиба  $h$  (рис. 1, а) – расстояние, измеренное в точке  $P$  приложения нагрузки, между скользящей поверхностью и плоской горизонтальной поверхностью; причем, значение нагрузки (здесь -  $F_S$ ) нормировано для лыж с номинальной длиной от 160 до 220 см с шагом 5 см (например, для лыжи 185 см нагрузка равна 270 Н, для 180 см – 245 Н), а также нормировано значение  $h$ , оно должны соответствовать 0,6–1,7 мм;

– длина остаточного прогиба  $L$  (рис. 1, а) – длина участка скользящей поверхности лыжи, не соприкасающегося с плоской горизонтальной поверхностью при приложении к лыже нагрузки; по нормативу – при нагрузке  $F_S$  применяют термин стандартная длина остаточного прогиба, значения которой должны соответствовать 350–550 мм;



– нагрузка распрямления (здесь –  $F_C$ , рис. 1, а) – сила, приложенная к точке  $P$ , при которой высота остаточного прогиба равна 0,3 мм; по нормативу – значение не регламентируется.

Остаточную длину при нагрузке  $F_C$  по указанному нормативу не определяют.



а – на плоской горизонтальной поверхности; б – на опорах

**Рисунок 1 – Схемы нагружения лыж при испытаниях**

Один из крупнейших производителей спортивного инвентаря австрийская компания *Fischer Sports GmbH* также использует характеристику, аналогичную нагрузке распрямления  $F_C$ , называемую индексом жесткости  $FA$  (синоним – жесткость по Фишеру) – сила (выражается в килограммах), приложенная в точке  $P$  (рис. 1, а), при которой высота остаточного прогиба равна 0,2 мм. Т.е. для этих характеристик имеются отличия в расположении точки приложения нагрузки и высоте остаточного прогиба. Но в отличие от нагрузки распрямления  $F_C$  для индекса жесткости  $FA$  приводятся значения в зависимости от массы лыжника и типа лыж (стиля катания). Поэтому при исследованиях и контроле качества лыж нагрузку распрямления  $F_C$  не фиксировали, а определяли индекс жесткости  $FA$ , а также длину остаточного прогиба при нагрузке  $FA$ .

При испытании на опорах (рис. 1, б) по ГОСТ 30045 определяют разрушающую нагрузку средней части лыжи  $F$ , также в указанном нормативе приводятся ее минимальные значения для длин лыж от 1650 до 2250 мм с шагом 100 мм (например, для лыж длиной 1750 мм разрушающая нагрузка  $F$  равна 1766 Н; для 1850 мм – 2354 Н). Необходимо отметить, что в ГОСТ 30045 не даются определения для понятий «номинальная длина лыжи» и «длина лыжи», но исходя из указанных в этом нормативе размеров лыж для назначения нагрузки  $F_S$

(от 160 до 220 см) и для выбора минимальной разрушающей нагрузки (от 1650 до 2250 мм) можно сделать предположение, что номинальная длина лыжи – это проекция длины лыжи на горизонтальную плоскость, а длина лыжи – это развернутая длина лыжи.

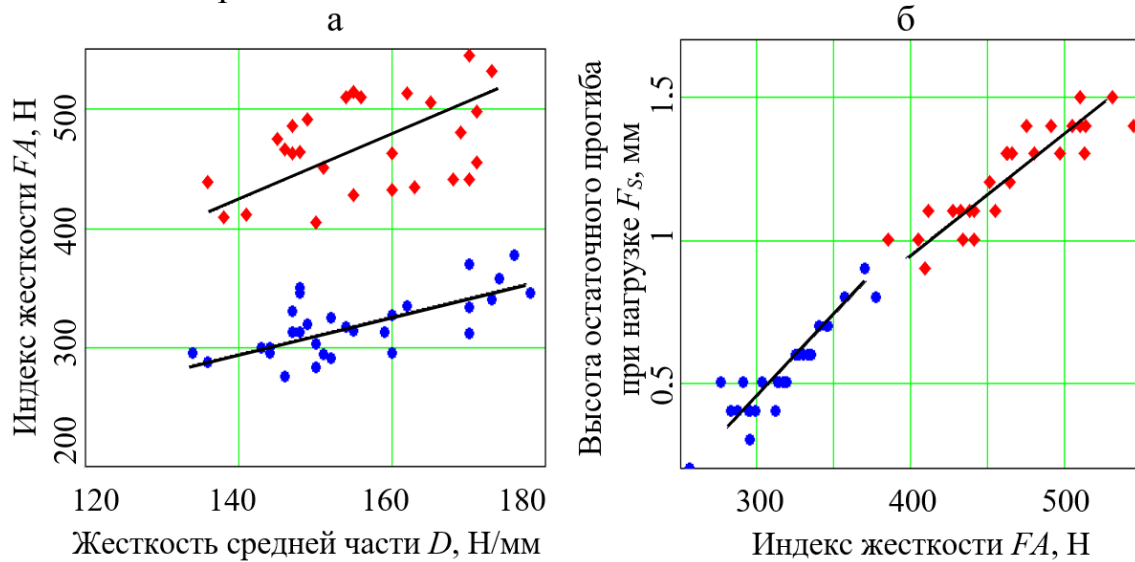
На начальных этапах выполнения исследовательских работ до освоения оборудования для обработки скользящего слоя замечено, что дефекты скользящего слоя не всегда позволяли объективно оценить индекс жесткости  $FA$ , чтобы целенаправленно вносить изменения в структуру лыжи (в частности – в расположение и количество армированных слоев) для достижения его требуемого значения. Понимая, что на значение этого параметра существенное влияние оказывает податливость средней части лыжи при изгибе, предложено дополнительно по схеме нагружения, изображенной на рис. 1, б, определять жесткость средней части лыжи  $D$  как отношение приращения нагрузки к соответствующему перемещению точки приложения нагрузки на начальном линейном участке диаграммы деформирования. Это позволило более объективно сравнивать образцы лыж с разной структурой в средней части и целенаправленно управлять структурой. Также сравнение комплекса результатов испытаний по определению жесткости средней части  $D$  и индекса жесткости  $FA$  для экспериментальных образцов и зарубежных аналогов позволило сделать вывод о дополнительном влиянии формы (профиля) нижней поверхности лыжи на значение индекса жесткости  $FA$ . Эти результаты путем принятия соответствующих технических решений (предложенное БГТУ ноу-хау производства) использованы для обеспечения требуемых значений индекса жесткости  $FA$  выпускаемых лыж в филиале «Телеханы».

Экспериментальные данные, полученные для партий лыж с двумя различными формами нижней поверхности лыж, представлены на рис. 2.

Наблюдается положительная корреляция индекса жесткости  $FA$  и жесткости средней части лыжи  $D$  (рис. 2, а) в каждой партии лыж. А также очевидно влияние формы нижней поверхности лыжи на значение индекса жесткости  $FA$  при равных значениях жесткости  $D$ , причем по сравнению с результатами до внедрения технического решения индекс жесткости  $FA$  увеличился соответственно более чем в 2 и 3 раза для отдельных партий лыж.

На рис. 2, б наблюдается естественная пропорциональная зависимость между высотой остаточного прогиба при нормативной нагрузке  $F_S$  и индексом жесткости  $FA$ , при этом видно, что эти зависимости для разных форм нижней поверхности лыж незначительно отличаются. Тем не менее данную зависимость можно использовать

при определении индекса жесткости  $FA$  во избежание получения ошибочных - завышенных или заниженных - значений ввиду малого уровня зазора между скользящей поверхностью и плоской горизонтальной поверхностью.



**Рисунок 2 – Зависимости между характеристиками жесткости для двух различных форм нижней поверхности лыжи (обозначены группами точек – ромбы и круги)**

Считаем также целесообразным ввести в практику оценки качества лыж значения разрушающих нагрузок  $F$  для различных длин лыж с шагом 50 мм, т.е. фактически ввести промежуточные значения по методу линейной интерполяции. Тогда, например, для лыж длиной 1800 мм разрушающая нагрузка  $F$  составит 2060 Н.

В результате исследований экспериментальных образцов и испытаний опытных партий лыж сформирована номенклатура показателей механических характеристик для средней части спортивно-беговых лыж (высота остаточного прогиба; стандартная длина остаточного прогиба; индекс жесткости  $FA$ ; длина остаточного прогиба при нагрузке  $FA$ ; жесткость средней части лыжи; разрушающая нагрузка средней части лыжи), отработаны методы их определения, разработана и утверждена методика для испытаний в специализированной лаборатории БГТУ, а также выявлены зависимости между различными характеристиками жесткости средней части лыж.

Д.В. Куис, доц., канд. техн. наук (БГТУ, г. Минск);  
И.Н. Степанкин, доц., канд. техн. наук;  
Е.П. Поздняков, ст. преп. (ГГТУ им. П.О. Сухого);  
Н.А. Свидуневич, проф., д-р техн. наук;  
А.С. Раковец, ассист.;  
А.С. Кравченко, инж., канд. техн. наук;  
Гордиенко Д.Д., асп. (БГТУ, г. Минск)

### **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ СЛОЕВ СТАЛИ VOHLER 303M EXTRA**

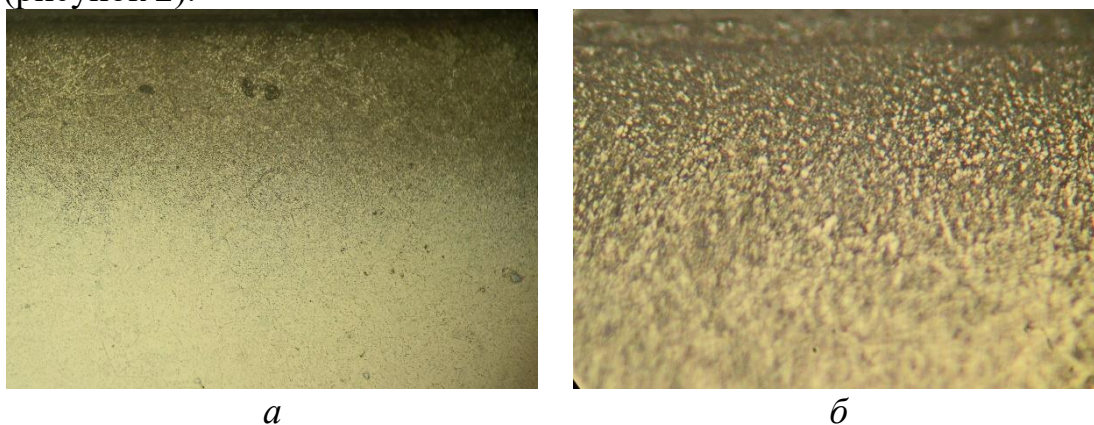
В настоящее время, наряду с широко используемыми сталями 18ХГТ, 40Х, 30ХГСА и др., машиностроительному комплексу доступны такие сплавы как 16MnCrS5, 18ХГР, 20ХН3А, 40Х13 и VOHLERM303 Extra, и их аналоги. Многие из них широко используются в производстве деталей машин зарубежными, в первую очередь западными производителями. Их применение в некоторых случаях регламентируется требованиями заказчиков, ориентированных на экспорт технических устройств за пределы Республики Беларусь. Использование таких сплавов также связано с интеграцией отечественной металлургической промышленности в общеевропейский рынок с возможностью получения сплавов по западным стандартам DINEN 10083 и DINEN10084 для удовлетворения потребностей как внутренних, так и внешних заказчиков.

С целью определения влияния режимов термохимической обработки на структурообразование, фазовый состав и свойства поверхностных слоев стали VOHLERM303 extra, были получены (режимы: цементация (900 °С, 6 часов) и нитроцементация (900 °С, 6 часов), закалка в масле с температуры 950 °С и отпуск при температуре 200 °С, 2 часа; закалка в масле с температуры 1060 °С и отпуск при температуре 500 °С, 2 часа, нитроцементация (500 °С, 6 часов); закалка в масле с температуры 1060 °С и отпуск при температуре 200 °С, 2 часа) и подготовлены для исследований зависимостей «состав-структура-свойства» образцы этой стали.

Исследованиями определено, что химический состав образцов этой стали соответствует литературным данным: 0,27 %С, 0,65 % Mn, 14,50 % Cr, 0,85 % Ni, 1,00 % Mo.

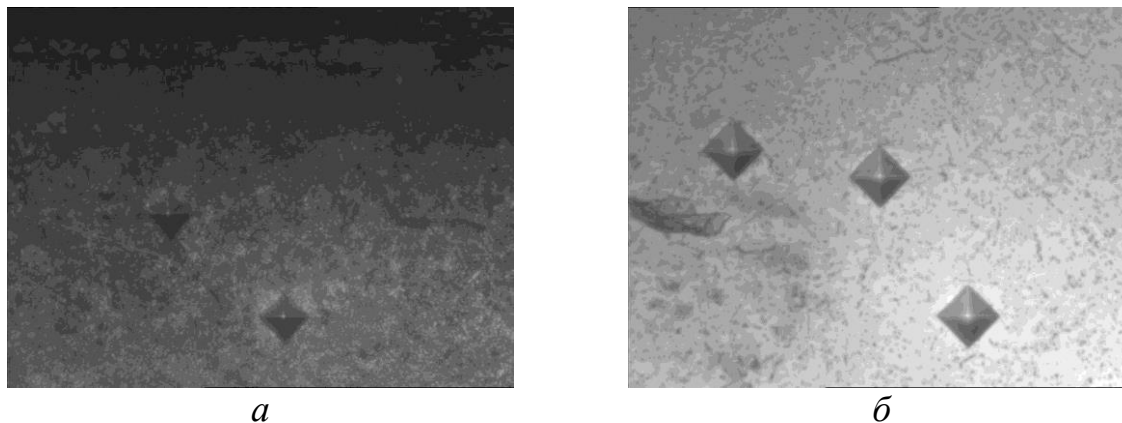
Структурными исследованиями установлено, что основа состоит из низкоуглеродистого мартенсита, а морфология модифицированных

поверхностных слоев изучаемых сплавов, вследствие развитой системы границ между кристаллитами (рисунок 1), является структурой сложного фазового состава (карбиды, нитриды, карбонитриды,  $\alpha$ - и  $\gamma$ -твердые растворы). Толщина модифицированных слоев составила до 0,6 мм после науглероживания и до 1,6 мм после нитроцементации с микротвердостью до  $\sim 8,0$  ГПа в зависимости от обработки (рисунок 2).



*a* –  $\times 200$ ; *б* –  $\times 1000$ .

**Рисунок 1 – Микроструктура в СМ образца 72 (нитроцементация в течении 6 часов при 900°C, 20 минут при 950°C, выдержка при 950°C 20 минут, закалка в масле, отпуск 200°C 2 часа)**



*a* – поверхность, *б* – основа

**Рисунок 2 – Микроструктура образца 72 (нитроцементация в течении 6 часов при 900°C, 20 минут при 950°C, выдержка при 950°C 20 минут, закалка в масле, отпуск 200°C 2 часа) с отпечатками индентора при нагрузке  $P = 200$  г**

Полученные данные использованы для определения влияния соотношения свойств и структуры поверхностно-модифицированных слоев стали BOHLER 303M EXTRA на механизм и закономерности ее контактного изнашивания.

Д.В. Куис, доц., канд. техн. наук;  
А.С. Калиниченко, проф., д-р техн. наук;  
И.Е. Григорьев, асп. (БГТУ, г. Минск);  
В.А. Шейнерт доц., канд. техн. наук;  
А.Г. Слуцкий, доц., канд. техн. наук (БНТУ, г. Минск)

## **ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОКАЗАТЕЛИ СВОЙСТВ БЫСТРООХЛАЖДЁННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С НЕРАВНОВЕСНОЙ СТРУКТУРОЙ**

Существующие методы повышения физико-механических и эксплуатационных свойств, основанные на легировании, практически использовали свой ресурс. Несомненный научный и практический интерес представляет разработка композиционных сплавов с использованием преимуществ неравновесных структур армирующей фазы.

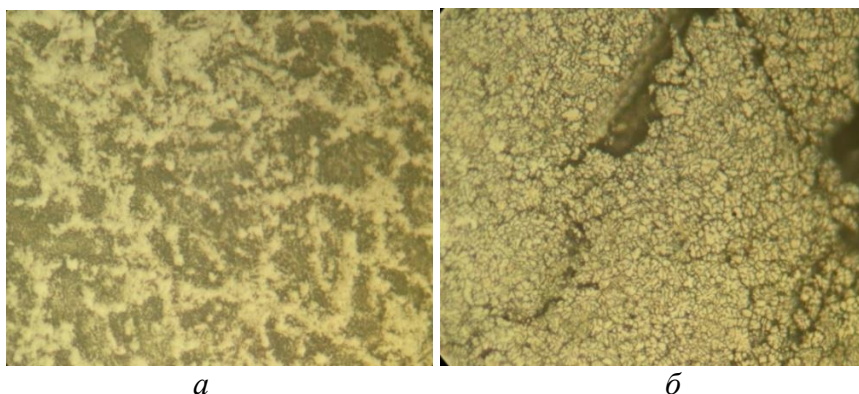
Ранее выполненные исследования [1-2] показали, что использование быстроохлажденных частиц с неравновесной структурой в качестве армирующего материала позволяет заметно повысить физико-механические свойства композитов различного назначения.

Быстроохлажденные материалы можно получать различной формы волокон (нитевидная, ленточная, лепестковая) в зависимости от конструктивных особенностей литейных установок. Это позволяет не только модифицировать структуру литых заготовок, приближая ее к строению композитов, но и использовать их для формирования композиционных материалов с матрицей на основе полимеров и керамики. Исходя из доступности исходных компонентов, широкой распространенности в технической сфере и простоты приготовления, для получения модельных неравновесных переохлажденных структур были выбраны базовые сплавы на основе алюминия и цинка, как более простых для получения на этапе отработки технологии высокоскоростной кристаллизации, обеспечивающей реализацию эффектов метастабильного состояния в волокнах.

Методом световой микроскопии и метода измерения микротвердости исследовано влияние режимов получения на микроструктуру и показатели механических свойств образцов быстроохлажденных элементов в виде волокон (фибры) на основе Al и Zn и образцов металлических материалов на основе Al и Zn, полученных методом литья в кокиль.

Анализ микроструктуры (рисунок) быстроохлажденных элементов показал наличие мелкозернистой структуры чистых металлов,

твердых растворов и механической смеси характерной для закалки из жидкого состояния. Микроструктура образцов, полученных литьем в кокиль, представлена в виде типичной для литых сплавов зернёной структуры металлов, первичных кристаллов твердого раствора и эвтектики (рисунок).



*a* – литье в кокиль; *б* – быстроохлажденные элементы

**Рисунок 1 – Микроструктура в СМ (x1000) образцов системы Zn–1 % Pb**

Определено, что увеличение скорости охлаждения приводит к ожидаемым результатам. По сравнению с микроструктурой образцов металлических материалов, полученных при литье в кокиль, микроструктура быстроохлажденных элементов значительно измельчается, что соответствующим образом отразилось на показателях физико-механических свойств. Установлено, что увеличение скорости охлаждения приводит к увеличению значений микротвердости до 2-х раз.

Результаты этих исследований использованы для усовершенствования классических схем получения быстроохлажденных металлических материалов с неравновесной структурой, что позволит стабилизировать основные параметры кристаллизации, минимизировать влияние постоянных и случайных вредных факторов и прогнозируемо управлять видом и свойствами полученных неравновесных металлических материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Получение литой стабильной фибры для армирования бетонных конструкций в лабораторных условиях / В.А. Шейнерт [и др.] // *Металлургия: Республиканский межведомственный сборник научных трудов.* – 2016. – № 37. – С. 132–136.

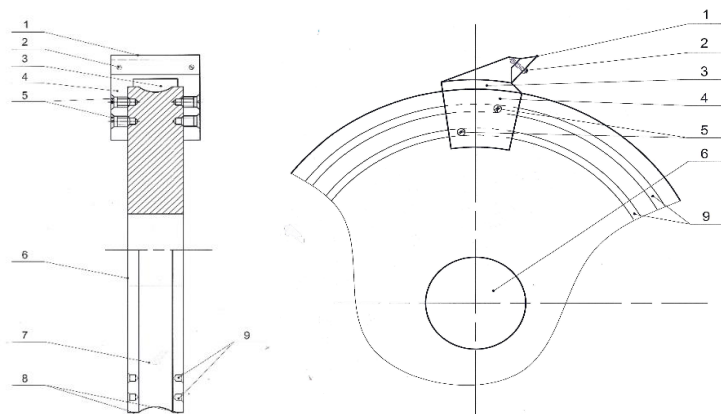
2. Технология получения быстроохлажденных гранул из сплавов на основе железа / А.С. Калиниченко [и др.] // *Металлургия: Республиканский межведомственный сборник научных трудов.* – 2016. – № 37. – С. 85–89.

С.И. Карпович, ст. науч. сотр.;  
 О.Ю. Цынкович, инж. (БГТУ, г. Минск);  
 С.С. Карпович, доц. (БНТУ, г. Минск)

## КОНСТРУКЦИИ ДЕРЕВОРЕЖУЩИХ ФРЕЗ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ЧИСЛОМ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Эффективность процесса фрезерования и качество обработки определяется многими параметрами, в том числе и количеством режущих элементов. Обеспечив конструктивную возможность регулировать число режущих элементов в процессе эксплуатации инструмента, можно активно влиять на технологические процессы механической обработки. Результатом проведенной конструкторской работы стала разработка такого рода инструмента в двух вариантах.

На рисунке 1 приведена разработанная принципиальная конструкция фрезы с регулируемым числом режущих элементов. Фреза с регулируемым числом режущих элементов состоит: сменяемая режущая пластина (1), крепежных винтов (2), зазор для удаления стружки (3), подвижный П-образный кронштейн (4), фиксирующие винты подвижного кронштейна (5), посадочное отверстие (6), корпус фрезы (7), посадочные пояски (8) кольцевых пазов (9).



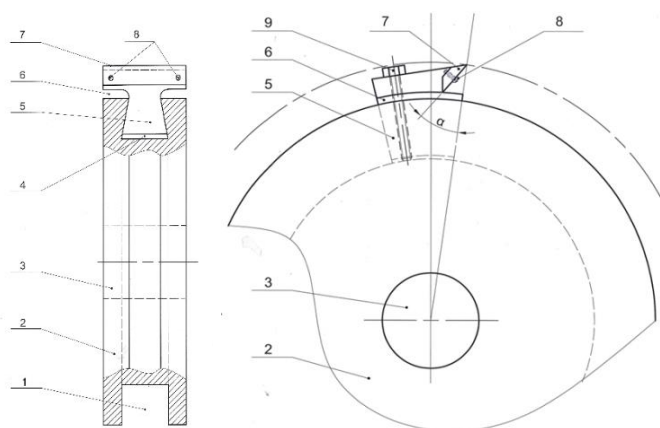
**Рисунок 1 – Конструкция фрезы с регулируемым числом режущих элементов (вариант 1)**

На кронштейне можно устанавливать режущие пластины, как с прямолинейным лезвием, так и профильные, радиусные. Для удаления стружки между корпусом фрезы и кронштейном предусмотрен зазор 3. Размеры зазора можно регулировать за счет проточки цилиндрической части корпуса и за счет выточки на внутренней поверхности кронштейна. Таким образом, у фрезы отсутствует межзубовая впадина, а, следовательно, обеспечивается свободное удаление стружки из



зоны резания. Такая схема удаления стружки снижает энергоемкость процесса резания.

На рисунке 2 приведена вторая принципиальная конструкция фрезы с регулируемым числом режущих элементов: прямоугольное гнездо (1), корпус фрезы (2), посадочное отверстие (3), кольцевой паз (4) трапецевидального сечения, вставка с хвостовиком (5) трапецевидального сечения, зазор (6) между вставкой и корпусом фрезы, сменная режущая пластина (7), крепежные винты (8) режущей пластины, резьбовой элемент (9), фиксирующий положение вставки в корпусе фрезы.



**Рисунок 2 – Конструкция фрезы с регулируемым числом режущих элементов (вариант 2)**

Предложенные конструкции фрез характеризуются универсальностью, на корпусе можно устанавливать не только разное число режущих элементов с разным шагом, но и разного профиля для получения как плоских, так и поверхностей различных профилей. На кронштейнах могут крепиться режущие пластины разного профиля, и их разное сочетание увеличит количество вариантов получаемых поверхностей.

Конструкции фрез с регулируемым числом режущих элементов обеспечивают возможность использовать один и тот же корпус для различных режимов фрезерования, в зависимости от вида выполняемой работы устанавливать разное число режущих элементов с возможностью изменения шага их расположения и изменения величины снимаемого припуска каждым зубом. Применение сменных режущих пластин упрощает технологию их замены и упрочнения.

Предложенный принцип конструирования фрез рекомендуется использовать при проектировании инструмента для мебельной промышленности и проведения научно-исследовательских работ в области совершенствования деревообрабатывающего инструмента.

С.Д. Латушкина, доц., канд. техн. наук;  
И.Н. Жоглик, научн. сотр.  
(ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», г. Минск);  
Д.В. Куис, доц., канд. техн. наук;  
А.С. Раковец, ассист.; А.С. Кравченко, инж., канд. техн. наук;  
О.Ю. Цынкович, инж.; Д.Д. Гордиенко, асп., (БГТУ, г. Минск)

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ОСАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И ПОКАЗАТЕЛИ  
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НИТРИДНЫХ  
ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ  
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ**

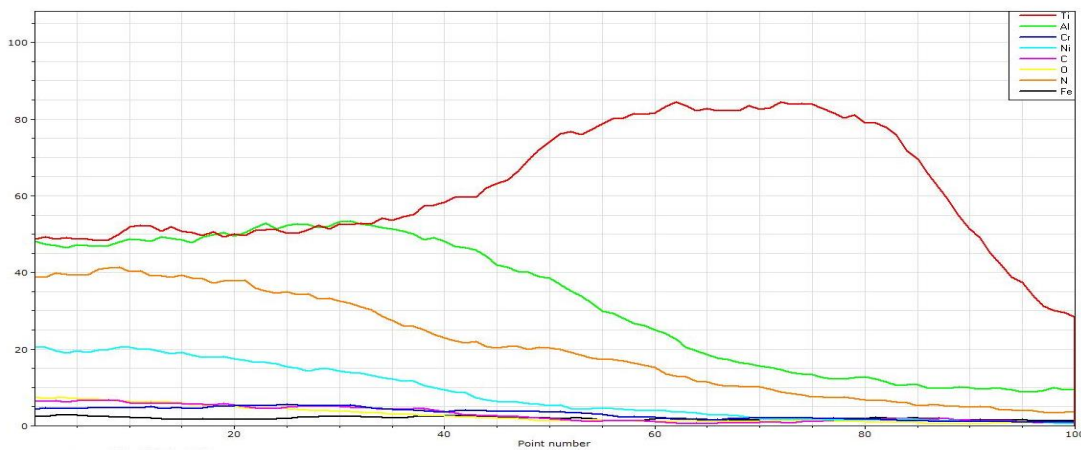
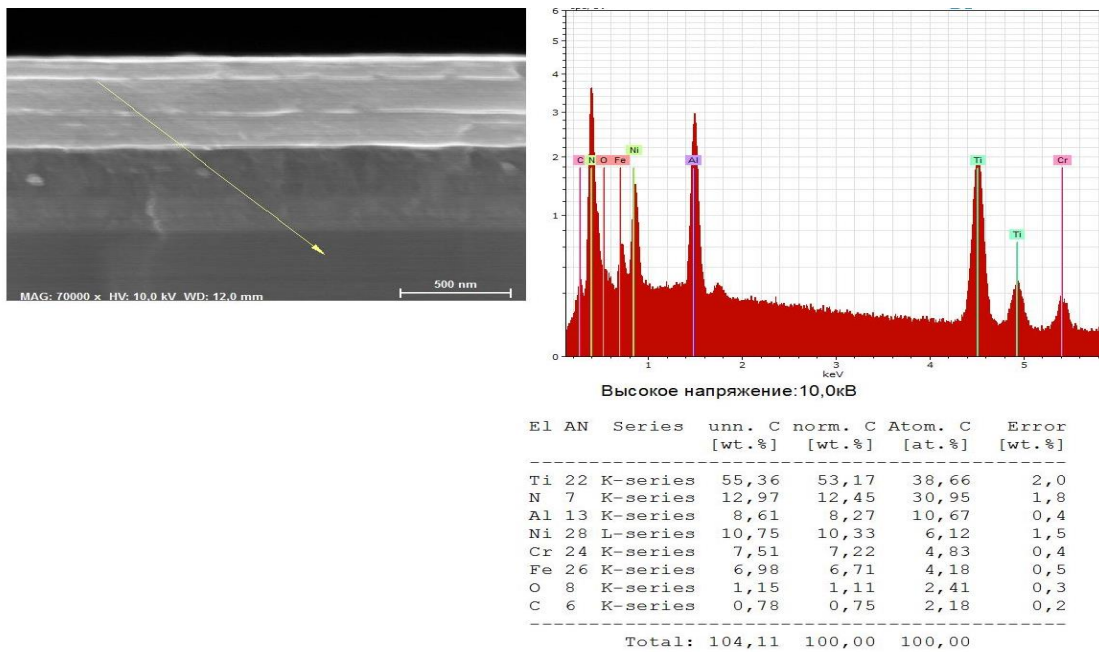
На современном этапе разработки защитных (износо- и коррозионностойких) покрытий наиболее значительные результаты достигнуты в области осаждения покрытий вакуумно-плазменными методами. В настоящее время широкое использование в качестве твердых износостойких покрытий находят покрытия на основе нитридов переходных металлов (титана, циркония, хрома), известных своими высокими механическими характеристиками - твердостью и прочностью. Однако такие покрытия являются недостаточно стабильными при повышенных температурах, вследствие чего возникает их рекристаллизация, изменяются структура и свойства.

Классическим методом изменения (повышения) физико-механических характеристик сплавов является комплексное легирование твердого раствора на основе кристаллической решетки основного элемента сплава. Исследования высокоэнтропийных сплавов показали, что они благодаря образованию твёрдых растворов имеют высокую твёрдость и обладают другими высокими физико-механическими характеристиками. Высокая энтропия смешения элементов в сплаве рассматривается как мера вероятности сохранения их системы в данном состоянии. Это обеспечивает повышенную термическую стабильность фазового состава и структурного состояния, а, следовательно, и свойства сплава – механические, физические, химические, что дает большие перспективы для формирования на их основе тонкопленочных покрытий [1-2].

В продолжение работ 2021 года [3] в рамках задания ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» с целью оптимизации составов и режимов формирования многокомпонентных покрытий из высокоэнтропийных сплавов было изучено влияние технологических режимов вакуумно-дугового осаждения с

сепарацией плазменного потока на структурное состояние, элементный и фазовый состав, микротвердость нитридных покрытий на основе системы Ti-Al-Cr-Fe-Ni-N.

Методом рентгеновской дифрактометрии установлено, что изменение потенциала смещения приводит к эволюции фазового состава формируемого покрытия от двухфазного покрытия на основе кубического нитрида титана и гексагональной фазы  $Ti_3Al_2N_2$  к твердому раствору на основе (Ti, Al) N, а изменение токов дугового осаждения на катодах не приводит к изменению фазового состава. Изменение технологических параметров, в основном, оказывает влияние на содержание титана при относительно одинаковом соотношении остальных компонентов (рисунок).



**Рисунок 1 – Топограмма поверхности образца нитридного покрытия на основе высокоэнтропийного сплава Ti-Al-Cr-Fe-Ni в РЭМ и результаты исследования микрохимического состава**

Определено, что структура покрытий (рисунок) отличается бездефектностью, однородностью и отсутствием столбчатой структуры, характерной для мононитридных покрытий, осаждаемых данным методом, что должно положительным образом сказаться на эксплуатационных свойствах изделий с такими покрытиями. При это наблюдается четкая граница раздела между покрытием и титановым подслоем.

Результаты исследований могут найти применение для упрочнения изделий инструментального назначения, работающих в условиях высоких термомеханических нагрузок и агрессивных коррозионных сред.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Senkov O.N., Scott J.M., Senkova S.V. Miracle Microstructure and room temperature properties of a highentropy TaNbHfZrTi alloy // *J. of Alloys and Com pounds*. – 2011. – V. 509. – P. 6043–6048.

2. Wang X.F., Zhang Y., Qiao Y., Chen G.L. // *Intermetallics*. – 2007. – Vol. 15. – P. 357–362.

3. Латушкина С.Д. Влияние технологических параметров осаждения на структуру и показатели физико-механических свойств вакуумно-плазменных покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов / С.Д. Латушкина, И.Н. Жоглик, Д.В. Куис, А.С. Раковец, О.Ю. Цынкович, А.С. Кравченко, И.Е. Григорьев // *Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 31 января – 12 февраля 2022 г. [Электронный ресурс] / БГТУ. – отв. за издание И. В. Войтов; УО «БГТУ».* – Минск : 2022. – С. 282–283.

УДК 621.771.6

А.Б. Найзабеков, д-р техн. наук, проф. (РИИ, г. Рудный);  
Е.А. Панин, PhD, доц. (КарИУ, г. Темиртау);  
И.Е. Волокитина, PhD, доц.;  
С.Н. Лежнев, канд. техн. наук, проф. (РИИ, г. Рудный);  
А.О. Толкушкин, асп. (УрФУ, г. Екатеринбург);  
Д.В. Куис, канд. техн. наук, доц. (БГТУ, г. Минск)

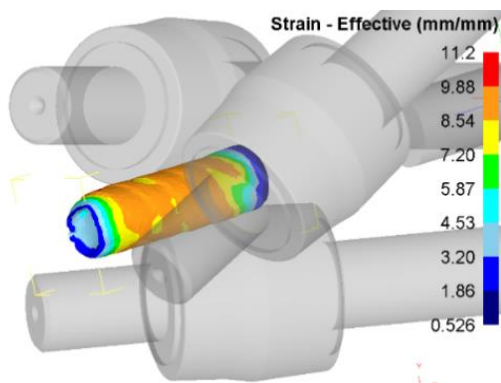
## **ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭВОЛЮЦИЮ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕДНОГО СПЛАВА, ПОДВЕРГНУТОГО РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКЕ**

Компьютерное моделирование процессов пластической деформации уже давно зарекомендовало себя, как надежный способ определения рациональных геометрических и технологических параметров различных способов деформирования, как черных, так и цветных металлов, и сплавов. Это позволяет без существенных трудозатрат и материальных затрат, как оптимизировать действующие технологические процессы различных способов деформирования, так и разрабатывать новые способы деформирования и всесторонне их изучать. Так как при таком подходе возникает возможность изучения интересующих параметров процесса деформирования в любой точке заготовки и инструмента на любой стадии процесса [1-3]. При этом модели процессов обработки давлением зачастую позволяют проанализировать формоизменение заготовки, параметры напряженно-деформированного состояния, изменение размера зерна металла и энергосиловые условия деформирования. Также в последнее время стали использовать программные комплексы и для моделирования различных процессов термической обработки черных и цветных металлов и сплавов. Чаще всего в данных программных комплексах используют модели недеформационного типа, т.е. модели, в которых стадия пластического деформирования отсутствует.

Для моделирования процессов термической обработки используется специальный модуль Deform-НТЗ, который также позволяет моделировать эволюцию структуры в традиционном виде, т.е. в виде градиентной заливки всей заготовки. В этом случае у пользователя имеется возможность оценки лишь среднего размера зерен. Другим вариантом является использование модуля Microstructure 3D, принцип работы которого основан на механизме клеточных автоматов (Cellular Automata). Основное отличие данного модуля заключается в возмож-

ности оценки не только размера зерен, но и их формы, поскольку эволюция структуры отображается в окне, аналогичном линзе микроскопа. Недостатком данного алгоритма является его локальность, т.е. исследование микроструктуры осуществляется не для всей заготовки, а лишь для определенных точек.

Целью данной работы является исследование влияния предварительной термической обработки на эволюцию микроструктуры медного сплава М1 при деформировании его на стане радиально-сдвиговой прокатки. Так известно, что правильный подбор предварительной термической обработки некоторых черных и цветных металлов и сплавов перед операцией его деформирования зачастую позволяет дополнительно измельчить исходный размер зерна. Если говорить о медном сплаве М1, то ранее авторами данной работы уже были проведены исследования влияния процесса радиально-сдвиговой прокатки (рисунок 1) на эволюцию микроструктуры данного сплава [4]. Но исходные заготовки из медного сплава М1 перед деформированием никакой предварительной термической обработке не подвергались.

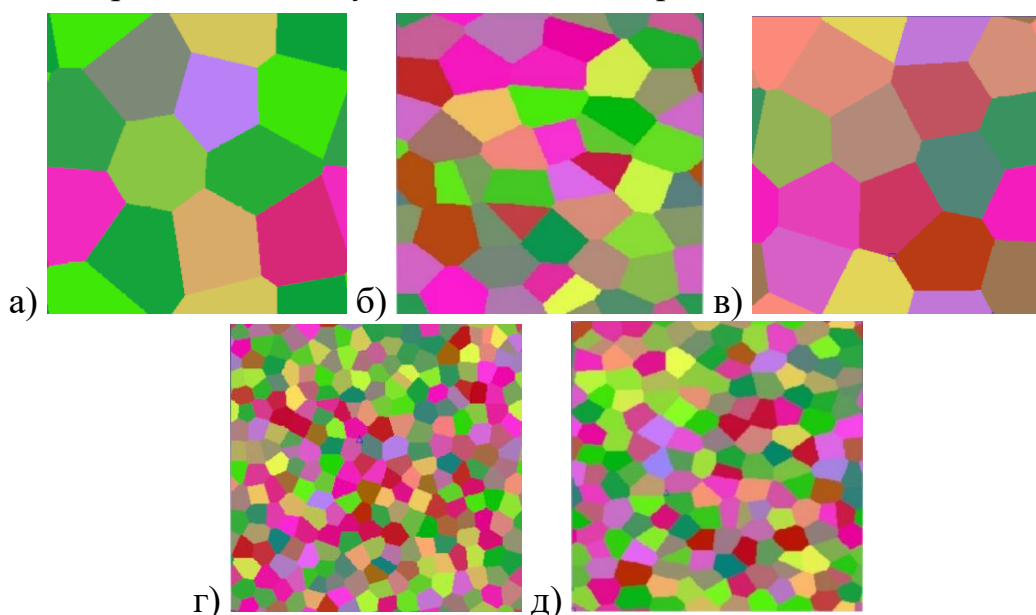


**Рисунок 1 – Заготовка после окончания деформирования**

Для достижения поставленной цели было принято решение провести компьютерное моделирование совмещенного режима обработки сплава М1, включающего в себя различные режимы предварительной термической обработки и последующую радиально-сдвиговую прокатку, что позволит определить влияние данного термомеханического воздействия на эволюцию микроструктуры данного сплава. Для этого были построены 2 модели в программном комплексе Deform. В первой модели заготовка диаметром 38 мм и длиной 80 мм подвергалась нагреву до 700°C при скорости нагрева 80°C/час, затем выдерживалась при заданной температуре 50 минут для равномерного прогрева по сечению, после чего резко охлаждалась со скоростью 500°C/сек до комнатной температуры, т.е. моделировался процесс закалки. Во второй модели режим нагрева и выдержки были аналогичными, скорость

охлаждения до комнатной температуры составляла 80°С/час, т.е. моделировался процесс отжига. После чего обе заготовки подвергались трем циклам радиально-сдвиговой прокатки с обжатиями по 3 мм в каждом проходе при комнатной температуре. Геометрия валков стана и их конфигурация соответствовала данным стана СВП-08 Рудненского индустриального института. Коэффициент трения на контакте заготовки и валков был принят равным 0,4, что, согласно рекомендациям системы Deform, соответствует среднему уровню шероховатости поверхности деформирующего инструмента без наличия смазочного материала. Для анализа структуры использовался алгоритм клеточных автоматов программы Deform. Для расчета изменения размера и формы зерен используется алгоритм Yada [5], который учитывает влияние различных типов рекристаллизации.

В качестве исходного размера зерна было принято значение в 100 мкм. Поскольку из ряда работ [6-7] известно, что основное измельчение структуры при радиально-сдвиговой прокатке происходит преимущественно в поверхностных слоях заготовки, то для анализа была выбрана зона на глубине 1 мм от поверхности.



**Рисунок 2 – Результаты моделирования микроструктуры:**  
**а – исходная структура, б – после закалки, в - после отжига,**  
**г - после закалки + 3 цикла РСП, д - после отжига + 3 цикла РСП**

На рисунке 2 представлены результаты моделирования структуры. Для более удобного сравнения результатов на обеих моделях было выставлено одинаковое разрешение (размер квадратного окна) 300 x 300 мкм. После проведения закалки исходное зерно измельчается со 100 мкм до 60 мкм. При отжиге размер зерен практически не изменя-

ется и остается на уровне 95-100 мкм. Реализация интенсивной пластической деформации в виде трех циклов радиально-сдвиговой прокатки приводит к существенному измельчению зерен в обеих моделях. Однако за счет различной предварительной термической обработки конечные размеры зерен отличаются. После закалки и трех циклов РСП средний размер зерен равен 13-15 мкм, тогда как после отжига и трех циклов РСП средний размер зерен равен 20-22 мкм.

Таким образом, в ходе компьютерного моделирования было выявлено, что наиболее оптимальным режимом предварительной термической обработки медного сплава М1 с точки зрения интенсивности измельчения зерна является закалка, поскольку ее реализация позволяет получить более мелкий размер зерен как после стадии предварительной термической обработки, так и после проведения радиально-сдвиговой прокатки. Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (Грант № AP14869128).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hu J., Kulagin R., Ivanisenko Y., Baretzky B., Zhang H. Finite element modeling of Conform-HPTE process for a continuous severe plastic deformation path. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020. Vol. 55. P. 373-380.
2. Latypov M. I., Alexandrov I. V., Beygelzimer Y. E., Lee S., Kim H. S. Finite element analysis of plastic deformation in twist extrusion. *Computational Materials Science*. 2012. Vol. 60. P. 194-200.
3. Septimio R. D. S., Button S. T. Numerical simulation of multi-directional hot forging for the reduction of forging defects. *Proceedings of the 8th International Conference on Computational Plasticity - Fundamentals and Applications*. Barcelona, 2015. P. 227-237.
4. Naizabekov A., Lezhnev S., Arbuz A., Panin E. Combined process "helical rolling-pressing" and its effect on the microstructure of ferrous and non-ferrous materials. *Metallurgical Research and Technology*. 2018. Vol. 115. Iss. 2. № 213.
5. Lenard J. G., Pietrzyk M., Cser L. *Mathematical and Physical Simulation of the Properties of Hot Rolled Products*. Amsterdam: Elsevier, 2005. 376 p.
6. Galkin S. P. Radial shear rolling as an optimal technology for lean production. *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44. P. 61-64.
7. Naizabekov A., Volokitina I., Lezhnev S., Arbuz A., Panin E., Volokitin A. Structure and Mechanical Properties of AISI1045 in the Helical Rolling-Pressing Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2020. Vol. 29. P. 315-329.



А.С. Раковец, ассист.; Д.В. Куис, доц.;  
Л.З. Писаренко, науч. сотр.;  
Н.А. Свидунович, проф. (БГТУ, г. Минск)

## **ВЛИЯНИЕ ПЕРЕГРЕВА И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЫДЕРЖКИ НА ЭФФЕКТ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СЕРОГО ЧУГУНА**

Эффект модифицирования зависит от совокупности таких технологических и металлургических факторов, как температура жидкого металла, время выдержки модифицированного чугуна перед заливкой в форму, размер фракций модификаторов, степень усвоения добавок и т.д. Изучалось влияние температуры жидкого чугуна на эффект модифицирования. Состав доэвтектического исходного сплава был следующий (в %): С 3,2-3,4; Si 1,8-2; Mn 0,6-0,7; S и P в обычных пределах.

Определяли основные показатели эффективности модифицирования: степень измельчения эвтектического зерна и чувствительности чугуна к отбелу. В интервале температур 1240-1520 °С при добавках 0,2% ферросилиция ФС75, силикокальция СК 20, ферросиликобария ФС60Ба25, алюминия, а также 0,05% редкоземельной лигатуры ФС30РЗМ30.

Чугун выплавляли в индукционной печи ИСТ-016 с кислой футеровкой, перегревали до 1520 °С, после чего индукционную печь отключали и по мере снижения температуры, через каждые 40 °С, производили отбор и заливку проб модифицированного и не модифицированного чугуна. Результаты исследований эффекта модифицирования ферросилицием, силикокальцием, алюминием и редкоземельной лигатурой в интервале температур 1240-1520 °С представлены на рис. (а и б).

Анализ микроструктуры опытных сплавов и полученных зависимостей свидетельствуют о снижении эффекта модифицирования и повышении чувствительности чугуна к отбелу в условиях перегрева жидкого чугуна сверх оптимальных температур. Эта же закономерность характерна и для не модифицированного чугуна, однако выражена значительно слабее. Полученные данные подчеркивают важность температуры, как основного фактора, определяющего эффективность действия модификатора, а в итоге и процесса модифицирования.

Приведенные эксперименты показали, что существует вполне определенный интервал оптимальных температур нагрева чугуна, наибольшая эффективность процесса модифицирования. Повышение

перегрева не модифицированного чугуна, увеличение выдержки в плавильной печи, изменяет его химический состав и жидкое состояние (вязкость, поверхностное натяжение и т.д), способствует дегазированию.

В модификационном чугуне имеется вполне определенная закономерность изменения такого критерия оценки эффекта модифицирования, как степень измельчения зерен: понижение температуры, при которой вводится модификатор, усиливает эффект модифицирования, способствует изменению эвтектических ячеек.

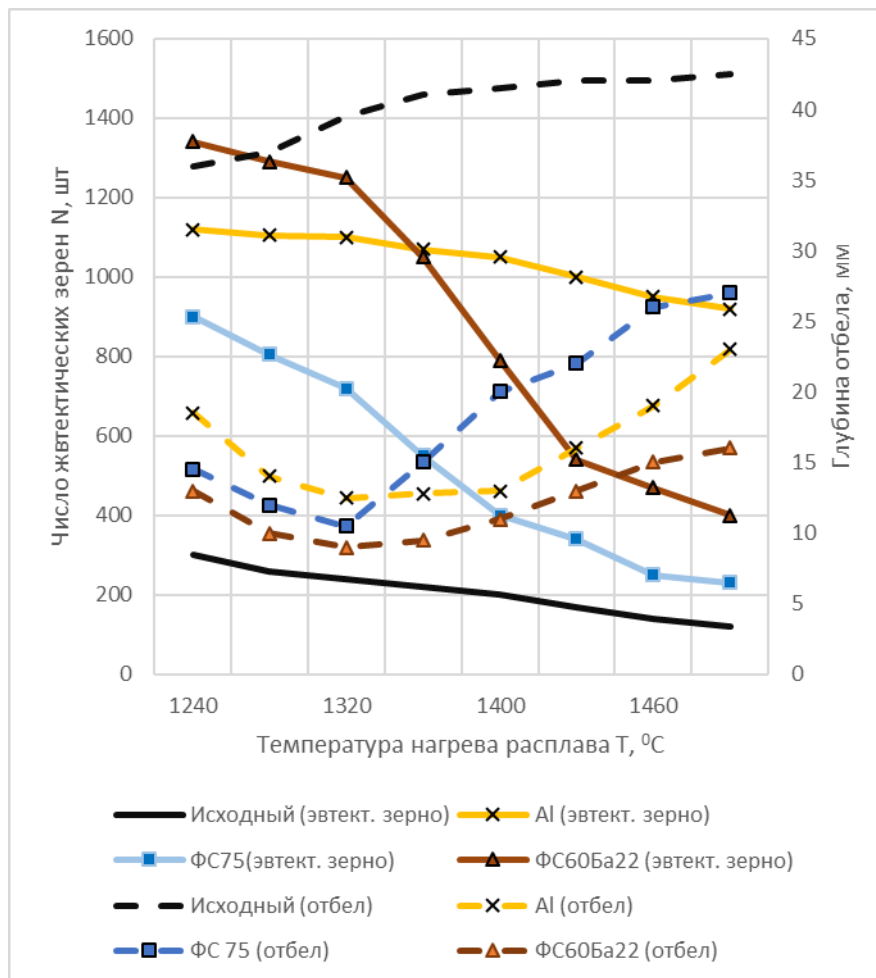


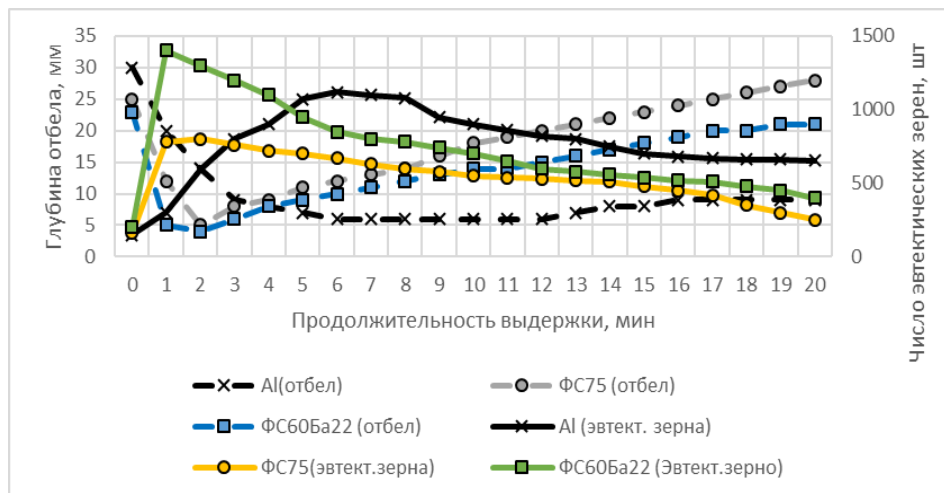
Рисунок 1 – Влияние температуры на эффект модифицирования чугуна

Измельчая эвтектическое зерно, графитизирующие модификаторы ФС75, ФС60Ba22 и алюминий уменьшает отбеливаемость отливок только в интервале температур 1240-1360 °С. При температурах модифицирования выше интервала 1360 °С эффект воздействия добавок ослабевает и степень отбела увеличивается, однако не достигает при этом значения глубины отбела не модифицированного чугуна.

При определении рациональных технологических режимов модифицирования, гарантирующих максимальный эффект обработки и

качества чугуна, важное место занимает вопрос продолжительности эффекта модифицирования, т.е. его «живучесть». Состав чугуна остается прежним. Использовались модификаторы по 0,2 ФС75, ФС60Ба22 и алюминий и 0,05% ФС30Р3М30. Модифицирование чугуна производилось непосредственно в индукционной печи. Температура жидкого чугуна выдерживалась постоянной (1400°С), а через определенные промежутки времени от 10,15,20 минут производили отбор проб для определения отбела и числа эвтектических зерен.

Как видно из рис.2, указанные параметры эффекта модифицирования имеют тенденцию непрерывного уменьшения по мере увеличения продолжительности выдержки чугуна, начиная с момента обработки его графитизирующими добавками. Достаточно высокая эффективность отмечается в 5 минут выдержки. Интересным является поведение алюминия, когда воздействие его в течении первых 5-7 минут резко возрастает, а затем несколько убывает, являясь значительным даже после 20 минут выдержки. Наиболее чувствительные к изменению эффекта модифицирования по сравнению с исходным чугуном является ферросилиций, затем ферросиликобарий ФС60Ба22, затем следует ФС30Р3М30.



**Рисинок 2 – Влияние продолжительности выдержки чугуна на основные параметры эффекта модифицирования**

После 20-25 минут выдержки качественные характеристики чугуна, модифицированные указанными добавками, приближаются к показателям исходного не модифицированного чугуна. Особое положение занимает алюминий, что особенно заметно на статичности полученных результатов по уменьшению отбела. Они практически мало изменяются и остаются весьма низкими по отношению к исходному чугуну в интервалах исследованных выдержек.

А.С. Раковец, ассист.; Д.В. Куис, доц.;  
Л.З. Писаренко, науч. сотр.; Н.А. Свидуневич, проф.;  
О.Ю. Цынкович, инж. (БГТУ, г. Минск)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ И ЛЕГИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЧУГУНА**

Одним из важных факторов воздействия на процессы структурообразования и свойства чугуна является его легирование. Степень воздействия легирующих элементов на улучшение свойств чугуна определяется их способностью упрочнять феррит, образовывать карбиды, повышать дисперсность перлита, влиять температуру кристаллизации по стабильной и метастабильной системе, уменьшить или увеличить переохлаждение при эвтектическом переохлаждении чугуна.

Так, по сравнению с исходным чугуном, легирование медью, никелем, кобальтом и оловом способствует перлитизации чугуна и не оказывают существенного влияния на характер распределение, количество и размеры графитных включений.

Добавки в чугун хрома, ванадия, молибдена, вольфрама, марганца и сурьмы способствуют измельчению графитных включений.

При небольших добавках эти элементы не оказывают существенного влияния на величину эвтектического зерна. Заметное уменьшение их наблюдается при больших добавках, когда чугун становится склонным к значительному переохлаждению и в его структуре появляются свободные карбиды.

Плавление карбидной эвтектики в структуре при определенных концентрациях карбидообразующих элементов ограничивает допустимую величину их присадки в чугун.

Исследовали влияние малых добавок легирующих элементов – хрома, марганца, сурьмы и висмута, которые присаживались в расплав чугуна в виде технически чистых металлов и ферросплавов, в количествах до 0,5% хрома и марганца. Добавки сурьмы составили – 0,02 %, 0,05 %, 0,1-0,2 %; висмута – 0,002-0,02 %, 0,05-0,1 %. Эти добавки оказывают различные воздействия на температуру эвтектического и эвтектоидного превращения при кристаллизации чугуна. Сурьма, висмут, теллур и др. являются поверхностно-активными элементами, которые согласно П.А. Ребиндеру являются модификаторами I рода, которые препятствуют росту кристаллических фаз и усиливают переохлаждение расплавов при затвердевании отливок.

В наших экспериментах, поставленных в одинаковых условиях, подтверждено, что добавки хрома, марганца, сурьмы и висмута способствуют измельчению графитных включений. Эти элементы при небольших добавках, не оказывают существенного влияния на величину эвтектического зерна, а заметное уменьшение числа зерен наблюдается при больших добавках, когда чугун склонен к значительному переохлаждению и в его структуре появляются свободные карбиды. Появление карбидной эвтектики в структуре при определенной концентрации карбидообразующих элементов ограничивает допустимую величину их присадки в чугун.

Выделение структурно свободных карбидов наблюдается при введении в чугун 0,5% хрома, марганец является более слабым карбидообразующим элементом и в пределах исследованных концентраций не было обнаружено его влияния на стабилизацию цементита.

Сурьма сильно стабилизирует перлит и обеспечивает полностью перлитную структуру при добавке 0,05% и в тоже время увеличивает склонность чугуна к отбелу. Так при добавке 0,1% сурьмы отбел увеличивается в 1,2 раза, а при 0,2 % – в 1,4 раза.

Добавки в чугун висмута даже при минимальных количествах 0,01-0,05% обеспечивает выделение карбидной эвтектики по границам эвтектических зерен. Висмут в чистом виде не применим для обработки серого чугуна, ввиду его сильной карбидообразующей способности при очень малых добавках. Поэтому дальнейшая работа с висмутом будет продолжена при добавках висмут-молибденового концентрата совместно с графитизирующими модификаторами.

Отличительной особенностью сурьмы и висмута является то, что они резко тормозят графитизацию в период эвтектоидного превращения, что, по-видимому, связано с замедлением диффузии углерода в твердом растворе. Легирующие элементы при добавках в жидкий чугун вносят существенные изменения в дендритообразовании первичной структуры. В чугуне доэвтектического состава без добавок легирующих элементов преобладают развитые столбчатые слабоответвленные кристаллы первичного аустенита, экзогенного типа.

Однако особое место среди легирующих элементов занимает добавка сурьмы. Ее добавка в расплав чугуна полностью исключает экзогенный характер распределения дендритов аустенита, они полностью приобретают эндогенный характер, характеризуются отдельными мелкими округлыми изолированными включениями, которые не переплетаются между собой и не образуют своеобразный каркас, заполненный графитной эвтектикой, как это имеет место при добавках хрома.

Научное издание

## **ЛЕСНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ДИЗАЙН**

**Материалы докладов 87-й научно-технической  
конференции профессорско-преподавательского  
состава, научных сотрудников и аспирантов  
(с международным участием)**

**Электронный ресурс**

В авторской редакции

Компьютерная верстка:

*М.Т. Насковец, И.Г. Федосенко, А.С. Раковец,  
С.В. Бушева, Е.О. Черник*

Усл. печ. л. 17,73. Уч.-изд. л. 18,48.

Издатель и полиграфическое исполнение:

УО «Белорусский государственный технологический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий

№ 1/227 от 20.03.2014

Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.