

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2020 Том 10 № 1 (37)

- *Влияние лесных полос на показатель водопотребления ярового ячменя*
- *Испытания огнетушащей способности гидрогеля алюминия при тушении модельных природных низовых пожаров*
- *Роль копытных в восстановлении хвойных насаждений*
- *Фитомасса подлеска в производных лиственных насаждениях Средней тайги*



ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал
2020 г. Том 10 № 1 (37)

Учредитель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ)

Председатель редакционной коллегии
д.т.н., проф. М.В. Драпалюк

Главный редактор
д.т.н., проф. И.М. Бартенев

Состав редакционной коллегии
д.б.н., проф. А.А. Сирин (Россия)
д.т.н., проф. Д.Н. Афоничев (Россия)
д.т.н., проф. Л.И. Бельчинская (Россия)
д.ф.-м.н., проф. Н.Н. Матвеев (Россия)
д.б.н., проф. С.М. Матвеев (Россия)
д.б.н., доц. А.А. Гусев (Россия)
д.э.н., проф. С.С. Морковина (Россия)
д.э.н., проф. Н.И. Кожухов (Россия)
д-р философии И. Ремеш (Чехия)
д.т.н., проф. А.М. Цыпук (Россия)
д.с.-х.н., проф. А.И. Чернодубов (Россия)
д.т.н., проф. О.Н. Бурмистрова (Россия)
д.т.н., проф. И.В. Григорьев (Россия)
д.с.-х.н., проф. К.Н. Кулик (Россия)
д.с.-х.н., проф. А.С. Манаенков (Россия)
д.с.-х.н., проф. А.А. Мартынюк (Россия)
д.б.н., проф. В.В. Рубцов (Россия)
д.т.н., проф. В.С. Сютёв (Россия)
д.б.н., проф. Н.Н. Харченко (Россия)
д.т.н., проф. П.А. Бехта (Украина)
проф. Чжоу Динго (Китай)
д.х.н., проф. А. Маркомини (Италия)
к.т.н., проф. В. Подразски (Чехия)
д-р наук, проф. Ф. Ресснер (Германия)
д.т.н., проф. Я. Седлячик (Словакия)
д-р химии Е.А. Чиркова (Латвия)

Ответственный секретарь
к.э.н., доц. С.В. Харин

Редактор
к.ф.н. Е.А. Богданова
Компьютерная верстка
к.э.н., доц. С.В. Харин
к.т.н. С.В. Малюков

Журнал зарегистрирован
Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных тех-
нологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-66384 от 14.07.2016 г.

Материалы настоящего журнала
могут быть воспроизведены только
с письменного разрешения редакцион-
ной коллегии

РИО ФГБОУ ВО «ВГЛТУ»
394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8,
телефон (473) 253-72-90,
факс (473) 253-76-51,
e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2020

LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL

Scientific Journal

2020 Vol. 10 № 1 (37)

Founder – Federal State Budget Educational Institution of High Education
«Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov» (VSUFT)

Editorial Board Head

Dr., prof. M.V. Drapalyuk

Chief Editor

Dr., prof. I.M. Bartenev

Members of editorial board

Dr., prof. A.A. Sirin (Russia)
Dr., prof. D.N. Afonichev (Russia)
Dr., prof. L.I. Belchinskaya (Russia)
Dr., prof. N.N. Matveev (Russia)
Dr., prof. S.M. Matveev (Russia)
Dr., Assoc. Prof. A.A. Gusev (Russia)
Dr., prof. S.S. Morkovina (Russia)
Dr., prof. N.I. Kozhukhov (Russia)
Dr. Philosophy J. Remes (Czech Republic)
Dr., prof. A.M. Tsybuk (Russia)
Dr., prof. A.I. Chernodubov (Russia)
Dr., prof. O.N. Burmistrova (Russia)
Dr., prof. I.V. Grigoriev (Russia)
Dr., prof. K.N. Kulik (Russia)
Dr., prof. A.S. Manaenkov (Russia)
Dr., prof. A.A. Martynyuk (Russia)
Dr., prof. V.V. Rubtsov (Russia)
Dr., prof. V.S. Syunev (Russia)
Dr., prof. N.N. Kharchenko (Russia)
Dr., prof. P.A. Bekhta (Ukraine)
prof. Zhou Dingguo (China)
Dr., prof. A. Marcomini (Italy)
CSc., prof. V. Podrazsky (Czech Republic)
Dr., prof. F. Roessner (Germany)
Ph.D., prof. J. Sedliacik (Slovakia)
Dr. Chemistry J.A. Chirkova (Latvia)

Executive secretary

PhD in Economics S.V. Kharin

Editor

PhD in Philology E.A. Bogdanova

Typesetting

PhD in Economics S.V. Kharin

PhD in Engineering S.V. Malyukov

The journal is registered by
the Federal Service for Supervision
of Communications, Information Tech-
nology and Communications.

Registration certificate

PI № FS77-66384 of 14.07.2016

Materials of this journal may be re-
produced only with written permission of
the editorial board

PS FSBEI HE «VSUFT»

394087, Voronezh, Timiryazeva str, 8,

telephone (473) 253-72-90,

fax (473) 253-76-51,

e-mail: lesteh@vglta.vrn.ru

© FSBEI HE «VSUFT», 2020

СОДЕРЖАНИЕ
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Брындина Л.В. Биостимулятор из отходов кератинсодержащего сырья.....	6
Грибачева О.В., Чернодубов А.И., Сотников Д.В. Динамика рангового распределения деревьев по высоте в пологозащитной полосе с участием дуба черешчатого (<i>Quercus robur</i> L.) и клёна остролистного (<i>Acer platanoides</i> L.).....	15
Дебков Н.М. Выделение репрезентативных участков лесных экосистем в рамках FSC сертификации.....	26
Ивченко О.А., Панкин К.Е. Испытания огнетушащей способности гидрогеля алюминия при тушении модельных природных низовых пожаров.....	38
Пирцхалава-Карпова Н.Р., Карпов А.А., Грищенко М.Ю., Козловский Е.Е. Исследование участков леса подверженных влиянию короеда-типографа (<i>Ips typographus</i>) в заповеднике «Курильский» (о. Кунашир)...	50
Пристова Т.А. Фитомасса подлеска в производных лиственных насаждениях Средней тайги.....	60
Рулева О.В., Семинченко Е.В. Влияние лесных полос на показатель водопотребления ярового ячменя.....	69
Царалунга В.В., Царалунга А.В., Долгих К.К. Роль копытных в восстановлении хвойных насаждений.....	76

ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

Абузов А.В., Григорьев И.В. Конструктивные особенности канатных лесотранспортных систем на мягких пневматических опорах.....	86
Абузов А.В., Куницкая О.А. Определение массы грузозахватного срезающего механизма для аэростатной системы трелевки.....	96

ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКА. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Кантиева Е.В., Пономаренко Л.В., Послухаев М.А., Чернышев А.Н. Натурное исследование прочности склеивания массивной древесины современными клеями при эксплуатации в различных условиях.....	105
---	-----

CONTENTS
NATURE MANAGEMENT

Bryndina L.V. Biostimulator made of waste of keratin-containing raw materials.....	6
Gribacheva O.V., Chernodubov A.I., Sotnikov D.V. Dynamics of height range distribution of trees in the forest shelter belt with participation of English oak (<i>Quercus robur</i> L.) and Norway maple (<i>Acer platanoides</i> L.).....	15
Debkov N.M. Allocation of representative sites of forest ecosystems within FSC certification....	26
Ivchenko O.A., Pankin K.E. Tests of fire extinguishing ability of aluminum hydrogel when extinguishing model natural ground fires.....	38
Pirtskhalava-Karpova N.R., Karpov A.A., Grishchenko M.Yu., Kozlovsky E.E. Research of forest sites affected by the influence of eight-dentated bark beetle (<i>Ips typographus</i>) in the Kurilskiy reserve (Kunashir island).....	50
Pristova T.A. Undergrowth phytomass in the secondary deciduous stands of the Middle taiga.....	60
Ruleva O.V., Seminchenko E.V. Influence of forest shelter belts on the water consumption indicator of spring barley.....	69
Tsaralunga V.V., Tsaralunga A.V., Dolgikh K.K. Role of ungulates in the restoration of coniferous plantations.....	76

FORESTRY ENGINEERING

Abuzov A.V., Grigoriev I.V. Design features of cable forestry systems on soft pneumatic supports.....	86
Abuzov A.V., Kunitskaya O.A. Determining the weight of load-gripping cutting mechanism for balloon skidding system.....	96

WOOD-PROCESSING.

ENGINEERING CHEMISTRY

Kantieva E.V., Ponomarenko L.V., Posluhaev M.A., Chernyshev A.N. Full-scale study of the strength of solid wood bonding with modern adhesives during operation in different conditions.....	105
--	-----

Сергеев А.Г. Результаты исследований рабочего процесса гранулятора ООО «Доза-Агро» в составе линий производства топливных пеллет.....	116
Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Котиков С.А. Повышение прочностных показателей фанеры ФСФ путем использования модифицирующих добавок к связующему.....	124
Федотов А.А., Вахнина Т.Н., Титунин А.А., Свиридов А.В. Исследование влияния стабилизаторов на свойства карбамидоформальдегидного связующего и фанеры ФК.....	136
Шакирова О.И. Ползучесть и обратная ползучесть натуральной и пластифицированной древесины березы при прессовании поперек волокон.....	145

ТЕХНОЛОГИИ. МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Бартенев И.М., Бухтояров Л.Д., Попиков В.П., Придворова А.В. Имитационная модель обрезчика ветвей В САПР.....	153
Бартенев И.М., Драпалюк М.В., Ушаков Н.О., Новиков А.И. К вопросу механизации высева дражированных лесных семян.....	161
Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Мануковский А.Ю., Рудов С.Е., Востриков Д.С. Основа математических моделей взаимодействия колесных движителей лесных машин с поверхностями движения.....	173
Гнусов М.А., Драпалюк М.В., Попиков П.И., Шерстюков Н.А. Моделирование рабочего процесса вырезных сферических дисков с гидроприводом лесопожарной грунтометательной машины.....	185
Зеликов В.А., Тихомиров П.В., Никитин В.В., Скряпников А.А., Самцов В.В., Бурдаков М.А. Оценка природных условий и хозяйственной деятельности человека в районе предполагаемого строительства лесовозной автомобильной дороги.....	193
Казаков И.В. Влияние режимов работы выкопной машины на качество выкопки посадочного материала.....	203

Sergeev A.G. Research results of Dosa-Agro granulator working process in the production lines of fuel pellets.....	116
Fedotov A.A., Vakhnina T.N., Kotikov S.A. Improving strength indicators of FSF plywood by using modifying additives to binding agent....	124
Fedotov A.A., Vakhnina T.N., Titunin A.A., Sviridov A.V. Study of the influence of stabilizers on the properties of carbamide formaldehyde binder and FC plywood.....	136
Shakirova O.I. Creep and reverse creep of natural and plasticized birch wood when pressing across the fibers.....	145

TECHNOLOGIES. MACHINERY AND EQUIPMENT

Bartenev I.M., Bukhtoyarov L.D., Popikov V.P., Pridvorova A.V. CAD simulator model of a cutter.....	153
Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Ushakov N.O., Novikov A.I. Sowing mechanization of dressed forest seeds.....	161
Burmistrova O.N., Teterlevleva E.V., Grigoryev I.V., Kunitskaya O.A., Manukovsky A.Yu., Rudov S.E., Vostrikov D.S. Basis of mathematical interaction models of wheel propellers of forestry machines with sliding surfaces.....	173
Gnusev M.A., Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Sherstyukov N.A. Modeling the work flow of cut-out spherical disks with hydraulic drive for fire-fighting soil-thrower.....	185
Zelikov V.A., Tikhomirov P.V., Nikitin V.V., Skrypnikov A.A., Samtsov V.V., Burdakov M.A. Evaluation of human natural conditions and economic activities in the area of proposed construction of a truck haul road.....	193
Kazakov I.V. The influence of plant lifter operating modes on the digging quality of planting material.....	203

Попиков П.И., Попиков В.П., Шаров А.В., Петков А.Ф., Поздняков А.К. Влияние режимов работы лесопожарной грунтометательной машины с гидроприводом на показатели эффективности.....	209	Popikov P.I., Popikov V.P., Sharov A.V., Petkov A.F., Pozdnyakov A.K. Influence of operating modes of forest fire soil-throwing machine with hydraulic drive on efficiency indicators.....	209
Посметьев В.И., Драпалюк М.В., Никонов В.О., Посметьев В.В., Авдюхин А.В. Оценка эффективности гидропневматической подвески лесовозного автомобиля по результатам имитационного моделирования.....	218	Posmetyev V.I., Drapalyuk M.V., Nikonov V.O., Posmetyev V.V., Avdyukhin A.V. Efficiency estimation of hydro-pneumatic suspension of a timber truck according to the results of simulation modelling.....	218
Посметьев В.И., Никонов В.О., Посметьев В.В., Зеликов В.А. Результаты компьютерного моделирования функционирования пневматической подсистемы рекуперативного гидропривода лесовозного тягача с полуприцепом.....	233	Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Posmetyev V.V., Zelikov V.A. Computer simulation results of functioning of the pneumatic subsystem of recoverable hydraulic drive of a forest truck with a semi-trailer.....	233
Прядкин В.И., Бартенев И.М., Посметьев В.В. Оценка устойчивости и экологичности роботизированного корчевателя, оборудованного широкопрофильными шинами.....	244	Pryadkin V.I., Bartenev I.M., Posmetyev V.V. Evaluation of sustainability and ecological properties of a robotized stump remover equipped with wide-section tyres.....	244
Толстых А.А., Ступников Д.С., Малуков С.В., Лукьянов А.С., Лунев Ю.С. Применение метода обучения с подкреплением в роботизированных и автоматизированных системах лесной промышленности.....	256	Tolstikh A.A., Stupnikov D.S., Malyukov S.V., Lukyanov A.S., Lunev Yu.S. Application of learning reinforcement method in robotized and automated forestry systems.....	256

БИОСТИМУЛЯТОР ИЗ ОТХОДОВ КЕРАТИНСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

доктор сельскохозяйственных наук, профессор **Л.В. Брындина**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

Деградация экосистем заставляет внедрять высокопродуктивные, экологичные биотехнологии в сельскохозяйственном производстве. В связи с этим возрастает интерес к органическому земледелию. Спрос на органические продукты опережает предложение. Это, в свою очередь, вызывает интерес к веществам, которые, с одной стороны, безопасны для окружающей среды, а с другой стороны – повышают урожайность и качество сельскохозяйственных культур. К таким веществам можно отнести биостимуляторы. Они стимулируют естественные процессы усвоения питательных веществ, повышают стрессоустойчивость растений. В связи с этим особого внимания заслуживает кератинсодержащее сырье, которое по химическому составу представляет собой концентрат белка (90-95 %). Но из-за низкой функциональности белка кератина этого сырья его применение ограничено. Ферментативный гидролиз кератина позволит получить биостимулятор для растений с высоким содержанием аминокислот. Целью исследования было разработать ферментативный способ гидролиза кератина с высоким содержанием аминокислот в конечном продукте. Ферментацию проводили протеиназой *Str. chromogenes* g. 0832. Содержание растворимого белка, пептидов и аминокислот проводили фотоколориметрически. Определены температурные (40 °C) и pH (8,0) – условия работы ферментного комплекса *Str. chromogenes* g. 0832, которые позволили в дальнейшем провести гидролиз кератинсодержащего сырья с максимальным выходом конечных продуктов – аминокислот (99,57 г/100 г). Обработка семян кукурузы полученным раствором аминокислот позволила увеличить ростостимулирующую активность на 48 %.

Ключевые слова: биостимуляторы, кератинсодержащее сырье, ферментативный гидролиз, органические отходы, аминокислоты

BIOSTIMULATOR MADE OF WASTE OF KERATIN-CONTAINING RAW MATERIALS

DSc (Argiculture), Professor **L.V. Bryndina**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

Ecosystem degradation forces us to introduce highly productive, environmentally friendly biotechnologies in agricultural production. In this regard, interest in organic farming is growing. Demand for organic products is ahead of supply. This, in its turn, causes interest in substances that, on the one hand, are safe for the environment, and on the other hand, increase yield and quality of crops. These substances include biostimulants. They stimulate the natural processes of assimilation of nutrients, increase stress resistance of plants. In this regard, keratin-containing raw materials deserve special attention, which, in terms of chemical composition, is a protein concentrate (90-95 %). But its use is limited due to the low functionality of the keratin protein of this raw material. Enzymatic keratin hydrolysis will provide a biostimulant for plants with a high content of amino acids. The aim of the study was to develop an enzymatic method for keratin hydrolysis with a high content of amino acids in the final product. Fermentation was carried out by *Str. chromogenes* g. 0832 proteinase. The content of soluble protein, peptides and amino acids was carried out photocolorimetrically. Temperature (40 °C) and pH (8.0) conditions of *Str. chromogenes* g. 0832 enzyme complex have been determined, which allowed further hydrolysis of keratin-containing raw materials with a maximum yield of final products - amino acids (99.57 g/100 g). Treatment of corn seeds with the obtained amino acid solution enabled to increase growth-promoting activity by 48 %.

Keywords: biostimulants, keratin-containing raw materials, enzymatic hydrolysis, organic waste, amino acids

Введение

В настоящее время критерием для использования любого производства, любой технологии является защита окружающей среды от загрязнения промышленными, сельскохозяйственными и другими отходами.

Перспективным направлением в последнее время является использование биостимуляторов для выращивания сельскохозяйственной продукции. Они способны значительно сократить время созревания продукции, повысить их качество за счет ускорения процессов поглощения питательных веществ. При этом являются экологически безопасными стимуляторами, так как имеют природное происхождение.

В связи с этим особого внимания заслуживает кератинсодержащее сырье (источник животного белка кератина). Птицеперерабатывающая отрасль активно развивается. Ежегодные объемы производства птицы увеличиваются в среднем на 12-15 % [7]. Это ведет к накоплению значительных объемов побочного сырья, в том числе на перо, пух, подкрылок приходится 4,0-5,7 % от общего количества отходов (15,3-28,3 %). Кератинсодержащее сырье по химическому составу представляет собой концентрат белка (90-95 %) с высоким содержанием незаменимых аминокислот [10, 11, 13]. Но из-за низкой функциональности белков этого сырья (нерастворимость в воде, высокая механическая прочность, недоступность к действию пищеварительных ферментов и др.) применение этого белка ограничено. Это свойство кератина объясняется наличием большого числа поперечных дисульфидных связей между полипептидными цепями [8, 9]. При разрыве этих связей кератин теряет свою устойчивость. Трудности заключаются в том, чтобы перевести этот белок в растворимое состояние, сохраняя при этом все аминокислоты данного белка. В этом случае наиболее приемлемы биотехнологические способы с использованием специфических ферментов, разрушающих компактную структуру кератиновой молекулы до усвояемых компонентов. Решение проблемы позволит получить биостимулятор для растений с высоким содержанием аминокислот.

Исходя из вышеизложенного, целью наших исследований было разработать биотехнологический способ переработки кератиновых отходов птицеперерабатывающей промышленности в ценный белковый продукт, который можно применять в качестве биостимулятора.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали перьевые отходы. Ферментным препаратом служила протеиназа *Str. chromogenes* g. 0832 [2]. Все опыты проводили с измельченным пером при гидромодуле 1:20. Ферментативный гидролиз проводили в оптимальных для действия фермента условиях (концентрация препарата – 3 ед/г белка). Предварительную обработку кератина проводили тетраборатом натрия в концентрации 0,5 % массовых, при давлении 0,20 МПа, продолжительность обработки – 2 ч. Степень гидролиза определяли как отношение аминного азота к общему. Общий азот определяли по методу Кьельдаля, аминный азот определяли спектрофотометрически с использованием 2,4,6-тринитробензолсульфоновой кислоты. Аминокислотный анализ проводили на аминокислотном анализаторе ААА 399М (Чехия). Протеолитическую активность определяли по ГОСТ 20264.2-88. Содержание растворимого белка, пептидов и аминокислот проводили фотоколориметрически. Предварительно каждую фракцию отделяли. 20 дм³ гидролизата обрабатывали трихлоруксусной кислотой для осаждения непрогидролизованых белков, полученный фильтрат использовали для определения пептидов и аминокислот. Пептиды определяли по биуретовой реакции, аминокислоты – по нингидриновой реакции. В таблицах и рисунках показаны данные, где каждое значение есть среднее из трех определений. При математической обработке результатов использовали критерий Стьюдента. Достоверными считали различия с уровнем значимости $q = 5 \%$.

Результаты и обсуждение

Общеизвестно, что дисульфидные связи молекулы кератина выполняют стабилизирующую функцию. Реакционная способность этих связей значительно зависит от стерических факторов и электростатического влияния соседних полярных групп [1, 5]. Для снижения устойчивости простран-

ственной структуры белковой молекулы необходима предварительная подготовка белка к ферментации. Для этих целей использовали тетраборат натрия, который способствует увеличению выхода растворимых продуктов гидролиза при последующей ферментации. Деструкция кератина кислотами, щелочами, другими реагентами менее предпочтительна, так как ведет к разрушению отдельных аминокислот, превращению некоторых из них из биологически активной L-формы в неактивную D-форму. Растения усваивают α -аминокислоты (протеиногенные) оптически активной L-конфигурации. Последние легко включаются в метаболические процессы клеток растений [3].

Известно, что на эффективность ферментации влияют стабильность фермента и условия протекания реакции [4]. Определение температурного и pH оптимума действия фермента позволит повысить скорость процесса гидролиза.

Оптимальной для действия фермента *Streptomyces chromogenes* g. 0832 оказалась температура 40 °С. Протеолитическая активность в этих условиях была максимальной и составила 233 ед/мг белка. При увеличении температуры до 50 °С сохраняется до 95 % активности фермента. Дальнейшее повышение температуры до 60 и 70 °С сопровождается резким падением активности до 37 и 30 % соответственно (рис. 1). Происходит термическая инактивация фермента, сопровождаемая денатурацией белковой молекулы. Снижение температуры до 30 °С сопровождалось, так же как и в случае с температурой 50 °С, незначительной потерей активности и составило 6 % от исходного уровня. При 20 °С потеря протеолитической активности составила уже 44 % от максимальной (рис. 1). Это явление объясняется изменением активного центра фермента из-за уменьшения плотности воды [4]. Следует отметить, что продолжительность воздействия температуры на ферментный комплекс также играет большую роль на скорость протекания ферментализации.

Термостабильность фермента определяли при значении pH 8,0 (рис. 2) и температурах 30-60 °С. Результаты эксперимента показали, что фермент стабилен на протяжении 4 часов при температурах 30 и 40 °С. При температурах 50-

60 °С остаточная активность уже через 2 ч инкубации снизилась на 45 и 60 % соответственно. Результаты наших исследований также подтверждают общую прямую зависимость между скоростью инактивации фермента и степенью денатурации белка. Еще раз доказывая, что влияние температуры на скорость ферментативной реакции подчиняется уравнению Аррениуса [4].

Исследование зависимости активности фермента от величины pH проводили при температуре 40 °С в диапазоне 5,0-11,0.

Из данных рис. 3 видно, что протеиназа из *Str. chromogenes* g. 0832 активна в диапазоне pH 7,0-9,0. pH-оптимум соответствовал 8,0. Это подтверждает литературные данные, согласно которым кератинрасщепляющие протеиназы имеют оптимум pH в щелочной области от 7,0 до 12,0 [12].

При сдвиге pH как в кислую, так и в щелочную сторону ферментативная активность резко падает. Возможно, конформационные изменения, происходящие в активном центре из-за изменения заряда молекулы фермента, приводят к потере его активности.

Кроме pH-оптимума, большое значение для протекания ферментативной реакции имеет pH-стабильность. Это тот диапазон pH, при котором фермент сохраняет свою активность в течение определенного периода времени.

Исследование pH-стабильности (рис. 4), показало, что препарат стабилен в диапазоне pH 8,0-9,0. После 12 ч инкубации при температуре 40 °С потеря активности составила при pH 9,0 – 10 %, при pH 8,0 – 5 %. Инактивация фермента наблюдалась при более кислых (pH 6,0) и щелочных значениях pH (pH 10,0).

Определенные температурные и pH-условия работы ферментного комплекса *Str. chromogenes* g. 0832 позволили в дальнейшем провести гидролиз кератинсодержащего сырья с максимальным выходом конечных продуктов – аминокислот.

Гидролиз белка кератина ферментным препаратом из *Str. chromogenes* g. 0832 изучали в течение 6 часов. Результаты эксперимента, представленные на рис. 5, показали, что интенсивное расщепление кератинсодержащего сырья ферментным препаратом *Str. chromogenes*.

g. 0832 происходит за первый час и достигает к 4-6 часам наибольшего значения 90-92 %. Динамика накопления продуктов гидролиза, представленная в таблице, показывает, что ферментный комплекс *Streptomyces chromogenes. g. 0832* проявляет высокую специфичность к белку кератину. В основном конечными продуктами гидролиза кератина являются аминокислоты, и уже через 1 ч после ферментации их содержание составило 82,2 %.

Ферментативный гидролиз препаратом *Streptomyces chromogenes. g. 0832* позволил получить продукт с высокой биологической ценностью. Аминокислотный состав гидролизата показывает, что он содержит все аминокислоты (рис. 6). Особенно много в гидролизате было обнаружено глутаминовой кислоты и пролина. Общее количество аминокислот составило 99,57 г/100 г, сумма незаменимых аминокислот составила 42,66 г/100 г. Сумма серосодержащих аминокислот – 3,72 г/100 г.

Большинством ученых доказаны иммуномодулирующие, антистрессовые и регуляторные свойства аминокислот [6]. В связи с этим нами были проведены исследования по влиянию полученного комплекса аминокислот и пептидов из кератина пера на ростостимулирующую активность растений.

Семена кукурузы непосредственно перед высевом в грунт обрабатывали соответствующими растворами в концентрации 0,1 мл/л воды и выдерживали 0,5 часа. Контролем служили необработанные семена. По представленным на рис. 7 результатам видно, что обработка препаратами на начальных этапах вегетации положительно сказывается на дальнейших этапах роста. Сравнение ростостимулирующей активности предлагаемого биостимулятора с известным препаратом Рибав-Экстра показало, что эффективность полученного препарата выше существующего аналога на 23 % и на 48 % – в сравнении с контролем.

Заключение

Проведенные исследования показали эффективность переработки кератиновых отходов птицеперерабатывающей промышленности в высокоэффективный биостимулятор роста растений. Высокое содержание свободных аминокислот в конечном продукте влияет на повышение урожайности сельскохозяйственных культур. Экологическая безопасность этих препаратов позволит использовать их при выращивании экологически чистых растений.

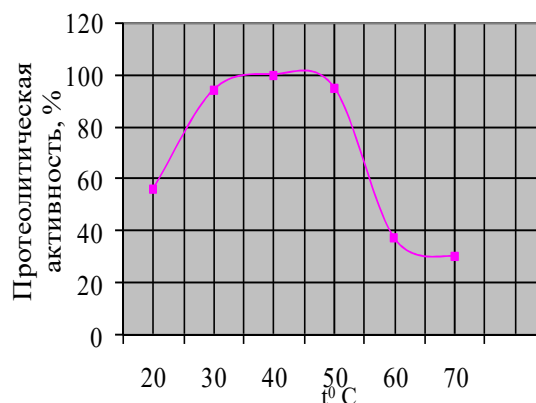


Рис. 1. Зависимость протеолитической активности *Str. chromogenes. g. 0832* от температуры (собственные экспериментальные данные и вычисления автора)

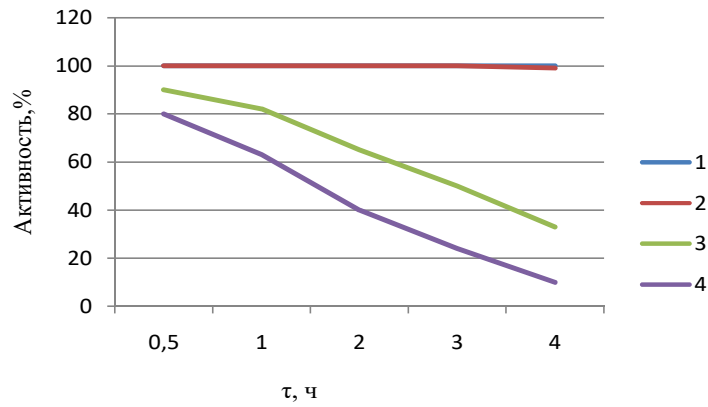


Рис. 2. Влияние температуры на стабильность фермента *Str. chromogenes*. g. 0832:
1 – 30 °С, 2 – 40 °С, 3 – 50 °С, 4 – 60 °С
(собственные экспериментальные данные и вычисления автора)

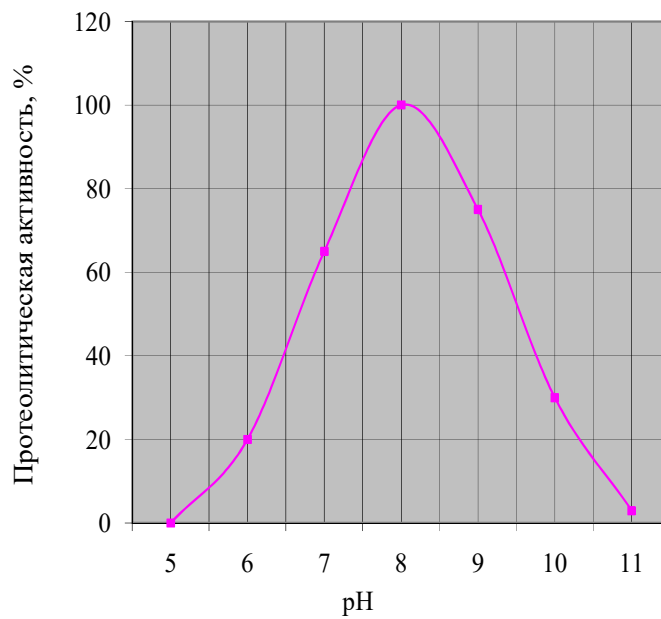


Рис. 3. Зависимость протеолитической активности *Str. chromogenes*. g. 0832 от pH
(собственные экспериментальные данные и вычисления автора)

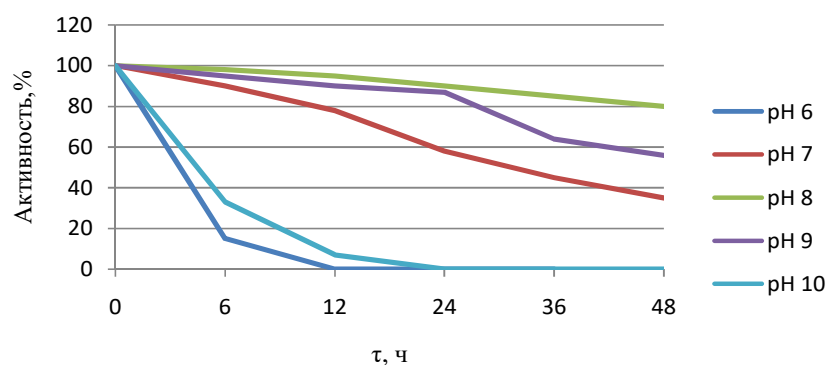


Рис. 4. Влияние величины pH на стабильность фермента *Str. chromogenes. g. 0832* (собственные экспериментальные данные и вычисления автора)

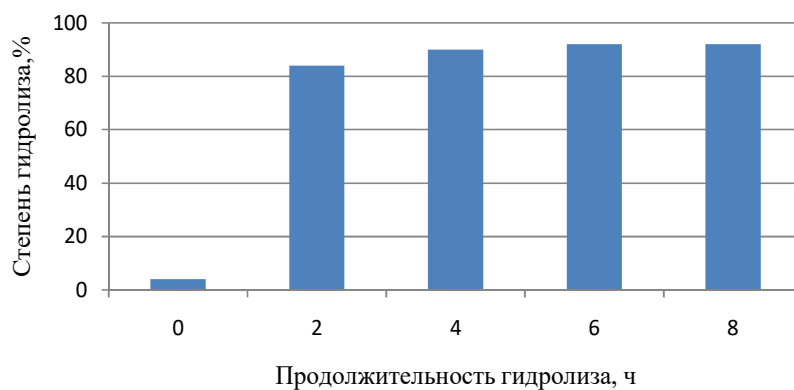


Рис. 5. Влияние продолжительности ферментативного гидролиза на степень гидролиза пера (собственные экспериментальные данные и вычисления автора)

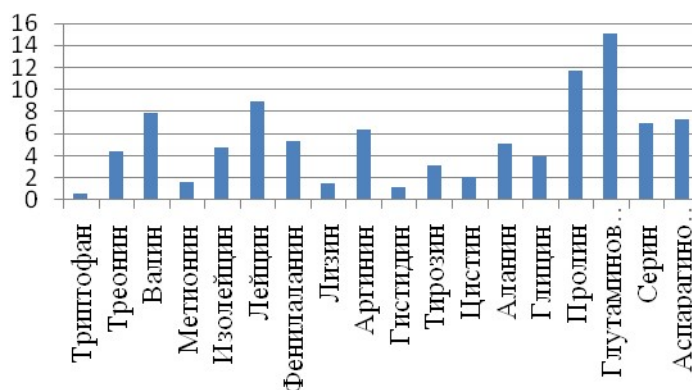


Рис. 6. Аминокислотный состав гидролизата из кератина пера (собственные экспериментальные данные и вычисления автора)

Динамика накопления продуктов ферментативного гидролиза белка кератина

Показатель	Содержание, % в 100 дм ³		
	растворимый белок	пептиды	аминокислоты
Продолжительность гидролиза, ч			
0	4,2	1,4	0
1	4,5	1,5	82,2
2	4,7	1,8	87,1
3	4,7	2,2	88,4
4	6,1	2,4	88,6
5	5,1	3,2	88,9
6	5,1	3,6	89,0

(собственные экспериментальные данные и вычисления автора)

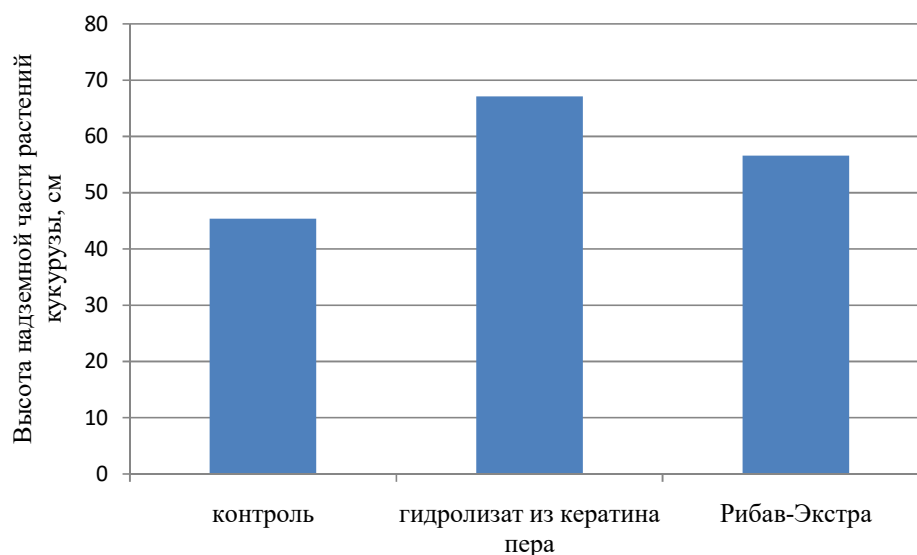


Рис. 7. Стимулирование роста растений замачиванием семян в растворе биостимулятора из кератина пера (собственные экспериментальные данные и вычисления автора)

Библиографический список

1. Бортников, С. В. Получение растворимой модификации кератина из белоксодержащих отходов животноводства / С. В. Бортников, Г. А. Горенкова // *Успехи современного естествознания*. – 2018. – № 4. – С. 17–22. – URL: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36719> (дата обращения: 26.01.2020).
2. Брындына, Л. В. Изучение физико-химических свойств ферментных систем флокулянта *Streptomyces chromogenes*. g. 0832 / Л. В. Брындына // *Экология и промышленность России*. – 2012. – № 11. – С. 48–50.
3. Кретович, Л. В. Биохимия растений / Л. В. Кретович. – Москва : Высшая школа, 1986. – 503 с.
4. Нельсон, Д. Н. Основы биохимии Ленинджера : в 3 т. Т. 1 : Основы биохимии, строение и катализ / Д. Нельсон, М. Кокс ; пер. с англ. – 3-е изд., испр. – Москва : Лаборатория знаний, 2017. – 694 с. : ил. – (Лучший зарубежный учебник). – ISBN 978-5-00101-014-2 (Т. 1); ISBN 978-5-00101-013-5В. – URL: http://binompress.ru/books_1/biology/lenindger_1.pdf (дата обращения 25.01.2020).
5. Смирнова, И. Р. Функциональный кератин пера как источник белка и незаменимых аминокислот в кормлении сельскохозяйственной птицы / И. Р. Смирнова, Л. П. Сатюкова, М. И. Шопинская // *Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии*. – 2016. – № 3. – С. 78–83.
6. Усвоение растениями аминокислот // *Агробиология. Информационный некоммерческий ресурс*. – URL: <http://agrohimiya.ru/mikroorganizmy-pochvy/1821-usvoenie-rasteniyami-aminokislot.html> (дата обращения: 26.01.2020).
7. Эффективное использование вторичного сырья, получаемого при переработке птицы / В. Г. Волик, Д. Ю. Исмаилова, О. Н. Ерохина [и др.] // *Птица и птицепродукты*. – 2011. – № 3. – С. 16–19. – URL: <http://www.vniipp.ru/images/statya/0311/s16.pdf> (дата обращения 29.01.2020).
8. Casarin, F. Use of Poultry Byproduct for Production of Keratinolytic Enzymes / F. Casarin, F. Cladera-Olivera, A. Brandelli // *Food and Bioprocess Technology*. – 2008. – Vol. 1. – P. 301–305. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0091-9>.
9. Gupta, R. Microbial keratinases and their prospective applications: an overview / R. Gupta, P. Ramnani // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2006. – V. 170. – P. 21–33. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-005-0239-8>.
10. Kirfel, J. Keratins: a structural scaffold with emerging functions / J. Kirfel, T. M. Magin, J. Reichelt // *Cellular and Molecular Life Sciences CMLS*. – 2003. – Vol. 60. – P. 56–71. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s000180300004>.
11. Körner, A. MALDI MS in Analysis of Keratin Fibre Proteins / A. Körner // *Applications of Mass Spectrometry in Life Safety*. – 2008. – P. 205–212. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8811-7_14.
12. Characterization of a new keratinolytic *Trichoderma atroviride* strain F6 that completely degrades native chicken feather / L. Cao, H. Tan, Y. Liu, X. Xue, S. Zhou // *Letters in Applied Microbiology*. – 2008. – Vol. 46. – P. 389–394. – DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2008.02327.x>.
13. Enzymatic hydrolysis of keratin-containing stock for obtaining protein hydrolysates / N. L. Eremeev, I. V. Nikolaev, I. D. Keruchen'ko [et al.] // *Applied Biochemistry and Microbiology*. – 2009. – Vol. 45. – No. 6. – P. 717–724. – DOI: <https://doi.org/10.1134/S0003683809060131>.

References

1. Bortnikov S. V., Gorenkova G. A. (2018) *Poluchenie rastvorimoy modifikacii keratina iz beloksoderzhashchih othodov zhivotnovodstva*. Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. № 4. P. 17-22. URL: <http://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36719> (date of access: 26.01.2020) (in Russian).
2. Bryndina L. V. (2012) *Izuchenie fiziko-himicheskikh svojstv fermentnykh sistem flokulyanta Streptomyces chromogenes*.g. 0832. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. № 11. P. 48-50 (in Russian).
3. Kretovich L. V. *Biokhimiya rastenij*. Moscow: Vysshaya shkola, 1986. 503 p. (in Russian).

4. Nel'son D. N., Koks M. *Osnovy biohimii Lenindzhera*: 3 vol. Vol. 1: *Osnovy biohimii, stroenie i kataliz*; per. s angl. 3rd ed., corr. Moscow: *Laboratoriya znaniy*, 2017. 694 p. ISBN 978-5-00101-014-2 (Vol. 1); ISBN 978-5-00101-013-5V. URL: http://binom-press.ru/books_1/biology/lenindger_1.pdf (date of access 25.01.2020) (in Russian).
5. Smirnova I. R., Satyukova L. P., Shopinskaya M. I. (2016) *Funkcional'nyj keratin pera kak istochnik belka i nezamenimyh aminokislot v kormlenii sel'skohozyajstvennoj pticy*. *Problemy veterinarnoj sanitarii, gigieny i ekologii*. № 3. P. 78-83 (in Russian).
6. *Usvoenie rasteniyami aminokislot. Agrohimiya. Informacionnyj nekommercheskij resurs*. – URL: <http://agrohimiya.ru/mikroorganizmy-pochvy/1821-usvoenie-rasteniyami-aminokislot.html> (date of access: 26.01.2020) (in Russian).
7. Volik V. G., Ismailova D. Yu., Erohina O. N. et al. (2011) *Effektivnoe ispol'zovanie vtorichnogo syr'ya, poluchaemogo pri pererabotke pticy. Ptica i pticeprodukty*. № 3. P. 16-19. URL: <http://www.vniipp.ru/images/statya/0311/s16.pdf> (date of access 29.01.2020) (in Russian).
8. Casarin F., Cladera-Olivera F., Brandelli A. (2008) Use of Poultry Byproduct for Production of Keratinolytic Enzymes. *Food and Bioprocess Technology*. Vol. 1. P. 301-305. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-008-0091-9>.
9. Gupta R., Ramnani P. (2006) Microbial keratinases and their prospective applications: an overview. *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol. 170. P. 21-33. DOI <https://doi.org/10.1007/s00253-005-0239-8>.
10. Kirfel J., Magin T. M., Reichelt J. (2003) Keratins: a structural scaffold with emerging functions. *Cellular and Molecular Life Sciences CMLS*. Vol. 60. P. 56-71. DOI <https://doi.org/10.1007/s000180300004>.
11. Körner A. (2008) MALDI MS in Analysis of Keratin Fibre Proteins. *Applications of Mass Spectrometry in Life Safety*. P. 205-212. DOI https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8811-7_14.
12. Cao L., Tan H., Liu Y., Xue X., Zhou S. (2008) Characterization of a new keratinolytic *Trichoderma atroviride* strain F6 that completely degrades native chicken feather. *Letters in Applied Microbiology*. Vol. 46. P. 389-394. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1472-765X.2008.02327.x>.
13. Ereemeev N. L., Nikolaev I. V., Keruchen'ko I. D. et al. (2009) Enzymatic hydrolysis of keratin-containing stock for obtaining protein hydrolysates. *Applied Biochemistry and Microbiology*. Vol. 45. No. 6. P. 717-724. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0003683809060131>.

Сведения об авторе

Брындина Лариса Васильевна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и правовых отношений ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: bryndinv@mail.ru.

Information about the author

Bryndina Larisa Vasilyevna – DSc (Agriculture), Professor of the Department of Life Safety and Legal Relations, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: bryndinv@mail.ru.

ДИНАМИКА РАНГОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕРЕВЬЕВ ПО ВЫСОТЕ В ПОЛЕЗАЩИТНОЙ ПОЛОСЕ С УЧАСТИЕМ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО (*QUERCUS ROBUR* L.) И КЛЁНА ОСТРОЛИСТНОГО (*ACER PLATANOIDES* L.)

кандидат биологических наук, доцент **О.В. Грибачева**¹

доктор сельскохозяйственных наук, профессор **А.И. Чернодубов**²

магистрант **Д.В. Сотников**¹

1 – Государственное образовательное учреждение Луганской Народной Республики

«Луганский национальный аграрный университет», г. Луганск, Луганская Народная Республика

2 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,

г. Воронеж, Российская Федерация

Организирующей основой адаптивно-ландшафтного земледелия является защитное лесоразведение. Цель работы – осуществить распределение деревьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) по высоте для установления сложности структуры древостоя. Рассмотрена дифференциация деревьев по высоте в полевых полосах, которая расположена в окрестностях с. Золотарёвка, Луганская область, Станично-Луганский район. В исследуемом насаждении нами были заложены две постоянные пробные площадки в соответствии с ОСТ 56-69-83. По результатам перечислительной таксации определяли относительную высоту каждого класса ранжированного ряда, редуциционные числа и ранги древостоев клёна остролистного и дуба черешчатого, образующих полевую полосу. Редуциционные числа и ранги определяли по методике Л.В. Стоноженко и др. Авторами выявлено, что преобладание деревьев-лидеров с ранговым классом 26-27 в древостое дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) на первой пробной площадке объясняется снижением интенсивности роста основной части древостоя вследствие разреженного стояния деревьев. Анализируя состояние древостоя, выяснили, что при формировании второго яруса в древостое из клёна остролистного на первой пробной площадке происходит ухудшение роста и развития дуба черешчатого и, как конечный результат, его разреживание. Особое внимание в работе авторы акцентируют на том, что при упрощении древостоя клёна остролистного на второй пробной площадке происходит улучшение роста и развития дуба черешчатого и, как следствие, усложнение формы насаждения.

Ключевые слова: полевая полоса, *Quercus robur* L., *Acer platanoides* L., древостой, ранжированный ряд по высоте, относительная средняя высота рангового класса, редуциционные числа, редуциционные ранги

DYNAMICS OF HEIGHT RANGE DISTRIBUTION OF TREES IN THE FOREST SHELTER BELT WITH PARTICIPATION OF ENGLISH OAK (*QUERCUS ROBUR* L.) AND NORWAY MAPLE (*ACER PLATANOIDES* L.)

PhD (Biology), Associate professor **O.V. Gribacheva**¹

DSc (Agriculture), Professor **A.I. Chernodubov**²

Master's degree student **D.V. Sotnikov**¹

1 – State Educational Institution of the Lugansk People's Republic "Lugansk National Agrarian University",
Lugansk, Lugansk People's Republic

2 – FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

Protective afforestation is organizing basis of adaptive landscape agriculture. The aim of the study is to distribute the trees of English oak (*Quercus robur* L.) and Norway maple (*Acer platanoides* L.) in height to establish the complexity of stand structure. The differentiation of trees by height in the shelterbelt, which is located in the vicinity of the village Zolotarevka, Lugansk region, Stanichno-Lugansk district, has been considered. In the plantation under study, we laid two permanent test plots in accordance with 56-69-83 Industrial Standard. Relative height of each class of the ranked row, reduction numbers and ranks of maple and oak stands, forming a field-protecting strip, have been determined based on the results of enumeration taxation. Reduction numbers and ranks have been determined according to the methodology of L.V. Stonozhenko et al. The authors have revealed that the predominance of leader trees with 26-27 grades in the oak-tree stand of *Quercus robur* L. (first test plot) is explained by a decrease in the growth rate of the main part of the stand due to the sparse standing of trees. Analyzing the state of the stand, during the formation of the second tier (maple stand on the first test plot), growth and development of oak and is worsened. Thinning can be seen as the final result. The authors emphasize in the work that there is an improvement in the growth and development of English oak when simplifying maple stand (second test plot). The consequence of all these is more complicated form of plantation.

Keywords: forest shelter belt, *Quercus robur* L., *Acer platanoides* L., stand, height ranked row, relative average height of rank class, reduction numbers, reduction ranks

Введение

Организующей основой адаптивно-ландшафтного земледелия является защитное лесоразведение. Защитные лесные насаждения преобразуют условия местопроизрастания и прилегающих к ним территорий, которые сами по себе являются динамичными, постоянно изменяющимися с возрастом насаждениями. При этом оптимальные мелиоративные функции выполняют насаждения, имеющие хороший рост и состояние. Однако в последнее десятилетие в лесоаграрных ландшафтах всё большую актуальность приобретает проблема ухудшения состояния и сохранности защитных лесных насаждений, утраты ими защитно-мелиорирующих функций по причине отсутствия их лесохозяйственного обслуживания [16, 17, 18]. Полезащитные лесные насаждения даже на не-

больших территориях, прилегающих к населённым пунктам, возле которых интенсивно ведётся сельское хозяйство, способствуют уменьшению числа засух, прекращению снижения уровня грунтовых вод. Структура древостоя в основном определяет всю ценогическую структуру лесного фитоценоза. Известно, что строение древостоев в процессе их роста заметно изменяется. На строение древостоя оказывают влияние такие факторы, как густота, возрастная и пространственная структура древостоя. Динамика рядов распределения числа стволов по высоте обусловлена текущим приростом, изменением их рангов в процессе прироста и отпадом части деревьев [9]. Закономерности строения насаждений по высоте и диаметру изучали [1, 3, 4, 8, 14, 15, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Цель работы – осуще-

ствить распределение деревьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) по высоте и группам ранговых коэффициентов (редукционным числам).

Материалы и методы

Полезащитная полоса, пространственную структуру которой изучали, расположена в окрестностях с. Золотарёвка (в 65 километрах от города Луганска). Территория, на которой произрастает исследуемая полеззащитная полоса, относится к шестому агролесомелиоративному району Украины по Б.И. Логгинову [5]. Почвы района – неглубокие с укороченным профилем, малогумусные обыкновенные чернозёмы. Этот район относится к наиболее подверженным суховеям территориям, где количество дней с суховеями достигает 16-24, а в отдельные годы – даже 60. Преобладающее направление ветра при суховеях восточное и юго-восточное. Рекомендованное направление продольных полос ССВ-ЮЮЗ. В исследуемом насаждении нами были заложены постоянные пробные площадки в соответствии с ОСТ 56-69-83 [12]. При ревизии постоянных пробных площадок были использованы геоботанические и общепринятые лесоводственные методики [13]. На этих площадках неоднократно производился перерасчёт древостоя, выявлялось видовое разнообразие, учитывался подрост. На первой пробной площадке было изучено 40 деревьев клёна остролистного и 42 дерева дуба черешчатого, а на второй – 50 деревьев клёна остролистного и 32 дерева дуба черешчатого. Деревья отбирались по методу случайной выборки из всех ступеней толщины. Математическую обработку результатов исследований проводили по методике Б.А. Доспехова [6]. Высоту деревьев измеряли при помощи оптического высотомера ЭВ-1. Для анализа высотного строения использовали показатель строения – редукционные числа по высоте (R_h), вычисляемые по аналогии с методикой К.К. Высоцкого [4] для нахождения редукционных чисел по диаметру в редакции С.А. Короткова [8]. В соответствии с этой методикой производили расчёт показателя ΔR_h как разницы относительной высоты первого и десятого классов. Расчёт редукционных чисел производили по следующей методике:

- построение ранжированного ряда по высотам от минимальной до максимальной;
- разделение полученного ряда на 10 классов;
- определение средней высоты каждого класса $h_{cp}(n)$;
- определение относительной высоты каждого класса по формуле $R_h(n) = h_{cp}(n) / h_{cp}(6)$;
- определение разницы $\Delta R_h = R_h(10) - R_h(1)$.

Для древостоев клёна остролистного на пробных площадках значение высоты деревьев ниже 7 м в расчёт не брались, а для деревьев дуба черешчатого – ниже 6 м. Показатель ΔR_h наиболее достоверно отражает зависимость значений показателя ΔR_h от формы древостоя, так как значения редукционных чисел являются средними значениями в классе и единичные деревья, сильно отличающиеся по высоте от других деревьев, в древостое не оказывают значительное влияние на увеличение показателя ΔR_h .

Первая и вторая пробные площадки представлены дубом черешчатым и клёном остролистным. Дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) занимает три центральных ряда, а клён остролистный (*Acer platanoides* L.) – два крайних ряда. Дуб высевали гнездовым способом с последующим вводом сопутствующих и быстрорастущих пород. Размеры прямоугольных площадок составляют: первой – 1170 м², а второй – 1502,8 м². Конструкция полеззащитной полосы – ажурно-продуваемая. Состав насаждения – 6Дч4Кло. Кустарниковый ярус представлен тёрном колючим (*Prunus spinosa* L.). Выявлен в небольшом количестве семенной и вегетативный подрост дуба черешчатого. Тип лесорастительных условий – сухая клёновая дубрава (D_1). Полнота насаждения – 0,5-0,6. Тип почвы – обыкновенные чернозёмы.

Высота дерева связана с положением его в насаждении. Связь эта характеризуется редукционными числами по высоте [9]. Закономерности строения насаждений по высоте и диаметру изучались многими учёными России и за рубежом [8, 10, 11, 14, 15]. В лесах Белоруссии ранги по высоте были изучены В.Ф. Багинским [2]. По его данным ранги по высоте от наименьшего до наибольшего дерева изменяются от 0,6 до 1,25 и даже до 1,30. На

постоянных пробных площадках Щелковского учебно-опытного лесхоза Московской области Л.В. Стоноженко и др. определили значение ΔR_h для простых древостоев – 0,418-0,573, а для сложных – 0,583-1,283 [15]. Ими отмечено, что смешанные многоярусные древостои больше отвечают целям ведения хозяйства в защитных лесах.

Результаты и обсуждение

В древостое клёна остролистного на первой пробной площадке наибольшее количество деревьев (10 шт., или 25,0%) наблюдается в ранговом классе, где высота их достигает 25 м (табл. 1). На второй пробной площадке наблюдается смещение количественного максимума в сторону рангового класса, где высота деревьев достигает 14-15 м. По результатам наблюдений в древостое дуба черешчатого на первой пробной площадке разбег в ранговых классах по высоте достигает от 7 м до 29 м (табл. 2).

Соотношение деревьев дуба черешчатого с высотой от 26 м до 27 м в древостое на второй пробной площадке по сравнению с первой пробной площадкой составляет 1:15. Преобладание деревьев-лидеров с ранговым классом 26-27 в древостое на первой пробной площадке объясняется снижением интенсивности роста основной части древостоя вследствие разреженного стояния деревьев. Наибольшая представленность деревьев различных ранговых классов по высоте наблюдается в древостое дуба черешчатого на второй пробной площадке.

Ранговое положение каждого дерева оценивали редуцированным числом (ранговым коэффициентом). Деревья распределяли по классам редуцированных чисел. Редуцированные числа и ранги по высоте для древостоя клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) на постоянных пробных площадках представлены на рис. 1а, 1б.

Таблица 1

Количественное соотношение деревьев клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) по ранговым классам высот в полевозащитной полосе

Название породы	Общее количество деревьев	Количество деревьев по ранговым классам высот, (шт./%)									
		7-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27
<i>Acer platanoides</i> L. (первая пробная площадка)	40	3/7,5	4/10,0	8/20,0	9/22,5	10/25,0	2/5,0	0/0	3/7,5	0/0	1/2,5
Название породы	Общее количество деревьев	Количество деревьев по ранговым классам высот, (шт./%)									
		8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18	19	20	21	22
<i>Acer platanoides</i> L. (вторая пробная площадка)	50	2/4,0	5/10,0	13/26,0	15/30,0	8/16,0	1/2,0	1/2,0	1/2,0	2/4,0	2/4,0

*Собственные вычисления авторов

Количественное соотношение деревьев дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) по ранговым классам высот в полезной полосе

Название породы	Общее количество деревьев	Количество деревьев по ранговым классам высот (м), (шт./%)									
		7-9	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29
<i>Quercus robur</i> L. (первая пробная площадка)	42	1/2,4	0/0	0/0	2/4,8	6/14,3	4/9,5	4/9,5	9/21,4	15/35,7	1/2,4
Количество деревьев по ранговым классам высот, (шт./%)											
<i>Quercus robur</i> L. (вторая пробная площадка)	32	6-7	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27
		1/3,1	0/0	1/3,1	5/15,6	17/53,2	1/3,1	1/3,1	2/6,3	1/3,1	3/9,4

*собственные вычисления автора

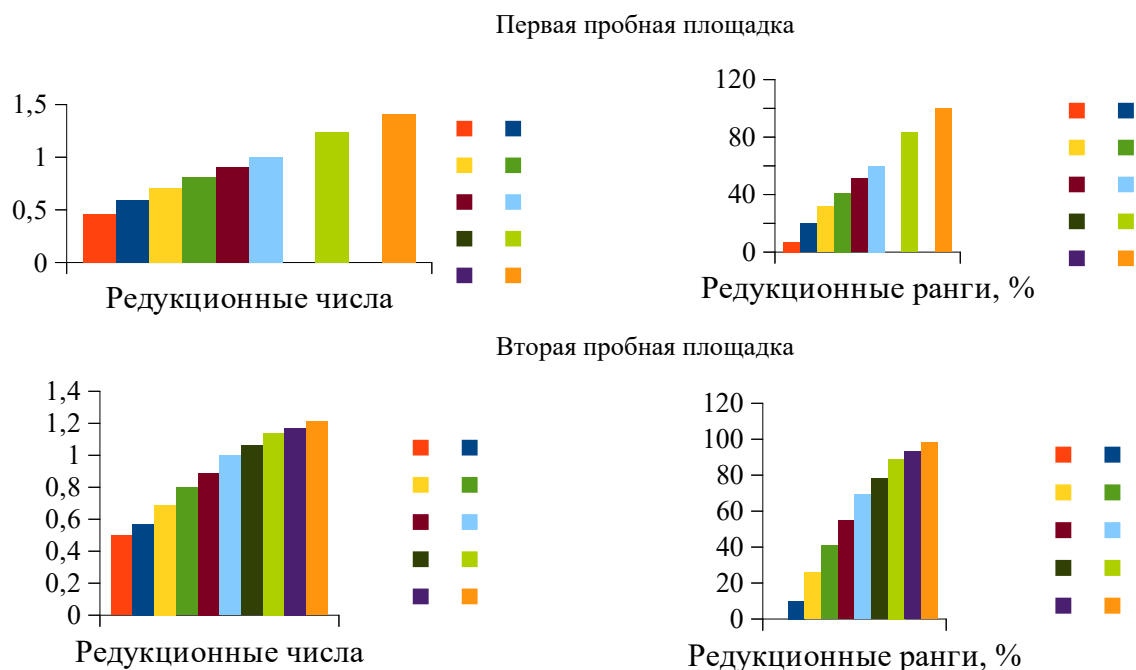


Рис. 1. Редукционные числа и ранги древостоя клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) по высоте на первой (1а) и второй пробной площадке (1б)

*собственные вычисления автора

Древостой клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) на первой пробной площадке характеризуется преобладанием ранговых классов с редукционными числами от 0,46 до 0,91, что составляет 90 % от общего количества деревьев (рис. 1а). На долю средних и крупных деревьев в ранжированном ряду по высоте приходится остальные 10 %. Это свидетельствует о том, что деревья указанной породы на первой пробной

площадке достаточно густо расположены друг к другу, составляя конкуренцию за почвенное питание и свет. Редукционному числу со значением единица соответствует средний ранг дерева в ранжированном ряду по высоте с рангом 59,89 % и средней высотой рангового класса 18,2 м. Разница между ранговым классом с редукционным числом единица и последующим составляет 0,1.

Наибольшее перераспределение ранговых мест в древостое клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) по высоте наблюдается на второй пробной площадке. На ней произрастают деревья с редуцированными числами от 0,50 до 1,21 (рис. 1б). Доля крупных деревьев с редуцированным числом от 1,06 до 1,21 составила 12 % от общего количества деревьев, а доля мелких деревьев с редуцированным числом от 0,50 до 0,89 – 86 %. Среднее значение находится в 50 % от самого низкого дерева и в 40 % от самого высокого. Редуцированному числу со значением единица соответствует средний ранг дерева в ранжированном ряду по высоте с рангом 69,0 % и средней высотой рангового класса 18,0 м. Это значение на 1,13 % больше и на 1,25 % меньше ранга среднего дерева по отношению к деревьям с высотой рангового класса 16,1 м и 19,1 м соответственно.

В древостое дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) на второй пробной площадке разброс редуцированных чисел составляет от 0,42 до 1,58, но отсутствуют деревья в ранговых классах с высотой от 8 до 9 м и от 10 до 11 м (рис. 2). Доля крупных деревьев с редуцированным числом от 1,10 до 1,58 и доля мелких деревьев с редуцированным числом от 0,42 до 0,89 составляет примерно одинаковое количество – 22 и 25 % соответственно. На долю средних деревьев с редуцированным числом 1 приходится 53 %. Среднее значение находится в 40 % от самого низкого дерева и в 50 % от самого высокого. Редуцированному числу со значением единица соответствует средний ранг дерева в ранжированном ряду по высоте с рангом 48,3 % и средней высотой рангового класса 16,66 м. Это

значение на 1,16 % больше и на 1,22 % меньше ранга среднего дерева по отношению к деревьям с высотой рангового класса 14,9 м и 18,2 м соответственно.

Показатель ΔR_h показывает вариативность значений высот в ранжированном ряду. Чем больше значение указанного показателя для насаждения, тем больше варьируются высоты в данном древостое, что может свидетельствовать также о наличии второго яруса в древостое. Согласно Л.В. Стоноженко, простым древостоем свойственны наименьшие значения ΔR_h , а сложным – наибольшие.

Нами в полевых условиях для древостоев, образованных из клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) и дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), установлены следующие значения показателя строения древостоя по высоте (ΔR_h): 0,95; 0,69; 0,59; 1,13 (табл. 3). При этом на первой пробной площадке ΔR_h для древостоя клёна остролистного он составляет 0,95, а для дуба черешчатого – 0,59, а на второй пробной площадке эти значения составляют 0,69 и 1,13 соответственно. Следовательно, при формировании второго яруса в древостое из клёна остролистного на первой пробной площадке происходит ухудшение роста и развития дуба черешчатого и, как конечный результат, его разреживание. И наоборот, при упрощении древостоя клёна остролистного на второй пробной площадке происходит улучшение роста и развития дуба черешчатого и, как следствие, усложнение формы насаждения.

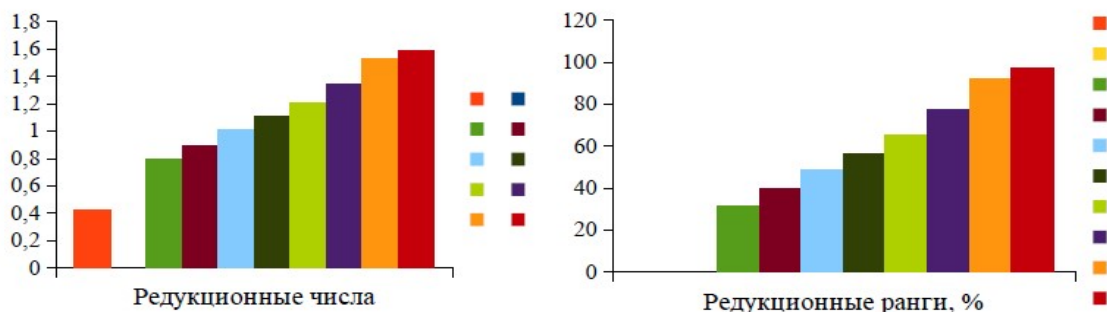


Рис. 2. Редуцированные числа и ранги древостоя дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) по высоте на второй пробной площадке

* собственные вычисления автора

Показатель строения древостоя по высоте (ΔR_h) полезациной полосы в окрестностях с. Золотарёвка

Название древесной породы	№ пробной площадки	ΔR_h
<i>Acer platanoides</i> L.	1	0,95
<i>Acer platanoides</i> L.	2	0,69
<i>Quercus robur</i> L.	1	0,59
<i>Quercus robur</i> L.	2	1,13

* собственные вычисления автора

В целом же для полезациной полосы в окрестностях с. Золотарёвка (Станично-Луганский район) характерно сложное строение древостоя по форме.

Выводы

По результатам исследования полезациной полосы с участием дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и клёна остролистного (*Acer platanoides* L.), расположенной в окрестностях с. Золотарёвка Станично-Луганского района Луганской области (Украина), сделаны следующие выводы:

1. Для насаждений указанного района исследования впервые за 35 лет проведено обследование лесополос. Установлено, что в схемах смешения из дуба черешчатого и клёна остролистного при посадке дуба черешчатого во внутренних рядах лесополосы и без прореживания клёна остролистного в крайних рядах происходит ухудшение развития дуба черешчатого и, как следствие, замедление его роста и искривление стволов.

2. Древостой клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) на первой пробной площадке характеризуется преобладанием ранговых классов с редуцированными числами от 0,46 до 0,91, что составляет 90 % от общего количества деревьев. Редуцированному числу со значением единица

соответствует средний ранг дерева в ранжированном ряду по высоте с рангом 59,89 % и средней высотой рангового класса 18,2 м.

3. Наибольшее перераспределение ранговых мест в древостое клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) по высоте наблюдается на второй пробной площадке. На ней произрастают деревья с редуцированными числами от 0,50 до 1,21. Редуцированному числу со значением единица соответствует средний ранг дерева в ранжированном ряду по высоте с рангом 69,0 % и средней высотой рангового класса 18,0 м.

4. В древостое дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) на второй пробной площадке разброс редуцированных чисел составляет от 0,42 до 1,58, но отсутствуют деревья в ранговых классах с высотой от 8 до 9 м и от 10 до 11 м. Редуцированному числу со значением единица соответствует средний ранг дерева в ранжированном ряду по высоте с рангом 48,3 % и средней высотой рангового класса 16,66 м.

5. В полезациной полосе для древостоев, образованных из клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) и дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), установлены следующие значения показателя строения древостоя по высоте (ΔR_h): 0,95; 0,69; 0,59; 1,13, что соответствует сложному насаждению.

Библиографический список

1. Анучин, Н. П. Лесная таксация: учеб. для вузов / Н. П. Анучин. – 5-е изд., доп. – Москва : Лесная промышленность, 1982. – 552 с. – URL: <https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/anuchin/1.pdf> (дата обращения: 22.09.2019).
2. Багинский, В. Ф. Особенности строения древостоев ольхи в лесах Беларуси / В. Ф. Багинский, Н. Н. Катков, Е. А. Усс // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2017. – Сер. Лісівництво та декоративне садівництво. – Вип. 266. – С. 9–15.

3. Берлин, Н. Г. Биопродуктивность полезащитных лесных полос с дубом черешчатым на чернозёмном степи Саратовского Правобережья : специальность 06.03.03 «Агроресомелиорация, защитное лесоразведение и озеленение населённых пунктов, лесные пожары и борьба с ними» : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / Берлин Николай Геннадиевич; Саратов. гос. аграр. ун-т им. Н.И. Вавилова. – Саратов, 2015. – 22 с.
4. Высоцкий, К. К. Закономерности строения смешанных древостоев / К. К. Высоцкий. – Москва, 1962. – 178 с.
5. Грибачева, О. В. Современное состояние полезащитной полосы с участием дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) и клёна остролистного (*Acer platanoides* L.) / О. В. Грибачева // Лесной журнал. – 2019. – № 4. – С. 34–44. – DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.34.
6. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования) / Б. А. Доспехов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Агропромиздат, 1985. – 351 с. – Библиогр.: с. 320–340. – ISBN 978-5-903034-96-3.
7. Зиганшин, Р. А. Закономерности строения древостоев Сибири и их инвентаризация на природной основе : специальность 06.03.02 «Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация» : дис. ... д-ра с.-х. наук: защищена 25.05.2000 / Зиганшин Рашид Асхатъевич; Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. – Красноярск, 2000. – 391 с. – Библиогр.: с. 200–216.
8. Коротков, С. А. Особенности формирования ельников в условиях антропогенного стресса (на примере лесов Клинско-Дмитровской гряды) : специальность 03.00.16 «Экология» : автореф. дис. ... канд. биол. наук / Коротков Сергей Александрович; Московский государственный университет леса. – Москва, 1998. – 24 с.
9. Кузьмичев, В. В. Закономерности динамики древостоев: принципы и модели / В. В. Кузьмичев; Рос. акад. наук СО, Ин-т леса им. В. Н. Сукачева. – Новосибирск : Наука, 2013. – 207 с. – Библиогр.: с. 211–215. – ISBN 978-5-02-0119148-8.
10. Лепехин, А. А. К оценке роста и лесопатологического состояния дуба после изреживания полезащитных лесополос рубками ухода / А. А. Лепехин // Лесной журнал. – 1987. – № 4. – С. 16–20. – DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.70.
11. Наквасина, Е. Н. Динамика рангового распределения деревьев по высоте в потомстве климатипов сосны обыкновенной / Е. Н. Наквасина // Лесной журнал. – 2002. – № 5. – С. 24–29. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/dinamika-rangovogo-raspredeleniya-dereviev-po-vysote-v-potomstve-klimatipov-sosny-obyknovennoy.pdf> (дата обращения: 18.09.2019).
12. ОСТ 56-69-83 Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки. – Москва : ЦБНТИлесхоз, 1984. – 50 с.
13. Раменский, Л. Г. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель / Л. Г. Раменский. – Москва : Сельхозгиз, 1938. – 620 с.
14. Сауткина, М. Ю. Современное состояние полезащитных полос с преобладанием дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в Каменной Степи / М. Ю. Сауткина, Н. Ф. Кузнецова, В. Д. Тунякин // Лесохозяйственная информация: электрон. сетевой журнал. – 2018. – № 1. – С. 78–89. – DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.1.07.
15. Стоноженко, Л. В. Исследование строения и формы насаждений / Л. В. Стоноженко, Е. В. Найденкова, С. А. Роганова // Лесной вестник. – 2016. – № 5. – С. 205–214. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/issledovanie-stroeniya-i-formy-nasazhdeniy.pdf> (дата обращения: 18.09.2019).
16. Турусов, В. И. Опыт лесной мелиорации степных ландшафтов (к 125-летию «Особой экспедиции... В.В. Докучаева») : моногр. / В. И. Турусов, А. А. Лепехин, А. С. Чеканьшкин. – Воронеж : Истоки, 2017. – 228 с. – Библиогр.: с. 119–126. – ISBN 978-5-4473-0158-3.
17. Агроэкологическая роль лесных полос в преобразовании ландшафтов (на примере Каменной Степи): моногр. / В. И. Турусов, А. С. Чеканьшкин, В. В. Тищенко [и др.]; Типография Россельхозакадемии. – Москва, 2012. – 191 с. – Библиогр.: с. 110–150. – ISBN 978-5-85941-444-4.

18. Чеканьшкин, А. С. Состояние защитного лесоразведения в Центрально-Черноземной зоне полос / А. С. Чеканьшкин, А. А. Лепехин // Лесной журнал. – 2015. – № 4. – С. 9–17. – ISSN 0536-1036.
19. Bao, Y. Effect of Shelterbelts on Winter Wheat Yields in Sanded Farmland of North-Western Shandong Province / Y. Bao, H. Li, H. Zhao // Journal of Food, Agriculture and Environment. – 2012. – No. 10 (3-4). – P. 1399–1403.
20. Burke, S. The effect of shelterbelts on crop yields at Rutherglen, Victoria / S. Burke // A National Australian Conference on The Role of Trees in Sustainable Agriculture held at Albury, Victoria, Australia : Proceedings. – Albury, 1991. – P. 89–99.
21. Coates, K. D. Tree recruitment in gaps of various size, clearcuts and undisturbed mixed forest of interior British Columbia, Canada / K. D. Coates // Forest Ecology and Management. – 2002. – № 155. – P. 387–398.
22. Tree-crop interactions: a physiological approach / ed. by P. Huxley. – CAB International, Wallingford. – P. 159–187.
23. Jackson, J. E. Tree and crop selection and management to optimize overall system productivity especially light utilisation in agroforestry / J. E. Jackson // Meteorology and Agroforestry / eds. W. S. Reifsnnyder, T. O. Darnhofer. – 1989. – P. 163–173.
24. Magnussen, S. Tree size, biomass and volume growth of twelve 34-year old Ontario jack pine provenances / S. Magnussen, V. G. Smith, C. W. Yeatman // Canadian Journal of Forest Research. – 1985. – Vol. 15. – № 6. – P. 1129–1136.

References

1. Anuchin N.P. *Lesnaya taksatsiya: uchebnik dlya vuzov* [Forest inventory: textbook]. 5th ed., dop. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1982. 552 p. (in Russian).
2. Baginskij V.F., Katkov N.N., Uss E.A. (2017) *Osobennosti stroeniya drevostoev ol'hi v lesah Belarusi* [Structural features of alder stands in the forests of Belarus]. *Naukovij visnik Nacional'nogo universitetu bioresursiv i prirodnokoristuvannya Ukraini* [Scientific Bulletin of the National University of bioresources and nature management of Ukraine], ser. forestry and ornamental gardening, vol. 266, pp. 9-15 (in Russian).
3. Berlin N.G. *Bioproduktivnost' polezashchitnyh lesnyh polos s dubom chereschatym na chernozyome yuzhnom stepi Saratovskogo Pravoberezh'ya: special'nost' 06.03.03: «Agrolesomelioraciya, zashchitnoe lesorazvedenie i ozelenenie naselyonnyh punktov, lesnye pozhary i bor'ba s nimi»*: avtoref. dis. ... kand. s.-h. nauk [PhD thesis abstr.], Saratov, 2015. 22 p. (in Russian).
4. Vysotskiy K.K. *Zakonomernosti stroeniya smeshannyh drevostoev*. Moscow, 1962. 178 p. (in Russian).
5. Gribacheva O.V. (2019) *Sovremennoe sostoyanie polezashchitnoj polosy s uchastiem duba chereschatogo (Quercus robur L.) i klyona ostrolistnogo (Acer platanoides L.)* [The current state of the shelterbelt featuring English oak (*Quercus robur* L.) and Norway maple (*Acer platanoides* L.)]. *Lesnoj zhurnal* [Forest Sib], no. 4, pp. 34-44. doi: 10.17238/issn0536-1036.2019.4.34.
6. Dospheov B.A. *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniya)*. 5th ed., proc. and complem. Moscow: Agropromizdat, 1985. 351 p. ISBN 978-5-903034-96-3 (in Russian).
7. Ziganshin R.A. *Zakonomernosti stroeniya drevostoev Sibiri i ih inventarizaciya na prirodnoj osnove* [Regularities of the structure of forest stands in Siberia and their inventory on a natural basis]: 06.03.02 «Lesovedenie, lesovodstvo, lesoustrojstvo i lesnaya taksaciya»: diss. ... DSc (Agriculture) [Doct. thesis]. Krasnoyarsk: Institut lesa im. V. N. Sukacheva SO RAN, 2000. 391 p. (in Russian).
8. Korotkov S.A. *Osobennosti formirovaniya elnikov v usloviyah antropogennogo stressa (na primere lesov Klinско-Dmitrovskoy gryady)*: 03.00.16: «Ekologiya»: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk [PhD (Biology) thesis abstr.]. Moscow: Moskovskij gosudarstvennyj universitet lesa, 1998. 24 p. (in Russian).

9. Kuz'michev V.V. *Zakonomernosti dinamiki drevostoev: principy i modeli* [Conformities to law of dynamics of stands: principles and models]. Novosibirsk, Nauka, 2013. 207 p. ISBN 978-5-02-0119148-8 (in Russian).
10. Lepekhin A.A. (1987) *K ocnenke rosta i lesopatologicheskogo sostoyaniya duba posle izrezhivaniya polezashchitnyh lesopolos rubkami uhoda* [To the assessment of growth and forest pathology condition of oak after thinning of shelter belts thinnings]. *Lesnoj zhurnal* [Forest Sib], no. 4, pp. 16-20. doi: 10.17238/issn0536-1036.2018.6.70 (in Russian).
11. Nakvasina E.N. (2002) *Dinamika rangovogo raspredeleniya derev'ev po vysote v potomstve klimatipov sosny obyknovnoy* [Dynamics of the rank distribution of trees in height in the offspring of Scots pine climatetypes]. *Lesnoj zhurnal* [Forest Sib], no. 5, pp. 24-29. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/dinamika-rangovogo-raspredeleniya-dereviev-po-vysote-v-potomstve-klimatipov-sosny-obyknovnoy.pdf> (date of access: 18.09.2019) (in Russian).
12. OST 56-69-83 *Probnye ploshshadi lesoustroitelnye. Metod zakladki*. V., TsBNTI leshoz, 1984. 50 p. (in Russian).
13. Ramenskiy L.G. *Vvedenie v kompleksnoe pochvenno-geobotanicheskoe issledovanie zemel*. M.: Selhozgiz, 1938. 620 p. (in Russian).
14. Sautkina M.Yu. (2018) *Sovremennoe sostojanie polezashhitnyh polos s preobladaniem duba chereshchatogo (Quercus robur L.) v Kamennoj Stepi* [Modern state of the field bands with a predominance of English oak (*Quercus robur* L.) in Kamennaya Steppe]. *Lesohoz. inform.* [Forestry Inform.], no. 1. pp. 78-89. doi:10.24419/LHI.2304-3083.2018.1.07 (in Russian).
15. Stonozhenko L.V., Najdenova E.V., Roganova S.A. (2016) *Issledovanie stroeniya i formy nasazhdenij* [Study of the structure and shape of plantations]. *Lesnoj vestnik* [Forest Bulletin], no. 5. pp. 205-214. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/issledovanie-stroeniya-i-formy-nasazhdeniy.pdf> (date of access: 18.09.2019) (in Russian).
16. Turusov V.I., Lepehin A.A., Chekanyshkin A.S. *Opyt lesnoj melioracii stepnyh landshaftov (k 125-letiju «Osoboj jekspedicii...» V.V. Dokuchaeva)* [Experience of forest reclamation of steppe landscapes (to the 125th anniversary of "Special expedition..." of V.V. Dokuchaev)]. Voronezh: «Istoki», 2017. 228 p. ISBN 978-5-4473-0158-3 (in Russian).
17. Turusov V.I., Chekanyshkin A.S., Tishhenko V.V. (et al.) *Agrojekologicheskaja rol' lesnyh polos v preobrazovanii landshaftov (na primere Kamennoj Stepi)* [Agro-ecological role of forest belts in the transformation of landscapes]. Moscow: Tipografija Rossel'hozakademii, 2012. 191 p. ISBN 978-5-85941-444-4 (in Russian).
18. Chekanyshkin A.S., Lepehin A.A. (2015) *Sostojanie zashhitnogo lesorazvedeniya v Central'no-Chernozemnoj zone polos* [The state of the protective afforestation in the Central Chernozem zone]. *Lesnoj zhurnal* [Forest Sib], no. 4, pp. 9-17 (in Russian). ISSN 0536-1036.
19. Bao Y., Li H., Zhao H. (2012) Effect of Shelterbelts on Winter Wheat Yields in Sanded Farmland of North-Western Shandong Province. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 10(3-4), pp. 1399-1403.
20. Burke S. (1991) The effect of shelterbelts on crop yields at Rutherglen, Victoria. In: Proceedings from A National Australian Conference on The Role of Trees in Sustainable Agriculture held at Albury, Victoria, Australia. pp. 89-99.
21. Coates K.D. (2002) Tree recruitment in gaps of various size, clearcuts and undisturbed mixed forest of interior British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management*. № 155, pp. 387-398.
22. Huxley P. (ed.) *Tree-crop interactions: a. physiological approach*. CAB International, Wallingford, pp. 159-187.
23. Jackson J.E. (1989) Tree and crop selection and management to optimize overall system productivity especially light utilisation in agroforestry. In: Reifsnnyder W.S. and Darnhofer T.O. (eds) *Meteorology and Agroforestry*, pp. 163-173.
24. Magnussen S., Smith V.G., Yeatman C.W. Tree size, biomass and volume growth of twelve 34-year old Ontario jack pine provenances. *Canad. Journ. of Forest Research*. 1985. Vol. 15. № 6. P. 1129-1136.

Сведения об авторах

Грибачева Олеся Владимировна – кандидат биологических наук, доцент, заведующая кафедры плодовоощеводства и лесоводства ГОУ ЛНР «Луганский национальный аграрный университет», г. Луганск, Луганская Народная Республика; e-mail: olesya_kopaneva_78@mail.ua.

Чернодубов Алексей Иванович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесных культур, селекции и лесомелиорации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail:chernodubov2010@yandex.ru.

Сотников Дмитрий Владимирович – старший преподаватель кафедры плодовоощеводства и лесоводства ГОУ ЛНР «Луганский национальный аграрный университет», г. Луганск, Луганская Народная Республика; e-mail: sotnikofd@mail.ru.

Information about authors

Gribacheva Olesya Vladimirovna – PhD (Biology), Associate Professor, Head of the Department of Forestry and Horticulture of the State Educational Institution of the Lugansk People's Republic "Lugansk National Agrarian University", Lugansk, Lugansk People's Republic; e-mail: olesya_kopaneva_78@mail.ua.

Chernodubov Aleksey Ivanovich – DSc (Agriculture), Professor, Department of Forest Crops, Selection and Forest Reclamation, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: chernodubov2010@yandex.ru.

Sotnikov Dmitry Vladimirovich – Master's degree student, Senior Lecturer of the Department of Forestry and Horticulture of the State Educational Institution of the Lugansk People's Republic "Lugansk National Agrarian University", Lugansk, Lugansk People's Republic; e-mail: sotnikofd@mail.ru.

ВЫДЕЛЕНИЕ РЕПРЕЗЕНТАТИВНЫХ УЧАСТКОВ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ В РАМКАХ FSC СЕРТИФИКАЦИИ

кандидат сельскохозяйственных наук **Н.М. Дебков**

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Российская Федерация

Добровольная лесная сертификация является широко распространённым механизмом рыночной экономики, направленным на соблюдение баланса экономических, экологических и социальных интересов. В статье приводится методика выделения репрезентативных участков лесных экосистем при формировании сети охраняемых участков, образующих экологический каркас арендованной территории. В качестве примера взято лесозаготовительное предприятие, арендующее два лесных участка в Чебулинском лесничестве Кемеровской области с разной характеристикой лесного фонда и историей лесопользования. Опираясь на базовые требования действующего стандарта лесопользования FSC, была разработана методика выделения репрезентативных участков. В результате ее применения установлено, что на участке с более интенсивным лесопользованием, несмотря на его меньшую площадь (3837 га), встречается 41 % типов леса, представленных на территории всего лесничества. На более крупном участке (5224 га), но менее трансформированном и фрагментированном – 21 %. Выявлено, что общим для обоих арендованных участков является доля нередких типов леса (с встречаемостью выше 1 %), которая составляет 18 %. Также примерно одинакова площадь репрезентативных участков – 4,16 и 3,79 % соответственно. Примечательно, что нередкие типы леса уже в достаточном объеме присутствуют в сети защитных лесов и особо защитных участков в эксплуатационных лесах. А вот редкие типы леса, как правило, незначительно в них представлены, что позволяет сделать вывод о важности формирования сети репрезентативных участков при лесной сертификации. Установлено, что в редкие лесные экосистемы попадают как хвойные, так и лиственные насаждения. Средняя площадь выдела в более староосвоенном арендованном участке равна 8,8 га (с колебанием от 0,8 до 55,0 га), а в менее – 13,3 га (с колебанием от 1,8 до 28,7 га), что является вполне логичным. Однако на первом арендованном участке только 9 %, а на втором – 6 % репрезентативных участков имеют площадь выше 20 га, которая принята в качестве пороговой в ряде стран.

Ключевые слова: репрезентативность, эталонные леса, лесная сертификация, типы леса, лесообразующие виды, лесопользование, биоразнообразие

ALLOCATION OF REPRESENTATIVE SITES OF FOREST ECOSYSTEMS WITHIN FSC CERTIFICATION

PhD (Agriculture) **N.M. Debkov**

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IMCES SB RAS)

Abstract

Voluntary forest certification is a widespread mechanism of a market economy aimed at balancing economic, environmental and social interests. The article provides a methodology for identifying representative areas of forest ecosystems when forming a network of protected areas that form the ecological framework of the leased area. As an example, we took a logging company that leases two forest plots in Chebulinsky forestry of the Kemerovo region with different characteristics of the forest fund and the history of forest use. Based on the basic requirements of the current FSC forest management standard, a methodology for identifying representative sites has been developed. As a result of

its application, it was found that in the area with more intensive forest management, 41 % of the forest types present in the entire forestry area are found, despite its smaller area (3837 hectares). It is 21 % on a larger, but less transformed and fragmented plot (5224 ha). It was revealed that the share of the frequent forest types (with the occurrence above 1 %), which is 18 %, is common for both leased plots. The area of representative plots is also approximately the same – 4.16 and 3.79 %, respectively. It is noteworthy that frequent types of forests are already present in sufficient quantities in the network of protective forests and especially protective areas in production forests. But rare forest types, as a rule, are slightly represented in them. It enables us to conclude that it is important to form a network of representative sites in forest certification. It has been established that both coniferous and deciduous stands fall into rare forest ecosystems. The average area under allotment in the older cultivated leased plot is 8.8 hectares (with a variation from 0.8 to 55.0 hectares), and in less cultivated – 13.3 hectares (with a variation from 1.8 to 28.7 hectares), which is quite logical. However, in the first leased area, only 9 %, and in the second – 6 % of representative areas have an area of over 20 ha, which is accepted as a threshold in several countries.

Keywords: representativeness, normal forests, forest certification, forest types, forest-forming species, forest management, biodiversity

Введение

Лесная сертификация является одним из рыночных механизмов в области устойчивого лесопользования. Основная ее цель заключается в независимой оценке деятельности предприятий лесного и деревообрабатывающего сектора специализированными органами по сертификации, т.е. негосударственными, как правило иностранными компаниями. Многочисленными исследованиями доказано ее комплексное и многогранное влияние на природоохранные аспекты при лесопользовании [18]. Отмечена ее позитивная роль в соблюдении прав работников и в целом во взаимодействии с местными сообществами [7]. В исследованиях, затрагивающих непосредственно процесс аудиторирования, отмечается, что предприятия, имеющие сертификат FSC, в целом улучшают систему менеджмента по всем направлениям [8]. Наиболее очевидным и не оспариваемым фактом является меньшая интенсивность лесопользования [15], т. е. при прочих равных обстоятельствах сертифицированное предприятие вынуждено вырубать леса в меньших объемах, поскольку обязано помимо установленных национальным законодательством охраняемых (защитных) лесов обеспечивать сбережение и так называемых «voluntary set-asides», т. е. добровольно сохраняемых участков лесов [6]. В качестве таких участков выделяются в том числе и типичные лесные экосистемы, которые также включаются в экологический и ландшафтный каркас арендованного участка.

Целью исследования являлась разработка сети охраняемых участков на примере существующего лесопромышленного предприятия и дополнение ее репрезентативными участками лесных экосистем.

Материалы и методы

В соответствии с требованиями критерия 6.4 действующего Российского национального стандарта добровольной лесной сертификации по схеме FSC [17], лесопромышленное предприятие-держатель сертификата FM (Forest management) должно выделить и обеспечить сохранение репрезентативных (эталонных) участков экосистем, которые «представляют собой систему, функционально связанных между собой охраняемых участков, обеспечивающих сохранение всего биоразнообразия флоры и фауны, ландшафтов, экосистем и местообитаний данной территории».

Функции репрезентативных участков могут выполнять существующие и проектируемые ООПТ, защитные леса, достаточно крупные особо защитные участки леса и участки, сохраняемые предприятием в добровольном порядке (например, леса высокой природоохранной ценности – ЛВПЦ).

Однако необходимо отметить, что хотя на перечисленные участки может приходиться значительная часть сети репрезентативных участков, они далеко не всегда охватывают все разнообразие ландшафтов, экосистем и местообитаний.

В этом случае в состав такой сети необходимо включать дополнительные участки. Это особен-

но важно в тех случаях, когда в пределах сертифицируемой территории доля ЛВПЦ (включая защитные леса и ОЗУ) низка или они вообще отсутствуют.

Общий подход к выделению репрезентативных участков описан в Приложении Е к национальному стандарту лесопользования [17], и наиболее важный момент касается необходимости включить в сеть охраняемых участков не менее 1 % типов леса в пределах арендованного участка. При этом в этот список не нужно включать явно нарушенные или вторичные типы экосистем, в том числе те, которые постоянно воспроизводятся в ходе лесохозяйственной деятельности (гари, зарастающие вырубки, молодняки, чисто вторичные лиственные древостой). Предпочтение следует отдавать участкам наиболее сохранившимся, старовозрастным, перестойным насаждениям.

Таким образом, для формирования сети репрезентативных участков экосистем необходимо сначала провести выделение всех типов охраняемых участков лесов (ООПТ, ОЗУ, защитных лесов, ЛВПЦ), затем провести анализ репрезентативности этих участков по отношению к территории аренды и, в случае необходимости, дополнить эту сеть охраняемых участков недостающими экосистемами.

Нами была разработана и апробирована процедура выделения репрезентативных участков лесных экосистем (нелесные выделять проще и они

далее не рассматриваются) на территории арендных участков ИП Опрышко А.А. (номер сертификата RR-FM/COC-643073), которые расположены в Чебулинском лесничестве Кемеровской области (рис. 1).

1. На основе лесостроительных материалов (повыдельной электронной базы в программе Win PLP, СОЛИ и т.д.) проводится распределение покрытых лесом площадей выделов арендуемого лесного участка предприятия по типам леса (в абсолютных и относительных величинах);

2. Затем составляется распределение покрытых лесом площадей по типам леса, включенных в ЛВПЦ (в абсолютных и относительных величинах);

3. Проводится анализ представленности того или иного типа леса в существующих ОЗУ, защитных лесах или ЛВПЦ;

4. Выявляются «пробелы» и редкие для данного лесного участка типы леса, которые необходимо сохранить в объеме не менее 1 % от покрытой лесом площади конкретного типа леса;

5. Изыскиваются дополнительные участки для закрытия «пробелов»;

6. В электронной форме составляется перечень выделов репрезентативных участков с указанием лесничества, участкового лесничества, квартала, выдела, площади выдела, типа леса, возраста древостоя;

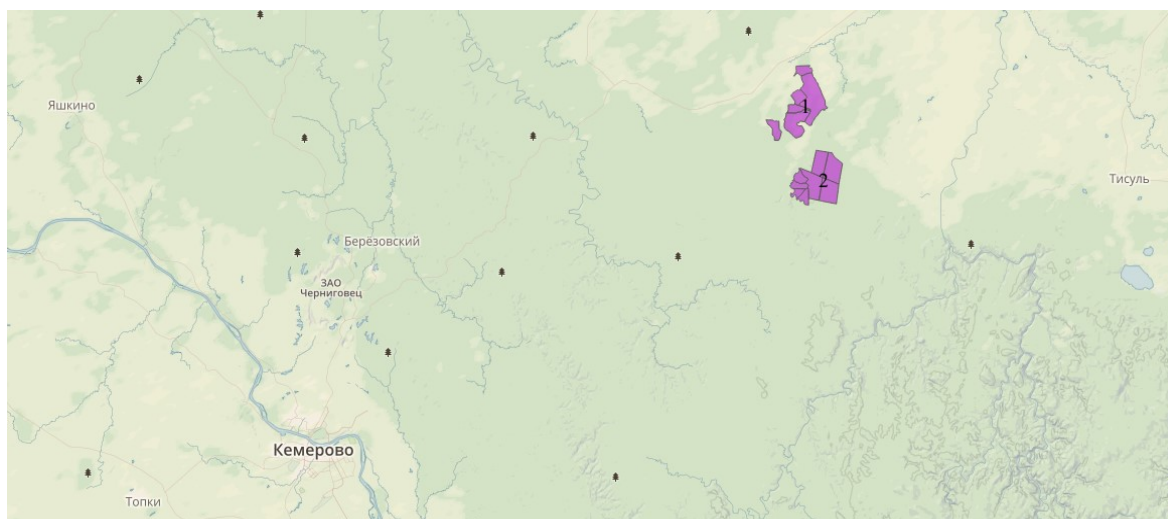


Рис. 1. Расположение арендных участков ИП Опрышко А.А.

*по данным сайта <http://maps.fsc.ru/>

7. Режим лесопользования и ведения лесного хозяйства в выделах, относящихся к репрезентативным, в рамках ЛВПЦ соответствует установленному режиму. Режим в дополнительно выделенных участках («пробелах») предусматривает запрет проведения рубок спелых и перестойных насаждений с целью заготовки древесины;

8. Дополнительно выделенные репрезентативные участки («пробелы») наносятся на карту ЛВПЦ предприятия;

9. Приказом руководителя предприятия данные выделы («пробелы») в добровольном порядке выводятся из коммерческой заготовки.

Схема типов леса по Чебулинскому лесничеству (табл. 1) взята из лесохозяйственного регламента [2]. Лесной участок по договору аренды № 94/14-д от 18.08.2014 г., площадью 3837 га (на рис. 1 обозначен цифрой «1») характеризуется сосново-березовым лесным фондом бывших сельских лесов, т. е. он староосвоенный и разбросан среди полей (фрагментирован). На другом лесном участке по договору аренды № 84/12-д от 08.08.2012 г., площадью 5224 га (на рис. 1 обозначен цифрой «2») темнохвойная тайга (с производными типами леса), и он расположен единым (монолитным) массивом и отличается еще и менее интенсивным антропогенным воздействием.

Результаты исследований и их обсуждение

В результате анализа арендованного лесного фонда было установлено (табл. 2, 3), что в схеме типов лесов Чебулинского лесничества отсутствуют такие типы леса, встречающиеся на территории арендованных лесных участков, как ельник широколиственный, березняк широколиственный и травяно-болотный, осинник разнотравный и кустарниково-разнотравный, кедровник мшистый, ивняки кустарниковые и древовидные травяно-болотные. Выявлено, что типы леса, входящие в состав защитных лесов, особо защитных участков в эксплуатационных лесах и ЛВПЦ (табл. 2, 3) частично уже представлены в сети охраняемых участков. Среди типов леса, не входящих в существующие охраняемые территории или представленных в ней незначительно (менее 1 %), дополнительно выделены на лесном участке по договору аренды от 08.08.2012 г. № 84/12-д сосняк разнотравный (3 выдела – 1,6, 2,4

и 19,2 га), ельник широколиственный (1 выдел – 0,8 га) и кустарниково-разнотравный (1 выдел – 8,3 га), пихтач мшистый (2 выдела – 5,2 и 21,2 га) и кустарниково-разнотравный (1 выдел – 8,6 га), березняк кустарниково-разнотравный (5 выделов – 2,7, 5,1, 11,3, 2,8 и 3,2 га), широколиственный (1 выдел – 55,0 га) и травяно-болотный (2 выдела – 1,6 и 4,6 га), осинник кустарниково-разнотравный (5 выделов – 6,3, 7,9, 6,0, 14,4 и 1,8 га) и папоротниковый (1 выдел – 4,2 га). Общая относительная площадь 22 выделов (10 типов лесных экосистем) составляет 4,16 %. Такие 8 редких типов леса для данного арендованного участка, как пихтач широколиственный, кедровник мшистый и разнотравный, березняк вейниковый, осинник лабазниково-хвощевый, ивняк кустарниковый травяно-болотный и ивняк древовидный травяно-болотный и разнотравно-пойменный уже в полном объеме находятся в сети охраняемых участков, и дополнить их площадь до 1 % невозможно. Отмечено, что из 22 типов леса, которые присутствуют на арендованной территории, только 4 (18 %) являются нередкими. Учитывая, что в лесничестве встречаются 53 типа леса, собственно на самом лесном участке имеется 41 %.

Среди типов леса, не входящих в существующие охраняемые территории или представленных в них незначительно (менее 1 %), дополнительно выделены на лесном участке по договору аренды от 18.08.2014 г. № 94/14-д пихтач разнотравный (4 выдела – 4,0, 7,1 4,9 и 17,1 га), березняк широколиственный (1 выдел – 28,7 га) и травяно-болотный (3 выдела – 13,4, 4,6 и 1,8 га), осинник разнотравный (1 выдел – 36,0 га) и широколиственный (2 выдела – 18,9 и 9,6 га). Общая относительная площадь 15 выделов (5 типов лесных экосистем) составляет 3,79 %. Такие 4 редких типа леса для данного арендованного участка, как лиственнично-разнотравный, кедровник разнотравный, пихтач широколиственный и ивняк кустарниковый разнотравно-пойменный уже в полном объеме находятся в сети охраняемых участков, и дополнить их площадь до 1 % невозможно. Отмечено, что из 11 типов леса, которые присутствуют на арендованной территории, только 2 (18 %) являются нередкими. Учитывая, что в лесничестве встречаются 53 типа леса, собственно на самом лесном участке имеется 21 %.

Природопользование

Таблица 1

Схема типов леса для Чебулинского лесничества Кемеровской области

Шифр	Типы леса	С	Е	П	Л	К	Б	Ос	Лп	Осок	Т	Ив	Об
Лш	Лишайниковый	+											
Мл	Мшисто-лишайниковый				+								
Мш	Мшистый	+		+									
Мя	Мшисто-ягодный	+											
Ск	Сухокустарниковый	+											
Ямш	Ягодно-мшистый				+	+							
Рг	Разнотравный	+		+	+	+	+						
Шт	Широкотравный	+		+	+	+		+					
Пп	Папоротниковый	+		+		+		+					
Кр	Кустарниково-разнотравный	+	+	+	+		+						
Кш	Кустарниково-широкотравный			+		+			+				
Кп	Кустарниково-папоротниковый			+		+			+				
Тб	Травяно-болотный		+			+							
В	Вейниковый				+	+	+						
Лбп	Лабазниково-пойменный				+								
Лбхв	Лабазниково-хвощевый							+					
Ртп	Разнотравно-пойменный									+	+	+	+

Примечание: С – сосна, Е – ель, П – пихта, Л – лиственница, К – кедр, Б – береза, Ос – осина, Лп – липа, Осок – осокора, Т – тополь, Ив – ива, Об – облепиха

*по данным лесохозяйственного регламента Чебулинского лесничества Кемеровской области [2]

Таблица 2

Представленность типов леса в пределах всего участка (числитель) и в пределах защитных лесов, ОЗУ и ЛВПЦ (знаменатель) по договору аренды № 84/12-д от 08.08.2012 г. (%)

Шифр	Типы леса	С	Е	П	Л	К	Б	Ос	Лп	Осок	Т	Ивк	Ивд	Об
Лш	Лишайниковый	0												
Мл	Мшисто-лишайниковый				0									
Мш	Мшистый	0		$\frac{0,75}{0,24}$		$\frac{0,67}{0,67}$								
Мя	Мшисто-ягодный	0												
Ск	Сухокустарниковый	0												
Ямш	Ягодно-мшистый				0	0								
Рг	Разнотравный	$\frac{0,44}{0,00}$		$\frac{18,38}{1,83}$	0	$\frac{0,60}{0,60}$	$\frac{16,34}{2,35}$	$\frac{23,70}{5,53}$						
Шт	Широкотравный	0	$\frac{0,02}{0,00}$	$\frac{0,69}{0,69}$	0	0	$\frac{3,82}{0,00}$	$\frac{26,87}{1,27}$						
Пп	Папоротниковый	0		0		0		$\frac{0,38}{0,00}$						
Кр	Кустарниково-разнотравный	0	$\frac{0,47}{0,32}$	$\frac{2,60}{0,92}$	0		$\frac{0,69}{0,21}$	$\frac{0,70}{0,00}$						
Кш	Кустарниково-широкотравный			0		0			0					
Кп	Кустарниково-папоротниковый			0		0			0					
Тб	Травяно-болотный		0			0	$\frac{0,53}{0,09}$					$\frac{0,60}{0,60}$	$\frac{0,14}{0,14}$	
В	Вейниковый				0	0	$\frac{0,06}{0,06}$							
Лбп	Лабазниково-пойменный				0									
Лбхв	Лабазниково-хвощевый							$\frac{0,38}{0,38}$						
Ртп	Разнотравно-пойменный									0	0	0	$\frac{0,10}{0,10}$	0

*по собственным данным

Природопользование

Таблица 3

Представленность типов леса в пределах всего участка (числитель) и в пределах защитных лесов, ОЗУ и ЛВПЦ (знаменатель) по договору аренды № 94/14-д от 18.08.2014 г. (%)

Типы леса	С	Е	П	Л	К	Б	Ос	Лп	Осок	Т	Ивк	Ивд	Об
Лишайниковый	0												
Мшисто-лишайниковый				0									
Мшистый	0		0		0								
Мшисто-ягодный	0												
Сухокустарниковый	0												
Ягодно-мшистый				0	0								
Разнотравный	$\frac{14,52}{1,50}$		$\frac{1,11}{0,25}$	$\frac{0,70}{0,70}$	$\frac{0,01}{0,01}$	$\frac{60,96}{2,87}$	$\frac{12,54}{0,16}$						
Широкотравный	0	0	$\frac{0,10}{0,10}$	0	0	$\frac{4,57}{0,26}$	$\frac{4,70}{0,36}$						
Папоротниковый	0		0		0		0						
Кустарниково-разнотравный	0	0	0	0		0	0						
Кустарниково-широкотравный			0		0			0					
Кустарниково-папоротниковый			0		0			0					
Травяно-болотный		0			0	$\frac{0,62}{0,12}$					0	0	
Вейниковый				0	0	0							
Лабазниково-пойменный				0									
Лабазниково-хвощевый							0						
Разнотравно-пойменный									0	0	$\frac{0,10}{0,10}$		0

*по собственным данным

Обсуждая полученные результаты, стоит отметить, что большая часть типов леса являются лиственными (73 % по договору № 84/12-д и 83 % по договору № 94/14-д), которые принято считать вторичными экосистемами, за исключением, пожалуй, ивняков, приуроченных к пойменным условиям произрастания. Также к явно вторичным нельзя отнести березняки и осинники на полугидроморфных почвах. Остаются только березовые и осино-вые насаждения разнотравных, широколиственных и кустарниково-разнотравных типов леса. Однако, как указывал еще Г.В. Крылов [1], в южной тайге нельзя все мягколиственные насаждения на плакорных участках относить к производным, среди них встречаются и коренные типы леса. В этой связи, руководствуясь принципом предосторожности, следует выделять все типы лесов вне зависимости от преобладающей породы в сеть репрезентативных участков и при полевой верификации плакорные монодоминантные лиственные насаждения с простой формой, со следами лесозаготовительной деятельности исключать из перечня репрезентативных

участков. Особенно надо учитывать, что масштабная вырубка лесов в Сибири началась в большинстве регионов непосредственно перед Великой Отечественной войной, т. е. менее 100 лет назад. Поэтому перестойные осинники и березняки, как правило, образовались не в результате рубок, а после пожаров, всплеск размножения вредителей (как правило, сибирского шелкопряда), т. е. вследствие естественной динамики.

Для сравнения в Швеции около 75 % добровольно охраняемых участков представлено лесами старше 100 лет [16], преимущественно (95 %) хвойных пород.

Возвращаясь к теме размеров добровольно охраняемых участков, следует отметить, что сравнительный анализ на Северо-Западе России и в Швеции показал их сопоставимость [9]. Масштабное исследование, проведенное на 7 млн га лесов в Швеции, показало [19], что защитные леса и добровольно сохраняемые участки занимали по 0,6 млн га, или по 8,6 %. Но «voluntary set-asides» были более многочисленными, особенно для раз-

меров меньше 10 га. Этот анализ показал, что добровольно выделяемые участки являются важным дополнением к системе защитных лесов.

С другой стороны, в Латвии (интенсивно- и староосвоенный регион), например, из общих 18,6 % площади охраняемых лесов [10] только 4,9 % приходится на добровольно сохраняемые (т.е. репрезентативные участки и ЛВПЦ). При этом лишь 9,4 % от площади этих лесов представлено старовозрастными насаждениями. Зачастую к добровольно сохраняемым участкам относят низкопродуктивные насаждения. Большая часть добровольных участков имеет площадь менее 1 га, т.е. это ключевые биотопы, оставляемые на лесах при рубке.

В целом же существует общее мнение, что размер репрезентативного участка является более важным в долгосрочной перспективе, чем пространственная ландшафтная конфигурация большого количества маленьких участков [11]. Но сохранение небольших участков среды обитания может обеспечить функцию охраны для некоторых редких и находящихся под угрозой исчезновения видов, однако выживание их популяций в долгосрочной перспективе неопределенно [14].

Как известно, FSC International разработало Единые международные индикаторы [13], на основе которых должны быть разработаны новые стандарты лесопользования для всех стран. Россия еще завершает этот процесс, в то время как ряд других государств уже утвердили свои национальные стандарты. Очень важно понимать, как в разных странах: с разным политическим строем, менталитетом, историей освоения лесов, интенсивностью лесопользования, уровнем ведения лесного хозяйства и природными условиями – подходят к выделению репрезентативных участков лесных экосистем. Для такого сравнительного анализа были выбраны 6 стран: Великобритания, Румыния, Япония, Германия, Швейцария и Канада.

Согласно приведенному определению термина в стандарте для Великобритании [24], под репрезентативными участками подразумеваются все-таки коренные экосистемы. В критерии 6.5 не идет речь об эталонных экосистемах. В индикаторах, конкретизирующих требования критерия,

указано, что если нет репрезентативных участков коренных экосистем, то нужно приложить усилия, чтобы они появились, т.е. подразумевается включение вторичных экосистем в сеть охраняемых участков. В индикаторе 6.5.1. сказано, что минимальная площадь всех типов охраняемых участков должна быть не менее 15 % от площади лесного управляемого участка, а на репрезентативные участки должно приходиться не менее 5 %.

Пороговые значения площади репрезентативных участков в Германии приведены более дифференцировано [23], в частности в государственных лесах не менее 10 %, в муниципальных с площадью лесных управляемых участков более 1000 га – не менее 5 %. А вот в муниципальных лесах меньшей площади, а также частных лесах только предпринимаются усилия в случае получения финансовой компенсации от третьих лиц. По возможности, репрезентативные участки должны иметь площадь более 25 га (минимальный размер 0,3 га). В них разрешается только охота. В случае отсутствия коренных типов леса требуется включение производных, имеющих потенциал восстановления до более естественного состояния, т.е. трансформация в коренные леса.

Япония в своем стандарте также установила [20], что в сеть охраняемых участков «The conservation areas network» должно быть включено 10 % всех типов ЛВПЦ, включая и репрезентативные участки. В случае отсутствия коренных типов леса следует сохранять производные насаждения, которые могут восстановиться до коренных. Причем можно включать не только производные молодняки, но и лесные культуры, которые зарастают естественным образом.

В стандарте Румынии [21] приводятся те же 10 % доли репрезентативных участков, которые, где это возможно, должны иметь минимальную площадь не менее 25 га. Отличием румынского стандарта является наличие специального приложения F «Representative Areas level», где применена концепция МИР (масштаб, интенсивность, риск). По интенсивности выделено 3 градации (низкая – более 70 % лесов естественного происхождения, средняя – 30-70 %, высокая – менее 30 %), по размерам также выделено 3 градации: 100-10 000,

10 000-50 000 и более 50 000 га. Например, при высокой степени воздействия в сеть репрезентативных экосистем уже должно входить не 10 %, а от 11 до 12% в зависимости от площади арендованного участка.

Швейцария также указала [22], что минимальная площадь репрезентативных участков (коренных типов леса) не должна быть меньше 10 %, уточнив, что на 5 % исключена любая хозяйственная деятельность, т. е. соблюдается режим заповедника. Размер репрезентативных участков должен быть по возможности не менее 20 га.

Интересен подход Канады [12], которая в государственных лесах прописала возможность включения только коренных типов леса в качестве репрезентативных участков, а для частных лесов предусмотрена опция выделять в данном качестве и вторичные насаждения. При этом в первом случае запрещается всякая лесохозяйственная деятельность, а в частных лесах во вторичных экосистемах, выделенных как репрезентативные участки, допускается ведение лесного хозяйства при условии сохранения экологических и культурных качеств. Еще одной отличительной особенностью канадского стандарта является введение института экспертов. Подразумевается, что именно экспертная оценка, проводимая одним или несколькими экспертами, должна выделить репрезентативные участки на площади не менее 10 %. Более того, предусматривается возможность проведения лесозаготовок и строительства дорог внутри репрезентативных участков, когда это подтверждено мнением независимого эксперта в случае необходимости для достижения целей, связанных с восстановлением участка до более естественного состояния. Также прописано, что анализ репрезентативности проводится периодически, но не реже одного раза в пять лет и обновляется, если необходимо, исходя из наличия новой информации.

Теперь, когда мы рассмотрели основные требования, применяемые к количественным и качественным параметрам репрезентативных участков в других странах, можно провести сравнительный анализ с теми положениями по данному вопросу, которые предусмотрены проектом стандарта лесоправления FSC для России.

В проекте национального стандарта России [4] по-прежнему употребляется термин «репрезентативные (эталонные) участки», который подразумевает синонимичность репрезентативности и эталонности. В то время как это не так. В практике лесоустройства иногда выделяют насаждения-эталонные, которые ближе к «Эталонным лесам» В.С. Чуенкова и К.Б. Лосицкого [3]. Подобные насаждения В.Н. Сукачев называл «выработавшимися» [5], т. е. коренными в квазиклиматической стадии развития. Единые международные индикаторы FSC содержат термин «Representative Sample Areas» [13], который правильно переводить как «репрезентативные участки». Безусловно, отдельное слово «Sample» в некоторых случаях может иметь значение «образец», которое близко к понятию «эталон». Но в данном контексте оно привязано к слову «Areas». Т. е. налицо ошибка перевода, который выполнен дословно, без учета семантики английского языка. Отличие нового стандарта в том, что он уже допускает в случае отсутствия репрезентативных участков восстановление лесных экосистем до более естественного состояния. Однако поясняется, что на практике такие участки могут выделяться из числа приспевающих, средневозрастных насаждений, молодняков, представленных местными породами, включая коренные лесообразующие виды деревьев, с учетом возможной смены пород. Т. е. хоть явно не указано, но вторичные насаждения могут быть включены в сеть репрезентативных участков.

В проекте стандарта также четко указано, что под типом лесных экосистем однозначно понимается тип леса. Размер репрезентативных участков же, в отличие от аналогичных требований в других странах, не регламентируется, лишь декларируется, что предпочтение должно отдаваться наиболее крупным участкам. Общая площадь всех типов охраняемых участков должна составлять не менее 10 %. Проект стандарта предусматривает необходимость проведения консультаций с местными экспертами, однако нет такой конкретики и четкого механизма взаимодействия лесных компаний и экспертов, как в Канаде.

Заключение

Выделение репрезентативных участков лесных экосистем является необходимым условием при сертификации FSC. Разработанный нами алгоритм позволяет дополнить существующую сеть охраняемых участков, состоящую из защитных лесов и особо защитных участков эксплуатационных лесов, репрезентативными лесными экосистемами. Исследования показали, что вне зависимости от истории лесопользования на конкретном участке, в существующие защитные леса и ОЗУ включают далеко не все типы леса. Около 45 % типов леса, встречающихся в арендованных лесах, представлены менее 1 % в сети охраняемых участков. Сравнительный анализ положений проекта национального

стандарта лесопользования с утверждёнными стандартами ряда стран показал, что подходы и требования к выделению репрезентативных участков различаются. В целом российские требования более размыты и неконкретны. Как минимум, следует отказаться от словосочетания «репрезентативные (эталонные) участки», ввести конкретную минимальную площадь участков (например, не менее 10 га), однозначно прописать возможность сохранения в качестве репрезентативных участков экосистем вторичных типов леса и указать, что на них должно приходиться не менее 5 % арендованной площади с полным запретом лесохозяйственной деятельности.

Библиографический список

1. Крылов, Г. В. Леса Западной Сибири / Г. В. Крылов ; Академия наук СССР. – М., 1961. – 256 с. – Библиогр.: с. 246–254.
2. Лесохозяйственный регламент Чебулинского лесничества Кемеровской области [утв. приказом Департамента лесного комплекса Кемеровской области 13 июня 2019 года]. – Кемерово, 2019. – 244 с. – Библиогр.: с. 204–211.
3. Лосицкий, К. Б. Эталонные леса / К. Б. Лосицкий, В. С. Чуенков. – Москва : Лесн. пром-сть, 1973. – 160 с. – Библиогр.: с. 154–160.
4. Российский национальный стандарт FSC. FSC-STD-RUS-02-2019. [версия 7-0, проект 3-5 от 10 октября 2018 года]. – Москва, 2019. – 149 с. – Библиогр.: с. 103–105.
5. Сукачев, В. Н. Избранные труды. Основы лесной типологии и биогеоценологии / В. Н. Сукачев ; Академия наук СССР. – М, 1972. – 574 с. – Библиогр.: с. 394–406.
6. Forest plantations and the protection of native forests in certified management units in Brazil / R. R. Alves, J. Goncalves, A. Laercio, M. L. da Silva // Revista Arvore. – 2011. – Vol. 35, Issue 4. – P. 835–844. – References: p. 844–844 (13 names).
7. Araujo, M. Why Brazilian companies are certifying their forests? / M. Araujo, S. Kant, L. Couto // Forest Policy and Economics. – 2009. – Vol. 11, Issue 8. – P. 579–585. – References: p. 585–585 (57 names). – DOI 10.1016/j.forpol.2009.07.008.
8. Impacts of forest management certification in Argentina and Chile / F. Cabbage, D. Diaz, P. Yapura, F. Dube // Forest Policy and Economics. – 2010. – Vol. 12. – P. 497–504. – References: p. 504–504 (19 names). – DOI 10.1016/j.forpol.2010.06.004.
9. How does forest certification contribute to boreal biodiversity conservation? Standards and outcomes in Sweden and NW Russia / M. Elbakidze, P. Angelstam, K. Andersson, M. Nordberg, Y. Pautov // Forest Ecology and Management. – 2011. – Vol. 262. – P. 1983–1995. – References: p. 1994–1995 (102 names). – DOI 10.1016/j.foreco.2011.08.040.
10. The role of forest certification for biodiversity conservation: Lithuania as a case study / M. Elbakidze, R. Razauskaite, M. Michael [et al.] // European Journal of Forest Research. – 2016. – Vol. 135, Issue 2. – P. 361–376. – References: p. 375–376 (92 names). – DOI 10.1007/s10342-016-0940-4.

11. Fahrig, L. Effect of habitat fragmentation on the extinction threshold: a synthesis / L. Fahrig // *Ecological Applications*. – 2002. – Vol. 12. – P. 346–353. – References: p. 352–353 (40 names). – DOI 10.1890/1051-0761(2002)012[0346:EOHFOT]2.0.CO;2.
12. FSC National Forest Stewardship Standard of Canada. FSC-STD-CAN-01-2018 EN : official version: effective date 2020.01.01. – Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2018. – 161 p.
13. International Generic Indicators. FSC-STD-60-004 V1-0 EN : official version: effective date 2015.09.01. – Bonn : FSC Board of Directors, 2015. – 85 p.
14. Environmental considerations from legislation and certification in managed forest stands: A review of their importance for biodiversity / T. Johansson, J. Hjalten, J. de Jong, H. von Stedingk // *Forest Ecology and Management*. – 2013. – Vol. 303. – P. 98–112. – References: p. 108–112 (260 names). – DOI 10.1016/j.foreco.2013.04.012.
15. Miteva, D. A. Social and environmental impacts of forest management certification in Indonesia / D. A. Miteva, C. J. Loucks, S. K. Pattanayak // *PLoS ONE*. – 2015. – Vol. 10, Issue 7. – article no. e0129675. – References: p. 15–18 (65 names). – DOI 10.1371/journal.pone.0129675.
16. Relative contributions of set-asides and tree retention to the long-term availability of key forest biodiversity structures at the landscape scale / J.-M. Roberge, T. Lamas, T. Lundmark [et al.] // *Journal of Environmental Management*. – 2015. – Vol. 154. – P. 284–292. – References: p. 291–292 (58 names). – DOI 10.1016/j.jenvman.2015.02.040.
17. Russia Natural and Plantations EN. FSC-STD-RUS-V6-1-2012 : official version: effective date 2008.11.11. – Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2008. – 198 p.
18. Schlyter, P. Not seeing the forest for the trees? The environmental effectiveness of forest certification in Sweden / P. Schlyter, I. Stjernquist, K. Backstrand // *Forest Policy and Economics*. – 2009. – Vol. 11. – P. 375–382. – References: p. 382–382 (59 names). – DOI 10.1016/j.forpol.2008.11.005.
19. Simonsson, P. Conservation values of certified-driven voluntary forest set-asides / P. Simonsson, L. Ostlund, L. Gustafsson // *Forest Ecology and Management*. – 2016. – Vol. 375. – P. 249–258. – References: p. 257–258 (72 names). – DOI 10.1016/j.foreco.2016.05.039.
20. The FSC National Forest Stewardship Standard of Japan. FSC-STD-JPN-01-2018 V 1-0 : official version: effective date 2019.02.15. – Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2018. – 85 p.
21. The FSC National Forest Stewardship Standard of Romania. FSC-STD-ROU-01-2017 EN : official version: effective date 2019.04.15. – Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2017. – 173 p.
22. The FSC National Forest Stewardship Standard of Swiss Confederation (and Principality of Liechtenstein). FSC-STD-CHE-01-2018 : official version: effective date 2019.09.01. – Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2018. – 60 p.
23. The FSC National Forest Stewardship Standard of the Federal Republic of Germany. FSC-STD-DEU-03-2017 EN Germany all forest types and sizes : official version: effective date 2018.06.01. – Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2017. – 85 p.
24. The FSC National Forest Stewardship Standard of the United Kingdom. FSC-STD-GBR-03-2017 V1-0 EN UK all forest types and scales : official version: effective date 2018.04.01. – Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2017. – 188 p.

References

1. Krylov G.V. *Lesy Zapadnoj Sibiri* [The forests of Western Siberia]. Moscow: Akademiya nauk SSSR, 1961. 256 p. (in Russian).
2. *Lesohozyajstvennyj reglament Chebulinskogo lesnichestva Kemerovskoj oblasti*. [Forestry regulations of Chebulinsky forest district of the Kemerovo region]. Kemerovo, 2019. 244 p. (in Russian).

3. Losickij K. B., Chuenkov V. S. *Etalonnye lesa* [The indigenous forests]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1973. 160 p. (in Russian).
4. *Rossiiskij nacional'nyj standart FSC. FSC-STD-RUS-02-2019*. [The project of the Russian national standard FSC]. Moscow, 2019. – 149 p. (in Russian).
5. Sukachev V. N. *Izbrannye trudy. Osnovy lesnoj tipologii i biogeocenologii* [The selected works. Fundamentals of forest typology and biogeocenology]. Moscow: Akademiya nauk SSSR, 1972. 574 p. (in Russian).
6. Alves R. R., Goncalves J., Laercio A., da Silva M. L. (2011) Forest plantations and the protection of native forests in certified management units in Brazil. *Revista Arvore*, Vol. 35, Issue 4, pp. 859-866.
7. Araujo M., Kant S., Couto L. (2009) Why Brazilian companies are certifying their forests? *Forest Policy and Economics*, Vol. 11, Issue 8, pp. 579-585. doi 10.1016/j.forpol.2009.07.008.
8. Cubbage F., Diaz D., Yapura P., Dube F. (2010) Impacts of forest management certification in Argentina and Chile. *Forest Policy and Economics*, Vol. 12, pp. 497-504. doi 10.1016/j.forpol.2010.06.004.
9. Elbakidze M., Angelstam P., Andersson K., Nordberg M., Pautov Y. (2011) How does forest certification contribute to boreal biodiversity conservation? Standards and outcomes in Sweden and NW Russia. *Forest Ecology and Management*, Vol. 262, pp. 1983-1995. doi 10.1016/j.foreco.2011.08.040.
10. Elbakidze M., Rauskaite R., Michael M. et al. (2016) The role of forest certification for biodiversity conservation: Lithuania as a case study. *European Journal of Forest Research*, Vol. 135, Issue 2, pp. 361-376. DOI 10.1007/s10342-016-0940-4.
11. Fahrig L. (2002) Effect of habitat fragmentation on the extinction threshold: a synthesis. *Ecological Applications*, Vol. 12, pp. 346-353. doi 10.1890/1051-0761(2002)012[0346:EOHFOT]2.0.CO;2.
12. FSC National Forest Stewardship Standard of Canada. FSC-STD-CAN-01-2018 EN : official version: effective date 2020.01.01. Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2018. 161 p.
13. International Generic Indicators. FSC-STD-60-004 V1-0 EN : official version: effective date 2015.09.01. Bonn : FSC Board of Directors, 2015. 85 p.
14. Johansson T., Hjalten J., de Jong J., von Stedingk H. (2013) Environmental considerations from legislation and certification in managed forest stands: A review of their importance for biodiversity. *Forest Ecology and Management*, Vol. 303, pp. 98-112. doi 10.1016/j.foreco.2013.04.012.
15. Miteva D. A., Loucks C. J., Pattanayak S. K. (2015) Social and environmental impacts of forest management certification in Indonesia. *PLoS ONE*, Vol. 10, Issue 7, article no. e0129675. doi 10.1371/journal.pone.
16. Roberge J.-M., Lamas T., Lundmark T. et al. (2015) Relative contributions of set-asides and tree retention to the long-term availability of key forest biodiversity structures at the landscape scale. *Journal of Environmental Management*, Vol. 154, pp. 284-292. doi 10.1016/j.jenvman.2015.02.040.
17. Russia Natural and Plantations EN. FSC-STD-RUS-V6-1-2012 : official version: effective date 2008.11.11. Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2008. 198 p.
18. Schlyter P., Stjernquist I., Backstrand K. (2009) Not seeing the forest for the trees? The environmental effectiveness of forest certification in Sweden. *Forest Policy and Economics*, Vol. 11, pp. 375-382. DOI 10.1016/j.forpol.2008.11.005.
19. Simonsson P., Ostlund L., Gustafsson L. (2016) Conservation values of certified-driven voluntary forest set-asides. *Forest Ecology and Management*, Vol. 375, pp. 249-258. doi 10.1016/j.foreco.2016.05.039.
20. The FSC National Forest Stewardship Standard of Japan. FSC-STD-JPN-01-2018 V 1-0 : official version: effective date 2019.02.15. Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2018. 85 p.
21. The FSC National Forest Stewardship Standard of Romania. FSC-STD-ROU-01-2017 EN : official version: effective date 2019.04.15. Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2017. 173 p.
22. The FSC National Forest Stewardship Standard of Swiss Confederation (and Principality of Liechtenstein). FSC-STD-CHE-01-2018 : official version: effective date 2019.09.01. Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2018. 60 p.

23. The FSC National Forest Stewardship Standard of the Federal Republic of Germany. FSC-STD-DEU-03-2017 EN Germany all forest types and sizes : official version: effective date 2018.06.01. Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2017. 85 p.

24. The FSC National Forest Stewardship Standard of the United Kingdom. FSC-STD-GBR-03-2017 V1-0 EN UK all forest types and scales : official version: effective date 2018.04.01. Bonn : FSC Policy and Standards Committee, 2017. 188 p.

Сведения об авторе

Дебков Никита Михайлович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории мониторинга лесных экосистем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Российская Федерация; e-mail: nikitadebkov@yandex.ru.

Information about the author

Debkov Nikita Mikhailovich – PhD (Agriculture), senior researcher of the laboratory of monitoring of forest ecosystems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS, Tomsk, Russian Federation; e-mail: nikitadebkov@yandex.ru.

ИСПЫТАНИЯ ОГNETУШАЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГИДРОГЕЛЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ ТУШЕНИИ МОДЕЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ НИЗОВЫХ ПОЖАРОВ

аспирант **О.А. Ивченко**

кандидат химических наук, доцент **К.Е. Панкин**

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова»,
г. Саратов, Российская Федерация

Тушение природных пожаров во многом зависит от эффективного применения пожарными огнетушащих средств. Тем не менее, существуют объективные пределы огнетушащей способности известных веществ и материалов, преодолеть которые нельзя ни тактическими, ни технологическими приемами. В работе предложен способ тушения низовых пожаров с применением в качестве огнетушащих составов гидрогелей алюминия с различной концентрацией, позволяющий реализовать одновременно три способа тушения: охлаждение, изоляцию и ингибирование горения. Исследования огнетушащей способности выбранных огнетушащих составов проводили по специально разработанной методике, имитирующей образование и развитие низового природного пожара на опытных участках. Эффективность тушения оценивалась путем сравнения результатов суммарных расходов огнетушащих средств к единице длины кромки пожара и единице площади пожара. Показано, что наилучшей огнетушащей способностью обладает водный раствор гидрогеля алюминия с концентрацией 3.5-7 г/л. Исследована огнетушащая способность гидрогелей алюминия, и полученные результаты были сравнены с огнетушащей способностью воды и водными растворами карбоната натрия (сода) и сульфата натрия. Серьезного вклада в огнетушение применение других водных растворов (сода и сульфата натрия) не выявлено, поэтому огнетушащий эффект полностью обусловлен химическим составом и физико-химическими свойствами гидрогеля алюминия. На основании полученных данных определены расходы гидрогеля алюминия на единицу длины и площади пожара, наименьшая его концентрация, сохраняющая огнетушащий эффект, и технологические условия его получения и применения.

Ключевые слова: лесные пожары, низовые пожары, тушение пожаров, гидрогель алюминия

TESTS OF FIRE EXTINGUISHING ABILITY OF ALUMINUM HYDROGEL WHEN EXTINGUISHING MODEL NATURAL GROUND FIRES

post-graduate student **O.A. Ivchenko**

PhD (Chemistry), Associate Professor **K.E. Pankin**

FSBEI HE "Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov", Saratov, Russian Federation

Abstract

Extinguishing natural fires largely depends on the effective use of fire extinguishers by firefighters. Nevertheless, there are objective limits to the fire extinguishing ability of known substances and materials, which cannot be overcome by either tactical or technological methods. In the work, a method for extinguishing ground fires using aluminum hydrogels with different concentrations as fire extinguishing compositions is proposed, which makes it possible to simultaneously realize three extinguishing methods: cooling, insulation, and combustion inhibition. Investigation of fire extinguishing ability of the selected fire extinguishing compositions has been carried out according to a specially developed technique that simulates formation and development of ground natural fire in experimental plots. Extinguishing efficiency was assessed by comparing the results of the total cost of extinguishing agents to a unit of length of the edge

of the fire and a unit of area of the fire. It was shown that the best fire extinguishing ability has an aqueous solution of aluminum hydrogel with a concentration of 3.5-7 g/l. Fire extinguishing ability of aluminum hydrogels was investigated. The obtained results were compared with the fire extinguishing ability of water and aqueous solutions of sodium carbonate (soda) and sodium sulfate. The use of other aqueous solutions (soda and sodium sulfate) has not shown significant contribution to fire extinguishing. Therefore, fire extinguishing effect is completely due to the chemical composition and physical and chemical properties of aluminum hydrogel. Based on the data obtained, aluminum hydrogel costs per unit length and area of the fire, its lowest concentration, which retains the fire extinguishing effect and the technological conditions for its preparation and use, have been determined.

Keywords: forest fires, ground fires, fire extinguishing, aluminum hydrogel

Введение

Тушение лесных пожаров имеет важную народно-хозяйственную задачу, цель которой заключается в сохранении видового разнообразия лесных ценозов, экологической функции лесных массивов, древесных ресурсов и недревесных продуктов леса, а также сложившихся экосистем для лесовоспроизводства. Лесной массив представляет собой громадный запас разнообразных горючих материалов, накапливающихся в нем по мере его роста и развития. Изменение климата – его постепенное потепление, а также интенсивное ведение хозяйственной деятельности в лесных массивах приводит к возникновению и распространению лесных пожаров. Профилактические меры борьбы с лесными пожарами часто являются неэффективными из-за большой протяженности лесных массивов, малых объемов проводимых мероприятий, что, в конечном итоге, приводит к неспособности комплекса проведенных мероприятий снизить пожарную опасность, уменьшить вероятность возникновения пожара, эффективно препятствовать его распространению, создавать возможность его своевременного обнаружения.

Тушение лесного пожара – это проведение комплекса мероприятий по прекращению горения лесных горючих материалов (ЛГМ). Для этого формируются специальные подразделения по тушению лесных пожаров, накапливаются и расходуются материальные средства для тушения – чаще всего вода, которую доставляют и подают в зону горения или проводят обводнение территории при тушении пожаров на торфяниках [1, 2]. Применение других огнетушащих составов (огнетушащие порошки, грунт и т.п.) при тушении природных пожаров либо крайне ограничено (только с целью

исследования [3]), либо затруднительно по техническим и технологическим причинам [4].

Каждый огнетушащий состав (ОС) обладает своими объективными пределами по огнетушащей способности, которые необходимо учитывать для определения достаточности его подачи в зону горения. Эффективность применения ОС зависит от того, какое минимальное количество огнетушащего вещества объективно необходимо для прекращения горения, в случае низового лесного пожара это количество (масса в кг) должно быть отнесено к площади или к длине кромки. Ввиду отсутствия опубликованных в научнотехнической литературе систематических работ в данном направлении оценка эффективности тушения природных пожаров представляет собой серьезную научно-техническую задачу, решение которой не найдено до сих пор. Методологические трудности настолько очевидны, насколько трудны в определении. Лесной пожар фактически не обладает площадью из-за постоянного перемещения кромки пожара в пространстве, а ширина кромки по мере развития пожара ничтожно мала по сравнению с площадью, пройденной пожаром. Поэтому с объективной точки зрения пожар не может измеряться площадью, этот параметр может быть отнесен только к описанию последствий пожара – площадь горельника, площадь, пострадавшая от пожара и т.п. Второй параметр – длина кромки пожара – также является довольно условной величиной, т.к. непосредственное горение происходит на некоторой площади, определяя кроме длины кромки еще и ее ширину. Ширина кромки низового пожара определяется несколькими условиями (массой ЛГМ на единице площади лесной почвы, равномерностью распределения

ЛГМ по поверхности почвы, влажностью ЛГМ, типом ЛГМ, скоростью ветра в приземном слое атмосферы и т.п.), а фактически является суперпозицией двух параметров: скорости выгорания ЛГМ и скорости перемещения фронта пламени по слою ЛГМ на поверхности почвы. Из этого следует, что ширина кромки (определяющая непосредственную площадь горения) будет строго индивидуальна для данной местности и данных погодных условий. Осознавая эти трудности, авторы работы [5] ограничились не теоретической оценкой массовой характеристики расхода ОС, а интенсивностью – параметром, определяющим массовую (объемную) скорость подачи огнетушащего состава в зону горения (на единицу его площади).

Еще одной проблемой, с которой сталкивается исследователь при оценке эффективности пожаротушения, является контроль прекращения горения, который является индикатором достаточности противопожарных мероприятий. Тушение пожара обязано проводиться до полного прекращения взаимодействия горючего вещества и окислителя. До сих пор остается неясным, как определить момент прекращения горения? В случае природного пожара доступно только визуальное определение. Наиболее заметно прекращение горения по исчезновению пламени, однако при этом горение может перейти в беспламенный режим, определить который можно по выделению дыма – смеси продуктов и полупродуктов горения. Поэтому при тушении низовых пожаров обязательны процедуры окарауливания и дотушивания участков, на которых высока вероятность повторного возникновения пламенного горения как наиболее интенсивной формы природного пожара. Таким образом, окончание горения можно определить по прекращению выделения дыма. Тем не менее, такой способ пригоден для лабораторных исследований, но обладает значительными трудностями при реальном тушении низовых пожаров. Именно поэтому при планировании мероприятий по тушению пожара в расчет необходимого количества огнетушащего состава вводится специальный параметр – коэффициент запаса ОС. Но введение данного коэффициента значительно

снижает точность определения расхода ОС (т. к. его значение чаще всего составляет 3 и более), и его учет переводит исследования в данной области из количественного в качественные. Скорость подачи ОС в зону горения также будет вносить свои коррективы в учет расхода ОС на тушение, т. к. контроль прекращения горения осуществляется визуально оператором, то и прекращение подачи огнетушащего вещества осуществляется именно им. Таким образом, прекращение пожаротушения всегда будет по времени дольше самого горения и, тем самым, количество ОС, поданное в зону горения, будет всегда больше необходимого. Следует учесть также, что чем больше скорость подачи ОС в зону горения, тем выше будет ошибка в определении эффективности, обусловленная его перерасходом, что никак не будет способствовать выявлению факторов, обеспечивающих снижение расхода ОС.

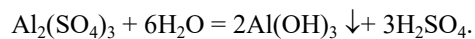
Следует отметить, что прекращение горения можно реализовать разными способами: *охлаждением, изоляцией, ингибированием и разбавлением* [6, 7]. Однако последние два способа пока не применяются в большом масштабе при тушении природных пожаров, и в научно-технической литературе пока отсутствуют крупные систематические исследования в данном направлении. При тушении природных пожаров чаще всего применяют первые два, для реализации которых применяют способ заливания кромки пожара водой и водными растворами поверхностно-активных веществ – смачивателей, а также засыпку грунтом вручную [1, 2] или с помощью грунтомета [4]. Все же есть определенная возможность реализации иных способов прекращения горения. К примеру, ингибирование возможно реализовать, добавляя в воду некоторые неорганические добавки: соли аммония, серной, фосфорной кислот, кремний-, магний-, бор-, железо-, цинк-, медь-, титан-содержащие вещества и т. п. [8-15]. Алюминийсодержащие препараты относятся к лидерам по применению в промышленных масштабах для производства антипиренов – веществ, подавляющих горение [15]. Применяя алюминийсодержащий препарат [16], удалось добиться снижения расхода ОС в 3-3,5 раза по сравнению с примене-

нием для тех же целей водопроводной воды. Таким образом, появляется возможность совместить в одной технологической операции тушения сразу три способа тушения: *охлаждение, изоляцию и ингибирование*, что должно, при прочих равных условиях, привести к снижению количественных характеристик расхода ОС.

Учитывая вышеописанное, для исследования огнетушащей способности веществ и материалов пригоден только метод сравнения количественных характеристик расхода исследуемых ОС с аналогичными параметрами для уже известных и применяемых на практике ОС. Поэтому целью данной работы явилось исследование огнетушащей способности гидрогелей алюминия (ГА) в полевых условиях и сравнение полученных значений их расхода с расходами на тушение водопроводной воды в аналогичных условиях.

Материалы и методы

ГА был получен путем растворения навески твердого вещества – сульфата алюминия в водопроводной воде. Данный способ отличается простотой применения и требует только двух компонентов: определенной массы сульфата алюминия и требуемого объема воды. При смешении этих компонентов образование ГА проходит согласно следующей схеме:



Сульфат алюминия – соль, образованная слабым основанием и сильной кислотой, поэтому ее гидролиз осуществляется по слабому основанию с образованием твердого гидроксида алюминия. Образование кристаллического гидроксида алюминия проходит через стадию образования коллоидного раствора – ГА. Коллоидный раствор неустойчив во времени и постепенно разрушается, формируя кристаллический гидроксид алюминия. Данный процесс можно контролировать визуально. Образование коллоида сопровождается потерей прозрачности раствора (его помутнением), что можно легко обнаружить, поместив раствор в прозрачный сосуд (стеклянную банку или пластиковую бутылку или контейнер). Восстановление прозрачности раствора с течением времени свидетельствует о разрушении коллоидного раствора и образовании твердого кристаллического

гидроксида алюминия, который начинает накапливаться на дне сосуда.

Навеску выбирали таким образом, чтобы получить минимальную концентрацию ГА при приемлемой огнетушащей эффективности в определенном ряду от 1.7, 3.5, 7, 14 и 28 г/л. Основанием выбора концентрации гидрогеля алюминия являлись результаты работы [16]. Для выявления эффективности тушения ГА результаты тушения сравнивали с тушением водопроводной водой в тех же условиях. В качестве объектов сравнения и для выявления природы огнетушащей способности были использованы дополнительно водные растворы карбоната натрия – соды (насыщенный раствор) и сульфата натрия (28 г/л).

Полевые исследования проводились в конце августа – начале сентября 2019 года на территории Саратовской области в условиях создания искусственного очага низового пожара. Местность была выбрана по результатам анализа погодных данных с отсутствием осадков в течение 45 дней. Влажность воздуха по истечении данного срока составила 22-24 %, температура воздуха в дневное время составила 24-30 °С, атмосферное давление близко к нормальному, скорость ветра в зависимости от времени суток варьировалась от полного штиля до 4-6 м/с. На открытых участках местности при порывах ветра наблюдалось пылеобразование, что косвенно свидетельствует о крайнем состоянии высушенности верхнего слоя почвы. Измерение температуры воздуха, его влажности и скорости ветра осуществлялось с помощью прибора Метеоскоп-М (ООО «НТМ-Защита», Россия). В качестве экспериментальных были выбраны участки почвы, заселенные разнотравьем. Для обеспечения устойчивого горения и формирования условий, близких к условиям устойчивого низового пожара, участки выбирались с равномерным травостоем с высотой 30-50 см. Участки местности размечали вешками, устанавливаемыми через равные расстояния 1 или 2 метра друг от друга для оценки скорости распространения пламени по участкам, определения ширины кромки пожара, высоты пламени, а также оценки равномерности распространения пламени (рис. 1). Размеры участков выбирались

таким образом, чтобы запаса ОС в ранцевом огнетушителе было заведомо больше, чем необходимо для его тушения. В целях соблюдения правил пожарной безопасности все участки были опаханы, т. е. по периметру всех участков создавалась минерализованная полоса шириной не менее 1,5 м, кроме этого при исследовании горения и тушения на месте проведения экспериментов всегда присутствовал дополнительный оператор тушения с ранцевым огнетушителем, заполненным водой, на случай экстренного тушения при потере контроля за процессом горения. Процесс исследования показал, что примененных мер пожарной безопасности было достаточно и оператор осуществлял только дополнительную проливку кромки пожара по завершении серии экспериментов в конце дня.

Поджог участков осуществлялся по направлению ветра с помощью аппарата зажигательного «Ермак» (Россия). На развитие горения отводили 10-20 с – время, достаточное, в данных условиях, для формирования устойчивого горения травяного покрова и образования кромки пожара. Тушение кромки пожара осуществлялось с применением ранцевого огнетушителя РП-15 (Ермак, Россия), который заполнялся исследуемым ОС. Выбор



Рис. 1. Участок исследования
(собственные фото авторов)

Проведение эксперимента в равных погодных и природных условиях, а также сравнение величин расхода различных ОС, отнесенных к площади и длине кромки, нивелирует все остальные различия. Тушение осуществлялось не менее трех раз (для каждого типа огнетушащего состава)

ранцевого огнетушителя был обусловлен малой скоростью подачи ОС, обеспечиваемой ручным поршневым насосом. Перекачка жидкого ОС в этом случае контролируется оператором, и появляется некоторая возможность более точного определения расхода ОС на тушение. Применить для аналогичных целей садовый опрыскиватель типа «Жук» ОП-209 не представилось возможным в связи с его малым расходом жидкости 0,6-0,8 л/мин [17], малой дальностью струи. Кроме этого, распылитель выполнен из пластмассовых деталей, которые могут быть повреждены теплотой, выделяемой при горении, и т. п. Для контроля расхода ОС и определения эффективности действия ОС ранцевый огнетушитель взвешивался на электронных весах – безмене до и после проведения эксперимента, и по разнице в массе определялся расход ОС на тушение. Для определения эффективности тушения различными ОС относили массу ОС к площади (и длине кромки) пожара. Для определения площади пожара проводили измерение длины и ширины сгоревшего участка, а затем для учета отклонения его формы от прямоугольной применяли модель эллипса, по полуосям которого рассчитывали его площадь и длину.



Рис. 2. Гидрогель алюминия
(собственные фото авторов)

для исключения грубых промахов и расчета коридора ошибок. Скорость распространения пламени по исследуемому участку определяли по изучению видеозаписи процесса образования и распространения изучаемого низового пожара, путем засечки времени преодоления им

размеченного вешками участка. Высоту пламени определяли по высоте обгоревшего поверхностного слоя установленных на участках вешек.

Результаты и обсуждение

Для точного определения пригодности гидрогеля алюминия в качестве ОС для применения его при тушении реального природного пожара необходимо выявить устойчивость во времени его водного раствора. Непосредственное визуальное наблюдение состояния ГА в ранцевом огнетушителе невозможно, поэтому проще экспериментально определить время потери мутности раствора и учитывать его в дальнейшем при работе с ГА. Сульфат алюминия обладает высокой растворимостью в воде – 342 г/л [18]. При помещении твердого сульфата алюминия в водопроводную воду в исследуемом диапазоне концентраций он растворяется при перемешивании очень быстро, в течение 10-30 секунд. По истечении данного времени наблюдается помутнение раствора (потеря прозрачности) – образование коллоидного раствора – ГА (рис. 2). Устойчивость коллоидного раствора с концентрациями сульфата алюминия в диапазоне 3,5-28 г/л составляла 40-50 минут при температуре 20-25 °С, к этому времени гидрогель полностью разрушался, твердый осадок гидроксида алюминия выпадал на дно сосуда, и эффективность его применения должна снижаться. Это время в дальнейшем учитывалось при проведении полевых испытаний, т. е. ГА подготавливался непосредственно перед осуществлением тушения, что в принципе является сходным при подготовке к процедуре тушения реального низового лесного пожара.

Из всех метеорологических условий на распространение пламени низового пожара больше всего влияет скорость ветра в приземном слое атмосферы. Исследования метеоусловий показали, что в дневное время в данной области наблюдается наличие ветра с различной скоростью. Минимальная скорость ветра наблюдалась в утренние и вечерние часы, в то время как к полудню ветровая обстановка становилась неустойчивой от полного штиля до кратковременных порывов 10-15 м/с. В среднем скорость ветра в дневные часы достигает 3-6 м/с. Такая скорость ветра в сочетании с низкой

влажностью воздуха способствует формированию благоприятных условий для возникновения и распространения низового пожара.

Для оценки эффективности тушения было проведено исследование горючих материалов, расположенных на площади предполагаемого модельного пожара. Для этого на участке на площади 0,8×0,9 м полностью удалялась растительность и растительные остатки, сохранившиеся с предыдущего сезона до обнажения минерального слоя почвы (рис. 3). Проведено исследование видового состава растительности: 80 % – пырей ползучий, 20 % – шалфей, полынь, василек, люцерна и т. п. Для определения массы горючих веществ, расположенных на единице площади исследуемого участка, удаленные растения и растительные остатки взвешивались на весах, и полученная масса пересчитывалась на 1 м² площади исследуемого участка. Данные, полученные с нескольких участков, не различались более чем на 50 %, поэтому значения усреднялись. Полученное распределение массы горючих материалов на площади составило в среднем 0,7-1,1 кг/м².

На первом этапе было проведено исследование горения участка местности для определения ширины кромки пожара и высоты образуемого ЛГМ пламени (рис. 4). Данная информация необходима для более точной оценки процесса горения, происходящего на данном участке, а также для оценки быстроты проведения эксперимента по тушению, для обеспечения максимально возможной точности в количественной оценке расхода ОС. Дело в том, что скорость распространения пламени при сложившихся погодных условиях может быть больше скорости тушения, из-за этого в процессе эксперимента кромка пламени достигнет границы участка быстрее, чем будет осуществлено ее тушение. В таком случае эксперимент необходимо будет признать неудачным и результаты его нельзя будет учесть для общей оценки эффективности применения ОС. Предварительные исследования показали, что в сложившихся погодных условиях ширина экспериментальных участков должна составлять не менее 5-10 метров.

Как было отмечено выше, ширина кромки пожара определяется отношением скорости горе-

ния материалов, накопленных на поверхности почвы, и скорости распространения пламени по слою горючего материала. Вторым параметром больше зависит от погодных условий, а именно от скорости ветра в данной местности и в данное время. Горение процесс скоротечный, поэтому ширину кромки пожара определяли по анализу видеозаписи процесса распространения пламени и определения времени достижения пламенем разметочных линий на участке. Исследования показали, что скорость распространения пламени составляет 3-3,5 м/мин для щиты, 5-6 м/мин для скорости ветра 3-6 м/с, порывы ветра свыше 10 м/с приводили к повышению скорости движения кромки, срыву пламени с горючего материала и тушению пожара. Таким образом, участок шириной 5 метров выгорает за 60-90 с при щиты, за 20-40 с при 3-6 м/с. При порывах ветра (более 10 м/с) в отдельных участках травостоя наблюдалось движение кромки пожара со скоростью 10-12 м/мин, а на отдельных участках происходил срыв пламени и ветровое тушение кромки низового пожара.



Рис. 3. Оценка запаса природных горючих материалов на выбранных экспериментальных участках (собственные фото авторов)

Тушение кромки пожара осуществлялось в два этапа: (1) подачей огнетушащего вещества в зону(ы) горения ручным способом до исчезновения пламенного горения. По мере тушения кромки пожара осуществлялся переход к следующему участку горения (вдоль кромки пожара) до полного подавления процесса пламенного горения; (2) проводилось наблюдение за выделением дыма на экспе-

Несмотря на выбор участков для исследования горения и огнетушения с равномерным травостоем, скорость горения в разных частях участка была различной, что обуславливало непрямолинейную форму кромки пожара, форма которой была далека от трапецевидной. В отдельных частях исследуемого участка скорость движения кромки пламени в 1,5-2 раза превышала среднюю скорость перемещения кромки. Свой вклад в непрямолинейность кромки пожара осуществляет и процесс поджига с помощью аппарата зажигательного («Ермак», Россия), применение которого не в состоянии обеспечить равномерный поджиг сразу всей стороны исследуемого участка. Высота пламени, формируемая при горении ЛГМ, согласно измерению высоты обгоревшего слоя на вешках составила 0,35-0,5 м. Тем не менее, данный параметр довольно условный, т. к. высота пламени в значительной степени зависит от скорости ветра, что на открытой местности является решающим фактором.



Рис. 4. Участок после исследования тушения низового пожара (собственные фото авторов)

риментальном участке и осуществления (в случае необходимости) операции дотушивания при повторном самопроизвольном возникновении горения. Тушение осуществляли водой, водными растворами гидрогеля алюминия различных концентраций и водными растворами других неорганических соединений (табл. 1).

Для повышения объективности оценки расхода ОС на разных участках изменяли последовательность действий следующим образом: сперва тушение осуществляли водой, а затем гидрогелем определенной концентрации, затем наоборот. К тому же оператор, осуществлявший тушение, не знал, какое ОС в залито в ранцевый огнетушитель. В задачу оператора входило прекращение горения с минимально возможным расходом ОС.

Была проведена серия экспериментов, достаточная для статистической обработки. Усредненные данные представлены в табл. 1, N – число параллельных экспериментов.

Полученные данные показывают, что на тушение 1 м кромки пожара в среднем потребовалось 0,21 кг воды (при средней ширине кромки пожара 30-40 см), а ГА потребовалось только 0,09-0,1 кг, что 2,3 раза меньше, чем воды. При оценке эффективности тушения пожара на его общую площадь площади пожара ушло в среднем 0,52 кг/м² воды, а ГА только 0,23 кг, что также в среднем в 2,3 раза меньше, чем воды. Наименьший средний расход ГА для тушения кромки пожара составил 0,09-0,11 кг/м при концентрации 3,5-14 г/л. При этом увеличение концентрации ГА в воде с 7 до 28 г/л, т. е. в 4 раза, не дает сколь-нибудь значительной прибавки в эффективности тушения и ведет фактически только к перерасходу гидрогеля. Такой результат можно объяснить тем, что при интенсивном горении ЛГМ, в условиях малой влажности и малой поверхностной плотности горючих материалов на почве, большая часть выливаемого жидкого раствора просто не попадает на горящий материал, а того количества, которое все же входит в контакт с горящим ЛГМ, хватает для тушения. Для обеспечения тушения необходимо некоторое минимальное количество ОС, а, в связи с этим, подача большего количества не дает вклада в повышение эффективности тушения. Таким образом, минимальное требуемое количество ОС на основе ГА, расходуемое на тушение, обеспечивается ГА с концентрацией в пределах 3,5-7 г/л.

Если учесть длину потушенной кромки и ее хотя бы ее приблизительную ширину, тогда можно оценить действительную площадь, на которую был подан исследуемый ОС, что составило 0,25-0,3 кг/м².

Определив среднюю массу горючих материалов растительного происхождения на исследуемых участках в 0,7-1,1 кг/м², появляется возможность рассчитать расход ОС на единицу массы природного горючего материала (см. табл. 1). Это значение в ходе эксперимента с применением в качестве ОС ГА (3,5-7,0 г/л) составило 0,27-0,36 кг/кг. Ориентируясь на низшую теплоту сгорания соломы, которая при 20 % влажности составляет 13,5 МДж/кг [19], можно рассчитать энергию горения, которую способна поглотить единица массы ОС. Полученные результаты представлены в табл. 1. Следует учесть, что в столбцах 5 и 6 (табл. 1) представлены данные, полученные сочетанием из эксперимента и известных литературных значений, которые несут в себе некоторый условный характер. Если предположить (довольно условно) общую огнетушащую способность как сумму огнетушащих эффектов, складывающих процесс тушения, тогда можно хотя бы приблизительно рассчитать вклад изоляции и ингибирования, которыми обладает ОС на основе ГА. Вычитая из общего вклада в огнеподавление, который обеспечивает ГА (7 г/л), который способен противостоять тепловыделению 52,5 МДж/кг, вклад, который дает водопроводная вода (21,5 МДж/кг), получаем, что общий вклад в тушение путем изоляции и ингибирования позволяет бороться с тепловыделением в 30 МДж/кг, или 57 % против 43 % энергии, поглощаемой водой.

ГА является водным раствором, содержащим несколько растворенных компонентов. Это собственно, сам ГА, ионы кальция, магния, калия, натрия, гидрокарбонат-ионы и т. п., содержащиеся в природной, а следовательно, и в водопроводной воде, кроме этого в растворе присутствуют другие продукты гидролиза – сульфат-ионы и т. п. Для выявления вклада в огнетушащий эффект именно присутствия в ОС соединений алюминия были проведены дополнительные испытания с применением насыщенного раствора карбоната натрия (сода) и сульфата натрия (28 г/л). Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что эффективность применения обоих ОС не отличается от эффективности применения водопроводной воды в условиях эксперимента.

Определение расхода ОС при тушении кромки пожара (собственные экспериментальные результаты и расчеты авторов с применением данных работы [19] по низшей теплоте сгорания соломы)

Наименование ОС	N	Расход ОС на периметр, кг/м	Расход ОС на площадь, кг/м ²	Расход ОС на массу природного горючего материала, кг/кг	Абсорбция энергии горения единицей массы ОС, МДж/кг
Вода	24	0.22±0.05	0.50±0.10	≈0.63	≈21.5
Гидрогель алюминия (1,7 г/л)	3	0.19±0.09	0.56±0.15	≈0.54	≈24.9
Гидрогель алюминия (3,5 г/л)	3	0.1±0.04	0.24±0.12	≈0.29	≈47.3
Гидрогель алюминия (7 г/л)	3	0.09±0.04	0.25±0.10	≈0.26	≈52.5
Гидрогель алюминия (14 г/л)	3	0.11±0.03	0.23±0.11	≈0.31	≈43.0
Гидрогель алюминия (28 г/л)	3	0.10±0.05	0.22±0.09	≈0.29	≈47.3
Гидрогель алюминия (7 г/л) через 60 мин после получения	3	0.25±0.04	0.61±0.07	≈0.71	≈18.9
Сульфат натрия (28 г/л)	3	0.23±0.04	0.55±0.12	≈0.66	≈20.5
Карбонат натрия (насыщенный раствор)	3	0.25±0.09	0.49±0.18	≈0.71	≈18.9

При реализации в ходе тушения кромки природного пожара одновременно нескольких огнеподавляющих эффектов (охлаждения, изоляции и, по видимому, ингибирования) чрезвычайно трудно выделить вклад каждого из них в процесс прекращения горения. Тем не менее, в ходе проведения полевого эксперимента неоднократно отмечалось, что при применении ГА с повышением его концентрации в водном растворе наблюдалось все меньше участков для проведения операции дотушивания, а также наблюдалось меньшее выделение остаточного дыма после ликвидации пламенного горения. Аналогичный эффект наблюдался при применении ГА для тушения модельного очага пожара [16]. Это, хотя и косвенно, свидетельствует о реализации процесса подавления горения на атомно-молекулярном уровне и активной борьбой с очагами тления, находящимися в объеме природного горючего материала, что доставляет немало хлопот и создает множество проблем при тушении низовых природных пожаров.

ГА – «скоропортящийся продукт», поэтому для проверки его действия при длительном хране-

нии была проведена серия экспериментов в условиях распада его коллоидного раствора и выпадения кристаллического осадка гидроксида алюминия в осадок на дно и стенки емкости ранцевого огнетушителя. Результаты табл. 1 свидетельствуют, что спустя 60 минут после приготовления гидрогеля он, как и предполагалось, полностью теряет свою эффективность, т. к. расходы такого ОС на тушение единицы длины кромки низового пожара не отличаются от таковых для водопроводной воды.

Выводы

В результате проведенных исследований выявлено следующее:

1. Подобран оптимальный способ получения ГА и его минимально необходимая концентрация в водном растворе, отвечающая минимальному расходу ОС для тушения кромки низового пожара.

2. Оказалось, что наибольшей огнетушащей способностью и минимальной концентрацией обладает ГА с концентрацией в диапазоне 3,5-7 г/л, полученный гидролизом сульфата алюминия в воде при его растворении. Использование более высококонцентрированных водных растворов ГА

не приводит к существенному уменьшению расхода огнетушащего вещества, а снижение концентрации ГА ниже 3,5 г/л в водном растворе, наоборот, приводит к перерасходу ОС. Это происходит, по-видимому, из-за наличия предела огнетушащей способности ОС, которой обладают ГА с концентрациями 3,5-7 г/л. Сравнение результатов тушения ГА с аналогичными результатами для других применяемых ОС: карбонат натрия и сульфат натрия – показало превосходство ГА над ними, обусловленное его составом и физико-химическими свойствами.

3. Таким образом, проведенные полевые исследования показывают, что предлагаемое ОС на

основе ГА является эффективным для тушения низовых пожаров. В среднем преимущество применения ГА в удельном расходе составляет 2-2,5 раза. Данное огнегасящее средство пригодно как для работ на открытой местности, так и в закрытых помещениях, а также является недорогим и удобным для использования в ранцевых огнетушителях или подачи в зону горения стандартным противопожарным оборудованием: пожарными насосами, рукавами, стволами. Тем не менее, экспериментально установлено, что ГА довольно быстро теряет свою огнетушащую эффективность, поэтому его применение необходимо совмещать с его получением.

Библиографический список

1. Полевой справочник лесного пожарного. – URL: <http://www.forestforum.ru/info/fireman.pdf>.
2. Справочник добровольного лесного пожарного. URL: <https://aviales.ru/files/documents/2013/02/spravochnik.pdf>.
3. Захватов, В. Д. Современные перспективные методы тушения лесных пожаров / В.Д. Захватов, М. В. Синельников // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. – 2013. – № 5–6. – С. 101–109.
4. Бакач, В. А. Эффективность грунтомета при локализации и тушении лесных пожаров / В. А. Бакач, Д. А. Беляев // Научно-образовательный потенциал молодежи в решении актуальных проблем XXI века. – 2019. – № 13. – С. 227–233. – DOI: 10.12737/14168.
5. Гундар, С. В. Интенсивность подачи воды на тушение кромки низовых лесных пожаров / С. В. Гундар, А. Н. Денисов // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23. – № 7. – С. 80–85.
6. Бобков, С. А. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / С. А. Бобков, А. В. Бабурин, П. В. Комраков. – Москва : Академия ГПС МЧС России, 2014. – 210 с.
7. Физико-химические основы развития и тушения пожаров : учеб. пособие / С. С. Тимофеева [и др.]. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2013. – 178 с.
8. Jimenez, M. Intumescent fire protective coating: Toward a better understanding of their mechanism of action / M. Jimenez, S. Duquesne, S. Bourbigot // *Thermochimica Acta*. – 2006. – Vol. 449. – P. 16–26. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.07.008>.
9. Liodakis, S. Testing the retardancy effect of various inorganic chemicals on smoldering combustion of *Pinus halepensis* needles / S. Liodakis, D. Vorisis, I. P. Agiovlasis // *Thermochimica Acta*. – 2006. – Vol. 444. – P. 157–165. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.03.010>.
10. Liodakis, S. Testing the fire retardancy of Greek minerals hydromagnesite and huntite on WUI forest species *Phillyrea latifolia* L. / S. Liodakis, I. Antonopoulos, I. P. Agiovlasis, T. Kakardakis // *Thermochimica Acta*. – 2008. – Vol. 469. – P. 43–51. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.12.010>.
11. Bakirtzis, D. Fire retardancy impact of sodium bicarbonate on ligno-cellulosic materials / D. Bakirtzis, M. A. Delichatsios, S. Liodakis, W. Ahmed // *Thermochimica Acta*. – 2009. – Vol. 486. – P. 11–19. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.12.012>.
12. Zhang, P. Synergistic effect of iron and intumescent flame retardant on shape-stabilized phase change material / P. Zhang, Y. Hu, L. Song, H. Lu, J. Wang, Q. Liu // *Thermochimica Acta*. – 2009. – Vol. 487. – P. 74–79. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.01.006>.

13. Bakirtzis, D. ATR investigation of the mass residue from the pyrolysis of fire retarded lignocellulosic materials / D. Bakirtzis, V. Tsapara, S. Liidakis, M. A. Delichatsios // *Thermochimica Acta*. – 2012. – Vol. 550. – P. 48–52. – <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.08.010>.

14. Perez-Moreno, S. M. Thermal characterization of new fire-insulating materials from industrial inorganic TiO₂ wastes / S. M. Perez-Moreno, M. J. Gazquez, A. G. Barneto, J. P. Bolivar // *Thermochimica Acta*. – 2013. – Vol. 552. – P. 114–122. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.10.021>.

15. Aluminium diethylphosphinate versus ammonium polyphosphate: A comprehensive comparison of the chemical interactions during pyrolysis in flame-retarded polyolefine/poly(phenylene oxide) / A. Sut, S. Greiser, C. Jager, B. Schartel // *Thermochimica Acta*. – 2016. – Vol. 640. – P. 74–84. – DOI: 10.1016/j.tca.2016.08.004.

16. Ивченко, О. А. Тушение лесных горючих материалов гидрогелями на основе гидроксида алюминия / О. А. Ивченко, К. Е. Панкин // *Лесотехнический журнал*. – 2019. – Т. 33. – № 1. – С. 76–84. – DOI: 10.12737/article_5c92016e1314b2.49705560.

17. Опрыскиватель «ЖУК». Паспорт. – URL: <https://poryadok.ru/upload/iblock/628/6286d584b7ca5b055d8701c3071021d3.pdf> (дата обращения 08.01.2020).

18. Справочник химика / под ред. Б. П. Никольского. – Ленинград : Химия, 1971. – Т. 2. – 1168 с.

19. Справочник потребителя биотоплива / В. Варес, Ю. Касък, П. Муйсте, Т. Пиху, С. Соосаар ; под ред. В. Вареса. – Таллинн : Таллиннский технический университет, 2005. – 183 с.

References

1. *Polevoj spravochnik lesnogo pozhnogo* [Wild fireman handbook]. URL: <http://www.forestforum.ru/info/fireman.pdf> (In Russian) (accessed 01 November 2018).

2. *Spravochnik dobrovol'nogo lesnogo pozhnogo* [Wild fireman volunteer handbook]. URL: <https://aviales.ru/files/documents/2013/02/spravochnik.pdf> (In Russian) (accessed 01 November 2018).

3. Zahvatov V.D., Sil'nikov M.V. (2013) *Sovremennye perspektivnye metody tusheniya lesnyh pozharov* [Modern and perspective methods for wild fire extinguishing]. *Voprosy oboronnoj tehniki. Seriya 16. Tehnicheskie sredstva protivodejstvija terrorizmu* [Topics of defence equipment design Series 16. Terrorism protection equipment], No 5-6, pp. 101-109 (in Russian).

4. Bakach V.A., Beljaev D.A. (2019) *Jeffektivnost' gruntometa pri lokalizacii i tushenii lesnyh pozharov*. Nauchno-obrazovatel'nyj potencial molodezhi v reshenii aktual'nyh problem XXI veka [Scientific and educational ability of young scientists for actual problem of XXI century solving]. № 13. P. 227-233 (in Russian). DOI: 10.12737/14168.

5. Gundar S.V., Denisov A.N. (2014) *Intensivnost' podachi vody na tushenie kromki nizovyh lesnyh pozharov* [Intensity of water flow for fire extinguishing of ground cover fire]. *Pozharovzryvobezopasnost'* [Fire and Explosion Safety]. T.23, № 7. P.80-85 (in Russian).

6. Bobkov S.A. *Fiziko-himicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov* [Physical and chemical basis of fires and fire extinguishing]. Moscow, 2014, 210 p. (In Russian).

7. *Fiziko-himicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov: A Tutorial* [Physical and chemical basis of fires and fire extinguishing]. Irkutsk, 2013, 178 p. (In Russian).

8. Jimenez M., Duquesne S., Bourbigot S. (2006) Intumescent fire protective coating: Toward a better understanding of their mechanism of action. *Thermochimica Acta*, Vol. 449, pp. 16-26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.07.008>.

9. Liidakis S., Vorisis D., Agiovlasis I.P. (2006) Testing the retardancy effect of various inorganic chemicals on smoldering combustion of *Pinus halepensis* needles. *Thermochimica Acta*, Vol. 444, pp. 157–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.03.010>.

10. Liodakis S., Antonopoulos I., Agiovlasis I.P., Kakardakis T. (2008) Testing the fire retardancy of Greek minerals hydromagnesite and huntite on WUI forest species *Phillyrea latifolia* L. *Thermochimica Acta*, Vol. 469, pp. 43-51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.12.010>.
11. Bakirtzis D., Delichatsios M.A., Liodakis S., Ahmed W. (2009) Fire retardancy impact of sodium bicarbonate on ligno-cellulosic materials. *Thermochimica Acta*, Vol. 486, pp. 11-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.12.012>.
12. Zhang P., Hu Y., Song L., Lu H., Wang J., Liu Q. (2009) Synergistic effect of iron and intumescent flame retardant on shape-stabilized phase change material. *Thermochimica Acta*, Vol. 487, pp. 74-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.01.006>.
13. Bakirtzis D., Tsapara V., Liodakis S., Delichatsios M.A. (2012) ATR investigation of the mass residue from the pyrolysis of fire retarded lignocellulosic materials. *Thermochimica Acta*, Vol. 550, pp. 48-52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.08.010>.
14. Perez-Moreno S.M., Gazquez M.J., Barneto A.G., Bolivar J.P. (2013) Thermal characterization of new fire-insulating materials from industrial inorganic TiO₂ wastes. *Thermochimica Acta*, Vol. 552, pp. 114-122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.10.021>.
15. Sut A., Greiser S., Jager C., Schartel B. (2016) Aluminium diethylphosphinate versus ammonium polyphosphate: A comprehensive comparison of the chemical interactions during pyrolysis in flame-retarded polyolefine/poly(phenylene oxide). *Thermochimica Acta*, Vol. 640, pp. 74-84. DOI: 10.1016/j.tca.2016.08.004.
16. Ivchenko O.A., Pankin K.E. (2019) *Tushenie lesnyh gorjuchih materialov gidrogeljami na osnove gidroksida aljuminija* [Fire extinguishing of forest flammable materials by hydrogels based on aluminum hydroxide]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 9, No. 1 (33), pp. 76-84 (in Russian). DOI:10.12737/article_5c92016e1314b2.49705560.
17. *Opryskivatel' "ZHUK"* [Agricultural Sprinkler "Beetle"]. *Pasport* [Technical certificate] URL: <https://poryadok.ru/upload/iblock/628/6286d584b7ca5b055d8701c3071021d3.pdf> (Date of access: 08.01.2020).
18. *Spravochnik himika* [Chemical directory]: in 7 vol. Vol. 2. Leningrad, 1966, 1168 p.
19. Vares V. (ed.) Handbook of the consumer of biofuel. Tallinn, TPU, 2005, 173 p.

Сведения об авторах

Ивченко Ольга Александровна – аспирант факультета инженерии и природообустройства ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова», г. Саратов, Российская Федерация; e-mail: olgalexan@yandex.ru.

Панкин Кирилл Евгеньевич – кандидат химических наук, доцент ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова», г. Саратов, Российская Федерация; e-mail: texmexium@mail.ru.

Information about authors

Ivchenko Olga Aleksandrovna – post-graduate student of the Department of Technosphere Safety and Transport-Technology Machines, FSBEI HE "Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov", Saratov, Russian Federation, e-mail: olgalexan@yandex.ru.

Pankin Kirill Evgenyevich – PhD (Chemistry), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technosphere safety and Transport-Technology machines, FSBEI HE "Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov" Saratov, Russian Federation; e-mail: texmexium@mail.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ УЧАСТКОВ ЛЕСА, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВЛИЯНИЮ КОРОЕДА-ТИПОГРАФА (*IPS TYPOGRAPHUS*) В ЗАПОВЕДНИКЕ «КУРИЛЬСКИЙ» (о. КУНАШИР)

аспирант, инженер по ГИС **Н.Р. Пирцхалава-Карпова**^{1,2}

аспирант, заместитель директора по охране территории и экологической безопасности **А.А. Карпов**^{1,2}

инженер по ГИС, старший научный сотрудник, кандидат географических наук **М.Ю. Грищенко**^{2,3}

заместитель директора по научной работе **Е.Е. Козловский**²

1 – ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»,
г. Архангельск, Российская Федерация

2 – ФГБУ «Государственный заповедник «Курильский», пгт. Южно-Курильск, Российская Федерация

3 – ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва,
Российская Федерация

Изменение климата оказывает большое влияние на вспышки лесных вредителей. В последние годы произошло несколько крупных климатических явлений в области Южных Курильских островов, которые имели каскадное воздействие на вредителей леса. Одно из таких воздействий оказал тайфун 2014 года, после которого началось массовое усыхание хвойных лесов на территории заповедника «Курильский», а также в охранной зоне. Усыхание лесов на острове Кунашир является одной из главных проблем. Целью данного исследования было обнаружение и изучение мест нападения короеда-типографа (*Ips typographus*) на территории заповедника, закладывание пробных площадей в очагах распространения. Данное исследование показало, что в основном подвержены нападению короеда-типографа ели возраста 50-70 лет. Однако стоит отметить, что нападение короеда было замечено больше на ели глена (*Picea glehnii*), меньше на ели аянской (*Picea jezoensis*) в местах закладывания пробных площадей. Кроме того, в ходе исследования были определены существенные различия между здоровыми, ослабленными деревьями и соседними мертвыми деревьями, атакованными *Ips typographus*. Эти различия были наиболее выражены в: индивидуальном затенении, коллективном затенении, факторах роста, состоянии ярусности. Ранее вредители леса были относительно не изучены, и это исследование даст новое понимание их экологии, а также практические возможности для управления ими.

Ключевые слова: лесопатологический мониторинг, короед-типограф, *Ips typographus*, ООПТ, ветровал, усыхание ельников

RESEARCH OF FOREST SITES AFFECTED BY THE INFLUENCE OF EIGHT-DENTATED BARK BEETLE (*IPS TYPOGRAPHUS*) IN THE KURILSKIY RESERVE (KUNASHIR ISLAND)

post-graduate student, GIS engineer **N.R. Pirtskhalava-Karpova**^{1,2}

post-graduate student, Deputy Head on territory protection and environmental safety **A.A. Karpov**^{1,2}

GIS engineer, senior researcher, PhD (Geography) **M.Yu. Grishchenko**^{2,3}

Deputy Head on scientific work **E.E. Kozlovsky**²

1 – FSAEI HE "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov", Arkhangelsk, Russian Federation

2 – Federal State Funded Organization State Nature Reserve "Kurilskiy"

3 – FSBEI HE "Moscow State University named after M.V. Lomonosov", Moscow, Russian Federation

Abstract

Climate change has a major impact on forest pest outbreaks. In recent years, there have been several major climatic events in the South Kuril Islands that have cascaded impacts on forest pests. One of these effects was exerted by the typhoon of 2014, after which the coniferous forests began to dry out in the Kurilskiy Nature Reserve, as well as in the protected zone. Drying of forests on the island of Kunashir is one of the main problems. The aim of this study was to detect and study the sites of attack of eight-dentated bark beetle (*Ips typographus*) in the reserve, laying test areas in the distribution foci. This study showed that spruce aged 50-70 are mainly susceptible to the attacks of eight-dentated bark beetle. However, it is worth noting that the attack of the bark beetle was seen more on Sakhalin spruce (*Picea glehnii*), less – on Yezo spruce (*Picea jezoensis*) in the places where the test plots were laid. In addition, the study has identified significant differences between healthy, weakened trees and neighboring dead trees attacked by *Ips typographus*. These differences were most pronounced in: individual shading, collective shading, and distance and tier factors. Forest pests have not been relatively studied previously. This study will give a new understanding of its ecology, as well as practical opportunities for its management.

Keywords: forest pathological monitoring, eight-dentated bark beetle, *Ips typographus*, protected areas, wind-fall timber, spruce drying

Введение

Изменение климата оказывает большое влияние на вспышки лесных вредителей. В последние годы произошло несколько крупномасштабных климатических явлений, которые имели каскадное воздействие на вредителей леса. Засуха, штормовые ветра и ледяные бури – некоторые из катастрофических событий происходят в больших масштабах. Однако каждое из них по-разному влияет на экосистему. Засуха оказывает сильное влияние на жизнеспособность дерева, но это во многом зависит от устойчивости вида к засухе [5, 6]. Большое воздействие на Курильские острова оказал тайфун 2014 года, после которого началось массовое усыхание хвойных лесов. Однако все перечисленные типы событий имеют сходный результат: крупномасштабные вспышки короеда на деревьях.

Нападение и распространение короеда на Курильских островах практически не изучалось до недавнего времени. В литературе имеется лишь отрывочная информация (Куренцов, 1941, 1950; Stark, 1952; Криволицкая, 1956, 1958) [8–12] о нахождении нескольких видов на Курильских островах, но без указания конкретных мест, где они были найдены. В 1965 г. была опубликована статья (Криволицкая, 1965а) [13], в которой для Южно-Курильских островов были названы 48 видов короедов с данными об их распространении, биотопическом разграничении, трофических звеньях, фенологических периодах развития и т. д. Всего на Курильских островах в настоящее время известно 53 вида короедов, относящихся к 20 родам [12, 13]: *Scolytus* (5 видов), *Hylesinus* (1), *Hyorrhynchus* (1), *Hylurgops* (1), *Alniphagus* (1), *Polygraphus* (6), *Crypturgus* (2), *Cryphalus* (6), *Ernoporicus* (2).

Eocryphalus (2), *Phellodendrophagus* (1), *Hypothenemus* (1), *Dryocoetes* (8), *Pityophthorus* (1), *Trypodendron* (4), *Pityogenes* (3), *Ips* (2), *Orthotomicus* (2), *Xyleborus* (2), и *Scolytoplatus* (2).

На острове Кунашир самым распространенным видом можно считать *Ips typographus*. Фауна короедов Курильских островов заметно истощена по сравнению с прилегающими островами и континентальными районами Дальнего Востока. Так, на Сахалине известно 68 видов короедов, 95 на Хоккайдо и 128 в Приморском крае [2]. По своему происхождению фауну короеда Курильских островов можно разделить на два основных комплекса: бореальный (23 вида) и палеарктический (30 видов). Они, в свою очередь, делятся на несколько групп и подгрупп, в зависимости от характера ареалов видов, включенных в эти комплексы.

На Курильских островах благодаря недавним мощным тайфунам в 2014 г. были созданы благоприятные условия для появления очагов массового размножения короедов на больших площадях. Почти во всех типах лесов, особенно в насаждениях, включающих хвойные породы, существуют предпосылки появления колоний короедов. В настоящее время очаги размножения короедов расположены на участках деятельности тайфунов и ураганов, в районах с перестойными и ослабленными деревьями, а также на мертвых деревьях, вблизи от сольфатаров на деревьях, которые были угнетены постоянными сбросами сероводорода и другими вредными газами, на прибрежных склонах, подавленных продолжительным воздействием ветров, дующих с моря. Одним из самых распространенных видов короеда является *Ips typographus*. Он способен массово размножаться в условиях Курильских островов на хвойных видах деревьев.

Ips typographus – один из распространенных видов в темнохвойных лесах Южных Курил, повреждает различные виды ели. Массово размножается в местах ветровалов и образует колонии [3, 7, 9, 10, 19]. Полет жуков продолжается с середины июня до середины июля [3, 8, 9]. Формирование гнезд и яйцекладка происходят в тот период времени, после которого жуки покидают гнездо, которое они создали, и подвергаются дополнительному питанию до созревания [1]. В конце июля – начале

августа они начинают размножаться и производить второе родственное поколение. К концу августа молодые жуки массово встречаются в семьях первого круга размножения. Многие остаются под корой на зиму. *Ips typographus* распространен в районах с влажным морским климатом, характерным для морских побережий и островов. Фенологические периоды развития короедов на Кунашире совпадают с Сахалином и несколько задерживаются, по сравнению с континентальными районами Дальнего Востока [3, 4]. Причиной этому является среда обитания в морской климатической среде, которая характеризуется поздней весной, влажным и относительно теплым летом и продолжительной теплой осенью.

Целью данного исследования было обнаружение и изучение мест нападения короеда-типографа (*Ips typographus*) на территории заповедника «Курильский», а также закладывание пробных площадей в очагах. Ранее вредители леса были относительно не изучены, и это исследование даст новое понимание их экологии, а также практические возможности для управления ими. Кроме того, в дальнейшем исследовании будет представлена модель прогнозирования нападения короеда на хвойные леса заповедника «Курильский».

Материалы и методы

Район исследования охватывает всю поверхность острова Кунашир (Курильские острова), территорию заповедника «Курильский». Полевые исследования проводились в июне – сентябре 2019 года. Почти 61 % острова занято лесами (рис. 1). Кроме того, Кунашир разделен на различные биогеографические регионы. На Южных Курильских островах, на Кунашире, расположены темнохвойные леса, состоящие из пихты сахалинской (*Abies sachalinensis*), ели аянской (*Picea jezoensis*) и ели глена (*P. glehnii*), а также тиса. На южной половине Кунашира произрастают широколиственные и темные хвойно-широколиственные леса. Особенно выделяются территории на юго-западном побережье острова и в районе кальдеры вулкана Головнина. Эти леса представляют собой сложную комбинацию различных древесных пород, которые характерны для различных зон растительности и принадлежат к различным географическим

ческим группировкам. В условиях влажного, относительно теплого климата возможно совместное произрастание ели, пихты, тиса, кедра, магнолии, дуба, ольхи, гортензии и березы.

Начальным этапом исследования было определение зараженных участков еловых насаждений на территории заповедника «Курильский» по космическим снимкам. Для изучения и закладки пробных площадей были выбраны три участка на разных частях острова – кальдера вулкана Головнина, ур. Даниловское и участок в северной части острова – пойма реки Саратовка. На всех участках было заложено 11 пробных площадей с радиусом 20 метров. Кроме того, на каждой пробной площади было выполнено подробное лесопатологическое обследование деревьев и определение факторов, влияющих на деятельность короеда-типографа.

Результаты и обсуждение

Усыхание лесов на острове Кунашир является одной из главных проблем. Исследование пока-

зало, что одной из причин возникшей проблемы стало нападение короеда-типографа на леса острова, в результате чего было произведено закладывание пробных площадей в разных частях острова для подробного изучения короеда-типографа (рис. 2-3).

Лесопатологическое обследование показало, что в основном подвержены нападению ели возраста 50-70 лет. Однако стоит отметить, что нападение короеда-типографа было замечено больше на ели глена (*Picea glehnii*), меньше на ели аянской (*Picea jezoensis*). Исследование пробных площадей показало, что в процентном соотношении, усыхающих и заселенных деревьев – 42,24 %, здоровых – 16,57 %, ослабленных – 12,29 % (табл. 1).

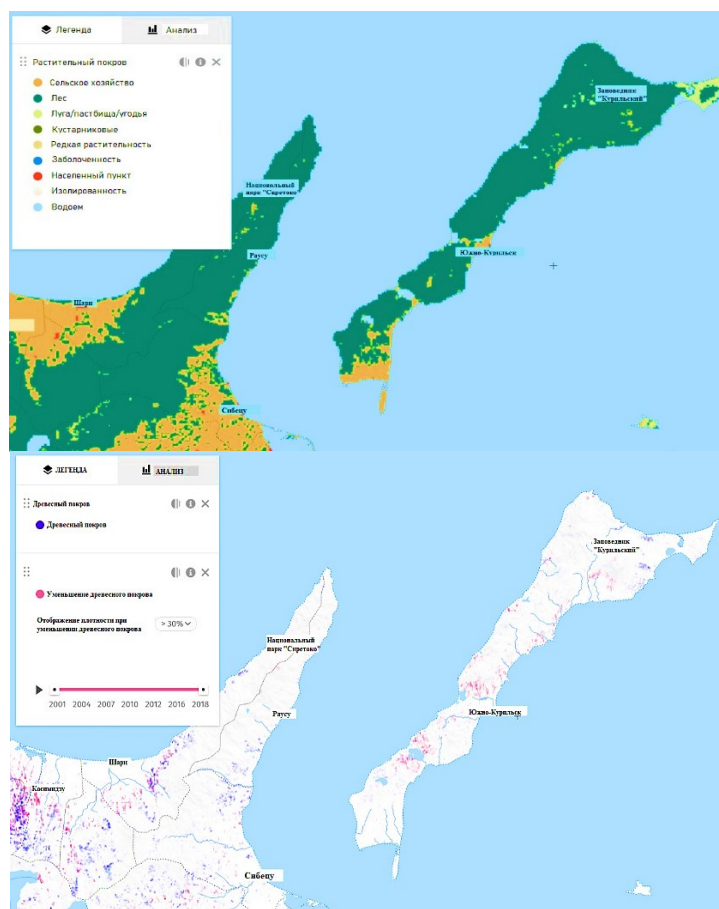


Рис. 1. Растительный покров острова Кунашир; Global Forest Watch, 2019

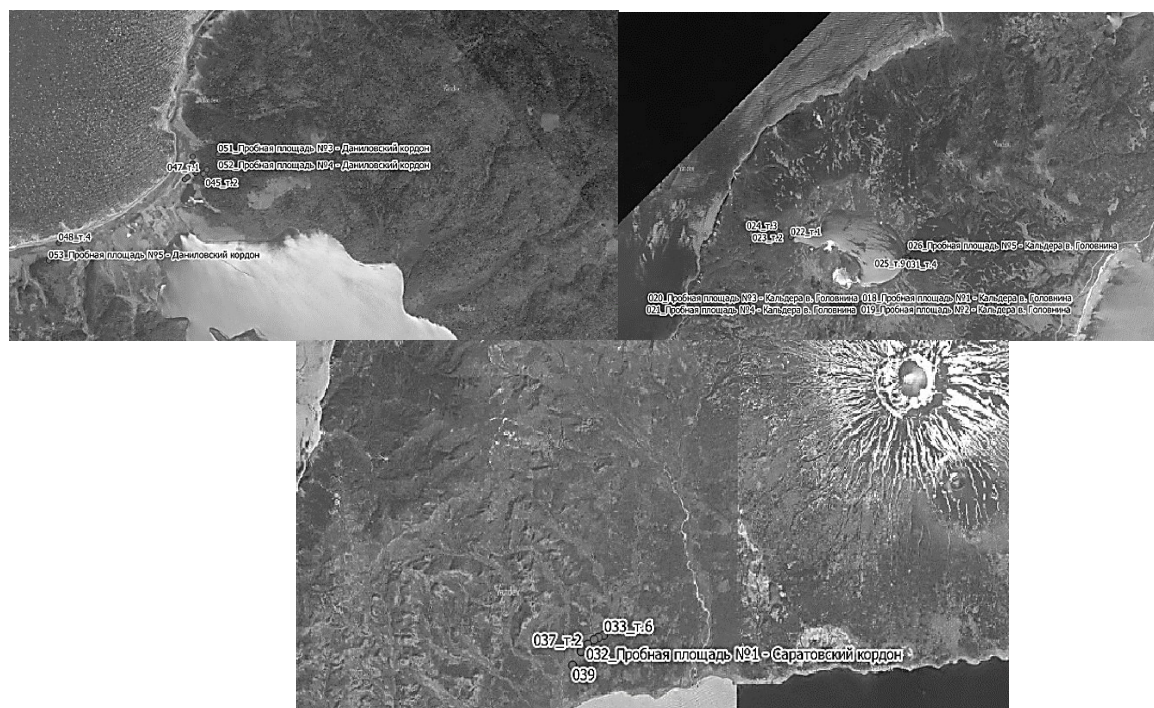


Рис. 2. Пробные площади на территории заповедника «Курильский», Google maps, 2019



Рис. 3. Пробные площади на территории заповедника «Курильский»; фото авторов, 2019

Таблица 1

Результаты перече́та на пробных площадях

Категория деревьев	Число деревьев	%
1 – здоровые	62	16,57
2 – ослабленные	46	12,29
3 – сильно ослабленные	26	6,95
4 – усыхающие заселенные	158	42,24
5 – свежий сухостой заселенный	35	9,39
6 – старый сухостой	47	12,56
Итого	374	100

Собственная разработка авторов, 2019

Категории деревьев (здоровые, ослабленные и сильно ослабленные) имели разные характеристики, связанные с геометрией кроны, затенения коллективных насаждений, расстояния между деревьями, высоты и первичной структуры, чем соседние мертвые деревья. Эти характеристики взаимосвязаны. Расстояние от ближайшего атакованного дерева оказалось не значимым. Это можно объяснить массовой атакой *Ips typographus*. При массовой атаке жуки нападают на соседние деревья [5, 7]. Небольшое расстояние от ранее атакованного дерева способствует дополнительным атакам. Параметры, связанные с затенением стволов деревьев от прямого солнечного излучения показали хорошие возможности для разграничения выживших и мертвых деревьев.

При нормальных условиях ствол дерева защищен от прямого солнечного излучения своими собственными ветвями или кронами соседних деревьев (коллективное затенение) [7]. В случае плотных насаждений с небольшими кронами большие части ствола, в свою очередь, будут подвержены воздействию солнца. Это может повлиять на транспирацию и вызвать дефицит воды. Более высокие температуры на коре могут также увеличить выбросы первичных аттрактантов для короеда [7]. Такие деревья и насаждения могут иметь снижение устойчивости к атакам короеда.

В рамках исследования было определено несколько видов факторов [16, 18], влияющих на деятельность короеда-типографа:

1. Климатические факторы. Данные факторы определяют географическое распространение короеда и его кормовой породы – ели.

2. Погодные факторы (температурные условия и количество осадков) – факторы для определения успешности заражения, развития и выживаемости короеда-типографа на разных этапах его жизни.

3. Стихийные факторы. Повреждения лесов ветром создают условия для появления очагов массового размножения короеда-типографа и поддерживают сохранность его популяции.

4. Биотические факторы. Это комплекс энтомофагов и болезней короеда-типографа.

В ходе исследования было выявлено, что короед-типограф может зимовать как под корой в местах своего развития, так и в лесной подстилке под отработанными им деревьями, в кусках опавшей коры. Большая часть короеда-типографа, зимующая в подстилке, сосредоточена на расстоянии до 1,0 м от усохшего дерева, а основная масса жуков зимует на глубине до 8 см, на границе подстилки с минеральным слоем почвы. На глубине 10 см жуков нет. Под деревом может зимовать более 5 тыс. жуков, что позволяет осуществлять борьбу с ними путём опрыскивания подстилки инсектицидами весной перед их вылетом [15, 16, 17]. Кроме того, на развитие короеда-типографа в условиях Курильских островов большое влияние оказывают погодные явления.

По наблюдениям, короед-типограф предпочитает свежие ветровальные и буреломные деревья, которые заселяются им более чем на 80 %.

Мониторинг, т. е. постоянное слежение за состоянием популяции короеда-типографа на острове Кунашир, его размножением и влиянием на санитарное состояние еловых насаждений, является важнейшим условием для эффективной защиты в зоне периодических усыханий. Мониторинг осуществляется путём использования всех современных способов и средств оценки санитарного состояния еловых насаждений, состояния и численности популяции короеда, а именно – дистанционными методами, наземными лесопатологическими обследованиями и наблюдениями, с использованием феромонов.

Последствия массовых размножений короеда-типографа и обусловленных этим катастрофических усыханий ельников на острове Кунашир в полной мере не изучены.

Heidger и Lieutier (2002) [1] в своем исследовании предлагали рекомендацию прореживания деревьев для уменьшения внутривидовой конкуренции, тем самым обеспечивается снижение уровня стресса и повышение доступа к воде, питательным веществам и свету. Это позволит ускорить фотосинтез с большим количеством питательных веществ, которые доступны для роста и защиты. Результаты показывают, что посадка елей с более длинными кронами и большими расстояниями ме-

жду деревьями может значительно увеличить устойчивость к нападениям короеда. Большие расстояния между деревьями могут быть достигнуты за счет прореживания или посадки на больших расстояниях. Посадка смешанных насаждений будет лучшим решением.

Заключение

Фенологические периоды развития у большинства видов на острове Кунашир отстают примерно на месяц по сравнению с континентальными районами аналогичной широты. Время массового полета короеда-типографа приходится, как правило, на вторую половину июля – первую половину августа.

В результате исследования можно сделать выводы. Важным аспектом является тот факт, что короед-типограф (*Ips typographus*) нападет в основном на ель глена (*Picea glehnii*) в заложенных пробных площадях. Также был исследован возрас-

тной фактор – нападению короеда-типографа подвержены ели в возрасте 50-70 лет.

Кроме того, были определены существенные различия между здоровыми, ослабленными деревьями и соседними мертвыми деревьями, атакованными *Ips typographus*. Эти различия были наиболее выражены в:

1) индивидуальном затенении: деревья с более высоким уровнем индивидуального затенения (размер кроны) имели большую тенденцию к выживанию;

2) коллективном затенении: в лесном массиве деревья имеют большую устойчивость к водному стрессу, чем отдельно стоящие деревья;

3) факторах расстояния: небольшие расстояния до ранее атакованного дерева;

4) ярусности: деревья нижних ярусов менее подвержены стрессу.

Библиографический список

1. Heidger, M. Possibilities to utilize tree resistance to insects in forest pest management in central and western Europe / M. Heidger F. Lieutier // Trees Mechanisms and deployment of resistance in tree to insects. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. – P. 239–263. – DOI: 10.1007/0-306-47596-0_11.
2. The International Kuril Island Project (IKIP). IKIP Databases and NSF Reports. – URL: <https://www.burkemuseum.org/static/okhotskia/ikip/index.htm> (дата обращения 09.12.2019).
3. *Ips typographus* and *Thanasimus formicarius* populations influenced by aspect and slope position in Artvin-Hatila valley national park / E. Akkuzruu, T. Sariyildiz, M. Kucugk, A. Dumaan // Afr J Biotechnol. – 2012. – No. 8(5). – P. 877–882.
4. Baier, P. Defence reactions of Norway spruce to controlled attacks of *Ips typographus* in relation to tree parameters / P. Baier // J Appl Entomol. – 1996. – No. 120. – P. 587–593. – DOI: 10.1111/j.1439-0418.1996.tb01656.x.
5. Jakus, R. Bark beetle communities and host and site factors on tree level in Norway spruce primeval natural forest / R. Jakus // J. Appl. Entomol. – 1995. – No. 119. – P. 643–651. – DOI: 10.1111/j.1439-0418.1995.tb01352.x.
6. Jakus, R. Types of bark beetle infestation in spruce forest stands affected by air pollution, bark beetle outbreak and honey fungus (*Armillaria mellea*) / R. Jakus // J. Appl. Entomol. – 1999. – No. 71. – P. 41–49. – DOI: 10.1007/bf02770619.
7. Definition of spatial patterns of bark beetle *Ips typographus* outbreak spreading in Tatra mountains, using GIS / R. Jakus, W. Grodzki, M. Jezi'k, M. Jachym // Survey and Management of Forest Insects. – 2005. – Gen Tech Rep NE-311. – P. 25–32.
8. Stark, V. The bark beetles / V. Stark // Fauna of the USSR, the Coleopterans. – 1952. – Vol. XXXI. – P. 52.
9. Куренцов, А. И. Вредные насекомые хвойных пород Приморского края / А. И. Куренцов // Труды ДВФ АН СССР, серия зоологическая. – 1950. – Т. 1 (4). – С. 256.
10. Куренцов, А. И. Короеды Дальнего Востока / А. И. Куренцов. – Москва, 1941. – 234 с.
11. Криволицкая, Г. О. Короеды (*Coleoptera, Ipsidae*) хвойных лесов о. Сахалина / Г. О. Криволицкая // Энтомологическое обозрение. – 1956. – Т. 35 (4). – С. 328.

12. Криволицкая, Г. О. Короеды острова Сахалина / Г. О. Криволицкая. – Москва, 1958. – 195 с.
13. Криволицкая, Г. О. Фауна короедов (*Coleoptera, Ipsidae*) Южных Курильских островов / Г. О. Криволицкая // Лесоводственные исследования на Дальнем Востоке. – 1965. – № 1. – С. 219–244.
14. Forest response to increasing typhoon activity on the Korean peninsula: Evidence from oak tree rings / J. Altman, J. Dolezal, T. Cerný, J-S. Song // *Global Change Biology*. – 2013. – No. 19 (2). – P. 498–504. – DOI: 10.1111/gcb.12067.
15. Linking spatiotemporal disturbance history with tree regeneration and diversity in an old-growth forest in northern Japan / J. Altman, P. Fibich, J. Leps [et al.] // *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*. – 2016. – No. 21. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.ppees.2016.04.003.
16. Маслов, А. Д. Короед-типограф и усыхание еловых лесов: моногр. / А. Д. Маслов ; Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФГУ ВНИИЛМ). – Пушкино, 2010. – 143 с. – ISBN 978-5-94219-170-2.
17. Маслов, А. Д. Влияние температуры и влажности на стволовых вредителей леса / А. Д. Маслов ; Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФГУ ВНИИЛМ). – Пушкино, 2008. – 26 с.
18. Методические рекомендации по надзору, учёту и прогнозу массовых размножений стволовых вредителей и санитарного состояния лесов / МПР РФ ФАЛХ ; Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФГУ ВНИИЛМ). – Пушкино, 2006. – 108 с.
19. Рекомендации по использованию феромонов для мониторинга численности основных вредителей леса в России / Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства (ФГУ ВНИИЛМ). – Пушкино, 2007. – 23 с.

References

1. Heidger M., Lieutier F. Possibilities to utilize tree resistance to insects in forest pest management in Central and Western Europe. *Trees Mechanisms and deployment of resistance in tree to insects*, 2002, pp. 239–263. – DOI: 10.1007/0-306-47596-0_11.
2. The International Kuril Island Project (IKIP). IKIP Databases and NSF Reports, 2002 (date of access 09 December 2019).
3. Akkuzuu E., Sariyildiz K., Kucuk M., Duman A. (2012) *Ips typographus* and *Thanasimus formicarius* populations influenced by aspect and slope position in Artvin-Hatila valley national park. *Afr J Biotechnol*, Vol. 8, no. 5, pp. 877–882.
4. Baier P. (1996) Defence reactions of Norway spruce to controlled attacks of *Ips typographus* in relation to tree parameters. *J Appl Entomol*, Vol. 120, pp. 587–593. – DOI: 10.1111/j.1439-0418.1996.tb01656.x.
5. Jakus R. (1995) Bark beetle communities and host and site factors on tree level in Norway spruce primeval natural forest. *J Appl Entomol*, Vol. 119, pp. 643–651. – DOI: 10.1111/j.1439-0418.1995.tb01352.x.
6. Jakus R. (1999) Types of bark beetle infestation in spruce forest stands affected by air pollution, bark beetle outbreak and honey fungus (*Armillaria mellea*). *J Appl Entomol*, Vol. 71, pp. 41–49. – DOI: 10.1007/bf02770619.
7. Jakus R., Grodzki W., Jezi'k M., Jachym M. (2005) Definition of spatial patterns of bark beetle *Ips typographus* outbreak spreading in Tatra mountains, using GIS. *Proceedings of Ecology, Survey and Management of Forest Insects*, Gen Tech Rep NE-311, pp. 25–32.
8. Stark V. The bark beetles. *Fauna of the USSR, the Coleopterans*, 1952, Vol. XXXI, p. 52.
9. Kurentsov A. I. (1950) *Vrednyye nasekomye khvoynykh porod Primorskogo kraya* [Insect pests of coniferous varieties of Primorskiy Krai]. *Vestnik Dal'nevostochnogo filiala Akademii nauk USSSR* [USSR Academy of Sciences], Vol. I, no. IV, p. 256 (In Russian).
10. Kurentsov A. I. *Koroyedy Dal'nego Vostoka* [The Bark Beetles of the Far East], 1941, p. 234 (In Russian).

11. Krivolutskaya G. O. (1956) *Koroyedy (Coleoptera, Ipsidae) khvoynykh lesov o. Sakhalina* [The bark beetles (Coleoptera, Ipsidae) of the coniferous forests of Sakhalin]. *Entomologicheskoye obozreniye* [Entomological Review], Vol. 35, No. 4, p. 328 (In Russian).
12. Krivolutskaya G. O. *Koroyedy ostrova Sakhalina* [The Bark Beetles of Sakhalin], 1958, 195 p. (In Russian).
13. Krivolutskaya G. O. (1965) *Fauna koroyedov (Coleoptera, Ipsidae) Yuzhnykh Kuril'skikh ostrovov* [The bark beetle fauna (Coleoptera, Ipsidae) of the Southern Kuril Islands]. *Lesovodstvennyye issledovaniya na Dal'nem Vostoke* [Forestry Research in the Far East], pp. 219-244 (In Russian).
14. Altman J., Dolezal J., Cerný T., Song J-S. (2015) Forest response to increasing typhoon activity on the Korean peninsula: Evidence from oak tree rings. *Global Change Biology*, Vol. 19, no. 2, pp. 498–504. – DOI: 10.1111/gcb.12067.
15. Altman J., Fibich P., Leps J. et al. (2016) Linking spatiotemporal disturbance history with tree regeneration and diversity in an old-growth forest in northern Japan. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, Vol. 21, pp. 1–13. – DOI: 10.1016/j.ppees.2016.04.003.
16. Maslov A. D. *Koroyed-tipograf i usykhaniye yelovykh lesov* [Ips typographus and drying of spruce forests]. *Monografiya Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesovodstva i mekhanizatsii lesnogo khozyaystva* [Monograph of the Russian Research Institute of Forestry and Forest Mechanization], 2010, 143 p. (In Russian).
17. Maslov A. D. *Vliyaniye temperatury i vlazhnosti na stvolovykh vreditel'nykh lesa* [Influence of temperature and humidity on forest stem pests], *Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut lesovodstva i mekhanizatsii lesnogo khozyaystva* [Russian Research Institute of Forestry and Forest Mechanization], 2008, 26 p. (In Russian).
18. *Metodicheskiye rekomendatsii po nadzoru, uchotu i prognozu massovykh razmnozheniy stvolovykh vreditel'nykh i sanitarnogo sostoyaniya lesov* [Guidelines for the supervision, accounting and forecasting of mass reproduction of stem pests and forest health], *Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut lesovodstva i mekhanizatsii lesnogo khozyaystva* [Russian Research Institute of Forestry and Forest Mechanization], 2006, 108 p. (In Russian).
19. *Rekomendatsii po ispol'zovaniyu feromonov dlya monitoringa chislennosti osnovnykh vreditel'nykh lesa v Rossii* [Recommendations on the use of pheromones for monitoring the number of major forest pests in Russia], *Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut lesovodstva i mekhanizatsii lesnogo khozyaystva* [Russian Research Institute of Forestry and Forest Mechanization], 2007, 23 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Пирцхалава-Карпова Нана Роландиевна – аспирант, инженер по ГИС, высшая инженерная школа, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, Российская Федерация; e-mail: heynanabl@gmail.com; ФГБУ «Государственный заповедник «Курильский», пгт. Южно-Курильск, Российская Федерация; e-mail: n.pirtskhalava-karпова@kurilskiy.ru.

Карпов Александр Анатольевич – аспирант, заместитель директора по охране территории и экологической безопасности, кафедра лесной таксации ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, Российская Федерация; ФГБУ «Государственный заповедник «Курильский», пгт. Южно-Курильск, Российская Федерация; e-mail: ohrana@kurilskiy.ru.

Грищенко Михаил Юрьевич – кандидат географических наук, инженер по ГИС, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва, Российская Федерация; ФГБУ «Государственный заповедник «Курильский», пгт. Южно-Курильск, Российская Федерация; e-mail: m.gri@geogr.msu.ru.

Козловский Евгений Евгеньевич – заместитель директора по научной работе, ФГБУ «Государственный заповедник «Курильский», пгт. Южно-Курильск, Российская Федерация; e-mail: nauka@kurilskiy.ru.

Information about authors

Pirtskhalava-Karpova Nana Rolandievna – post-graduate student, GIS engineer, Higher engineering school, FSAEI HE "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov", Arkhangelsk, Russian Federation; e-mail: heynanabl@gmail.com; Kurilskiy Nature Reserve, Yuzhno-Kurilsk, Russian Federation; e-mail: n.pirtskhalava-karpova@kurilskiy.ru.

Karpov Aleksandr Anatolyevich – post-graduate student, FSAEI HE "Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov", Arkhangelsk, Russian Federation; Deputy Head on territory protection and environmental safety, Kurilskiy Nature Reserve, Yuzhno-Kurilsk, Russian Federation; e-mail: ohrana@kurilskiy.ru.

Grishchenko Mikhail Yuryevich – PhD (Geography), GIS engineer, Senior research scientist, Faculty of Geography, FSBEI HE "Moscow State University named after M.V. Lomonosov", Moscow, Russian Federation; Kurilskiy Nature Reserve, Yuzhno-Kurilsk, Russian Federation; e-mail: m.gri@geogr.msu.ru.

Kozlovsky Evgeny Evgenyevich – Head of Science Department, Kurilskiy Nature Reserve, Yuzhno-Kurilsk, Russian Federation; e-mail: nauka@kurilskiy.ru.

ФИТОМАССА ПОДЛЕСКА В ПРОИЗВОДНЫХ ЛИСТВЕННЫХ НАСАЖДЕНИЯХ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ

кандидат биологических наук **Т.А. Пристова**

Институт биологии ФИЦ Коми НЦ Уральского отделения РАН, г. Сыктывкар, Российская Федерация

Определение запасов органической массы лесными фитоценозами имеет большое значение при оценке биологической продуктивности лиственных насаждений, формирующихся на месте вырубок. Как правило, при оценке продуктивности лесов приводится фитомасса древостоя и напочвенного покрова, в то время как для подлеска этот показатель определяется редко. Исследованы лиственные фитоценозы средней тайги, формирующиеся на месте рубки ельников черничного типа. Подлесок исследуемых фитоценозов представлен шестью видами древесных растений: *Salix caprea* L., *Sorbus aucuparia* L., *Rosa acicularis* Lindl. и *Lonicera pallasii* Ledeb., кроме перечисленных видов в березово-еловом молодняке встречаются *Salix pentandra* L. и *S. philicifolia* L. Для определения фитомассы подлеска использован метод «модельных деревьев» с применением аллометрических уравнений и метод «среднего дерева» для оценки массы единично встречающихся видов. Специфика динамики фитомассы подлеска в исследуемых послерубочных фитоценозах связана с зарастанием вырубок лесообразующими и подлесочными породами одновременно, что в последующем приводит к конкуренции между ними. Согласно проведенным исследованиям, в березово-еловом молодняке за 10 лет фитомасса подлеска снизилась с 8,8 до 4,7 т/га, в осиново-березовом насаждении – с 4.0 до 3.8. В течение всего исследуемого периода в фитомассе подлеска преобладают фракции, длительно аккумулирующие органическое вещество – стволы и ветви. Масса листьев составляет 6-8 % от общей фитомассы подлеска. Динамика аккумуляции органического вещества подлеском определяется биологическими особенностями видов, которые его формируют, их численностью, естественным изреживанием и стадией сукцессии производного насаждения.

Ключевые слова: средняя тайга, леса послерубочного происхождения, подлесок, фитомасса.

UNDERGROWTH PHYTOMASS IN THE SECONDARY DECIDUOUS STANDS OF THE MIDDLE TAIGA

PhD (Biology) **T.A. Pristova**

Institute of Biology of Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
(IB FRC Komi SC UB RAS), Syktyvkar, Russian Federation

Abstract

The determination of organic matter reserves by forest phytocenoses is important in assessing biological productivity of deciduous plantations formed at felling. As a rule, phytomass of the stand and soil cover is given when assessing forest productivity. This indicator is rarely determined for the undergrowth. The deciduous phytocenoses of the middle taiga, formed at the cutting of spruce of myrtillus type, have been studied. The undergrowth of the studied phytocenoses is represented by six species of woody plants: *Salix caprea* L., *Sorbus aucuparia* L., *Rosa acicularis* Lindl. and *Lonicera pallasii* Ledeb. Besides the mentioned species, *Salix pentandra* L. and *S. philicifolia* L. are found in birch and spruce young growths. The method of “model trees” using allometric equations and the method of the “middle tree” for estimating the mass of individual species were used to determine the undergrowth phytomass. The specifics of the undergrowth phytomass dynamics in the studied after-cutting phytocenoses is associated with the overgrowing of felling by forest-forming and undergrowth species at the same time. It subsequently leads to competition between them. According to the studies in birch and spruce young forests, the undergrowth phytomass of decreased from 8.8 to 4.7 t/ha over 10 years; in aspen-birch stands – from 4.0 to 3.8. Throughout the entire studied period, fractions, accumulating

organic matter (trunks and branches) for a long time, prevail in the undergrowth phytomass. The mass of leaves is 6-8 % of the total undergrowth phytomass. The dynamics of the accumulation of organic matter by undergrowth is determined by biological characteristics of the species that form it, their abundance, natural thinning, and succession stage of the secondary stands.

Keywords: middle taiga, forests of logging origin, undergrowth, phytomass.

Введение

Особенностью фитоценозов, формирующихся на вырубках путем естественного лесовозобновления, является существенное изменение пространственной структуры, ярусов и видового состава. В процессе развития лесных экосистем после рубки происходит потеря их естественной структурно-динамической организации по сравнению с исходным фитоценозом [6]. В настоящее время важной задачей является анализ лесовосстановления для последующего прогнозирования лесных запасов. Для этой цели разрабатываются различные методы оценки лесовосстановления [3]. Оценка запасов органической массы растений лесных фитоценозов является важным показателем, отражающим продуктивность лесов в целом и процессы лесовосстановления в частности, однако исследователями больше внимания уделяется древостою, данные по фитомассе подлеска приводятся редко [1, 2, 10, 14, 15, 19, 22]. Исследования лиственных фитоценозов послерубочного происхождения в условиях средней тайги, при которых проведено определение фитомассы отдельных видов древесных растений подлеска, единичны [13]. Особенность развития подлеска в послерубочных производных фитоценозах определяется зарастанием вырубki лесобразующими и подлесочными породами одновременно, что в последующем приводит к конкуренции между ними. Актуальность определения фитомассы древесных растений подлеска и ее динамики обусловлена необходимостью пополнения баз данных по биологической продуктивности и фитомассе лесных фитоценозов в целом [15, 18]. Кроме того, многие виды растений подлеска имеют ресурсное значение [4]. Цель исследований состояла в определении фитомассы древесных растений подлеска в лиственных фитоценозах послерубочного происхождения и ее динамики за 10-летний период.

Объекты и методы

Исследования проведены в подзоне средней тайги на базе Ляльского лесоэкологического стационара Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в Кытловском лесничестве Княжпогостского района Республики Коми. Постоянные пробные площади (ППП) закладывали под руководством д-ра биол. наук, профессора К.С. Бобковой в березово-еловом молодняке разнотравном и осиново-березовом насаждении разнотравно-черничного типа (62°18' с.ш., 50°55' в.д.), произрастающих на торфянисто-подзолисто-глеяватых почвах [8]. До вырубki на месте исследуемых насаждений произрастали: ельник чернично-долгомошный и ельник черничный, с составом древостоя 8Е2Б, подроста – 10Е, возраст 150-190 лет (по данным Кытловского участкового лесничества ГУ РК «Железнодорожное лесничество»). Объекты исследования расположены на территории Кытловского участкового лесничества ГУ РК «Железнодорожное лесничество» и относятся к эксплуатационным лесам. На территории Железнодорожного лесничества ежегодный размер естественного лесовосстановления составляет 74,1 % от общего количества земель, нуждающихся в лесовосстановительных мероприятиях, искусственное лесовосстановление – 3,9 %, комбинированное – 22 %. В результате естественного лесовозобновления на этой территории в большинстве случаев формируются лиственные насаждения. Площадь, занятая лиственными породами, преимущественно березой, по состоянию на 2008 г. составила 29,3 % от общей лесопокрытой площади Железнодорожного лесничества [5].

Древесный ярус березово-елового молодняка сложный по составу и представлен доминирующими *Betula pendula* Roth., *B. pubescens* Ehrh., *Picea obovata* Ledeb., а также единичными экземплярами *Populus tremula* L., *Pinus sylvestris* L., *Abies sibirica* Ledeb. Напочвенный покров березово-елового молодняка отличается большой мозаичностью. На месте трелевочных волоков в исследуемом фитоце-

нозе развивается моховой покров – преимущественно из *Sphagnum magelanicum* и *Polytrichum commune* (Hedw.) Br. Из кустарничков доминируют *Vaccinium myrtillus* и *V. vitis-idaea*, из трав – *Juncus fliformis* и *Agrostis tenuis*, среди мхов *Polytrichum commune* Sch. Et Gmb., *Sphagnum magelanicum* Brid., *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br., Sch. Et Gmb.

Древостой осиново-березового насаждения состоит из *Populus tremula*, *Betula pendula*, *B. pubescens*, *Picea obovata*, единично *Abies sibirica*. В травяно-кустарничковом ярусе доминируют *Vaccinium myrtillus* и *V. vitis-idaea*, среди трав – *Oxalis acetosella* L., *Solidago virgaurea* L., *Rubus saxatilis* L., *Aegopodium podagraria* L. Для мохового яруса в исследуемом осиново-березовом фито-ценозе характерно неравномерное распределение, преобладает *Polytrichum commune*, на отдельных участках *Sphagnum magelanicum*.

Подлесок исследуемых фитоценозов представлен 6 видами древесных растений и состоит из *Salix caprea* L., *Sorbus aucuparia* L. и единичных экземпляров *Rosa acicularis* Lindl. (высотой до 0,5 м) и *Lonicera pallasii* Ledeb. (от 0,6 до 1 м), кроме перечисленных видов в березово-еловом молодняке встречаются *Salix pentandra* L. и *S. philicifolia* L.

Согласно таксационным измерениям, проведенным в 10-летнем березово-еловом молодняке, состав древостоя (по запасу) – 8Б2Еед.Сед.Ос и 7Б3Е+С ед.Ос в 20-летнем возрасте, в 38-летнем осиново-березовом насаждении – 5Ос4Б1Еед.Пх и 6Ос3Б1Еед.Пх – в 48-летнем. Запасы древесины за 10 лет в березово-еловом молодняке возросли с 19 до 52, в осиново-березовом насаждении с 161 до 232 м³/га. Более подробное описание древостоя и напочвенного покрова исследованных объектов приведено ранее [9].

Для определения запасов фитомассы подлеска в исследуемых фитоценозах использован метод «модельных деревьев» с последующим применением аллометрических уравнений для оценки отдельных фракций древесных растений и фитомассы подлеска в целом [15, 17, 20, 23]. Фитомасса шиповника и жимолости рассчитывалась по весу среднего по высоте растения, так как эти виды представлены в подлеске единичными экземпляра-

ми [16]. На основании анализа результатов таксационных измерений для каждого из видов древесных растений подлеска отбирали растения разной высоты, которые срезали под корень и определяли вес ствола, ветвей и листы. Корни выкапывали, отбирали и обрабатывали в соответствии с общепринятыми методиками [11, 16]. Все фракции фитомассы взвешивали в сыром виде, затем отбирали образцы на определение влажности, которые высушивались при температуре 105 °С до абсолютно сухого веса [11]. В последующем вес отдельных фракций древесных растений пересчитывали на абсолютно сухой вес.

Результаты и обсуждение

Роль подлеска в накоплении органического вещества фитоценозом во многом определяется его видовым составом и густотой. Среди исследуемых фитоценозов наибольшей густотой подлеска отличается 10-летний березово-еловый молодняк, наименьшей – 48-летнее осиново-березовое насаждение. Общая численность подлеска за 10 лет снижается в березово-еловом молодняке с 13 до 8, в осиново-березовом насаждении – с 6 до 3 тыс. шт./га.

Снижение численности связано с естественным изреживанием, которое приводит к увеличению количества сухих деревьев в подлеске. В составе подлеска березово-елового молодняка в 10-летнем возрасте по количеству преобладали ивы, в 20-летнем – ивы и рябина, в осиново-березовом насаждении на протяжении всего исследуемого периода – рябина (табл. 1). Среди рассматриваемых древесных видов подлеска наибольшими значениями возраста, диаметра и высоты характеризуются ива козья и рябина, наименьшими – шиповник и жимолость. Так, 18-летняя ива козья в березово-еловом молодняке достигает высоты 8,6 м и 12 см в диаметре, рябина – 7,4 м и 9 см соответственно.

Динамика фитомассы древесных растений подлеска специфична и обусловлена биологическими особенностями видов, их численностью и стадией сукцессионного развития исследуемых производных насаждений. За 10-летний период общие запасы органического вещества древесных растений подлеска снизились с 8,8 до 4,7 т/га в березово-еловом молодняке и с 4,0 до 3,8 т/га в

осиново-березовом насаждении (табл. 2). Довольно близкие показатели (3,9 т/га) приводятся для подлеска 25-летнего березняка, расположенного южнее (Республика Марий Эл) [2]. Ведущая роль в накоплении фитомассы подлеска в исследуемых фитоценозах принадлежит рябине и ивам. Снижение массы рябины в березово-еловом молодняке более чем в 2 раза обусловлено рядом ее биологических особенностей. Она хорошо размножается корневыми отпрысками, и первые 3-5 лет после рубки происходит увеличение ее численности, которая к 10 годам достигает максимума, однако через 10-12 лет она вытесняется более долговечными и быстрорастущими лиственными породами – березой и осиной [4, 19]. Снижение с 3,9 до 3,7 т/га массы рябины, составляющей до 90 % от общей фитомассы подлеска осиново-березового насаждения, связано с уменьшением количества деревьев в результате естественного изреживания и увеличением до 25 % численности усыхающих особей (табл. 2). Уменьшение фитомассы рябины в данном насаждении по сравнению с молодняком небольшое, так как большая часть рябины представлена крупными деревьями. Фитомасса кустарников – шиповника и жимолости – в исследуемых фитоценозах не превышает 1 %, что обусловлено небольшими размерами растений и их низкой численностью в исследуемых фитоценозах (табл. 2).

Установлено, что фитомасса древесных растений подлеска и ее фракционное распределение определяются возрастом и стадией сукцессии исследуемых фитоценозов. В надземной фитомассе древесных растений подлеска преобладают органы, длительно аккумулирующие органическое вещество – стволы и ветви, на которые приходится более 80 % от надземной фитомассы подлеска исследуемых фитоценозов (табл. 2).

На ассимилирующие органы в березово-еловом молодняке приходится около 8 %, в осиново-березовом насаждении – 6-7 % от надземной фитомассы подлеска. Схожие показатели по доле листьев в надземной фитомассе приводятся для ивы козьей в среднетаежных лиственных фитоценозах Вологодской области: 15 % в 18-летнем березово-еловом молодняке и 5,5 % в 37-летнем березово-еловом насаждении с участием осины, при этом отмечается, что процент веса листвы ивы с увеличением ее диаметра уменьшается [13]. Соотношение фракций фитомассы в исследуемых насаждениях также связано с особенностью распределения надземных фракций фитомассы рябины – небольшая масса ветвей и листьев по отношению к стволу – 1:1,7 в березово-еловом молодняке и 1:2,10 в осиново-березовом насаждении. Такое соотношение объясняется тем, что рябина, несмотря на свою теневыносливость, в условиях недостаточной освещенности под пологом древостоя формирует зонтикообразную крону [4].

Таблица 1

Долевое участие видов в общем количестве древесных растений подлеска исследуемых фитоценозов, %

Вид растения*	Березово-еловый молодняк		Осиново-березовое насаждение	
	10 лет	20 лет	38 лет	48 лет
Рябина обыкновенная	29.6	45.6	97.4	92.4
Ива**	66.7	53.4	1.7	6.5
Шиповник иглистый	3.6	0.9	0.2	0.4
Жимолость Палласа	0.1	0.1	0.7	0.7

Примечания. * Видовые латинские названия растений подлеска приведены в описании объектов

** Данные по доле участия ивы в осиново-березовом насаждении представлены для одного вида – *Salix caprea*, в березово-еловом молодняке общие для трех видов – *Salix caprea*, *S. pentandra* и *S. philicifolia*.

Природопользование

Таблица 2

Фитомасса древесных растений подлеска исследуемых лиственных фитоценозов, кг/га

Вид растения	Ствол (стволик)		Ветви		Листья		Корни		Всего	
	2005	2015	2005	2015	2005	2015	2005	2015	2005	2015
Березово-еловый молодняк										
Рябина	3578.0	1575.2	611.4	270.9	322.7	132.1	261.5	110.3	4773.6	2088.5
Ива*	2744.5	1778.4	318.1	200.5	380.2	239.5	564.0	427.0	4006.8	2645.4
Жимолость	0.1	0.4	0.1	0.4	0.04	0.2	0.1	0.9	0.3	1.9
Шиповник	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4	0.4
Осиново-березовое насаждение										
Рябина	2931.0	2761.5	488.1	470.8	271.5	236.0	218.4	197.1	3909.0	3665.4
Ива*	60.0	72.6	5.4	6.6	6.5	8.0	9.4	13.4	81.3	100.6
Жимолость	0.09	0.1	0.09	0.1	0.04	0.04	0.2	0.2	0.4	0.4
Шиповник	0.07	0.1	0.05	0.08	0.07	0.1	0.07	0.1	0.3	0.4

Примечание. *Данные по фитомассе ивы в осиново-березовом насаждении представлены для одного вида – *Salix caprea*, в березово-еловом молодняке общие для трех видов – *Salix caprea*, *S. pentandra* и *S. philicifolia*.

Таблица 3

Доля участия фракций фитомассы древесных растений подлеска исследуемых лиственных фитоценозов,
% от общей массы фракции

Вид растения	Ствол (стволик)		Ветви		Листья		Корни		Всего	
	2005	2015	2005	2015	2005	2015	2005	2015	2005	2015
Березово-еловый молодняк										
Рябина	56.590	46.960	65.76	57.41	45.9	35.52	31.67	20.49	54.361	44.10
Ива*	43.400	53.020	34.22	42.49	54.08	64.40	68.31	79.32	45.631	55.86
Жимолость	0.005	0.015	0.01	0.05	0.006	0.05	0.01	0.17	0.003	0.03
Шиповник	0.005	0.005	0.01	0.05	0.014	0.03	0.01	0.02	0.005	0.01
Осиново-березовое насаждение										
Рябина	97.99	97.430	98.88	98.58	97.62	96.67	95.76	93.50	97.90	97.31
Ива*	2.005	2.560	1.094	1.38	2.341	3.28	4.12	6.36	2.034	2.67
Жимолость	0.003	0.005	0.016	0.023	0.014	0.01	0.09	0.09	0.060	0.01
Шиповник	0.002	0.005	0.010	0.017	0.025	0.04	0.03	0.05	0.006	0.01

Примечание. *Данные по доле участия ивы в фитомассе подлеска в осиново-березовом насаждении представлены для одного вида – *Salix caprea*, в березово-еловом молодняке – общие для трех видов – *Salix caprea*, *S. pentandra* и *S. philicifolia*.

Согласно полученным данным, доля подземных органов древесных растений подлеска в фитомассе исследуемых фитоценозов не превышает 12 %, при этом в березово-еловом молодняке она составляет 9,4-11,4 %, в осиново-березовом насаждении – около 6 % от общей фитомассы подлеска (табл. 2). Небольшая доля корней в общей фитомассе подлеска обусловлена определенными особенностями и спецификой онтогенеза некоторых видов. Так, для корневой системы ивы

козьей в процессе ее роста характерно отмирание или невыраженность главного корня и развитие придаточных корней. С возрастом у ивы козьей разрушаются основные скелетные корни [7].

В березово-еловом молодняке ива представлена тремя видами – *Salix caprea*, *S. pentandra* и *S. philicifolia*, которые занимают разные ниши в древесной растительности. За 10-летний период их фитомасса снижается в 1,5 раза (табл. 2). В молодняке *Salix caprea* имеет жизненную форму

одноствольного дерева, которая отличается светолюбивостью, поэтому не выдерживает конкуренции с формирующимся древостоем и постепенно отпадает [7, 21]. Кустарниковые формы ивы (*S. pentandra* и *S. philicifolia*) более устойчивы и произрастают под пологом формирующегося древостоя молодняка в виде биогрупп, состоящих из нескольких стволов, которые в условиях увеличивающегося затенения древостоем постепенно отмирают [12]. Ива, представленная в подлеске осиново-березового насаждения одним видом, ивой козьей, представленной одноствольными деревьями, в течение исследуемого периода имеет небольшую фитомассу (табл. 2). Объясняется это тем, что ива в данном фитоценозе представлена в основном мелкой порослью высотой до 0,5-1 м и крупными деревьями – около 5 м, при этом живых деревьев высотой от 1 до 4,5 м мало, но много сухих. Такое распределение по высоте обусловлено гибелью порослевых побегов ивы козьей под пологом древостоя в течение 5-7 лет, что связано с биологическими особенностями данного вида, возрастом и стадией сукцессионного развития осиново-березового фитоценоза [7, 21].

В березово-еловом молодняке доля участия рябины в формировании фитомассы подлеска за исследуемый период снижается на 10 %, ивы, напротив, увеличивается на 10 %, жимолости и шиповника – увеличивается (табл. 3). Изменение доли участия рябины и ивы в фитомассе происходит за счет стволовой древесины, жимолости и шиповника – за счет листьев.

В осиново-березовом насаждении доля участия ивы и рябины в формировании фитомассы подлеска практически не изменяется и составляет около 97 % для рябины и около 2 % для ивы (табл. 3). Участие жимолости в фитомассе снижается, а шиповника – увеличивается. При этом доля участия фракций фитомассы ивы и рябины за 10-летний период практически остается такой же.

Выводы

1. Согласно таксационным измерениям, численность подлеска за 10 лет снижается в березово-еловом молодняке с 13 до 8, в осиново-

березовом насаждении – с 6 до 3 тыс. шт./га. Наибольшей густотой подлеска отличается 10-летний березово-еловый молодняк, наименьшей – 48-летнее осиново-березовое насаждение.

2. Установлено, что фитомасса подлеска лиственных фитоценозов послерубочного происхождения, представленного шестью видами древесных растений, за 10 лет снижается с 8,8 до 4,7 т/га в березово-еловом молодняке и с 4,0 до 3,8 т/га в осиново-березовом насаждении. Ведущая роль в формировании фитомассы подлеска исследуемых фитоценозов принадлежит иве и рябине.

3. Выявлено, что в фитомассе древесных растений подлеска преобладают органы, длительно аккумулирующие органическое вещество, – стволы и ветви, на которые приходится более 80 % общих запасов фитомассы подлеска исследуемых фитоценозов. На ассимилирующие органы в березово-еловом молодняке приходится около 8 %, в осиново-березовом насаждении – 6-7 % от надземной фитомассы подлеска.

4. Аккумуляция органического вещества древесными растениями подлеска и ее динамика обусловлена биологическими особенностями видов, которые его формируют, их численностью, естественным изреживанием и стадией сукцессии.

5. Полученные в результате проведенных исследований данные по фитомассе и динамике подлеска в производных лиственных насаждениях средней тайги, формирующихся после рубки еловых лесов черничного типа, могут быть использованы для пополнения базы данных по продуктивности лесов и оценке запасов для видов, имеющих ресурсное значение.

Работа выполнена при финансовой поддержке темы госзадания Института биологии Коми научного центра УрО РАН (№ АААА-А 17-117122090014-8) «Пространственно-временная динамика структуры и продуктивности фитоценозов лесных и болотных экосистем на европейском Северо-Востоке России».

Автор выражает искреннюю благодарность К.С. Бобковой и А.В. Манову за помощь в сборе и обработке материала.

Библиографический список

1. Биопродукционный процесс в лесных экосистемах / под общ. ред. К.С. Бобковой, Э. П. Галенко. – Санкт-Петербург : Наука, 2001. – 278 с. – ISBN 5-02-026154-8.
2. Закамская, Е. С. Фитомасса подлеска в березняках / Е. С. Закамская, А. В. Закамский // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 9 (51). – С. 6–9. – DOI 10.18454.
3. Разработка методики для оценки успешности лесовосстановления дистанционными методами / А. А. Карпов, Н. Р. Пирцхалава-Карпова, Р. А. Алешко, А. П. Богданов, А. Г. Гудина // Лесотехнический журнал. – 2019. – № 3. – С. 25–34. – DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/3.
4. Ковалев, Н. В. Ресурсный потенциал и ценотическая роль рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) в лесных экосистемах Ленинградской области: специальность 06.03.02 «Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация»: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / Н. В. Ковалев ; Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С.М. Кирова. – Санкт-Петербург, 2012. – 20 с.
5. Лесохозяйственный регламент ГУ «Железнодорожное лесничество» Комитета лесов Республики Коми. 2008 г. – URL: <http://www.komles.rkomi.ru/page/17998> (дата обращения 08.02.2010).
6. Мелехов, И. С. Изучение концентрированных рубок и возобновления леса в связи с ними в таежной зоне / И. С. Мелехов // Концентрированные рубки в лесах Севера: сборник. – Москва : Изд-во АН СССР, 1954. – С. 5–47.
7. Недосеко, О. И. Разнообразие жизненных форм ивы козьей (*Salix caprea* L.) / О. И. Недосеко // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отд. биол. – 2011. – Т. 116. – Вып. 5. – С. 55–63.
8. ОСТ 56–69–83. Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки [Trial areas are forest inventory. Bookmark Method]. – Москва : ЦБНТИ гослесхоза СССР, 1983. – 60 с.
9. Пристова, Т. А. Динамика надземной фитомассы живого напочвенного покрова в лиственных фитоценозах послерубочного происхождения / Т. А. Пристова // Известия Самарского научного центра РАН. – 2019. – Т. 21 – № 2 (2). – С. 204–209.
10. Родин, Л. Е. Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности / Л. Е. Родин, Н. И. Базилевич. – Москва-Ленинград : Наука, 1965. – 254 с.
11. Родин, Л. Е. Методические указания к изучению динамики и биологического круговорота в фитоценозах / Л. Е. Родин, Н. П. Ремезов, Н. И. Базилевич. – Ленинград : Наука, 1968. – 145 с.
12. Сидорова, О. В. Эколого-биоморфологические особенности ивы пятитычинковой (*Salix pentandra* L.) / О. В. Сидорова, А. С. Пахов, А. А. Софронов // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: естественные науки. – 2012. – № 4. – С. 82–89.
13. Смирнов, В. В. Изменение сырораствующей органической массы в еловых и елово-лиственных древостоях средней тайги в связи с их возрастом / В. В. Смирнов // Материалы к научному обоснованию некоторых лесохозяйственных мероприятий в северной части Вологодской области: труды Института леса и древесины. Москва-Ленинград : Изд-во Академии наук СССР, 1962. – С. 103–125.
14. Трофимова, И. Л. Надземная фитомасса и ее годичная продукция в спелых сосняках Среднего Урала: специальность 06.03.02. «Лесоведение, лесоводство, лесоустройство и лесная таксация»: дис. ... канд. с.-х. наук / Ия Леонидовна Трофимова. – Екатеринбург, 2015. – 249 с.
15. Усольцев, В. А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных и ее приложения / В. А. Усольцев ; УрО РАН. – Екатеринбург, 2007. – 636 с. – ISBN 978-5-7691-2122-7.
16. Усольцев, В. А. Методы определения биологической продуктивности насаждений / В. А. Усольцев, С. В. Залесов ; Уральский гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург, 2005. – 147 с.
17. Уткин, А. И. Определение запасов углерода насаждений на пробных площадях: сравнение аллометрического и конверсионно-объемного методов / А. И. Уткин, Д. Г. Замолотчиков, Г. Н. Коровин // Лесоведение. – 1997. – № 5. – С. 51–65.

18. Aalto, M. Feedstock availability and moisture content data processing for multi-year simulation of forest biomass supply in energy production / M. Aalto, O. Korpinen, T. Ranta // *Silva fennica*. – 2019. – Vol. 53. – № 4. – 15 p.
19. Korsmo, H. Weight equations for determining biomass fractions of young hardwoods from natural regenerated stand / H. Korsmo // *Scandinavian Journal of forest Research*. – 1995. – № 10. – P. 333–346.
20. Ledermann, T. Biomass equations from data of old long-term experimental plots / T. Ledermann, M. Neumann // *Austrian Journal of Forest Science*. – 2006. – № 123. – P. 47–64.
21. Malmivaara, E. Pajujen mahdollisuudet metsäpuiden jalostuksessa / E. Malmivaara, J. Mikola, C. Palmberg // *Silva fennica*. – 1971. – № 1. – P. 11–19.
22. Muukkonen, P. Biomass equations for European trees: addendum / P. Muukkonen, R. Makipaa // *Silva fennica*. – 2006. – № 40 (4). – P. 763–773.
23. Repola, J. Biomass Equations for Birch in Finland / J. Repola // *Silva Fennica*. – 2008. – № 42 (4). – P. 605–624.

References

1. *Bioprodukcionnyj process v lesnyh jekosistemah Severa* [Bioproduction process in forest ecosystems of the North]. Sankt-Peterburg: Nauka, 2001. 278 p.
2. Zakamskaja E.S., Zakamskij A.V. (2016) *Fitomassa podleska v bereznejakah* [Phytomass of undergrowth in birch forests]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal* [International Research Journal]. №9 (51). pp. 6-9. doi: 10.18454. (in Russian).
3. Karpov A.A., Pirtskhalava-Karpova N.R., Aleshko R.A., Bogdanov A.P., Gudina A.G. (2019) *Razrabotka metodiki dlja ocenki uspešnosti lesovosstanovlenija distancionnymi metodami* [Development of a methodology for assessing the success of reforestation by remote methods]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal]. Vol. 9. No. 3. pp. 25-34 (in Russian). DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.3/3.
4. Kovalev N.V. *Resursnyj potencial i cenoticheskaja rol' rjabiny obyknovnoj (Sorbus aucuparia L.) v lesnyh jekosistemah Leningradskoj oblasti*. Dis. kand. s.-h. nauk [Resource potential and cenotic role of common mountain ash (*Sorbus aucuparia* L.) in forest ecosystems of the Leningrad region. PhD thesis]. Sankt-Peterburskaja gosudarstvennaja lesotekhnicheskaja akademija im. S.M. Kirova. Sankt-Peterburg, 2012. 20 p. (in Russian).
5. *Lesohozjajstvennyj reglament GU «Zheleznodorozhnoe lesnichestvo» Komiteta lesov Respubliki Komi* [Forestry regulations of the State Institution “Zheleznodorozhnoe Forestry” of the Forest Committee of the Komi Republic]. 2008. URL: <http://www.komles.rkomi.ru/page/17998> (as amended on 08.02.2010) (in Russian).
6. Melehov I.S. *Izuchenie koncentrirovannyh rubok i vozobnovlenija lesa v svjazi s nimi v taezhnoj zone* [The study of concentrated cutting and reforestation in connection with them in the taiga zone]. *Koncentrirovannye rubki v lesah Severa: sbornik statej* [Concentrated cutting in the forests of the North: a collection of articles]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1954. pp. 5-47 (in Russian).
7. Nedoseko O.I. (2011) *Raznoobrazie zhiznennyh form ivy koz'ej (Salix caprea L.)* [A variety of life forms of goat willow (*Salix caprea* L.)] *Bjul. Mosk. obshhestva ispytatelej prirody. Otd. biol.* [Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Department of Biology]. Vol. 116. Iss. 5. pp. 55-63 (in Russian).
8. OST 56–69–83. *Probnye ploshhadi lesoustroitel'nye. Metod zakladki* [Trial areas are forest inventory. Bookmark Method]. Moscow: CBNTI gosleshoza USSR, 1983. 60 p. (in Russian).
9. Pristova T.A. (2019) *Dinamika nadzemnoj fitomassy zhivogo napochvennogo pokrova v listvennyh fitocenoazah poslerubochnogo proishozhdenija* [Dynamics of the aboveground phytomass of living soil cover in deciduous phytocenoses of postcutting origin]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. Vol. 21. № 2 (2). p. 204-209 (in Russian).
10. Rodin L.E., Bazilevich N.I. *Dinamika organicheskogo veshhestva i biologicheskij krugovorot v osnovnyh tipah rastitel'nosti* [The dynamics of organic matter and the biological cycle in the main types of vegetation]. M.-L.: Nauka, 1965. 254 p. (in Russian).

11. Rodin L.E., Remezov N.P., Bazilevich N.I. *Metodicheskie ukazaniya k izucheniju dinamiki i biologicheskogo krugovorota v fitocenoze* [Guidelines for the study of dynamics and the biological cycle in phytocenoses]. Leningrad: Nauka, 1968. 145 p. (in Russian).
12. Sidorova O.V., Pahov A.S., Sofronov A.A. (2012) *Jekologo-biomorfologicheskie osobennosti ivy pjatitychinkovoj (Salix pentandra L.)* [Ecological and biomorphological features of five-stamen willow (*Salix pentandra* L.)]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Serija: estestvennye nauki* [Bulletin of the Northern (Arctic) Federal University. Series: natural sciences]. № 4. pp. 82-89 (in Russian).
13. Smirnov V.V. *Izmenenie syrорastushhej organicheskoy massy v elovyh i elovo-listvennyh drevostojah srednej tajgi v svyazi s ih vozrastom* [Change in raw-growing organic matter in spruce and spruce-deciduous stands of the middle taiga due to their age]. *Materialy k nauchnomu obosnovaniju nekotoryh lesohozjajstvennyh meroprijatij v severnoj chasti Vologodskoj oblasti: trudy Instituta lesa i drevesiny* [Materials for the scientific substantiation of some forestry activities in the northern part of the Vologda Oblast: Proceedings of the Forest and Timber Institute]. Moskva-Leningrad: Izd-vo Akademii nauk SSSR, 1962. pp. 103-125 (in Russian).
14. Trofimova I.L. *Nadzemnaja fitomassa i ee godichnaja produkcija v spelyh sosnjakah Srednego Urala*. Dis. kand. s.-h. nauk [Elevated phytomass and its annual production in ripe pine forests of the Middle Urals: PhD thesis]. Ekaterinburg, 2015. 249 p. (in Russian).
15. Usol'cev V.A. *Biologicheskaja produktivnost' lesov Severnoj Evrazii: metody, baza dannyh i ee prilozhenija* [Biological productivity of forests of Northern Eurasia: methods, database and its applications]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2007. 636 p.
16. Usol'cev V.A., Zalesov S.V. *Metody opredelenija biologicheskoy produktivnosti nasazhdenij* [Methods for determining the biological productivity of plantations]. Ekaterinburg: Ural'skij gos. lesotehn. un-t, 2005. 147 p. (in Russian).
17. Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Korovin G.N. (1997) *Opredelenie zapasov ugleroda nasazhdenij na probnyh ploshhadjah: sravnenie allometricheskogo i konvercionno-obemnogo metodov* [Determination of carbon stocks of stands on trial plots: comparison of allometric and conversion-volumetric methods]. *Lesovedenie*. № 5, p. 51-65 (in Russian).
18. Aalto M., Korpinen O., Ranta T. (2019) Feedstock availability and moisture content data processing for multi-year simulation of forest biomass supply in energy production. *Silva fennica*. Vol. 53. № 4. 15 p.
19. Korsmo H. (1995) Weight equations for determining biomass fractions of young hardwoods from natural regenerated stand. *Scandinavian Journal of forest Research*. № 10. pp. 333-346.
20. Ledermann T., Neumann M. (2006) Biomass equations from data of old long-term experimental plots. *Austrian Journal of Forest Science*. № 123. pp. 47-64.
21. Malmivaara E., Mikola J., Palmberg C. (1971) *Pajujen mahdollisuudet metsäpuiden jalostuksessa* [The possibilities of willows in forest tree breeding]. *Silva fennica*. № 1. pp. 11-19.
22. Muukkonen P., Makipaa R. (2006) Biomass equations for European trees: addendum. *Silva fennica*. 40 (4). pp. 763-773.
23. Repola J. (2008) Biomass Equations for Birch in Finland. *Silva Fennica*. 42(4). P. 605-624.

Сведения об авторе

Пристова Татьяна Александровна – кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела лесобиологических проблем Севера Института биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Сыктывкар, Российская Федерация; e-mail: pristova@ib.komisc.ru.

Information about the author

Pristova Tatyana Aleksandrovna – PhD (Biology), researcher, Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russian Federation; e-mail: pristova@ib.komisc.ru.

ВЛИЯНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЛОС НА ПОКАЗАТЕЛЬ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ

доктор сельскохозяйственных наук **О.В. Рулева**

научный сотрудник, соискатель **Е.В. Семинченко**

ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения
Российской академии наук»

В статье изложены материалы исследований по влиянию полезащитных лесных полос на рост и развитие ярового ячменя. Установлено, что запасы продуктивной влаги на межполосной клетке распределены неравномерно и варьируются в зависимости от удаленности от лесной полосы. Наибольший весенний влагозапас в условиях агролесоландшафта накапливается в зоне от 5Н до 15Н от полезащитных лесных полос. Урожайность ярового ячменя на межполосном пространстве формируется в зависимости от расстояния до лесной полосы. На основе математического моделирования и эмпирических данных критериально оценивалось расстояние от лесной полосы и её влияние на фазы развития растений. Для выяснения факторов, влияющих на формирование урожая, были обработаны данные среднесуточного потребления влаги растениями ячменя по фазам развития, с помощью программы для ЭВМ STATISTICA для получения функциональных связей. Была установлена высокая корреляция между расстоянием от ЛП и фазами ячменя: выход в трубку ($R = -0,94$), фазы трубкования ($R = -0,93$), в фазу цветения ($R = -0,93$). Прогноз развития ячменя на фазах налив и созревание зерна чуть ниже и составил $R = -0,89$. Связь коэффициента водопотребления с расстоянием от лесной полосы не выявлена. Проведенный анализ показал влияние коэффициента водопотребления ячменя в зависимости от расстояния до лесных полос на фазы вегетации данной культуры. Результаты исследования свидетельствуют о важной роли лесных полос.

Ключевые слова: ячмень, защитная полоса, водопотребление, фаза вегетации, урожайность, коэффициенты корреляции и детерминации.

INFLUENCE OF FOREST SHELTER BELTS ON THE WATER CONSUMPTION INDICATOR OF SPRING BARLEY

DSc (Agriculture) **O.V. Ruleva**

Researcher, applicant for a degree **E.V. Seminchenko**

Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Reclamation and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences"

Abstract

The article presents research materials on the impact of shelterbelts on the growth and development of spring barley. It has been established that the reserves of productive moisture on the inter-strip cell are distributed unevenly and vary depending on the distance from the forest belt. The greatest spring moisture reserve (in the conditions of agroforestry) accumulates in the zone from 5H to 15H from forest shelter belts. The yield of spring barley in the inter-strip space is formed depending on the distance to the forest belt. The distance from the forest belt and its influence on the phases of plant development has been critically evaluated based on mathematical modeling and empirical data. Data on the average daily moisture consumption of barley plants by development phases have been processed to clarify the factors affecting the formation of the crop. Functional relationships have been obtained using STATISTICA computer program. High correlation between the distance from the forest belt and the phases of barley has been found: tube forming ($R = -0.94$), booting stage ($R = -0.93$), blooming period ($R = -0.93$). The forecast for barley development in the phases

of grain filling and ripening is slightly lower and amounted to $R = -0.89$. The relationship between the coefficient of water consumption and the distance from the forest belt has not been identified. The analysis has showed the influence of the barley water consumption coefficient depending on the distance to the forest belts on the vegetation phases of this crop. The results of the study indicate the important role of forest belts.

Keywords: barley, protective belt, water consumption, vegetation phase, productivity, correlation and determination coefficients

Введение

В Волгоградской области, наряду с озимой пшеницей, важной зернофуражной культурой является яровая ячмень, ежегодно под зерновые отводится более 1,5 млн га. В зоне неустойчивого земледелия, куда относится и Волгоградская область, за счет использования лесной мелиорации можно увеличить потенциал пашни и получить более высокий урожай. На урожай зерна влияет и состояние самой пашни. В условиях максимального насыщения севооборота зерновыми, когда на значительной площади размещения зерновых культур приходится сохранять стерню, возрастает опасность распространения болезней, которые уменьшают урожайность [3, 5].

В последнее время потенциальные возможности ячменя используются слабо, так как почти не вносятся минеральные удобрения под данную культуру, и он не набирает массу зерна, а также пропадает значительная часть зерна из-за отсутствия фитосанитарных обработок. За счет естественного плодородия почвы при благоприятных погодных условиях на светло-каштановых почвах можно получить 1,5-2,0 т/га зерна [7, 11].

В засушливых районах почвенная влага – это важный фактор получения гарантированного урожая. В условиях непромывного режима атмосферные осадки являются единственным источником для пополнения почвенных запасов влаги. В подзоне светло-каштановых почв выпадение осадков неравномерное, поэтому нужно проводить мероприятия по накоплению, сохранению и снижению непродуктивного расхода, например, на физическое испарение [4, 12]. В связи с этим, для улучшения микроклимата полей и предотвращения дефляции поля располагают под защитой лесных полос [1, 2].

Материалы и методы

Для исследования влияния лесных насаждений на продуктивность сельскохозяйственных культур в землепользовании «Городищенское» ка-

дастровый номер 34:03:000000:12 на полях НВНИ-ИСХ – филиале ФНЦ агроэкологии РАН был заложен полевой опыт в системе лесных полос. Высота лесной полосы 5 метров, 4-рядная. Породный состав: клен, вяз, уплотнена смородиной золотистой. Почва опытного участка – светло-каштановая тяжелосуглинистая с содержанием гумуса в пахотном слое 1,74 %, рН почвенного раствора – 8,1. Содержание легкогидролизуемого азота 2-7 мг, подвижного фосфора – 3-11 мг и обменного калия – 30-40 мг/100 г почвы. Объектом исследования был яровой ячмень Медикум 139, норма высева 3,8 млн шт./га. Сумма осадков за 2017–2018 сельскохозяйственный год составила 393,0 мм против среднемноголетнего значения 339,2 мм. Технология возделывания ярового ячменя общепринятая для зоны проведения исследований. Глубокая основная обработка почвы включала проведение чизелевания на 0,3-0,32 м с оборотом поверхностного пласта на глубину 0,2-0,22 м орудием ОЧО-5-40 и многофункциональными рабочими органами модульного типа «РАНЧО» (отвал и широкое долото). Яровой ячмень сеяли в оптимально установленные для зоны исследований сроки.

Результаты и обсуждение

Исследования показали, что запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в межполосном пространстве распределены неравномерно и варьируют в зависимости от расстояния до лесной полосы. Так, перед посевом больше всего продуктивной влаги накапливается в зонах, приближенных к лесной полосе от 5 до 10Н и варьируется от 26,9 до 30,6 мм в зависимости от удаления от лесных полос.

Дифференцированное изменение содержания продуктивной влаги по мере удаления от ПЗЛП сохраняется и в следующие месяцы вегетации. Так, в фазу колошения ярового ячменя, которая наступает в 1-й декаде июля, количество доступной влаги для растений в метровом слое в зоне от 5 до 15Н варьи-

ровалось от 13,6 до 16,4 мм, на расстоянии 20-30Н – 8,3-9,0 мм.

Водопотребление различных культур в отдельных зонах неодинаково, что обуславливается биологическими особенностями растений, динамикой их роста, величиной урожая, а также почвенно-климатическими условиями [9, 12].

Исследования показали, что при выращивании в одних и тех же почвенно-климатических условиях суммарное водопотребление посевами ярового ячменя на лесомелиорируемой территории различно в зависимости от удаления от ПЗЛП.

Суммарное водопотребление ярового ячменя на расстоянии 5Н было самым высоким – 118,4 мм, уменьшалось в зависимости от удаления от лесных насаждений и составило 114,6 мм в зоне 10-30Н.

Важным показателем, характеризующим экономное расходование воды, является коэффициент водопотребления, показывающий количество воды, израсходованное растением на создание весовой единицы урожая [7, 8].

Исследованиями установлено, что более эффективно влага использовалась посевами ячменя на расстояниях 5 и 10Н. Коэффициент водопотребления равнялся 65,8 и 63,7 соответственно при урожайности 1,8 т/га. В зависимости от удаления от лесной полосы коэффициент водопотребления изменялся от 109,3 (15Н) до 71,7 (30Н) при урожайности 1,05 до 1,6 т/га соответственно.

Анализ, выполненный с помощью пакета прикладных программ для STATISTICA 10, по суммарному водопотреблению в 1,0 м слое почвы позволил выявить следующие связи.

Зависимость запасов влаги (У) при посеве от расстояния до ЛП (Н) описывается с помощью уравнения экспоненциальной зависимости вида

$$Y = 29,33 * \exp^{-0,0037H}, \quad R^2 = -0,66$$

Суммарное водопотребление (У) от расстояния до ЛП (Н) представлено функцией вида $Y = 117,17 * \exp^{-0,0009H}$, $R^2 = -0,66$.

На формирование урожайности ярового ячменя полезащитная лесная полоса также оказала

влияние [6, 12]. В депрессионной зоне (до 5Н) урожайность ячменя была низкой и не превышала 0,5 т/га. Самая высокая урожайность была при выращивании ячменя в зоне от 5 до 15Н – 1,8 т/га и далее варьировалась в зависимости от удаленности от ЛП от 1,05 т/га (15Н) до 1,6 т/га (30Н).

Анализ урожая как фазы созревания за период вегетации ячменя не выявил функциональной связи. Это обусловлено тем, на наш взгляд, что в элиминирующей фазе развития зерна сыграли роль и другие факторы, например ветер [8], которые мы не рассматривали в нашей статье.

Был статистически обработан и коэффициент водопотребления за вегетационный период. Четкой связи получено не было.

Более точным показателем, определяющим расход влаги из почвы, является их среднесуточный показатель [5, 10].

Начало и конец вегетации ярового ячменя характеризовался более низкими показателями среднесуточного расхода продуктивной влаги из метрового слоя. Максимальные значения этого показателя отмечены на период «цветение», так как на этот период выпало 60,8 мм осадков, минимальные – в фазу «трубкование», что отрицательно повлияло на урожайность ячменя. В связи с тем, что во все основные фазы роста и развития ярового ячменя выпадение атмосферных осадков было неравномерным, низкие запасы продуктивной влаги не позволили получить высокий урожай ярового ячменя.

Для выявления факторов, влияющих на формирование урожая, были обработаны среднесуточные показатели потребления влаги растениями ячменя по фазам развития (рис. 1) с помощью программы для ЭВМ STATISTICA.

Для примера выявления функциональных связей фаз развития ячменя с расстоянием до лесных полос взят период выхода в трубку (рис. 1).

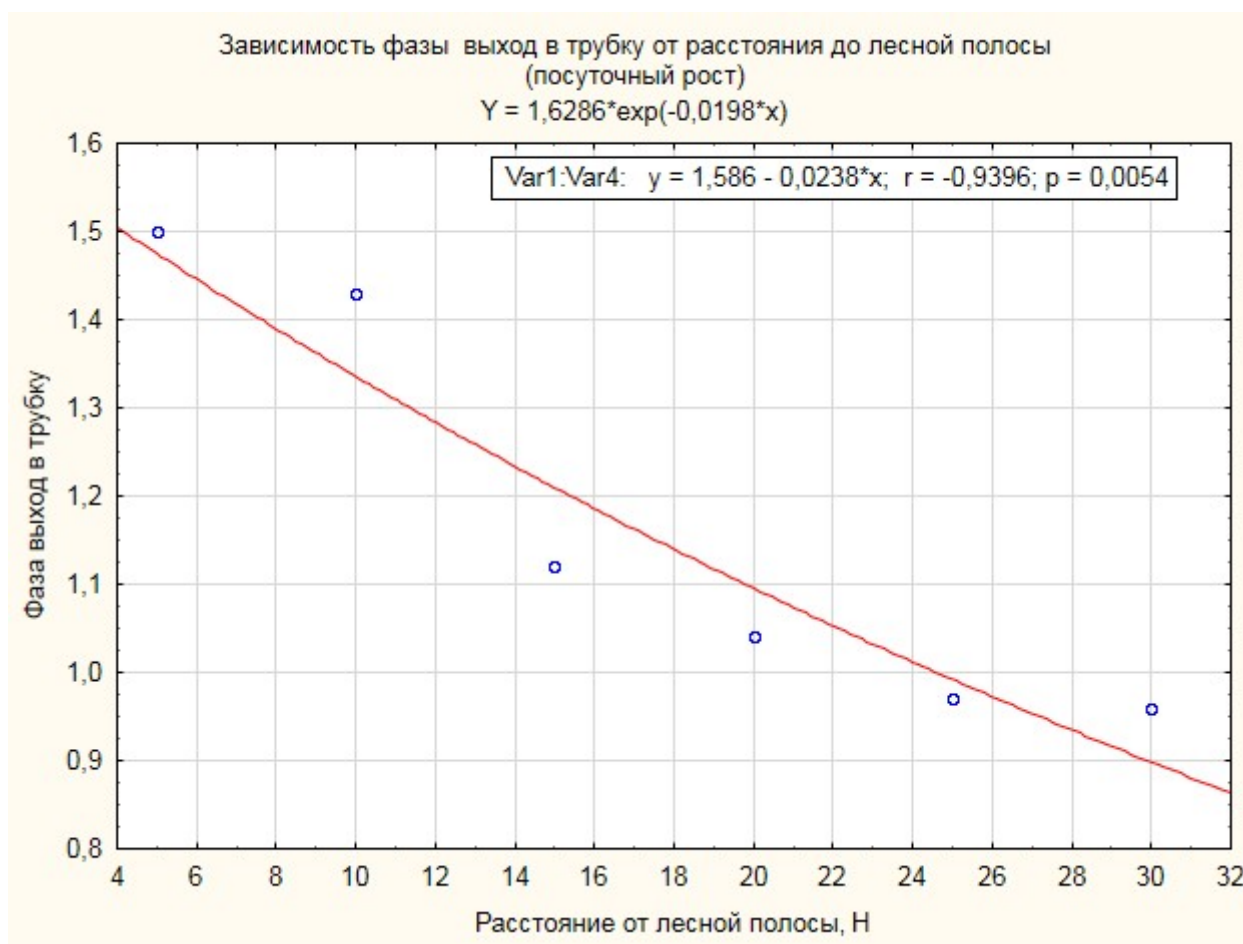


Рис. 1. Зависимость фазы выхода в трубку от расстояния до лесной полосы (собственные вычисления)

Таблица 1

Параметры зависимости суточного суммарного водопотребления ячменя по фазам развития, определяемые функцией $Y = k * e^{-mH}$ (собственные вычисления)

Фаза развития	k	m	R
Кущение	2,029	-0,0033	-0,68
Выход в трубку	1,628	-0,019	-0,94
Трубкавание	0,74	-0,01	-0,94
Цветение	15,45	-0,0038	-0,94
Налив и созревание зерна	1,99	-0,0053	-0,88

Было проанализировано также суточное суммарное водопотребление растений по фазам развития (табл. 1).

Параметры зависимости суточного суммарного водопотребления (Y) ячменя по фазам развития (k) от расстояния до ЛП (H) вида $Y = k * e^{-mH}$, где k и m – это коэффициенты, указывающие на наклон на изгиб экспоненциальной кривой.

Анализ графических связей, коэффициентов корреляции и детерминации позволил выявить, на

каком этапе развития наиболее высокое суточное потребление влаги у культуры ячмень Медикум 139, выращенной в условиях сухого земледелия. Наибольшее посуточное потребление влаги было на фазе цветение (R = -0,93); трубкавание (R = -0,94). На фазе налив и созревание зерна оно уменьшается, а в фазу кущение не достигает минимального предела, т. к. часть влаги поступает в растения из атмосферных осадков, на фазе полной спелости суточное водопотребление равно 0.

Выводы

Таким образом, в условиях сухостепной зоны светло-каштановых почв Нижнего Поволжья исследования показали, что целесообразность создания полезащитных лесных насаждений способствует улучшению показателей микроклимата на прилегающем пространстве, которые оказывают благоприятное влияние на возделываемую сельскохозяйственную культуру. Возделывание ячменя под влиянием ЛП способствует повышению урожайности, сохранению запасов

продуктивной влаги и способствуют статусу ячменя как экономически выгодной зерновой культуры для сельхозтоваропроизводителей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 19-416-340013 «Управление биопродуктивностью агролесосистем Волгоградской области с помощью компьютерных продуктов»

Библиографический список

1. Адамень, Ф. Ф. Полезащитные лесные полосы как основа устойчивого развития агроландшафта / Ф. Ф. Адамень, В. С. Паштецкий, Ю. В. Плугатарь // Зрошуване землеробство. – 2012. – № 57. – С. 36–40.
2. Балакай, Н. И. Полезащитные лесные полосы / Н. И. Балакай // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2013. – № 50. – С. 17–24.
3. Верин, А. Ю. Влияние лесной полосы на формирование экологических факторов агроландшафта / А. Ю. Верин, И. Ф. Медведев, Д. И. Губарев, С. С. Деревягин, В. П. Графов // Аграрный научный журнал. – 2018. – № 12. – С. 12–15. – Библиогр.: с. 15 (7 назв.). – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36565385>.
4. Деревягин, С. С. Полезащитные лесные полосы в роли биогеохимических барьеров в агроландшафте / С. С. Деревягин, И. Ф. Медведев // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2013. – № 4. – С. 12–15. – Библиогр.: с. 15 (4 назв.) – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18971934>.
5. Попов, А. В. Агротехнические уходы в полезащитной лесной полосе / А. В. Попов, В. С. Вавин // Научный альманах. – 2016. – № 10-2. – С. 249–252. – Библиогр.: с. 252 (3 назв.). – DOI: 10.17117/na.2016.10.02.249 <http://ucom.ru/doc/na.2016.10.02.249.pdf>.
6. Сарычев, А. Н. Оценка технологий обработки светло-каштановой почвы в условиях агролесомелиорации / А. Н. Сарычев // Известия ТСХА. – 2015. – № 6. – С. 37–45. – Библиогр.: с. 45 (15 назв.).
7. Таниюкевич, В. В. Надземная фитомасса лесных полос, их влияние на ветровой режим и влагонакопление агроландшафтов / В. В. Таниюкевич // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 91. – С. 986–1003. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20678931> (дата обращения 01.10.2019).
8. Рулева, О. В. Влияние предшественников на формирование элементов продуктивности озимой пшеницы в условиях Нижнего Поволжья / О. В. Рулева, Е. В. Семинченко // Аграрная наука. – 2019. – № 4. – С. 68–72. – Библиогр.: с. 72 (5 назв.).
9. Семинченко, Е. В. Водопотребление и урожайность озимой пшеницы в севооборотах с чистым и сидеральным паром в условиях Нижнего Поволжья / Е. В. Семинченко // Известие Горского ГАУ. – 2019. – № 2. – С. 22–26.
10. Peltonen-Sainio, P. Unexploited potential to diversify monotonous crop sequencing at high latitudes / P. Peltonen-Sainio, L. Jauhiainen // Agricultural Systems. – Vol. 174. – August 2019. – P. 73–82. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X1830742X>. – DOI:10.1016/j.agry.2019.04.011.
11. Rong Li, Xianqing Hou. Interactive effects of autumn tillage with mulching on soil temperature, productivity and water use efficiency of rainfed potato in loess plateau of China / Rong Li, Xianqing Hou // Agricultural Water Management. – Vol. 224. – September 2019, 1057471. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377419307863>. – DOI:10.1016/j.agwat.2019.105740.

12. Water-scarcity footprints and water productivities indicate unsustainable wheat production in China / Jing Huang, B. G. Ridoutt, K. R. Thorp [et al.] // *Agricultural Water Management*. – Vol. 224, 105744. – September 2019. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377419306407>. – DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105744.

References

1. Adamen' F.F., Pashtetskiy V.S., Plugatar'Yu.V. (2012) *Polezashchitnye lesnye polosy kak osnova ustoychivogo razvitiya agrolandshafta* [Protective forest belts as the basis for sustainable development of agrolandscape]. *Zroshuvane zemlerobstvo* [Zroshuvan earthmoving]. № 57, P. 36-40 (in Russian).

2. Balakay N.I. (2013) *Polezashchitnye lesne polosy* [Protective forest belts]. *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya* [Ways to improve the efficiency of irrigated agriculture]. № 50, p. 17-24 (in Russian).

3. Verin A.Yu., Medvedev I.F., Gubarev D.I., Derevyagin S.S., Grafov V.P. (2018) *Vliyanie lesnoy polosy na formirovanie ekologicheskikh faktorov agrolandshafta* [The influence of the forest strip on the formation of environmental factors of the agrolandscape]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian scientific journal], № 12, p. 12-15 (in Russian).

4. Derevyagin S.S., Medvedev I.F. (2013) *Polezashchitnye lesnye polosy v roli biogeokhimicheskikh bar'erov v agrolandshafte* [Protective forest belts in the role of biogeochemical barriers in agrolandscape]. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova* [Bulletin of the Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov], № 4, p. 12-15 (in Russian).

5. Popov A.V., Vavin V.S. (2016) *Agrotekhnicheskie ukhody v polezashchitnoy lesnoy polose* [Agrotechnical care in the forest protection zone]. *Nauchnyy al'manakh* [Scientific almanac], № 10-2. P. 249-252 (in Russian). DOI: 10.17117/na.2016.10.02.249 <http://ucom.ru/doc/na.2016.10.02.249.pdf>.

6. Sarychev A.N. (2015) *Otsenka tekhnologiy obrabotki svetlo-kashtanovoy pochvy v usloviyakh agrolesomelioratsii* [Evaluation of technologies for processing light chestnut soil under agroforestry conditions]. *Izvestiya TSKhA* [News TSHA], № 6, p. 37-45 (in Russian).

7. Tanyukevich V.V. (2013) *Nadzemnaya fitomassa lesnykh polos, ikh vliyanie na vetrovoy rezhim i vlagonakoplenie agrolandshaftov* [Elevated phytomass of forest strips, their influence on the wind regime and moisture accumulation of agrolandscapes]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Political Internet electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], № 91, P. 986-1003 (in Russian).

8. Ruleva O.V. (2019) *Vliyanie predshestvennikov na formirovanie elementov produktivnosti ozimoy pshenitsy v usloviyakh Nizhnego Povolzh'ya* [The influence of predecessors on the formation of elements of the productivity of winter wheat in the Lower Volga]. *Agrarnaya nauka* [Agricultural science], № 4, pp. 68-72 (in Russian).

9. Seminchenko E.V. (2019) *Vodopotrebleniye i urozhaynost' ozimoy pshenitsy v sevooborotakh s chistym i sideral'nym parom v usloviyakh Nizhnego Povolzh'ya* [Water consumption and yield of winter wheat in crop rotation with pure and green manure in the Lower Volga region] *Izvestiya Gorskogo GAU* [News of the Gorsky GAU], № 2, p. 22-26 (in Russian).

10. Peltonen-Sainio P., Jauhiainen L. Unexploited potential to diversify monotonous crop sequencing at high latitudes. *Agricultural systems*. Vol. 174. August 2019. P. 73-82. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X1830742X>. DOI:10.1016/j.agry.2019.04.011.

11. Xianqing Hou, Rong Li. Interactive effects of autumn tillage with mulching on soil temperature, productivity and water use efficiency of rainfed potato in loess plateau of China. *Agricultural Water Management*. Vol. 224, 1057471. September 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377419307863>. DOI:10.1016/j.agwat.2019.105740.

12. Jing Huang, Ridoutt B. G., K. R. Thorp et al. Water-scarcity footprints and water productivities indicate unsustainable wheat production in China. *Agricultural Water Management*. Vol. 224, 105744, 1 September 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377419306407>. DOI:10.1016/j.agwat.2019.105744.

Сведения об авторах

Рулева Ольга Васильевна – доктор сельскохозяйственных наук, зав. лабораторией агроэкологии и прогнозирования биопродуктивности агролесоландшафтов, ФГБНУ «Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения Российской академии наук» (ФНЦ агроэкологии РАН), г. Волгоград, Российская Федерация; e-mail: bifu@mail.ru.

Семинченко Елена Валерьевна – научный сотрудник, соискатель, Нижне-Волжский НИИ сельского хозяйства – филиал ФНЦ агроэкологии РАН, пос. Областной сельскохозяйственной опытной станции, Городищенский район, Волгоградская область, Российская Федерация; e-mail: eseminchenko@mail.ru.

Information about authors

Ruleva Olga Vasilyevna – DSc (Agriculture), Head of Laboratory of Agroecology and Prediction of Bioproductivity of Agroforest Landscapes, FSBSI “Federal Scientific Center for Agroecology, Complex Reclamation and Protective Forestation of the Russian Academy of Sciences” (Federal Scientific Center for Agroecology RAS), Volgograd, Russian Federation; e-mail: bifu@mail.ru.

Seminchenko Elena Valeryevna – Researcher, Applicant, Nizhne-Volzhsy Research Institute of Agriculture – Branch of the Federal Research Center for Agroecology of the Russian Academy of Sciences, pos. Regional Agricultural Experimental Station, Gorodishchensky District, Volgograd Region, Russian Federation; e-mail: eseminchenko@mail.ru.

РОЛЬ КОПЫТНЫХ В ВОССТАНОВЛЕНИИ ХВОЙНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

доктор сельскохозяйственных наук, доцент **В.В. Царалунга**¹

кандидат биологических наук **А.В. Царалунга**¹

аспирант **К.К. Долгих**¹

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

В последнее время в областях Центральной лесостепи лесное хозяйство снова, как и в 70-80-е годы прошлого столетия, стало нести большие потери в результате гибели лесных культур, уничтожаемых дикими копытными. На примере Грязинского лесничества Липецкой области в статье показано, в какой степени дикие копытные мешают успешному лесовосстановлению и во что обходится лесному хозяйству избыточное количество диких копытных в насаждениях. Повреждения лесных культур зафиксированы во всех участковых лесничествах и распределены относительно равномерно, пропорционально объему посадок. Все списанные лесные культуры были созданы в период с 2005 по 2010 годы и не переводились в лесопокрытую площадь. Всего за 6 лет Грязинское лесничество потеряло 160 га лесных культур, или четверть (24,5 %) от того, что было посажено. Убытки по Грязинскому лесничеству только на закладку лесных культур за 6 лет составили более 2 миллионов рублей. Для культур хвойных пород основным вредителем из диких копытных в Липецкой области является косуля, общая численность которой достигла 3020 голов. Соизмеримый вред лесным культурам сосны в области также наносят лоси и олени, общая численность которых, практически в равных долях, составляет порядка 1000 голов. Очевидно, что в условиях интенсивного лесовосстановления и лесоразведения необходимо либо ограничивать рост численности диких копытных, либо эффективно охранять (защищать) от них лесные культуры.

Ключевые слова: копытные, лесовосстановление, лесные культуры, покрытые лесом площади, повреждение лесных культур

ROLE OF UNGULATES IN THE RESTORATION OF CONIFEROUS PLANTATIONS

DSc (Agriculture), Associate Professor **V.V. Tsaralunga**¹

PhD (Biology) **A.V. Tsaralunga**¹

post-graduate student **K.K. Dolgikh**¹

1 – FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

In recent times, forestry, again like the 70-80s of the last century, began to suffer great losses as a result of the death of forest cultures destroyed by wild ungulates in the regions of the Central forest-steppe. On the example of Gryazinsky forestry of the Lipetsk region, the article shows the extent to which wild ungulates interfere with successful reforestation and what cost is paid by forestry for this excessive number of wild ungulates in plantations. Damage to forest crops was recorded in all district forestry. It is distributed relatively evenly, in proportion to the volume of plantings. All discard forest crops were created between 2005 and 2010 and were not transferred to the forested area. Gryazinsky forestry has lost 160 hectares of forest crops or a quarter (24.5 %) of what was planted just in 6 years. Losses in Gryazinsky forestry, only for the laying of forest crops for 6 years, amounted to more than 2 million rubles. Roe deer, the total number of which reached 3020, is the main problem for coniferous plantations in the Lipetsk region. Comparable

harm to pine forest cultures in the region is also caused by moose and deer, the total number of which, in almost equal proportions, is about 1000 animals. It is obvious that in conditions of intensive reforestation and afforestation, it is necessary either to limit the growth of the number of wild ungulates, or to effectively protect forest crops from them.

Keywords: ungulates, reforestation, forest crops, forested areas, damage to forest crops

Введение

В связи с тем, что в 60-80-е годы XX столетия шло активное восстановление отечественных лесов (самое масштабное за всю историю страны), крайне обострились противоречия между лесным и охотничьим хозяйством. С одной стороны, эффективные природоохранные меры и регламентация охоты привели к увеличению численности диких животных, и в первую очередь копытных, а с другой, большие площади молодых лесных посадок стали для этих копытных, по сути, ремизными участками. В результате многие лесные культуры повреждались, их приходилось неоднократно дополнять или вообще полностью восстанавливать [2; 9]. Никакие защитные меры, используемые лесоводами для сохранения лесных культур (огораживание, репелленты, светозащитная защита и т. д.), радикально ситуацию не меняли [3].

Острота проблемы «лес и копытные» существенно снизилась в 90-е годы. Это было связано как с резким сокращением лесокультурных работ, так и с не менее существенным снижением поголовья диких копытных. Однако, в последние годы положение и с лесовосстановлением и с охраной диких копытных заметно улучшается. Так, к примеру, интенсивность лесокультурных работ в Липецкой области за последние десятилетие выросла в 3,5 раза (с 385 га в 2006 г., до 1350 га в 2016 г.), а численность некоторых диких копытных в 2,6 раза (косули с 1160 голов в 2005 году до 3020 голов в 2017 г.) [1;8;10]. Соответственно, снова начинает обостряться проблема сохранения лесных культур от повреждения дикими копытными. [2;3;4;5;6;7].

Исходя из этого, мы задались целью, на примере Грязинского лесничества Липецкой области, определить, в какой степени дикие копытные мешают успешному лесовосстановлению и, во что обходится лесному хозяйству избыточное количество диких копытных в насаждениях.

Материалы и методики исследований

Исследования проводились как аналитическим путем, на основе анализа соответствующей отчетной документации, имеющейся в открытом доступе [1; 10], так и путем натурного обследования поврежденных участков лесных культур. Всего было заложено 8 пробных площадей по 0,2 га каждая (40 x 50 м). Шесть пробных площадей были заложены на предмет выяснения интенсивности и характера повреждения лесных культур копытными на опушке леса, вдоль автомагистрали (пп № 1 кв. 78-2 5СО5Б; пп № 2 кв. 72-25 6БЗОС1КЛО; пп № 3 кв. 56-8 8Б2ОС) и в глубине леса, и две пробные площади были заложены в культурах текущего года для определения сезонной динамики повреждений.

Результаты и обсуждения

В табл. 1 приведены данные за пятилетний период потерь лесных культур различных пород в результате погрыза дикими копытными.

Если считать потери в денежном выражении, то убытки по Грязинскому лесничеству только на закладку лесных культур (не считая затрат на уход, дополнения, охрану, упущенную выгоду и т. д.) за 6 лет составили более 2 миллионов рублей. Как видно из рис. 1, гибель поврежденных дикими копытными лесных культур происходит в основном на 4-6 год после посадки.

Таким образом, в 2010 году были списаны лесные культуры на площади 23,7 га только в Плехановском участковом лесничестве. В следующем году в результате повреждения дикими копытными уже списывались лесные культуры во всех четырех лесничествах на общей площади 32,2 га. В 2012 году было соответственно списано 11,9 га, в 2013 – 3,5 га и в 2014 – 8,5 га. Как известно, именно в периоды наиболее активного роста лесные культуры используются копытными как ремизная база и подвергаются наибольшему повреждению [2]. Из-за этого страдает густота посадок, приживаемость и качество (рис. 2). Повреждения встречаются как

Природопользование

куртинные, так и сплошные на всей площади. Также разные породы деревьев имеют свои характерные виды животных-вредителей. Для культур дуба черешчатого это, в первую очередь, кабан. Хотя в последние 5 лет произошел резкий спад его численности (с 2653 особей в 2012 г. до 450 в 2017 г.),

кабан крайне экологически пластичен и, как никакой другой вид диких копытных, способен быстро восстанавливать численность. Повреждения лесных культур зафиксированы во всех участковых лесничествах и распределены относительно равномерно, пропорционально объему посадок (табл. 2).

Таблица 1

Сводная ведомость списания лесных культур в Грязинском лесничестве Липецкой области с 2010 по 2015 гг. в результате потравы дикими копытными (по отчетам Грязинского лесничества Липецкой области)

№ Квартала	№ Выдела	Год закладки / Год списания	Площадь га	Главная порода	Затраты тыс. руб
Плехановское участковое лесничество					
44,47,60, 48,61,63,	3,25,8, 15,18,23	2005/2010	5,9	С	139,5
48,50,60	18,10,3	2006/2010	4,0	С	92,1
49,50,61, 73,74,75	27,10,3, 18,1-6,1	2007/2010	8,6	С	197,8
49,61,61,48,48	20,3,3,15,18	2008/2010	6,2	с	172,5
99,71,89	19,19,6	2005/2011	3,5	С	80,1
6,75,50	9,5,16	2006/2011	2,9	С	92,0
Итого по участковому лесничеству			31,1		774,0
Балашовское участковое лесничество					
111,122,129	35,33,24	2005/2011	2,4	С	43,0
101,92,99,96	11,17,2,24	2006/2011	9,0	С,Д,Щ	285,1
117,89,107	20,24,21	2007/2012	3,3	С	75,9
111,111,122	7,32,25	2007/2013	2,0	С	54,6
Итого по участковому лесничеству			16,7		458,6
Фашевское участковое лесничество					
78,54,92,88,84	10,12,20,20,21	2005/2011	5,7	С	153,3
42,46,92,47,	16,17,13,12	2006/2011	4,6	С	123,7
93,64,88	3,3,15	2006/2012	3,2	С	72,4
69,85	4,31	2007/2012	2,0	С	47,2
44,112	14,9	2008/2013	1,5	С	43,2
76,77,54	14,28,18	2009/2014	3,9	Б,С,Б	52,3
Итого по участковому лесничеству			20,9		492,1
Яманское участковое лесничество					
69,13,71	33,10,1	2006/2011	3,0	С	76,1
54	11	2005/2011	1,1	Б	28,6
83	29	2008/2012	0,8	С	22,5
73,74,41	25,4,28	2008/2012	2,2	Б	47,3
71,68	14,42	2009/2012	0,4	С	10,5
83,69,77	28,16,50	2008/2014	2,4	С	59,3
104,94,94	5,8,20	2010/2014	2,2	Б	56,7
Итого по участковому лесничеству			12,1		301,0
Всего по лесничеству			80,8		2025,7

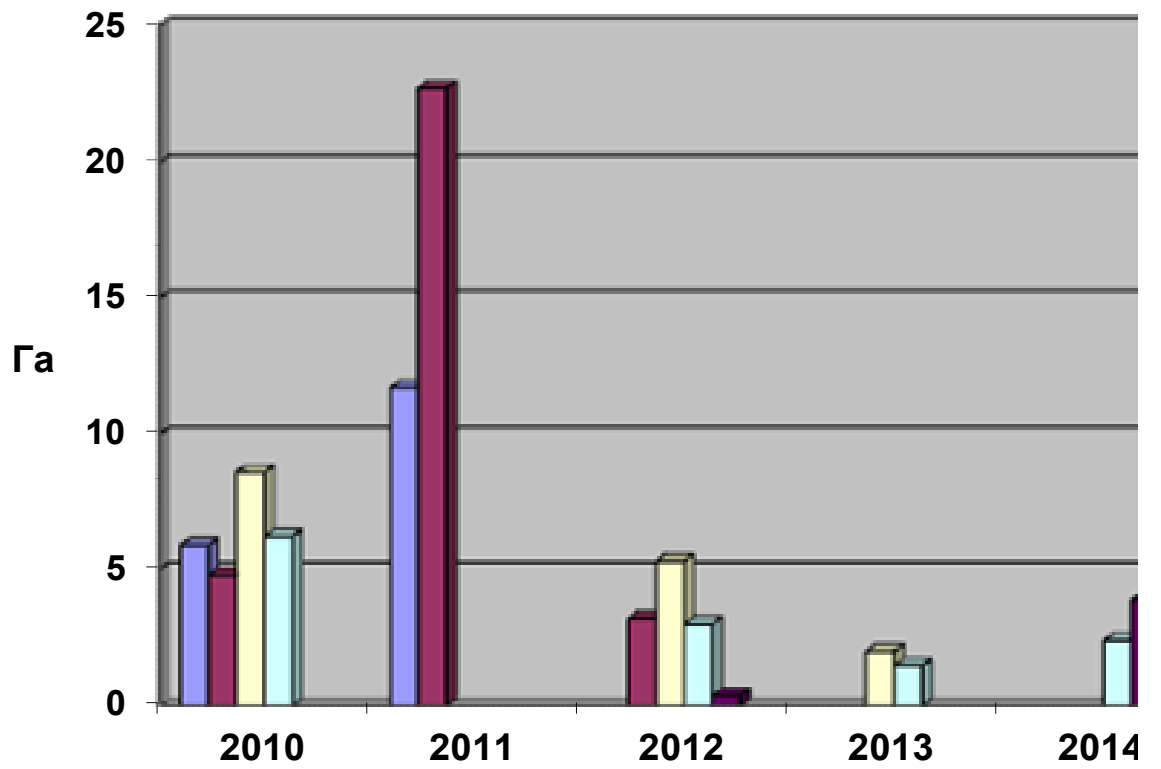


Рис. 2. Фатальные повреждения 5-летних культур сосны дикими копытными в Грязинском лесничестве

Природопользование

Таблица 2

Доля лесных культур в Грязинском лесничестве, списанных из-за повреждения копытными

Год посадки	Ед. изм.	Участковое лесничество				Итого по лесничеству
		Балашова	Фашевка	Яманское	Плеханово	
2005	Посажено га	20,5	24,8	14,8	30,1	90,2
	Списано га/%	4,4 / 21,5	17,5 / 70,6	2,2 / 14,9	12,3 / 40,9	36,4 / 40,4
2006	Посажено га	23,9	20,8	16,0	29,9	90,6
	Списано га/%	11,3 / 47,3	17,4 / 83,7	3,4 / 21,3	8,4 / 28,1	40,5 / 44,7
2007	Посажено га	18,7	10,9	33,9	27,3	90,8
	Списано га/%	4,6 / 24,6	3,7 / 33,9	3,5 / 10,3	9,6 / 35,2	21,4 / 23,6
2008	Посажено га	19,2	23,3	34,0	33,6	110,1
	Списано га/%	3,3 / 17,2	4,3 / 18,5	3,6 / 10,6	12,8 / 38,1	24,0 / 21,8
2009	Посажено га	9,9	21,9	33,5	18,9	84,2
	Списано га/%	1,6 / 16,2	3,9 / 17,8	9,2 / 27,5	2,0 / 10,6	16,7 / 19,8
2010	Посажено га	4,5	28,2	28,1	95,4	156,2
	Списано га/%	2,3 / 51,1	3,2 / 11,3	2,5 / 8,9	12,2 / 12,8	20,2 / 12,9
Всего за 6 лет	Посажено га	96,7	129,9	160,3	235,2	622,1
	Списано га/%	27,5 / 28,4	50,0 / 38,5	24,4 / 15,2	57,3 / 24,5	159,2 / 24,5

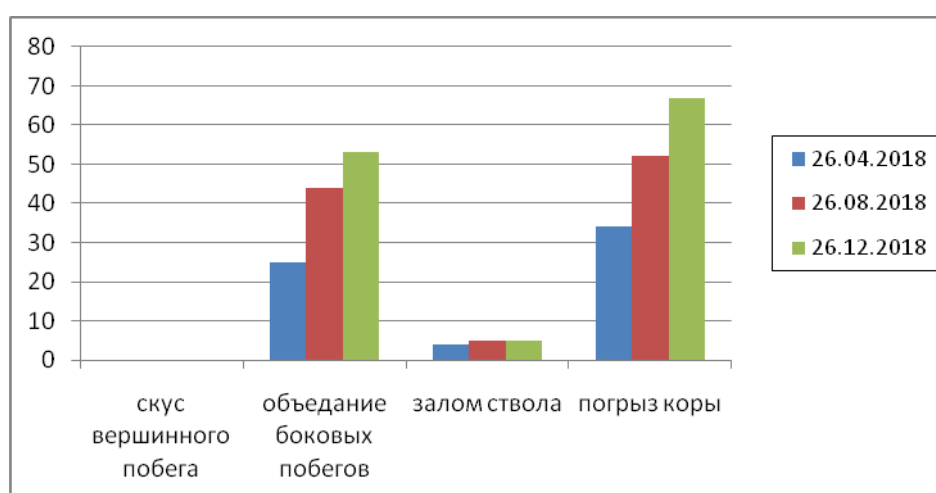


Рис. 3. Характер и сезонная динамика повреждения лесных культур на участках, расположенных вдоль автомагистрали (по результатам натурных исследований авторов)

Это свидетельствует о том, что, с одной стороны, дикие копытные имеют достаточно высокую плотность во всех насаждениях лесничества, а с другой, что молодые посадки для них везде доступны.

Несколько меньший, но соизмеримый вред лесным культурам сосны в области наносят лоси и олени, общая численность которых, практически в равных долях, составляет порядка 1000 голов.

Все списанные лесные культуры были созданы в период с 2005 по 2010 годы и не переводились в лесопокрытую площадь. В процентном отношении доля списанных культур от посадок 2005 года составила 40,4 % (36,4 га), 2006 года – 44,7 % (40,5 га), 2007 – 23,6 % (21,4 га), 2008 – 21,8 % (24,0 га), 2009 – 19,8 % (16,7 га), 2010 – 12,9 % (20,2 га). Всего за 6 лет Грязинское лесничество потеряло 160 га лесных культур, или четверть (24,5 %) от того, что было посажено.

Это свидетельствует о том, что возрастающая численность диких копытных снова становится крайне серьезной проблемой для лесного хозяйства.

Для культур хвойных пород основным вредителем из диких копытных в Липецкой области является косуля. Особенно большой прирост её численности (более 200 голов) на территории Липецкой области отмечен в 2017 году.

Кроме масштабного повреждения лесных культур избыточное количество копытных в лесничестве наносит существенный вред древостоям среднего и приспевающих возрастов.

Интересен и тот факт, что на разных участках лесных культур повреждения деревьев имеют разный характер и разную сезонную динамику. Так, вдоль опушки леса, прилегающей к автотрассе (рис. 3), отмечено наиболее интенсивное объедание копытными боковых побегов.

Закономерно, что это происходит наиболее интенсивно в зимний период. На втором месте

среди повреждений копытными на этих участках стоят погрызы коры. Реже встречаются такие повреждения, как скус вершинного побега или облом стволика. Соотношение средних показателей по данным повреждениям (объедание боковых веток, погрызы коры, скусы вершинного побега и облом стволика) выглядит как 63,4/25,4/7,0/4,2.

Несмотря на то, что повреждение стволика и его облом копытными происходит на порядок реже, чем повреждение боковых побегов и коры, суммарное отрицательное воздействие в большинстве случаев приводит к гибели молодых деревьев.

Заметно отличается характер повреждений на участках в глубине леса (рис. 4)

Как видно из диаграммы, отражающей виды и интенсивность повреждений лесных культур в глубине леса, здесь практически отсутствуют скусывание верхушечных побегов и обломы стволиков, но гораздо больше, чем в предыдущем варианте, повреждений коры. Объедание боковых побегов соизмеримо с величиной этого показателя на участках, расположенных вдоль автотрассы. Следует отметить, что в осенний период интенсивность повреждений на культурах, находящихся вблизи автодорог, почти не проявлялась.

Вероятнее всего, это связано с регулярным и активным посещением данных лесных массивов грибниками и туристами, которые являются существенным фактором беспокойства для диких животных, вследствие чего копытные локализуются в этот период в более лесистых и отдаленных от дорог общего пользования участках. Это, в свою очередь, подтверждается относительной стабильностью повреждений культур в глубине леса, так здесь копытные присутствуют постоянно и используют молодые посадки как ремизную базу. Повреждаются копытными и молодые лесные культуры, посаженные в текущем году (рис. 5).

Природопользование

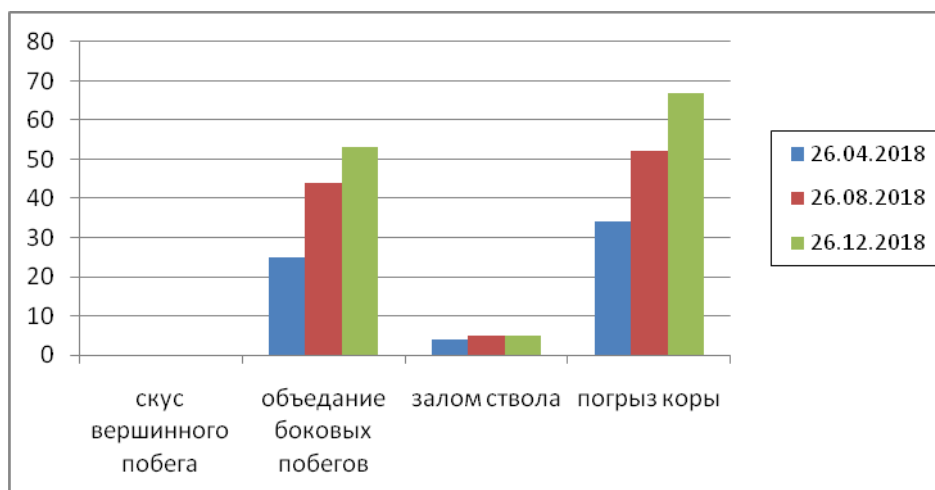


Рис. 4. Характер и сезонная динамика повреждения лесных культур на участках, расположенных в глубине лесного массива (по результатам натуральных исследований авторов)

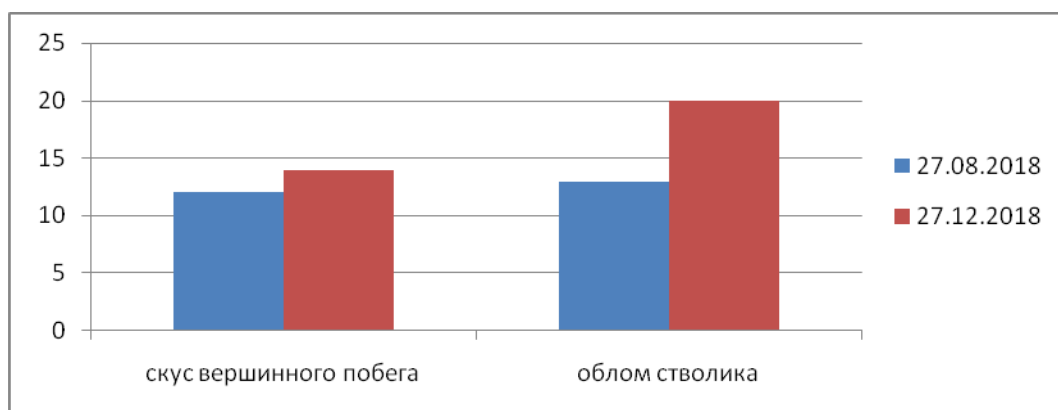


Рис. 5. Характер и сезонная динамика повреждения лесных культур (%) посадки текущего года (по результатам натуральных исследований авторов)



Рис. 6. На территории обширных загонов дикие копытные наносят многочисленные повреждения деревьям путем погрызов, сдирания коры при чесании, оголения корней и корневой шейки, а также нарушения почвенного покрова (фото К.К. Долгих)

В данном случае из-за размеров деревца не приходится говорить о повреждении коры или боковых побегов, но скусывание верхушечных побегов и облом стволиков (часто в результате затаптывания) составило 12-20 %, что, естественно, будет препятствовать успешному лесовосстановлению на данных участках.

На территории Грязинского лесничества в Балашовском участковом лесничестве, которое находится в аренде у ОАО «Бригантина», в квартале 46 выдел 19 (0,9 га) ведется полувольерное содержание диких копытных, таких как кабан, косуля и олень. На территории загонов, где численность диких копытных в десятки раз превышает естественную, они наносят многочисленные повреждения деревьям путем погрызов, сдирания коры при чесании, оголения корней и корневой шейки, а также нарушения почвенного покрова (рис. 6).

Необходимо отметить, что животные, находящиеся в загонах, регулярно и достаточно подкармливаются, то есть наносимые ими повреждения деревьям не связаны с кормом. Следовательно, в естественных условиях (особенно в хвойных насаждениях) деревья, «вышедшие из морды зверя», то есть переставшие быть для диких копытных кормом, все равно могут подвергаться существенным повреждениям. Такие повреждения приводят к увеличению естественного отпада, а при высокой плотности копытных – к сильному ослаблению древостоя, результатом

которого часто становится его куртинное усыхание (рис. 7).

Для получения объективных данных о проценте и степени повреждения древостоев дикими копытными при избыточной плотности нами в загоне была заложена пробная площадка в 0,25 га. Участок был представлен сосново-березовым древостоем (7СЗБ) с полнотой 0,7 в возрасте 75 лет. Копытных на момент учета было 5 особей (1 олень, 2 кабана и 2 козы). В табл. 3 приведены результаты учета повреждений на деревьях и количество сухостоя.

Как видим, больше половины деревьев на пробном участке имеют существенные повреждения, что уже привело к усыханию четверти древостоя.

Ученные виды повреждений количественно сопоставимы. Полностью уничтожен напочвенный покров на трети территории. Правда, некоторые лесоводы считают, что сдирание лесной подстилки дикими копытными является положительным и наглядно иллюстрирует, насколько серьезно и достаточно быстро дикие копытные могут нанести вред лесному хозяйству в случае их избыточной численности.

В связи с вышеизложенными фактами и тенденциями в динамике популяций диких копытных непонятна политика органов, отвечающих за регулирование численности диких копытных, которые ограничивают нормы ежегодного отстрела косули и лося в области на уровне 1-3 % (!), а оленя не отстреливают уже более 20 лет.



Рис. 7. Повреждения, наносимые копытными деревьям и почвенному покрову (фото К.К. Долгих)

Повреждение древостоя в заgone, где содержатся дикие копытные
(по результатам натуральных испытаний авторов)

Порода	Количество шт./%	Повреждения деревьев шт./%				Повреждение почвы (отсутв. напочв. покров) кв. м/%	Усохло деревьев шт./%
		Стес коры	Погрызы	Повреж- дение корней	Всего деревьев с поврежден.		
Сосна	91/82,0	52/46,8	43/38,7	39/35,1	72/64,9	700/28,0	27/24,3
Береза	20/18,0	2/1,8	17/15,3	8/7,2	19/17,1		2/1,8
Итого	111/100,0	54/48,6	60/54,1	47/42,3	91/82,0	700/28,0	29/26,1

Конечно, данная ситуация предельно утрирована, поскольку суммарная плотность популяций животных в обследуемом заgone превышала оптимальную для данного типа угодий в 200 раз (5 тыс. особей на 1000 га вместо 25).

Выводы

Из проведенного анализа динамики численности копытных и интенсивности повреждения ими лесных культур и насаждений в Грязинском лесничестве Липецкой области очевидно, что проблема

взаимоотношения лесного и охотничьего хозяйства снова явно обостряется и требует повышенного внимания.

Соответственно, в условиях интенсивного лесовосстановления и лесоразведения необходимо либо ограничивать рост численности диких копытных, либо эффективно охранять (защищать) от них лесные культуры с параллельным увеличением биотехнических мероприятий для диких животных.

Библиографический список

1. Открытые данные Управления лесного хозяйства Липецкой области. – URL: <http://www.leslipetsk.ru/> Документы (дата обращения: 05.12.2019).
2. Русанов, Я. С. Лес и копытные / Я. С. Русанов, Л. И. Сорокина – Москва : Лесн. пром-сть, 1984. – 128 с.
3. Русанов, Я. С. Факторы, определяющие степень повреждения лесных культур лосями / Я. С. Русанов // Вопросы лесного охотоведения. – Москва : ВНИИЛМ, 1979. – С. 3–21.
4. Смирнов, К. А. Запас и потребление косулей зимнего древесно-веточного корма в заповеднике Белогорье / К. А. Смирнов, А. С. Жемчужников, В. В. Немченко // Зоологический журнал. – 2009. – № 5. – С. 623–628. – URL: <http://naukarus.com/j/zoologicheskij-zhurnal/47>.
5. Соколов, С. А. Охотничьи животные. Корма и питание промысловых зверей и птиц / С. А. Соколов. – Москва, 1949. – 256 с.
6. Спурр, С. Г. Лесная экология / С. Г. Спурр, Б. В. Барнес. – Москва : Лесн. пром-сть, 1984. – 480 с.
7. Тимофеева, Е. К. Лось / Е. К. Тимофеева // Звери Ленинградской области. – Л., 1970. – С. 155–160.
8. Шубин, В. А. Леса России / В. А. Шубин, Д. М. Гиряев. – Москва : Энциклопедия сел и деревень, 1998. – 208 с.
9. Boulanger, V. Ungulates increase forest plant species richness to the benefit of non-forest specialists / V. Boulanger // Glob. Chang. Biol. – 2018. – Feb: 24(2): e485-e495. – DOI: 10/1111/gcb.13899.
10. Challenges and science-based implications for modern management and conservation of European ungulate populations / M. Apollonio [et al.] // Mammal Research. – July 2017. – Vol. 62. – Iss. 3. – P. 209–217.

References

1. Open data of management of forestry of the Lipetsk region. URL: <http://www.leslipetsk.ru/Documents> (in Russian).
2. Rusanov Ya.S., Sorokin L.I. *Les i kopytnye* [Forest and ungulates]. Moscow: *Lesnaya promyshlennost*, 1984. 128 p. (in Russian).
3. Rusanov Ya.S. *Faktory, opredelyayushie stepen' povrezhdeniya lesnykh kultur losyami* [Factors determining the degree of damage of forest plantations by moose]. *Voprosy lesnogo okhotovedeniya* [Questions of forest management]. Moscow: VNIILM, 1979. P. 3-21 (in Russian).
4. Smirnov K.A., Zhemchuzhnikov A.S., Nemchenko V.V. (2009) *Zapas i potreblenie kosuley zimnego drevesno-vetochnogo korma v zapovednike Belogorye* [Stock and feeding of ROE deer of winter dry-spring-branch forage in the reserve Belogorye]. *Zoologicheskij zhurnal* [Zoology journal]. Vol. 88. No. 5. Pp. 623-628 (in Russian). URL: <http://naukarus.com/j/zoologicheskij-zhurnal/47>.
5. Sokolov S. A. *Okhotnichyi zhivotniye. Korma i pitanie promyslovykh zverey i ptits* [Hunting animals. Feed and nutrition of commercial animals and birds]. M., 1949. 256 p. (in Russian).
6. Spurr S.G., Barnes B.V. *Forest ecology*. Moscow: *Lesnaya promyshlennost*, 1984. 480 p. (in Russian).
7. Timofeeva E.K. *Los'* [Elk] // *Animals of the Leningrad region*. L., 1970. P. 155-160 (in Russian).
8. Shubin V.A., Giryayev D.M. *Lesa Rossii* [Forests of Russia]. Moscow: Encyclopedia of villages, 1998. 208 p. (in Russian).
9. Boulanger V. (2018) Forest Ungulates increase plant species richness to the benefit of non-forest specialists. *Glob Chang Biol*. Feb:24(2): e485-e495. doi: 10/1111/gcb.
10. Apollonio M. et al. (2017) Challenges and science-based implications for modern management and conservation of European ungulate populations. *Mammal Research*, July 2017, Vol. 62, Iss. 3, pp. 209-217.

Сведения об авторах

Царалунга Владимир Владимирович – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, профессор кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: caralunga@bk.ru.

Царалунга Анна Викторовна – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: saralunga@yandex.ru.

Долгих Константин Константинович – аспирант кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: kostyawyt@yandex.ru.

Information about authors

Tsaralunga Vladimir Vladimirovich – DSc (Agriculture), Associate Professor, Professor of Department of Ecology, Protection of Forests and Forest-hunt Conducting, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: caralunga@bk.ru.

Tsaralunga Anna Viktorovna – PhD (Biology), Associate Professor of Department of Ecology, Protection of Forests and Forest-hunt Conducting, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: saralunga@yandex.ru.

Dolgikh Konstantin Konstantinovich – post-graduate student of Department of Ecology, Protection of Forests and Forest-hunt Conducting, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: kostyawyt@yandex.ru.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КАНАТНЫХ ЛЕСОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ НА МЯГКИХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОПОРАХ

доктор технических наук, профессор **А.В. Абузов**¹

доктор технических наук, профессор **И.В. Григорьев**²

1 – ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия» г. Якутск,
Российская Федерация

В статье представлены результаты исследований, посвященных альтернативному виду лесного транспорта на базе канатных комплексов, оснащенных мягкими пневматическими опорами. Актуальность исследований продиктована тем, что в настоящее время лесозаготовительные процессы смещаются с наиболее доступных лесных территорий на труднодоступные горные участки с характерными признаками экологической зависимости с плотным наличием водных объектов, таких как реки, озера, болота, которые в свою очередь также могут служить транспортными коридорами для перемещения заготовленной древесины. Исходя из теоретических и экспериментальных исследований, авторами предложена технология, позволяющая эффективно и экологически безопасно вести заготовку древесины именно при наличии различных гидрологических преград, включая болота. Представлена технологическая схема использования канатных комплексов, конструкция мягкой пневматической опоры арочного типа, а также рабочий экспериментальный прототип данной лесотранспортной системы. Приведены результаты расчетов и примеры изополей деформаций, позволяющих оценить нагрузки, возникающие в конструкции арочной пневматической опоры в зависимости от массы удерживаемого груза и давления воздуха внутри опоры. Для моделирования процесса нагрузок использовался программный комплекс ЛИРА. Результаты исследований подтвердили возможность использования канатных лесотранспортных систем на мягких пневматических опорах в лесозаготовительном процессе.

Ключевые слова: канатные лесотранспортные системы, силовые надувные конструкции, водный транспорт леса, трелевка леса, мягкие пневматические опоры, канатная трелевка.

DESIGN FEATURES OF CABLE FORESTRY SYSTEMS ON SOFT PNEUMATIC SUPPORTS

DSc (Engineering), Professor **A.V. Abuzov**¹

DSc (Engineering), Professor **I.V. Grigoryev**²

1 – FSBEI HE "Pacific National University", Khabarovsk, Russian Federation

2 – FSBEI HE "Yakut State Agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of studies on an alternative type of forest transport based on cable systems equipped with soft pneumatic supports. The relevance of the research is dictated by the fact that currently logging processes are shifting from the most accessible forest areas to hard-to-reach mountain areas with characteristic signs of environmental dependence with the dense presence of water bodies such as rivers, lakes, swamps, which in its turn can also serve as transport corridors to move harvested wood. Based on theoretical and experimental studies, the authors have proposed a technology that allows efficiently and environmentally safe logging in the presence of various hydrological barriers, including swamps. The technological scheme of the use of rope complexes, the construction of a soft pneumatic support of an arch type, as well as a working experimental prototype of this timber transport system are presented. The results of calculations and examples of deformation isopoles are given, which make it possible to evaluate

the loads arising in the design of an arch pneumatic support depending on the mass of the cargo held and the air pressure inside the support. LIRA software package was used to simulate the load process. The research results confirmed the possibility of using cable forest transport systems on soft pneumatic supports in the logging process.

Keywords: cable forest transport systems, power pneumatic structures, water forest transport, skidding of the forest, soft pneumatic supports, cable skidding.

Введение

В настоящее время область распространения лесозаготовительных операций планомерно смещается с наиболее доступных лесных территорий на лесосеки с характерными признаками труднодоступности и экологической зависимости, с плотным наличием на них рек, озер и болот, как правило, окруженных горными склонами с резким перепадом высот.

В данном случае технологические системы заготовки древесины, представленные обычными самоходными канатными установками или тракторными комплексами, специализированными для работы на крутых склонах, не до конца решают проблемы горных лесозаготовок и не обеспечивают эффективность лесозаготовительного процесса как с технологической, так и с экологической точек зрения [1, 2, 11].

Опыт применения воздушных систем транспортировки древесины доказал технологическую и лесоводственную эффективность данных методов. Однако если техническая изученность, например, вертолетных трелевочных систем очевидна и в большинстве случаев сводится к повышению экономической целесообразности выполняемых работ, то способы и механизмы на базе подвесных канатных комплексов, способных работать на крутых склонах и при этом преодолевать водные преграды, требуют дополнительного серьезного и разностороннего исследования, позволяющего более эффективно изучить и оценить их технологические и конструктивные особенности.

Материалы и методы

Проанализировав информацию в научных источниках [5, 6], можно констатировать тот факт, что значительные площади спелого древостоя сосредоточены не только на территориях с плотным наличием резко пересеченного рельефа и крутых склонов, но и в местах с частичным наличием сильно переувлажненных грунтов, заболоченности и топей (рис. 1).

Особенностью данных территорий является то, что основные площади, где произрастает качественный древостой, сосредоточены на крутых склонах, которые в нижней своей части часто соприкасаются с гидрологическими системами (болотами, речками), а также с морским побережьем.

По разработанной методике с использованием программ ArcGisv.10, ENVI был проведен анализ протяженности гидрологических систем по обрзующим склонам на примере отдельных горных районов Хабаровского края, которые в настоящий момент наиболее обеспечены запасом древесины хорошего качества. Результаты анализа показали возможность использования от нескольких десятков до нескольких сотен километров гидрологических систем в качестве транспортных коридоров для канатного и водно-канатного надувного транспорта. На рис. 2 приведен пример результатов анализа по одному из горных участков Комсомольского района Хабаровского края.

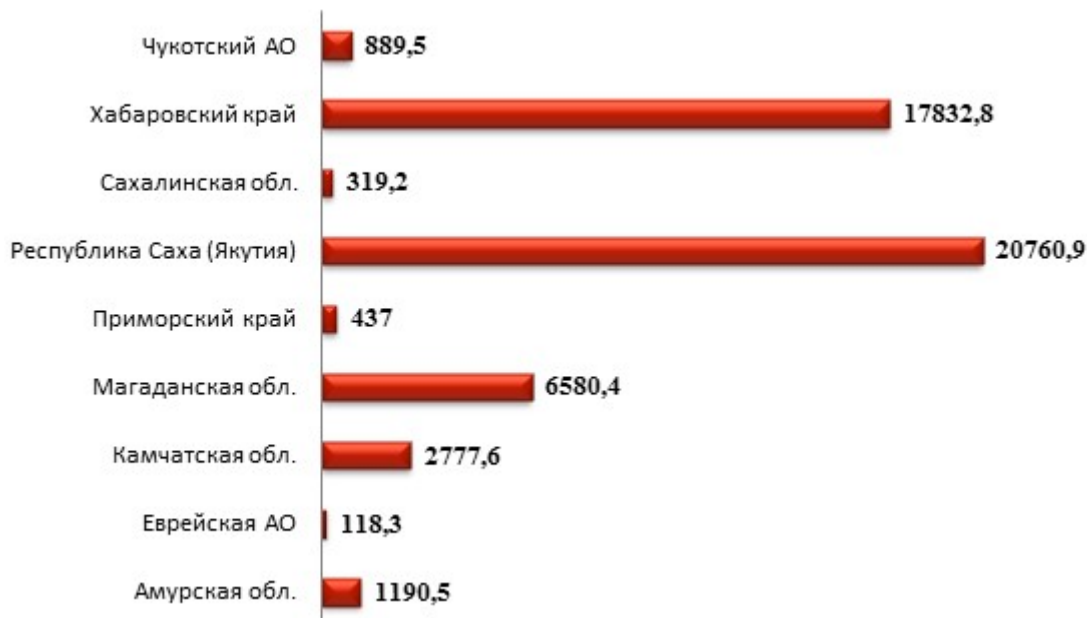
Исходя из этого, целесообразно говорить об объединенной системе водных транспортных коридоров с учетом морских границ. Это даст возможность сформировать поэтапную транспортную сеть, которая включила бы в себя не только цикл трелевки и дополнительных переместительных операций, но и работы по загрузке крупнотоннажных речных и морских судов в местах, где нет оборудованных грузовых причалов или нет возможности подхода грузовой баржи близко к берегу.

Поиск технических решений по обеспечению заготовки древесины на площадях со слабыми несущими грунтами, а также для оперативной переброски заготовленной древесины в пределах лесосеки через водные преграды, осуществлению её погрузки с необорудованных береговых территорий на водный транспорт без использования кранового оборудования из-за наличия рифов или высокого берега, определил направления разработки

лесотранспортных канатных систем на базе пневматических плавающих конструкций [7, 9, 10].

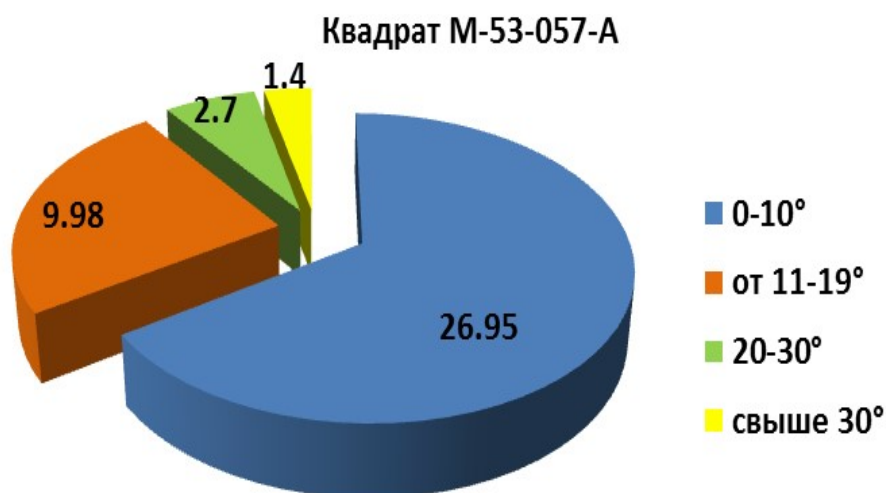
При этом транспортировка древесины осуществляется подвесной канатной системой и самопередвигающейся радиоуправляемой грузовой ка-

реткой, несущий канат которой удерживается с помощью пневматических арочных опор, способных эксплуатироваться как на грунтовой, так и на водной поверхности (рис. 3).



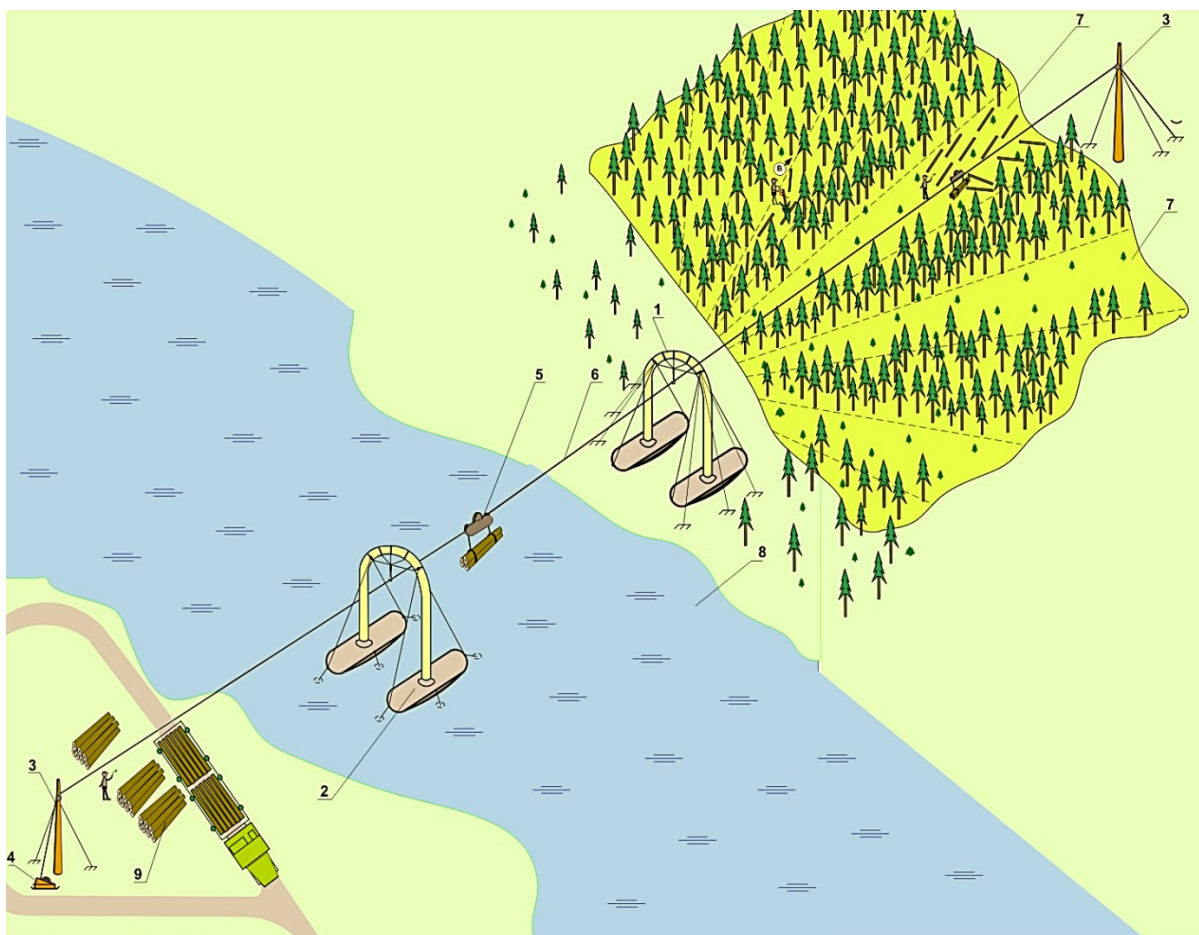
Результаты аналитических исследований авторов

Рис. 1. Наличие в лесном фонде ДФО лесозащитных территорий с сильно переувлажненными и заболоченными участками, тыс. га



Результаты аналитических исследований авторов с использованием программ ArcGisv.10, ENVI

Рис. 2. Плотность гидрологических систем по образующим склонам, км/1000 га



Разработка Абузова А.В., Абузовой К.Р., патент № 2531649 РФ, 2014 год

Рис. 3. Технологическая схема разработки лесосеки канатной лесотранспортной системой с одновременной обработкой склона и транспортировкой через водную преграду: 1 – береговая пневматическая опора; 2 – пневматическая плавающая опора; 3 – жесткие опоры; 4 – наземная лебедка; 5 – самопередвигающаяся каретка; 6 – несущий канат; 7 – пасака; 8 – водная преграда; 9 – погрузочный пункт



Разработка Абузова А.В.

Рис. 4. Прототип экспериментальной модели канатного лесотранспортного комплекса на базе мягких пневматических конструкций

Основным элементом описанных выше канатных лесотранспортных систем, способных перемещать груз через гидрологическую преграду и требующих дополнительных исследований, являются мягкие пневматические опоры, которые в данном случае имеют арочный вид.

Результаты и обсуждение

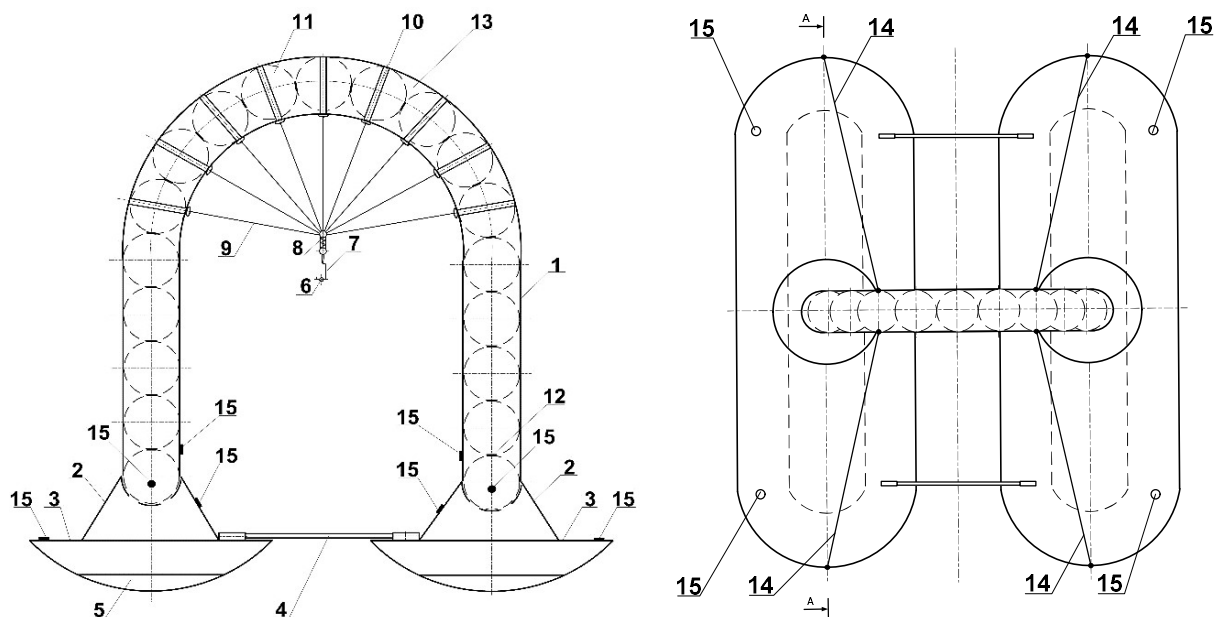
Экспериментальные практические исследования в данной области, проводимые с использованием прототипов, результаты работы которых обрабатывались и сопоставлялись с теоретическими показателями, позволили выявить ряд особенностей, связанных с распространением деформационных нагрузок внутри пневматической арочной конструкции.

На рис. 4 представлен прототип экспериментальной модели канатного лесотранспортного комплекса на базе мягких пневматических конструкций с радио дистанционно управляемой трелевочной кареткой. Данный прототип использовался как

для исследования вопросов технологического применения, так и для изучения вопросов возникающих деформационных нагрузок.

По итогу комплекса проводимых работ было предложено конструктивное решение, заключающееся в том, что конструкция пневматической арочной опоры была дополнена внутренними шаровыми и торовыми элементами, служащими демпфером и обеспечивающими одновременно жесткость и гибкость конструкции, а также устойчивость на водной поверхности (рис. 5).

Однако определить деформации пневматических арок расчетным путем, учитывающим сопряжение и взаимодействие внутренних сфер, достаточно сложно из-за нестабильности и реологических свойств материала. Поэтому для реализации данной задачи использовался программный комплекс ЛИРА, в основу которого положен метод конечных элементов.



Разработка Абузова А.В., Абузовой К.Р., патент № 2531778 РФ, 2014 год.

Рис. 5. Общий вид пневматической плавающей конструкции

а) вид спереди; б) вид сверху:

- 1 – главная несущая конструкция, 2 – конусные сегменты, эллипсоидные чаши, 4 – упорные тяги, 5 – балластный отсек, 6 – несущий канат, 7 – г-образный башмак, 8 – демпфер, 9 – синтетические канаты, 10 – силовые стропы, 11 – шаровые надувные сегменты, 12 – воздушный клапан, 13 – полость, 14 – растяжки, 15 – клапан подкачки воздуха

Пневматические арки с наличием внутреннего каркаса, состоящего из сопряженных между собой сфер равного напряжения, относятся к силовым пневматическим конструкциям, у которых изменение равновесного энергетического состояния сопровождается совершением механической работы [3, 4, 8]. Данная работа совершается натяжением поверхности при воздействии внешних факторов, за счет чего происходит не только растяжение внешней оболочки, но и перемещение сопряженных с ней и между собой внутренних сфер, которые, в свою очередь, могут играть роль амортизатора. Данное конструктивное решение позволяет противодействовать внешним силовым воздействиям и, соответственно, снимать и перераспределять погонные растягивающие усилия, возникающие во внешней оболочке надувной арочной конструкции.

Основными параметрами, которые обеспечивают устойчивость арочных конструкций, являются внутреннее давление и диаметр сечения её основания. Основные габаритные размеры, такие как высота, ширина и радиус кривизны арки, также будут зависеть от этих параметров.

Исходя из этого, пневматическая арка должна удовлетворять нескольким условиям, обеспечивающим её несущую способность [3, 4, 8].

I – условие кольцевой прочности:

$$PR_m \leq [T_2], \quad (1)$$

где P – избыточное давление воздуха, одинаковое во всех сечениях арки; R_m – наибольший радиус кривизны сечения балки; T_2 – допускаемые кольцевые напряжения в материале.

II – условие продольной прочности:

$$M \leq \pi R^2 \left([T_1] - \frac{PR}{2} \right) \text{ или } P \leq \frac{2}{R} \left([T_1] - \frac{M}{\pi R^2} \right), \quad (2)$$

где M – наибольший изгибающий момент в сечениях арки; T_1 – допускаемые продольные напряжения в материале; R – радиус сечения круглой балки.

III – условие складкообразования:

$$\frac{M_z}{I_1} + \frac{P\Omega}{S} - \frac{Q}{S} \geq 0, \quad (3)$$

где I_1 – момент инерции сечения круглой балки относительно нейтральной оси сечения;

Ω – площадь «воздушного» сечения круглой балки;

S – периметр поперечного сечения балки;

Q – нагрузка.

IV – условие устойчивости с учетом сдвигов:

$$Q \leq \pi^3 E' \cdot R^3 / l_{np}^2 \left[1 + 2 \cdot (1 - \vartheta^2) - \frac{PR}{E'} \right], \quad (4)$$

где E' – модуль упругости материала; l_{np} – приведенная высота стойки арочной конструкции.

Для подтверждения улучшения устойчивости и уменьшения деформационных нагрузок в пневматических арках с внутренними сферами был смоделирован ряд ситуаций, согласно которым с использованием программного комплекса ЛИРА проведены расчеты в два этапа:

- расчет пневматических арок без наличия сфер для диаметров 1,5 м, 2,5 м, определяя только влияние внутреннего давления с учетом диаметра.

- расчет пневматической арки с наличием сфер для худшего результата, полученного предыдущими расчетами, определяя влияние использования сфер с учетом внутреннего давления.

Исходные данные для расчета пневматической арки с наличием внутренних сфер примем следующие:

- диаметр кольцевого сечения арки 1500 мм;
- высота арки по наружной грани 10 000 мм, по оси 9250 мм, по внутренней грани 8500 мм;
- ширина арки по наружной грани 9000 мм, по оси 7500 мм, по внутренней грани 6000 мм;
- диаметр внутренних сфер для учета сопряжения – 1560 мм;
- груз 2000 кг, 3000 кг, 4000 кг, 5000 кг;
- внутреннее давление 100 кПа, 300 кПа, 500 кПа.

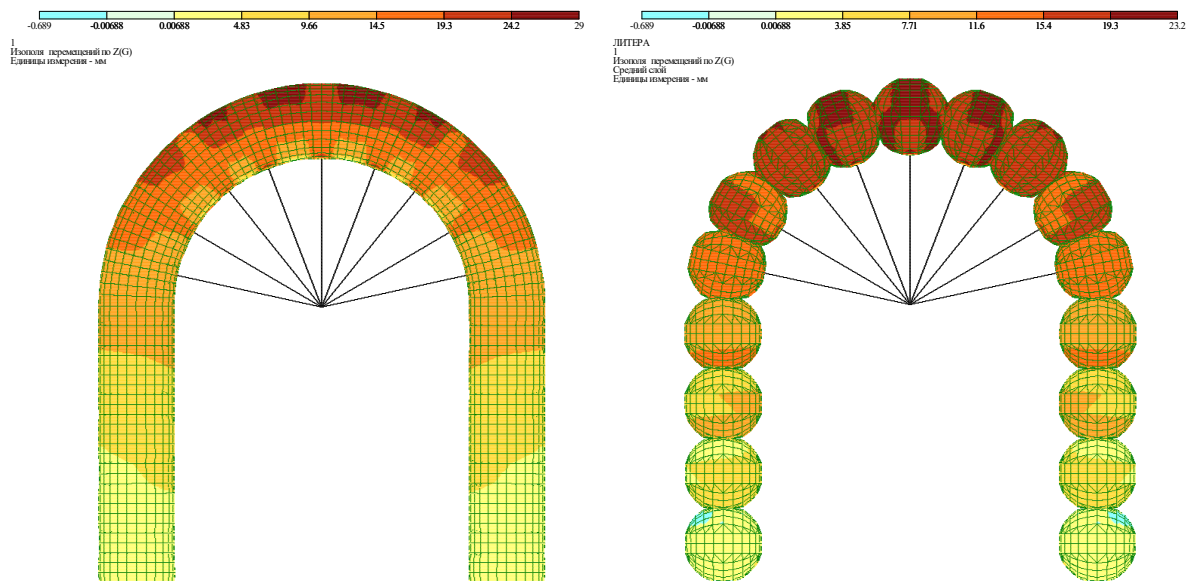
Количество конечных элементов в расчетной схеме пневматической арки с внутренними сферами 7177, количество узлов в схеме 5159. Разбивка на конечные элементы принята в среднем 200×200 мм. Данная плотность разбивки позволит получить более детальную картину напряженно-деформированного состояния конструкции.

Сравнительные результаты расчета пневматической арки диаметром 1,5 м с внутренними сферами и без при давлении 300 кПа и массой удерживаемого груза 3000 кг, позволяющие сделать вывод о возможностях исследуемых пневматических арок с заданными размерами, сведены в табл. 1. Примеры моделирования нагрузок, возникающих в пневматической арке, представлены на рис. 6 и 7.

Результаты максимальных значений деформации конструкции пневматических арок
($\varnothing 1,5$ – без внутренних сфер, $\varnothing 1,5с$ – с наличием внутренних сфер)

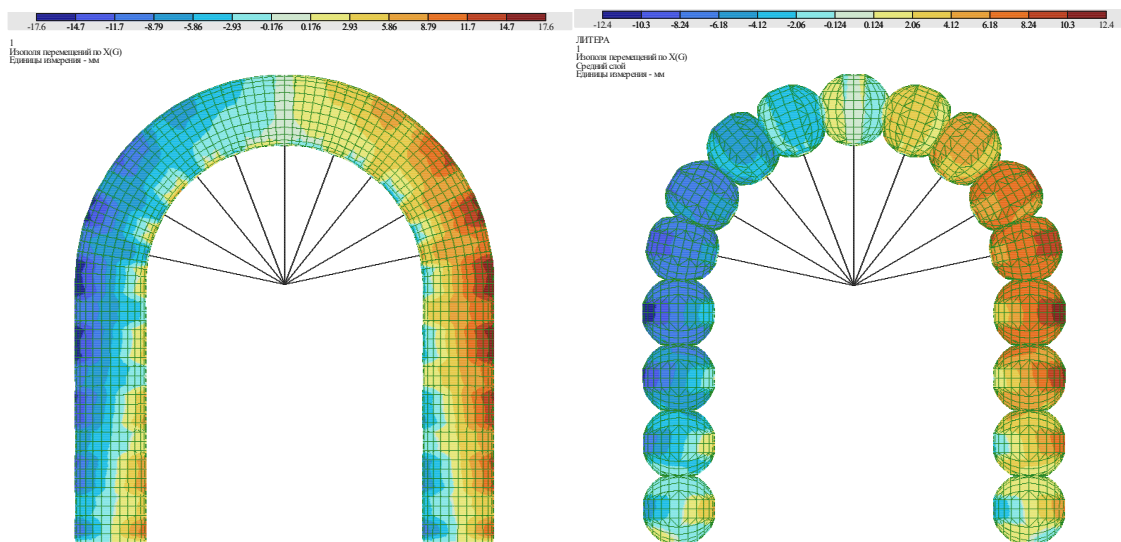
Давление, кПа	Груз, т	Перемещения по z, мм		Перемещения по x, мм		Перемещения по y, мм		Главные напряжения N1, МПа		Главные напряжения N2, МПа	
		$\varnothing 1,5$	$\varnothing 1,5с$	$\varnothing 1,5$	$\varnothing 1,5с$	$\varnothing 1,5$	$\varnothing 1,5с$	$\varnothing 1,5$	$\varnothing 1,5с$	$\varnothing 1,5$	$\varnothing 1,5с$
100	2	-59,7	-6,8	-60,5	-6,5	-41,8	-4,1	118	112	86,6	53
	3	-94,7	-13,7	-91,5	-7,1	-58,3	-4,1	121	122	105	53
	4	-130	-20,6	-122	-9,7	-74,8	-4,2	128	133	119	53
	5	-165	-27,5	-153	-12,4	-91,3	-5,0	145	160	123	54
300	2	-38,3	-0,5	-55,5	-17	-78,5	-12,3	343	337	186	161
	3	-73,3	-0,7	-86,5	-17,6	-86,1	-12,2	346	336	204	160
	4	-108	-6,2	-117	-18,2	-94,2	-12,2	348	336	223	160
	5	-143	-13,1	-148	-18,7	-108	-12,2	351	336	242	159
500	2	-16,9	-0,8	-50,5	-27,6	-126	-20,7	569	562	285	273
	3	-51,9	-0,9	-81,5	-28,1	-129	-20,6	572	561	303	270
	4	-87,0	-1,0	-112	-28,7	-135	-20,5	574	560	322	268
	5	-122	-1,13	-143	-29,3	-143	-20,4	576	560	341	267

Результаты вычислений авторов



Результаты моделирования авторов с использованием программного комплекса ЛИРА

Рис. 6. Пример изополей деформаций по оси z при давлении 300 кПа, нагрузка 3000 кг



Результаты моделирования аэроарок с использованием программного комплекса ЛИРА
Рис. 7. Пример изополей деформаций по оси x при давлении 300 кПа, нагрузка 3000 кг

Выводы

Проведенные исследования являются основанием для изучения вопросов внедрения в лесозаготовительный процесс данного вида транспорта, будущее использование которого продиктовано следующими факторами:

- использование пневматических конструкций позволяет повысить эффективность переместительных операций в пределах лесосеки, снизить затраты на покупку, эксплуатацию, хранение и сервисное обслуживание дополнительной наземной техники.

- возможность использования гидрологических систем (с учетом болот и несудоходных рек) в качестве транспортного коридора для подвесной трелевки и транспортировки древесины, что дает значительное сокращение времени и затрат на строительство временных лесовозных дорог (усов, веток) и подъездных путей;

- возможность использования гидрологических систем для оперативной доставки лесозаготовительной техники и рабочего персонала;

- возможность освоения ранее недоступных территорий;

- снижение экологических последствий для гидрологических систем по сравнению с молевым и плотовым сплавом древесины;

Анализируя полученные результаты расчета пневматических арок с диаметрами поперечного сечения 1,5 и 2,5 м с внутренним давлением 100, 300 и 500 кПа и вертикальной нагрузкой от крана в 2, 3, 4 и 5 т, можно сделать следующие выводы:

- использование внутренних сфер позволяет значительно снизить деформацию пневматической арочной конструкции, например, смещения по оси z , отражающие прогиб арки, снижаются при давлении 100 кПа в 6-8,78 раза, при давлении 300 кПа – в 10,91-76,6 раза, при давлении 500 кПа – в 21,13-108 раз;

- использование внутренних сфер позволило снизить рекомендуемое рабочее давление до 250-300 кПа, что положительно отразится на ресурсе материала и сварных швов пневматической конструкции;

- на фоне значительного снижения деформации, но менее улучшившейся пространственной жесткости (устойчивости), которая характерна для арочной конструкции диаметром 2,5 м, можно рекомендовать увеличение диаметра сечения для арки диаметром 1,5 м, не изменяя общие габариты (высоту и ширину), что позволит добиться максимальной конструктивной и эксплуатационной эффективности.

Библиографический список

1. Абузов, А. В. Лесотранспортные системы: новые возможности и перспективы развития // Состояние лесов и актуальные проблемы лесопромышленности: матер. Всерос. конференции с междунар. участием / отв. ред. А. П. Ковалев. – Хабаровск : Изд-во ФБУ «ДальНИИЛХ», 2013. – С. 101–104.
2. Герц, Э. Ф. Вероятность повреждений деревьев в процессе трелевки при сплошных рубках / Э. Ф. Герц // Лесная промышленность. – 2004. – № 2 – С. 13–14.
3. Ермолов, В. В. Пневматические конструкции воздухоопорного типа / В. В. Ермолов. – Москва : Стройиздат, 1973. – 288 с.
4. Жмурин, И. П. Исследование динамических характеристик мягкой сферической оболочки в потоке воздуха / И. П. Жмурин, В. С. Левкин, Л. Ф. Смирнова // Труды ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского. – 1973. – Вып. 1496. – 15 с.
5. Ковалев, А. П. Эколого-лесоводственные основы рубок в лесах Дальнего Востока / А. П. Ковалев. – Хабаровск : ДальНИИЛХ, 2004. – 270 с.
6. Современное состояние лесов российского Дальнего Востока и перспективы их использования / под ред. А. П. Ковалёва. – Хабаровск : ДальНИИЛХ, 2009. – 470 с.
7. Стрельников, Д. В. Оценка адаптивности привода слежения судовой подвесной канатной дороги / Д. В. Стрельников, А. В. Бачище // Проблемы водного транспорта Российской Федерации. – Москва : Транспортное дело России, 2003. – Спецвыпуск. – 152 с.
8. Магула, В. Э. Судовые эластичные конструкции / В. Э. Магула. – Ленинград : Судостроение, 1978. – 132 с.
9. Патент 2531649 Российская Федерация, МПК⁷ В63В 35/00, В63В 27/30, В61В 7/06. Способ транспортировки древесины с использованием надувных плавающих опор : № 2013121242/11 : заявл. 07.05.13. : опубл. 27.10.14. Бюл. № 30 / Абузов А.В., Абузова К.Р. ; заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет.
10. Патент 2531778 Российская Федерация, МПК⁷ E04G 11/04, В63В 35/71, E04H 15/20. Надувная плавающая опора для удержания несущего каната : № 2013121199/11 : заявл. 07.05.13 : опубл. 27.10.14. Бюл. № 30 / Абузов А.В., Абузова К.Р. ; заявитель и патентообладатель Тихоокеанский государственный университет.
11. Григорьев, И. В. Особенности эксплуатации колесных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях / И. В. Григорьев, С. Е. Рудов // Forest Engineering : матер. науч.-практ. конференции с междунар. участием. – 2018. – С. 67–71.

References

1. Abuzov A.V. *Lesotransportnye sistemy: novye vozmozhnosti i perspektivy razvitija* // *Sostojanie lesov i aktual'nye problemy lesoupravlenija: materialy vseros. konf. s mezhdunar. uchastiem* / отв. ред. А.П. Kovalev. – Khabarovsk: Izd-vo FBU «Dal'NIILH», 2013. – P. 101-104 (in Russian).
2. Gerc E.F. (2004) *Verojatnost' povrezhdenij derev'ev v processe trelevki pri sploshnyh rubkah. Lesnaja promyshlennost'* [Forest industry]. № 2. P. 13-14 (in Russian).
3. Ermolov V.V. *Pnevmaticheskie konstrukcii vozduhoopornogo tipa*. Moscow: Strojizdat, 1973. 288 p. (in Russian).
4. Zhmurin I.P., Levkin V.S., Smirnova L.F. *Issledovanie dinamicheskikh harakteristik mjagkoj sfericheskoj obolochki v potoke vozduha. Trudy CAGI im. N.E. Zhukovskogo*. 1973. Iss. 1496. 15 p. (in Russian).
5. Kovalev A.P. *Ekologo-lesovodstvennye osnovy rubok v lesah Dal'nego Vostoka*. Habarovsk: Dal'NIILH, 2004. 270 p. (in Russian).

6. *Sovremennoe sostojanie lesov rossijskogo Dal'nego Vostoka i perspektivy ih ispol'zovanija* [Modern state of Russian Far East forests and perspectives of their use] / ed by A.P. Kovalev. – Khabarovsk: Dal'NIILH, 2009. 470 p. (in Russian).
7. Strel'nikov D.V., Bachishche A.V. *Ocenka adaptivnosti privoda slezhenija sudovoj podvesnoj kanatnoj dorogi / Problemy vodnogo transporta Rossijskoj Federacii.* – Moscow: Transportnoe delo Rossii, 2003. Special issue. 152 p. (in Russian).
8. Magula V.E. *Sudovye elasticheskie konstrukcii.* Leningrad: Sudostroenie, 1978. 132 p. (in Russian).
9. Patent 2531649 Rossijskaja Federacija, MPK7 V63V 35/00, V63V 27/30, V61V 7/06. *Sposob transportirovki drevesiny s ispol'zovaniem naduvnyh plavajushchih opor / Abuzov A.V., Abuzova K.R.; Zajavitel' i patentoobladatel' Tihookeanskij gosudarstvennyj universitet.* – № 2013121242/11; zajavl. 07.05.13. opubl.: 27.10.14. Bjul. № 30 (in Russian).
10. Patent 2531778 Rossijskaja Federacija, MPK7 E04G 11/04, V63V 35/71, E04N 15/20. *Naduvnaja plavajushhaja opora dlja uderzhanija nesushhego kanata / Abuzov A.V., Abuzova K.R.; Zajavitel' i patentoobladatel' Tihookeanskij gosudarstvennyj universitet.* – № 2013121199/11; zajavl. 07.05.13. opubl.: 27.10.14. Bjul. № 30 (in Russian).
11. Grigor'ev I.V., Rudov S.E. (2018) *Osobennostij ekspluatcii kolesnyh lesnyh mashin v slozhnyh pochvenno-gruntovyh i relyefnyh uslovijah.* Forest Engineering: *materialy nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Forest Engineering: Proceedings of the international scientific conference]. – S. 67-71 (in Russian).

Сведения об авторах

Абузов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесопользования и ландшафтного строительства ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: ac-systems@mail.ru.

Григорьев Игорь Владиславович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: silver73@inbox.ru.

Information about authors

Abuzov Aleksandr Viktorovich – DSc (Engineering), Professor, Department of Forest Management Technology and Landscape Construction, FSBEI HE "Pacific National University", Khabarovsk, Russian Federation; e-mail: ac-systems@mail.ru.

Grigoryev Igor Vladislavovich – DSc (Engineering), Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex", FSBEI HE "Yakut State Agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ ГРУЗОЗАХВАТНОГО СРЕЗАЮЩЕГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ АЭРОСТАТНОЙ СИСТЕМЫ ТРЕЛЕВКИ

доктор технических наук, профессор **А.В. Абузов**¹

доктор технических наук, профессор **О.А. Куницкая**²

1 – ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия»,

г. Якутск, Российская Федерация

В статье представлены результаты практических и теоретических исследований в области применения аэростатно-канатных систем, способных работать в режиме вертикального изъятия дерева из полога леса и последующей его транспортировки на погрузочный пункт. Актуальность данного технологического направления заключается в невозможности традиционной лесозаготовительной техники проводить процесс заготовки и транспортировки древесины, не нарушая экологические требования. Отмечается, что явный экологический эффект может достигаться с применением воздушных средств заготовки и транспортировки древесины, в частности при использовании аэростатных комплексов. Приводится краткое описание работы грузозахватного срезающего механизма, используемого для вертикальной системы трелевки с использованием аэростатно-канатных систем. Указывается, что основными параметрами данных механизмов, влияющих на их эффективную работу, является масса механизма и скорость его опускания на крону дерева. Приводится методика расчета оптимальной массы грузозахватного срезающего механизма в зависимости от породы обрабатываемого дерева и скорости опускания. Даются краткие рекомендации расчета массы и скорости движения при возможном использовании восходящего грузозахватного срезающего механизма.

Ключевые слова: аэростатная трелевка, аэростатно-канатная система, грузозахватный механизм, вертикальное изъятие древостоя, воздушная трелевка, срез ветвей дерева

DETERMINING THE WEIGHT OF LOAD-GRIPPING CUTTING MECHANISM FOR BALLOON SKIDDING SYSTEM

DSc (Engineering), Professor **A.V. Abuzov**¹

DSc (Engineering), Professor **O.A. Kunitskaya**²

1 – FSBEI HE "Pacific National University", Khabarovsk, Russian Federation

2 – FSBEI HE "Yakut State Agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of practical and theoretical studies in the field of application of balloon-cable systems capable of operating in the mode of vertical removal of a tree from a forest canopy and its subsequent transportation to a loading point. The relevance of this technological direction lies in the impossibility of traditional forestry equipment to carry out the process of harvesting and transporting wood without violating environmental requirements. It is noted that clear environmental effect can be achieved using air wood harvesting and transportation means, in particular when using balloon systems. A brief description of the operation of the load-gripping cutting mechanism used for the vertical skidding system using balloon-cable systems is given. It is indicated that the main parameters of these mechanisms that affect their effective operation are the mass of the mechanism and the speed of its lowering to the tree crown. The method of calculating the optimal mass of load-gripping cutting mechanism is given depending on the type

of wood being processed and the speed of lowering. Brief recommendations for calculating mass and speed of movement with the possible use of an ascending load-gripping cutting mechanism are given.

Keywords: balloon skidding, balloon-cable system, load-gripping mechanism, vertical removal of stand, aerial skidding, cut of tree branches

Введение

При совершенствовании возможностей лесозаготовительной техники и оборудования не всегда учитываются современные экологические требования, важность и необходимость которых продиктована не только общими лесохозяйственными требованиями, но и нарастающей тенденцией смены климатических условий на всей планете.

Применение в процессе лесозаготовок традиционных наземных технологий, в совокупности с вариантами сплошных рубок, влечет за собой изменение почвенного покрова, резко усиливает контрастность микроклимата на вырубках, ухудшает водорегулирующие свойства, что препятствует естественному возобновлению леса, ведет к низкой сохранности тонкомера и подроста.

Максимальный уровень экологической безопасности, в частности для системы горных лесов, может достигаться только с принципиально новым подходом к проведению выборочных рубок. В классическом понимании выборочные рубки в горных лесах должны представлять собой частичное изъятие единичных деревьев с определенной площади леса. При этом идеальным представляется практически 100 % сохранение подроста, тонкомера и других близстоящих деревьев, а также отсутствие любого чрезмерного воздействия на почву [1]. Однако если учесть, что оставшиеся растущие деревья повреждаются не только от процесса наземной трелевки, но также и от падения дерева в процессе его валки, то согласно проведенным исследованиям [3, 4, 7-14], наиболее щадящей технологией, которая совмещает возможности выборочной заготовки леса с размерным и геометрическим учетом расположения эксплуатационных площадок или лент, может являться воздушный способ трелевки древесины, представленный аэростатно-канатной системой, работающей по принципу вертикального изъятия деревьев и транспортировки их на погрузочный пункт.

Исходя из этого, можно констатировать, что для проведения лесозаготовительного процесса с

вертикальным изъятием растущих деревьев и последующей их транспортировки на погрузочный пункт требуется разработка и параметризация специализированных грузозахватных механизмов (ГЗМ), использование которых позволяло бы применять радио дистанционную систему наведения и управления, максимально сохраняя оперативность работ.

Материалы и методы

Для реализации эффективной работы аэростатно-канатной системы в режиме изъятия вертикально стоящих древостоев была разработана серия новых грузозахватных механизмов (ГЗМ), которые отличаются пониженным показателем энергозатрат при заготовке древесины, а также повышенной оперативностью и, соответственно, более низкой себестоимостью работ. По итогу исследований были предложены несколько вариантов ГЗМ, основной особенностью которых является наличие инерционных срезающих механизмов нисходящего и восходящего типа движения вдоль ствола дерева, в зависимости от породы [2].

Особенностью данных ГЗМ является использование в качестве инструмента реза специальных ножей и тяговой системы подъема или спуска срезающего механизма, движение которой обеспечивается бортовыми мини-лебедками либо подъемной силой аэростата.

Для обеспечения точного наведения на вершину стоящего дерева целесообразно применять инерционный ГЗМ в форме усеченного конуса. Данная форма обеспечивает минимальное сопротивление воздушной среды при перемещении аэростата и более устойчива в процессе опускания и наведения.

Разделяющийся грузозахватный механизм нисходящего типа движения (РГЗМ НГД) представлен конструкцией конусного вида, которая имеет верхний и нижний силовые узлы. При перемещении в точку загрузки, во избежание колебаний грузовой подвески, верхний и нижний узел находится в сомкнутом состоянии под оболочкой аэро-

стата. Когда аэростат достигает точки нахождения дерева, происходит его остановка за счет затормаживания работы барабанов наземных лебедок и последующее наведение и опускание РГЗМ на верхушку дерева с помощью бортового лебедочного комплекса, который находится под оболочкой аэростата. В момент достижения РГЗМ вершины дерева, происходит его разделение, после чего верхняя часть остается на месте, выполняя функции удержания вершины дерева, а нижняя часть, опускаясь вниз, за счет силы инерции, массы и специальных внутренних механизмов производит срез ветвей, захват комля, его срез и последующее удержание в процессе подъема и транспортировки. Процесс заготовки древесины с использованием аэростатно-канатной системы, оснащенной разделяющимся грузозахватным механизмом нисходящего типа движения, представлен на рис. 1.

Несмотря на явную эффективность, с точки зрения энергозатрат и улучшенной производительности разделяющийся грузозахватный механизм в совокупности с системой наведения и стабилизации является серьезной конструкцией, требующей отдельного изучения.

Необходимо отметить, что важными параметрами инерционного ГЗМ, обеспечивающими эффективное срезание ветвей, являются его масса и скорость опускания на крону дерева. При этом масса ГЗМ по отношению к скорости опускания должна быть оптимальной, так как её завышение снижает полезную нагрузку аэростата, а уменьшение не обеспечивает устойчивость грузовой подвески в процессе перемещения и наведения на груз. В связи с чем определение параметров массы инерционного грузозахватного механизма, а соответственно, и его конструктивных особенностей требует дополнительных исследований.

Результаты и обсуждения

Используя сведения из источников [5, 6] о числе сучьев i , среднем диаметре сучьев d_c , длине бессучковой зоны $l_{\text{бс}}$ в зависимости от диаметра дерева на высоте груди $d_{1,3}$ для основных эксплуатационных пород (сосна, ель, лиственница), примем их за базовую информацию для дальнейшей методики расчета. Обработка данных проводилась с использованием метода наименьших квадратов.

По результатам статистической обработки, зависимость числа сучьев i от диаметра дерева на высоте груди $d_{1,3}$ для сосны, ели и лиственницы выражена формулами

$$i = -0,0363d_{1,3}^2 + 4,9583d_{1,3} - 17,857, \quad (1)$$

$$i = -0,0036d_{1,3}^2 + 5,0643d_{1,3} - 20, \quad (2)$$

$$i = -0,0012d_{1,3}^2 + 1,6712d_{1,3} - 6,6. \quad (3)$$

Зависимость среднего диаметра сучьев d_c от диаметра дерева на высоте груди $d_{1,3}$ для сосны, ели и лиственницы выражена формулами

$$d_c = 0,0229d_{1,3}^2 - 0,1514d_{1,3} + 10, \quad (4)$$

$$d_c = 0,0057d_{1,3}^2 + 0,0571d_{1,3} + 12,2, \quad (5)$$

$$d_c = 0,0125d_{1,3}^2 + 0,5d_{1,3} + 23,75. \quad (6)$$

Зависимость длины бессучковой зоны $l_{\text{бс}}$ от диаметра дерева на высоте груди $d_{1,3}$ для сосны, ели и лиственницы показана на рис. 2 и соответственно выражена формулами

$$l_{\text{бс}} = -0,0031d_{1,3}^2 + 0,434d_{1,3} + 1,2, \quad (7)$$

$$l_{\text{бс}} = -0,0023d_{1,3}^2 + 0,3181d_{1,3} - 0,2429, \quad (8)$$

$$l_{\text{бс}} = -0,0017d_{1,3}^2 + 0,2513d_{1,3} - 1,6584. \quad (9)$$

При этом общую длину дерева опишем выражением

$$l = -0,0062d_{1,3}^2 + 0,8028d_{1,3} + 0,6988. \quad (10)$$

Сила, необходимая для срезания одного сучка, определяется по известной формуле

$$P = 315 \cdot 10^4 d^2 a_{\Pi} a_{\delta}, \quad (11)$$

где d – диаметр сучка [м], a_{Π} – поправочный коэффициент на породу древесины, a_{δ} – поправочный коэффициент на угол срезания сучка.

Учтем, что диаметр сучьев изменяется по длине ствола. В работах [5, 6] приводится диапазон изменения коэффициента вариации диаметра сучьев для этих пород древесины: 0,2–0,5. Коэффициент вариации ν связан со среднеквадратичным отклонением S известной формулой

$$S = \nu \cdot d_c. \quad (12)$$

Распределение сучьев по диаметру опишем при допущении о нормальном распределении диаметра сучьев по стволу дерева с учетом функции для оценки плотности вероятности в виде

$$S \cdot (2\pi)^{\frac{1}{2}} \exp\left\{-\frac{(d-d_c)^2}{2S^2}\right\}, \quad (13)$$

а также уравнений (4)–(6) для d_c в зависимости от $d_{1,3}$.

Работа A , совершаемая при срезании с дерева всех сучьев, представляет собой сумму значений работы по срезанию каждого из сучков. С учетом функции распределения сучьев по диаметру, величину A [кДж] рассчитаем по формуле

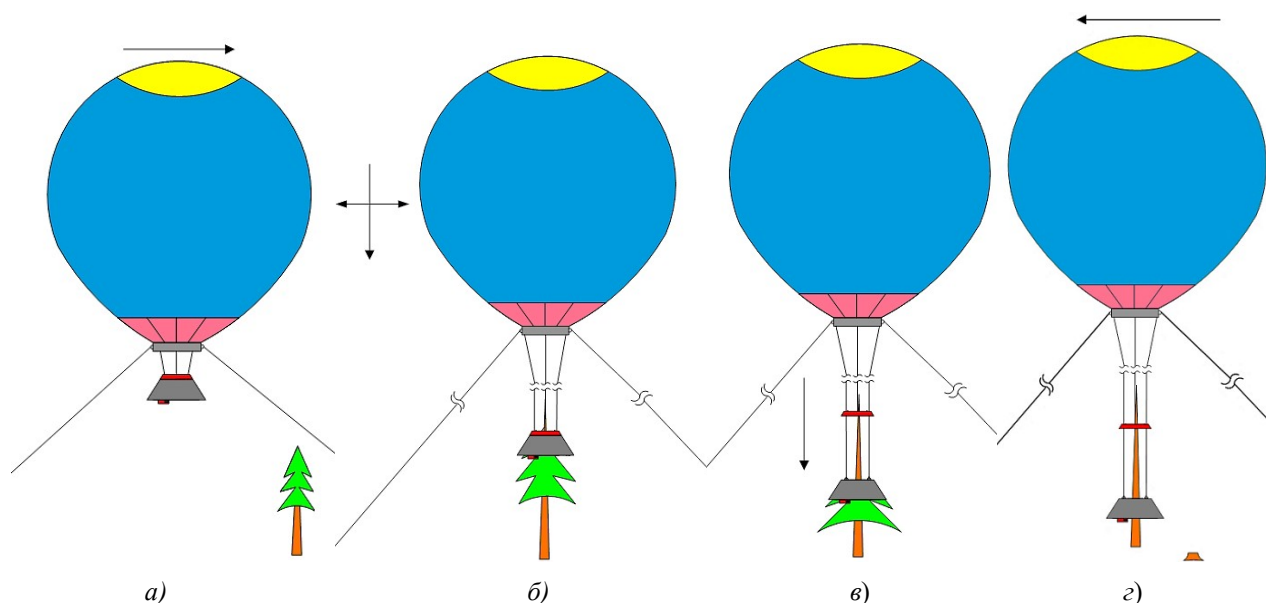
$$A = \int_0^{d_c+3S} 315 \cdot 10d^{-8} Sa_{\pi} a_{\delta} i d d \cdot \quad (14)$$

Сумму кинетической и потенциальной энергии срезающего механизма определим E [кДж] по формуле

$$E = 10^{-3} \{0,5MV^2 + Mg(l-l_{bc})\}, \quad (15)$$

где M – масса срезающего механизма, V – скорость срезающего механизма в начале процесса очистки дерева от сучьев, g – ускорение свободного падения.

Возможность очистки дерева от сучьев оценим по сопоставлению суммарной энергии срезающего механизма в начале процесса E и значения работы, которую необходимо совершить при срезании всех сучьев A .



Разработка Абузова А.В.

Рис. 1. Технологический процесс заготовки древесины с использованием РГЗМ НТД: а) движение в точку загрузки; б) процесс наведения; в) процесс очистки от ветвей и спил; г) процесс транспортировки в точку разгрузки

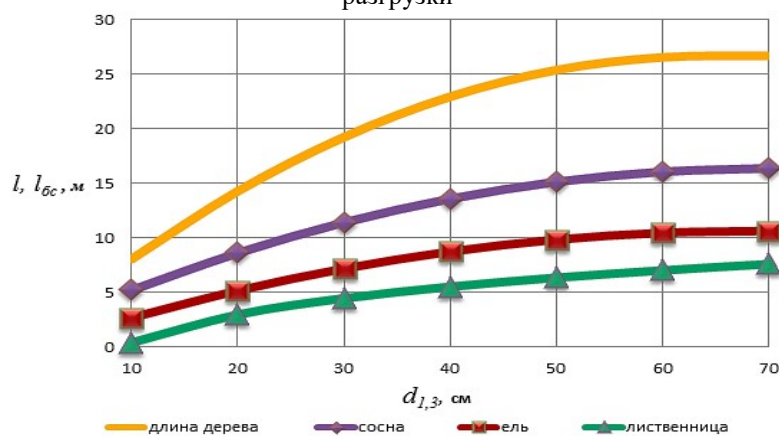


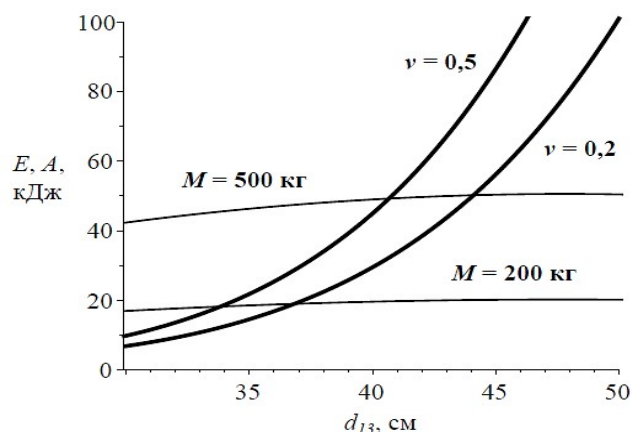
Рис. 2. Длина дерева и длина бессучковой зоны (графики с маркерами) в зависимости от диаметра дерева на высоте груди

Отметим, что при скоростях срезающего механизма в начале срезания сучьев (на вершине дерева) в пределах 1-2 м/с кинетическая энергия много меньше потенциальной, т.е. $0,5MV^2 \ll Mg(l - l_{oc})$. Например, при скорости $V = 2$ м/с и массе $M = 500$ кг кинетическая энергия составит 4 кДж, потенциальная энергия при разности $l - l_{oc} = 10$ м составит 50 кДж, что на порядок выше. Таким образом, скорость, с которой начинается очистка дерева от сучьев, не оказывает на процесс заметного влияния. Иными словами, срезание сучьев становится возможным за счет энергии, приобретаемой срезающим механизмом уже в процессе его движения вдоль ствола дерева. Дополнительно заметим, что в теории резания в исследуемом диапазоне скоростей не вводится каких-либо дополнительных поправочных коэффициентов на скорость.

На рис. 3 в виде графиков представлены зависимости A и E от $d_{1,3}$ при варьировании M и коэффициента вариации ν (на примере сосны).

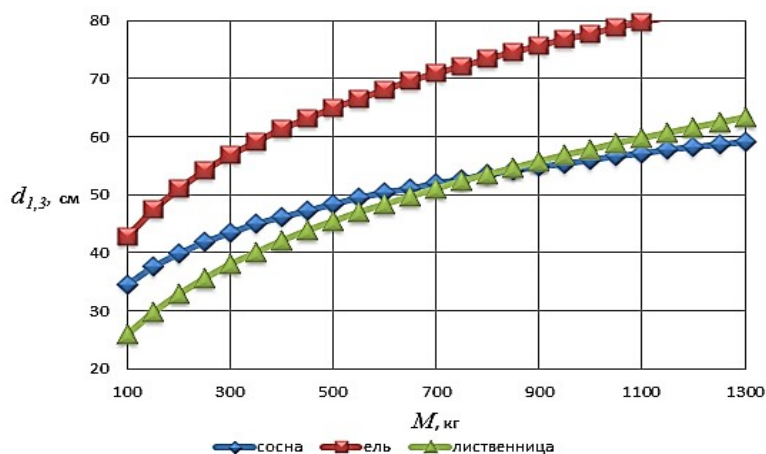
При заданных значениях M , V , a_{II} , a_{δ} , с учетом полученных выше зависимостей l , l_{oc} , i , d_c от $d_{1,3}$ по формулам (1)–(10), приравнивая друг другу величины A и E по формулам (14) и (15), получим соотношение для определения максимального диаметра $d_{1,3}$ дерева, которое можно очистить от сучьев. Замкнутое решение относительно $d_{1,3}$ не представляется возможным, поэтому для определения $d_{1,3}$ прибегнем к численным методам.

Вычисления произведены при $V = 1-2$ м/с, $M = 50-500$ кг, $a_{II} = 1$ (сосна), 1,1 (лиственница) и 1,3 (ель), $a_{\delta} = 1$, $\nu = 0,2-0,5$. Результаты решения (средние значения) представлены на рис. 4.



Результаты вычислений авторов

Рис. 3. Работа при срезании с дерева всех сучьев (толстые линии), сумма кинетической и потенциальной энергии срезающего механизма (тонкие линии)



Результаты вычислений авторов

Рис. 4. Зависимость массы срезающего механизма от диаметра очищаемого дерева

Данные графиков на рис. 4 можно аппроксимировать ($R^2 > 0,95$) следующими степенными зависимостями (для сосны, ели и лиственницы соответственно):

$$d_{1,3} = 13,121M^{0,2101} \pm 3,5, \quad (16)$$

$$d_{1,3} = 12,875M^{0,2604} \pm 2,7, \quad (17)$$

$$d_{1,3} = 5,239M^{0,3476} \pm 2,4. \quad (18)$$

Оценить изменение скорости срезающего механизма в процессе очистки дерева от сучьев можно следующим образом. Зададимся вертикальной координатой z , причем у верхушки дерева $z = 0$, а в начале бессучковой зоны дерева $z = l - l_{\text{сч}}$. С использованием закона сохранения энергии, а также выражений (14) и (15), при допущении о равномерном распределении числа сучков по длине ствола, получим для скорости $V(z)$

$$V(z) = \sqrt{\frac{10^{-3} \{0,5MV^2 + Mgz\} - \int_0^z \int_0^{d_c+3S} 315 \cdot 10d^{-8} Sa_{\text{II}} a_{\delta} i d d dz}{M}} \quad (19)$$

Например, при $M = 500$ кг для сосны с диаметром $d_{1,3} = 45$ см, зависимость скорости от координаты z (в диапазоне от 0 до $l - l_{\text{сч}}$), решение уравнения (19) представим в виде графиков на рис. 5. Из графиков видно, что начальный «запас» энергии (т. е. кинетическая энергия, обусловленная скоростью срезающего механизма до начала очистки дерева от сучьев) довольно быстро расходуется на совершение работы (кривые при $V = 1$ м/с и

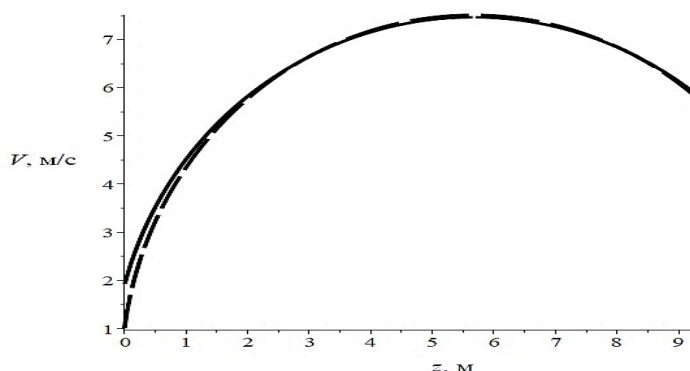
$V = 2$ м/с близки), и основная часть работы по срезанию сучьев совершается за счет энергии, получаемой срезающим механизмом во время его падения (т. е. уже после начала процесса очистки дерева от сучьев, при условии отсутствия ограничения на скорость со стороны лебедки).

Для сравнения также были проведены расчеты, когда поправочный коэффициент на угол срезания сучка $a_{\delta} = 0,7$. Полученные результаты сравнения отражены на графике (рис. 6).

Выводы

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что среднее значение массы, необходимой для эффективного срезания сучьев на вертикально стоящем дереве с использованием инерционного разделяющегося грузозахватного механизма нисходящего типа движения, может составлять 500 кг.

В случае использования грузозахватного механизма с направлением очистки дерева от сучьев снизу вверх за счет перемещения механизма подъемной силой аэростата условия, при которых возможно срезание сучьев по направлению вверх, определяются сопоставлением подъемной силы аэростата за вычетом веса срезающего механизма (итого 30–40 кН) и силы, необходимой для срезания максимального по диаметру сука по формуле (11).



Результаты вычислений авторов

Рис. 5. Изменение скорости срезающего механизма в процессе очистки дерева от сучьев (сосна, $d_{1,3} = 45$ см, $M = 500$ кг): сплошная линия – $V = 2$ м/с, пунктирная линия $V = 1$ м/с

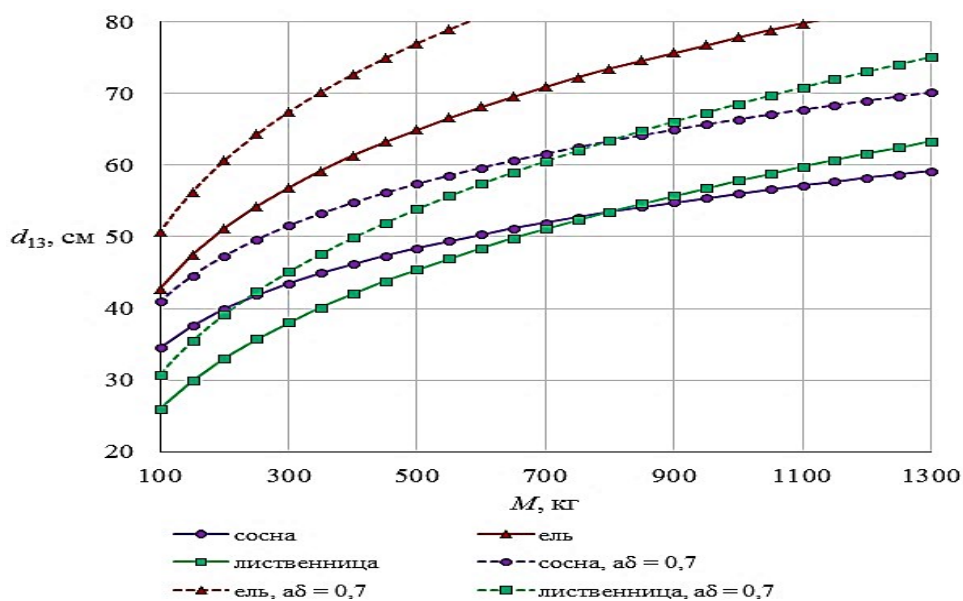


Рис. 6. График зависимости массы срезающего механизма от диаметра очищаемого дерева при $a_\delta = 0,7$ и $a_\delta = 1$

Библиографический список

1. Абузов, А. В. Агрэкология: формирование лесозаготовительных операций с учётом экологических требований / А. В. Абузов // Инженерная экология. – 2012. – № 1 (103). – С. 24–31.
2. Абузов, А. В. Особенности лесозаготовительного процесса при вертикальном изъятии и транспортировке деревьев воздушным способом / А. В. Абузов, Р. В. Бернотас // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур: сб. докл. Междунар. Экол. Семинара, Хабаровск, 6-8 мая 2015 г. / под ред. проф. П. Б. Рябухина. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – С. 67–71.
3. Анисимов, Г. М. Экологическая эффективность трелевочных тракторов / Г. М. Анисимов, И. В. Григорьев, А. И. Жукова. – Санкт-Петербург : СПбГЛТА, 2006. – 252 с.
4. Средооадающие технологии разработки лесосек в условиях Северо-Западного региона Российской Федерации : монография / И. В. Григорьев, А. И. Жукова, О. И. Григорьева, А. В. Иванов. – Санкт-Петербург : ЛТА, 2008. – 174 с.
5. Залегаллер, Б. Г. Технология и оборудование лесных складов : учебник для вузов / Б. Г. Залегаллер, П. В. Ласточкин, С. П. Бойков. – 3-е изд., испр., доп. – Москва : Лесн. пром-сть, 1984. – 352 с.
6. Редькин, А. К. Выбор лесоскладских машин и технологии в зависимости от размерно-качественных характеристик обрабатываемого сырья / А. К. Редькин, А.Я. Чувелев. – Москва : МЛТИ, 1981. – 76 с.
7. Патент на изобретение № 2135351 Российская Федерация, МПК В27L. Сучкорезно-окорочное устройство для обработки стоящих деревьев : заявл. 98112451/13 24.06.1998 : дата публ. 27.08.1999 / Якимович С.Б., Дьячков О.Е., Ткаченко В.Ю. ; заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет.
8. Патент на изобретение № 2233073 Российская Федерация, МПК А01G 23/083, А01G 23/08. Лесной комбайн : заявл. 02.07.2002; дата публ. 27.07.2004 / Якимович С.Б., Редькин А.К., Зорин А.Н. ; заявитель и патентообладатель Марийский государственный технический университет, Московский государственный университет.
9. Patent US 3638693, A01G 23/02. Forest harvester / Inventor: Ulf Hjalmar Sundberg ; Pub. Date Feb. 1, 1972.
10. Patent US 6263932B1, A01G 23/095. Aerial tree harvesting apparatus / Inventor: Robert Chalifoux ; Pub. Date Jul. 24, 2001.

11. Patent US 6672347B2, A01/095. Aerial tree delimiting apparatus / Inventor: Ervin Ralph Tingstad ; Pub. Date Jan. 6, 2004.
12. Patent US 4662414, A01G 23/08. Apparatus and method for collecting a tree top / Inventor: Helmut E. Fandrich ; Pub. Date May 5, 1987.
13. Patent US 2009/0000698A1, A01G 1/50. Suspendable tree cutter having an adjustable orientation pivot / Inventor: Brian Beresford ; Pub. Date Jan. 1, 2009.
14. Григорьев, И. В. Особенности эксплуатации колесных лесных машин в сложных почвенно-грунтовых и рельефных условиях / И. В. Григорьев, С. Е. Рудов // Forest Engineering: материалы научно-практической конференции с международным участием. 2018. – С. 67–71.

References

1. Abuzov A.V. *Agrojekologija: formirovanie lesozagotovitel'nyh operacij s uchjotom jekologicheskikh trebovanij // Inzhenernaja jekologija*. 2012. №1(103). – С. 24 – 31.
2. Abuzov A.V., Bernotas R.V. *Osobennosti lesozagotovitel'nogo processa pri vertikal'nom iz'yatii i transportirovke derev'ev vozdušnym sposobom // Filosofiya sovremennogo prirodopol'zovaniya v bassejne reki Amur: sb. dokl. Mezhdunar. Ekol. Seminara, Habarovsk, 6-8 maya 2015 g. / pod red. prof. P.B. Ryabuhina. – Habarovsk: Izd-vo Tihookean. gos. un-ta, 2015. – С. 67 – 71.*
3. Anisimov G.M., Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. *Ekologicheskaya effektivnost' trelevochnyh traktorov*.
4. Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. *Sredoshchadyashchie tekhnologii razrabotki lesosek v usloviyah Severo-Zapadnogo regiona Rossijskoj Federacii: Monografiya. – SPb.: LTA, 2008. – 174 s*
5. Zalegaller B. G., Lastochkin P. V., Bojkov S. P. *Tekhnologiya i oborudovanie lesnyh skladov - Uchebnik dlya vuzov. – 3-e izd., ispr., dop. – M.: Lesn. prom-st', 1984. – 352 s.*
6. Red'kin A.K., Chuvelev A.YA. *Vybor lesoskladskih mashin i tekhnologii v zavisimosti ot razmerno-kachestvennyh harakteristik obrabatyvaemogo syr'ya*. M.: MLTI, 1981. – 76 s.
7. *Patent na izobrenie №2135351 Rossijskaya Federaciya, MPK B27L. Suchkorezno-okorochnoe ustrojstvo dlya obrabotki stoyashchih derev'ev / YAKimovich S.B., D'yachkov O.E., Tkachenko V.YU.; zayavitel' i patentoobladatel' Marijskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet; zayavl. 98112451/13 24.06.1998; data publ. 27.08.1999.*
8. *Patent na izobrenie №2233073 Rossijskaya Federaciya, MPK A01G 23/083, A01G 23/08. Lesnoj kombajn / YAKimovich S.B., Red'kin A.K., Zorin A.N.; zayavitel' i patentoobladatel' Marijskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, Moskovskij gosudarstvennyj universitet; zayavl. 02.07.2002; datapubl. 27.07.2004.*
9. Patent US 3638693, A01G 23/02. Forest harvester / Inventor: Ulf Hjalmar Sundberg; Pub. Date Feb. 1, 1972.
10. Patent US 6263932B1, A01G 23/095. Aerial tree harvesting apparatus / Inventor: Robert Chalifoux; Pub. Date Jul. 24, 2001.
11. Patent US 6672347B2, A01/095. Aerial tree delimiting apparatus / Inventor Ervin Ralph Tingstad; Pub. Date Jan. 6, 2004.
12. Patent US 4662414, A01G 23/08. Apparatus and method for collecting a tree top / Inventor: Helmut E. Fandrich; Pub. Date May 5, 1987.
13. Patent US 2009/0000698A1, A01G 1/50. Suspendable tree cutter having an adjustable orientation pivot / Inventor: Brian Beresford; Pub. Date Jan. 1, 2009.
14. Grigor'ev I.V., Rudov S.E. *Osobennosti ekspluatcii kolesnyh lesnyh mashin v slozhnyh pochvenno-gruntovyh i rel'efnyh usloviyah // Forest Engineering: materialy nauchno-prakticheskoi konferencii s mezdu-narodnym uchastiem*. 2018. – С. 67-71.

Сведения об авторах

Абузов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесопользования и ландшафтного строительства ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск, Российская Федерация; e-mail: ac-systems@mail.ru.

Куницкая Ольга Анатольевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Information about authors

Abuzov Aleksandr Viktorovich – DSc (Engineering), Professor, Department of Forest Management Technology and Landscape Construction, FSBEI HE "Pacific National University", Khabarovsk, Russian Federation; e-mail: ac-systems@mail.ru.

Kunitskaya Olga Anatolyevna – DSc (Engineering), Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex", FSBEI HE "Yakut State Agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation; e-mail:ola.ola07@mail.ru.

НАТУРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ СКЛЕИВАНИЯ МАССИВНОЙ ДРЕВЕСИНЫ СОВРЕМЕННЫМИ КЛЕЯМИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

кандидат технических наук, доцент **Е.В. Кантиева**¹

кандидат технических наук, доцент **Л.В. Пономаренко**¹

исполнительный директор **М.А. Послухаев**²

кандидат технических наук, зам. генерального директора по техническому развитию **А.Н. Чернышев**²

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

2 – ООО ХК «Мебель Черноземья», г. Воронеж, Российская Федерация

Для соединения различных материалов достаточно широко используются клеи, тем более что в некоторых случаях другие варианты совмещения материалов не подходят. В работе рассматривается склеивание массивной древесины твердолиственных пород современными клеевыми материалами. В настоящее время на рынке представлена большая группа клеев различных марок от российских и зарубежных производителей. В деревообрабатывающей промышленности в столярно-строительном и мебельном производствах, в деревянном домостроении, в производстве отделочных материалов и др. используются клеи, которые эксплуатируются снаружи и внутри помещений в постоянных и переменных влажностных условиях. Поэтому правильный выбор клея играет важную роль и для производителя, и в последующем для потребителя полученного продукта. В данной работе исследовали зависимость предела прочности при скалывании по клеевому слою от вида клея, породы древесины и условий эксплуатации. Нами выбраны клеи на основе полихлоропрена, поливинилацетата и каучука. Наибольшую прочность клеевого соединения при склеивании массивной древесины твердых лиственных пород дают клеи на основе поливинилацетата. При эксплуатации изделий в условиях перемены температуры и влажности прочность склеивания снижается, в некоторых случаях значительно. Справедливости ради надо отметить, что на прочность склеивания влияет не только вид клея, но и порода древесины.

Ключевые слова: древесина, клей, клеевое соединение, прочность, столярное и мебельное изделие

A FULL-SCALE STUDY OF THE STRENGTH OF MASSIVE WOOD GLUING WITH MODERN ADHESIVES WHEN OPERATING IN VARIOUS CONDITIONS

PhD (Engineering), Associate Professor **E.V. Kantieva**¹

PhD (Engineering), Associate Professor **L.V. Ponomarenko**¹

Executive Director **M.A. Poslukhaev**²

PhD (Engineering), Deputy Head on technical development **A.N. Chernyshev**²

1 – FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

2 – LLC HC Furniture of Chernozemye, Voronezh, Russian Federation

Abstract

Glues are widely used to connect various materials, especially since in some cases other options for combining materials are not suitable. The paper deals with the bonding of solid hardwood with modern adhesive materials. Currently, a large group of adhesives of various brands from Russian and foreign manufacturers is presented on the market. In the woodworking industry, adhesives are used in the carpentry and furniture, manufacturing, in wooden house-

building, in the production of finishing materials, etc., which are operated outside and inside the premises in constant and variable humidity conditions. Therefore, the correct choice of adhesives plays an important role both for the manufacturer and subsequently for the consumer of the resulting product. In this work, we have studied the dependence of the tensile strength when chipping along the adhesive layer on the type of glue, wood species, and operating conditions. We have selected the following adhesives based on polychloroprene, polyvinyl acetate and rubber. The greatest strength of the adhesive bonding when gluing solid hardwood is given by polyvinyl acetate adhesives. When using the product in conditions of changing temperature and humidity, the bonding strength decreases, in some cases significantly. In fairness, it should be noted that not only the type of glue, but also the type of wood affects the bonding strength.

Keywords: wood, glue, adhesive bonding, strength, joinery and furniture

Введение

В условиях развивающейся отечественной экономики, когда для успешного ведения бизнеса необходимо обеспечить заданные стандартами параметры изделия в течение всего гарантийного срока его эксплуатации, важным является момент постоянства формы и размеров конструктивных элементов в различных климатических условиях жилых и гражданских помещений: гостиная, офис, ванная, кухня, тамбур и т. п.

Преимущества мебели и столярно-строительных изделий из натуральной древесины в данном случае сложно переоценить: и дело здесь не только в эстетической составляющей, но и в высоких эксплуатационных качествах, благодаря которым древесина издавна использовалась в строительных целях и для изготовления уникальных предметов интерьера. Основным фактором длительного срока эксплуатации изделия является формоустойчивость составляющих его конструктивных элементов, условия обеспечения которой диктуются правилами конструирования изделий из древесины, предложенными доцентом кафедры механической технологии древесины ВЛТИ Н.А. Михайловым [1]: «Отдельные детали изделия надо конструировать так, чтобы неизбежные изменения размера и формы были наименьшими...». Этого можно добиться изготовлением элементов конструкций не из цельного отрезка древесины, а из нескольких, возможно более мелких, соединенных клеем [12]. По данным [8], в последние годы все большую популярность приобретает идея составных деревянных конструкций, в которых крупномерные элементы изготавливаются из нескольких деталей меньшего размера.

Требования к условиям изготовления сборочных единиц сплачиванием и сращиванием включают состояние температуры и влажности воздуха в производственном помещении, состояние склеиваемых материалов, выбор и подготовку клеев, способы нанесения клеев, способ склеивания и подвода теплоты, параметры прессования, рекомендации по выдержке склеенных деталей, применяемое оборудование, методы и средства контроля. Основным показателем качества изготовления клееных материалов является прочность склеивания [5], зависящая от вида клея и породы древесины [7].

Целью работы является исследование влияния вида клея на прочность склеивания древесины и древесных материалов в современном промышленном использовании.

Материалы и методы

В данной работе нами исследуется влияние вида клея на прочность склеивания древесины [3, 4] при промышленном использовании. Так как производителю важно предугадывать поведение изделия во время эксплуатации его потребителем в различных климатических условиях [9], то исследования проводились не только со свежесклееными образцами древесины (то есть испытанными после технологической выдержки 48 часов), но и после выдержки в различных климатических условиях в период с октября 2018 г. по апрель 2019 г. включительно. Для повышения объективности конечных результатов исследования проводились в условиях реальных производств двух регионов России на древесине бука и ясеня рубок Северного Кавказа и Центрально-Черноземного региона:

1) деревообрабатывающее предприятие ООО «Фирма «Кавказский лес», Республика Адыгея,

Майкопский р-н, п. Тульский, специализирующееся на выпуске столярно-строительных изделий из массивной древесины;

2) мебельное предприятие ООО ХК «Мебель Черноземья», г. Воронеж, специализирующееся на выпуске бытовой корпусной, мягкой и решетчатой мебели.

Технологический процесс изготовления образцов для испытания заключался в сплачивании по кромке массивных заготовок длиной 2400 мм с поперечным сечением 33×32 мм в горячем горизонтальном прессе марки Orma NPC-L-Digit 6-90 25-13. Установлены следующие режимы склеивания: температура 60 °С, боковое давление склеивания 1,2 МПа, вертикальное давление прижима 2,2 МПа в течение 8 мин по 36 штук в закладке. Полученные щиты прострагивали по толщине в размер 21 мм. Эти щиты могут использоваться для тонких мебельных заготовок, а также склеиваться попарно по пласти в холодной наклонной гидравлической вайме по 30 пар в закладке для получения толстых столярных или мебельных заготовок. Боковое давление прижима составляет 0,9 МПа, вертикальное давление склеивания 1,2 МПа, продолжительность выдержки 30 мин. Склеенные щиты выдерживались в помещении цеха в течение 48 часов для стабилизации внутренних напряжений.

Контролировали температуру и влажность среды в производственном помещении с целью обеспечения стабильности влажности склеиваемых материалов. Температура воздуха в помещении должна быть не ниже 20±2 °С, а относительная влажность воздуха – от 45 до 65 %.

На современном рынке наблюдается большое разнообразие клеев различных марок российских и зарубежных производителей [6]. В себестоимости изделия клеи составляют значительную часть, поэтому к выбору клея стоит подходить обоснованно. По данным [11], рекомендуется использовать поливинилацетатные клеи, так как они имеют прозрачный клеевой шов, высокую прочность склеивания и невысокую стоимость.

Использовали следующие виды клеев:

1) контактный клей KLEYBERGNC 100-1 на основе полихлоропрена. Область применения – для выполнения постформирования и наиболее качест-

венного соединения декоративных пластиков и материалов МДФ, ДСП, ДВП, склеивания поролона с древесиной, кожей, тканью, синтетикой;

2) клей на основе поливинилацетата OLMIVIL 0310, предназначенный для всех видов склеивания, где требуется влагостойкость в соответствии с нормой EN 204/205-D3. Область применения – производство дверей, окон и мебели, эксплуатируемых в сырых помещениях. Используется для склеивания древесины хвойных и лиственных пород, для облицовывания ДСтП и других древесных плит шпоном, а также для укладки ламинатного пола и паркета (соединение на шпунт и гребень);

3) однокомпонентный дисперсионный клей HALTIG на основе поливинилацетата, класс водостойкости D3. Область применения – склеивание изделий и конструкций из древесины мягких и твердых пород, пригоден для ламинирования поверхностей, шпонирования, склеивания каркасных и сборочных конструкций, склеивания щита, бруса, производства слоистых плит, приклеивания пленок. Пригоден для горячего и холодного склеивания;

4) поливинилацетатный клей Rakoll 0301, класс водостойкости D3. Область применения – облицовывание поверхностей декоративными пленками, шпоном, слоистыми пластиками, рейками из массивной древесины, склеивание на гладкую фугу элементов из древесины и ДСтП;

5) поливинилацетатный клей Rakoll 0300, класс водостойкости D4. Область применения – облицовывание поверхностей декоративными пленками, шпоном, слоистыми пластиками, рейками из массивной древесины, склеивание на гладкую фугу элементов из древесины и ДСтП;

6) каучуковый монтажный клей POINT 96 на основе синтетических каучуков (углеводородных смол и органических растворителей). Область применения – приклеивание реек, панелей, досок из жесткого ПВХ и древесины, термо- и звукоизоляционных материалов.

Характеристики испытуемых клеев приведены в табл. 1.

Заготовки были разделы на 3 группы: первая – для испытания после изготовления, вторая и третья – для испытания после выдержки в помещении с постоянными и переменными климатическими

условиями соответственно. Из заготовок каждой группы было изготовлено и в последующем испытано по 10 образцов каждой породы древесины (бука и ясеня).

Основным показателем качества клеевого соединения является прочность склеивания, характеризующаяся пределом прочности при скалывании по клеевому слою [10, 13].

Испытание проводилось в соответствии с ГОСТ 33120-2014 «Конструкции деревянные клееные. Методы определения прочности клеевых соединений» [2].

Форма и размеры образцов приведены на рис. 1, примеры разрушений – на рис. 2.

Таблица 1

Характеристики клеев

Свойства	KLEYBERGNC 100-1	OLMIVIL 0310	HALTIG	Rakoll 0301 D3	Rakoll 0300 D4	POINT 96
Плотность, г/см ³	0,81	1,05	1,08	-	-	0,89
Цвет	красный	Белый, при высыхании бесцветный				бесцветный
Вязкость по Брукфильду при 20-23 °С, мПа·с	200±50	14000±3000	14000±2700	ок. 12000	ок. 12000	паста
pH	-	2,5-3,5	4,75±0,25	ок. 3	ок. 3	-
Содержание сухого остатка, %	19	-	50±1	-	-	61±3
Рабочая температура, °С	-	15-22	15-25	18-20	18-20	15-20
Расход, г/м ²	140-160	150-300	80-180	70-180	70-180	150-300
Время прессования, мин при 20 °С	-	20-30	20	-	-	-
80 °С	-	3-6	0,5	8-15	8-15	10-15
Время открытой выдержки, мин	3-20	15-20	15-20	8-11	8-11	3-5

Источник: данные производителей

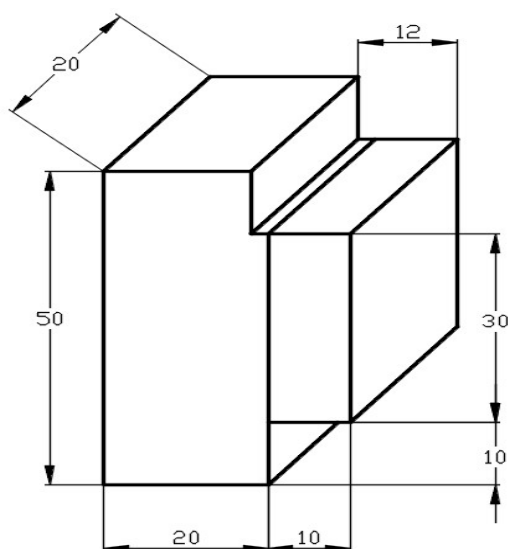


Рис. 1. Форма и размер образца

Источник: [2]

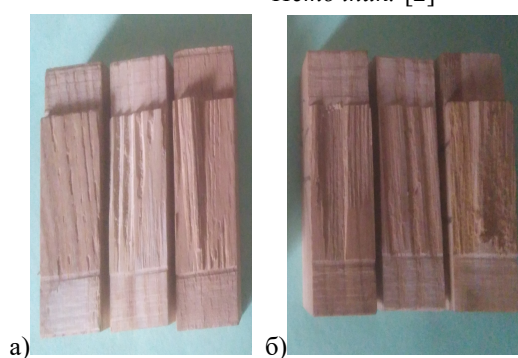


Рис. 2. Примеры разрушений образцов бука и ясеня на испытательной машине: а) преимущественно по клеевому слою; б) преимущественно по древесине
Источник: собственные вычисления (разработки)

Предел прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон определяли по формуле

$$\tau_{\text{скл}} = \frac{P_{\text{max}}}{b \cdot l}, \quad \text{МПа} \quad (1)$$

где P_{max} – максимальная нагрузка в МН (кгс);

b – толщина образца в м (см);

l – длина скалываемой части образца, м (см).

Результаты и обсуждение

Сводные результаты испытаний приведены в табл. 2. Характер разрушения всех групп образцов был смешанный (частично по древесине, частично по клеевому шву) у клеев OLMIVIL 0310, Rakoll 0301D3, в основном по клеевому шву – HALTIG, в основном по древесине – Rakoll 0300D4.

Анализ испытаний первой группы образцов показал, что использование каучукового клея POINT 96 обеспечивает прочность клеевого соединения 3,7 МПа, что значительно ниже требуемых показателей. Образцы, склеенные клеем KLEYBERGNC 100-1 на основе полихлоропрена, разрушались в момент приложения давления, заготовки сдвигались относительно друг друга. В связи с этим данные клеи не участвовали в испытаниях второй и третьей группы образцов. По результатам испытаний построены графические зависимости, приведенные на рис. 3-7.

Как показывает анализ рис. 3, клеи на основе поливинилацетата дают примерно одинаковую прочность в пределах 25-26 МПа. Наибольшая прочность склеивания обеспечивается клеем марки OLMIVIL 0310 и составляет 26,3 МПа.

Образцы, склеенные этими же клеями и выдержанные в постоянных климатических условиях (рис. 4), увеличили свою прочность в целом. Но для клея Rakoll 0301D4, OLMIVIL 0310 увеличение составило 3-7 %, Rakoll 0301D3, HALTIG – 35 %. Это может быть связано с завершением процессов отверждения и стабилизацией внутренних напряжений. При выдержке образцов в переменных климатических условиях (рис. 5) прочность склеивания снизилась для всех марок клеев, но если для клея Rakoll 0301D4 снижение составило 10 %, то потеря прочности для клея Rakoll 0301D3 – уже 80 %. Исследования еще раз подтвердили, что группа клеев D4 имеет большую водостойкость, чем D3.

При сравнении образцов (рис. 6, 7), изготовленных из древесины бука и ясеня, можно говорить, что порода древесины значительно не влияет на прочность склеивания образцов, испытанных после технологической выдержки и выдержки в постоянных климатических условиях.

Таблица 2

Результаты испытания образцов при скалывании по клеевому шву

Марка клея	Предел прочности при скалывании вдоль волокон, МПа	
	Бук	Ясень
Первая группа образцов		
Rakoll 0301D3	25,2	25,8
HALTIG	24,9	25,3
KLEYBERGNC 100-1	Все образцы в момент нагружения сдвинулись относительно друг друга	
OLMIVIL 0310	26,3	26,4
Rakoll 0301D4	25,1	25,5
POINT 96	3,5	3,7
Вторая группа образцов		
Rakoll 0301D3	34,0	26,4
HALTIG	33,8	36,5
KLEYBERGNC 100-1	-	-
OLMIVIL 0310	27,0	29,7
Rakoll 0301D4	26,8	29,3
POINT 96	-	-
Третья группа образцов		
Rakoll 0301D3	6,8	14,7
HALTIG	16,3	27,0
KLEYBERGNC 100-1	-	-
OLMIVIL 0310	17,0	27,6
Rakoll 0301D4	24,0	25,7
POINT 96	-	-

Источник: собственные вычисления (разработки)

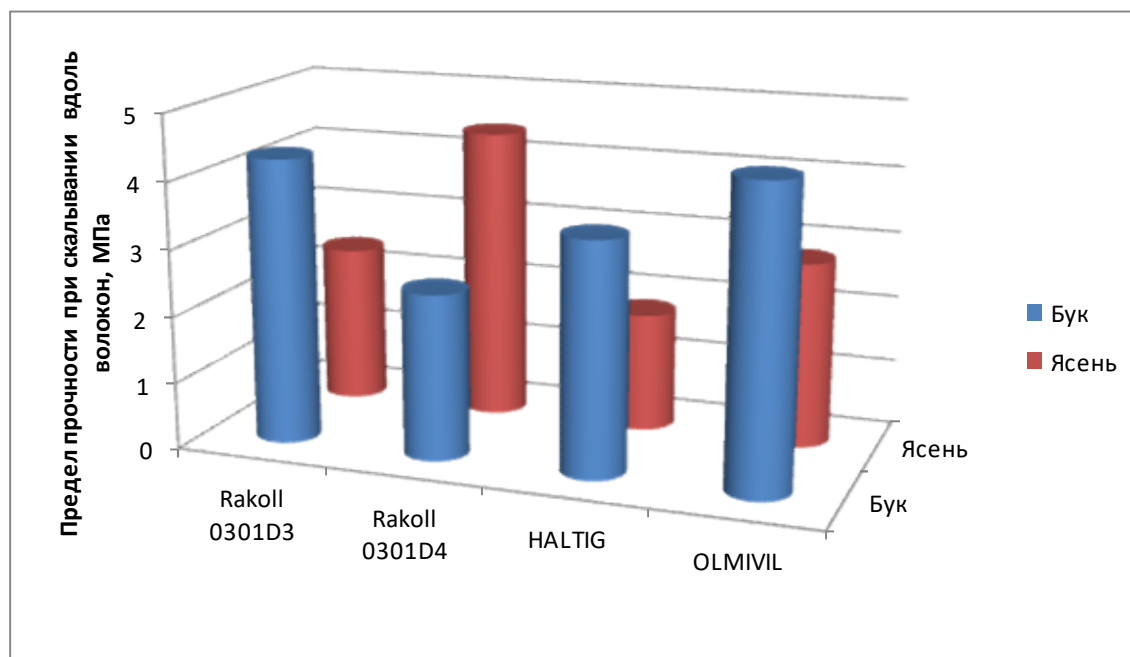


Рис. 3. Зависимость предела прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон древесины для образцов первой группы от вида клея
 Источник: собственные вычисления (разработки)

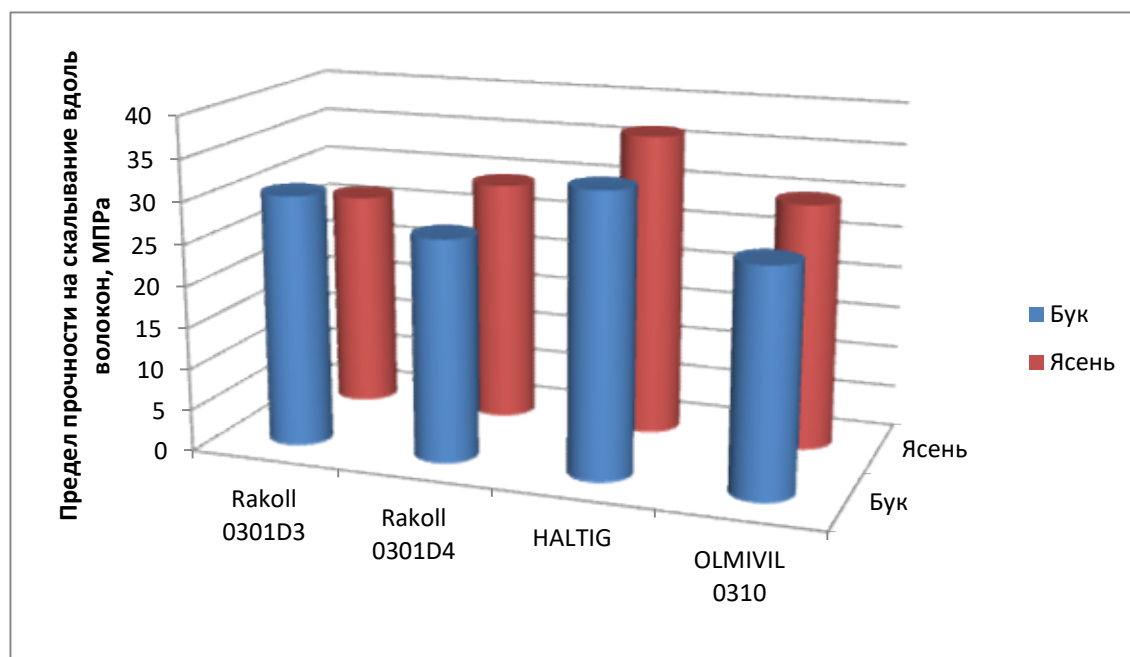


Рис. 4. Зависимость предела прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон древесины для образцов второй группы от вида клея
 Источник: собственные вычисления (разработки)

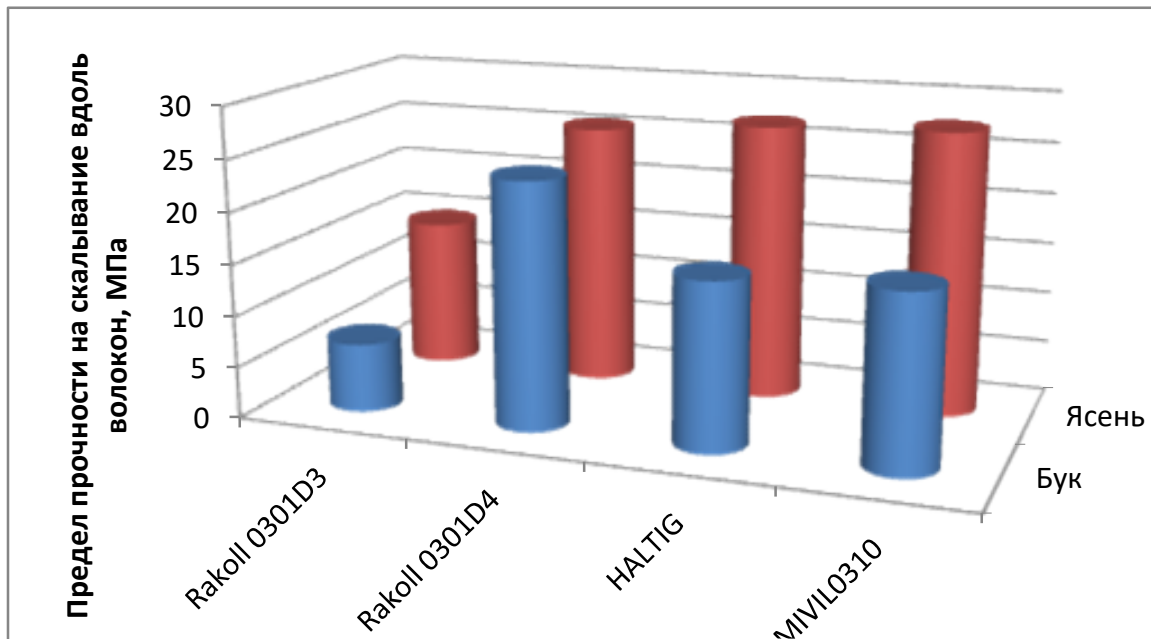


Рис. 5. Зависимость предела прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон древесины для образцов третьей группы от вида клея
 Источник: собственные вычисления (разработки)

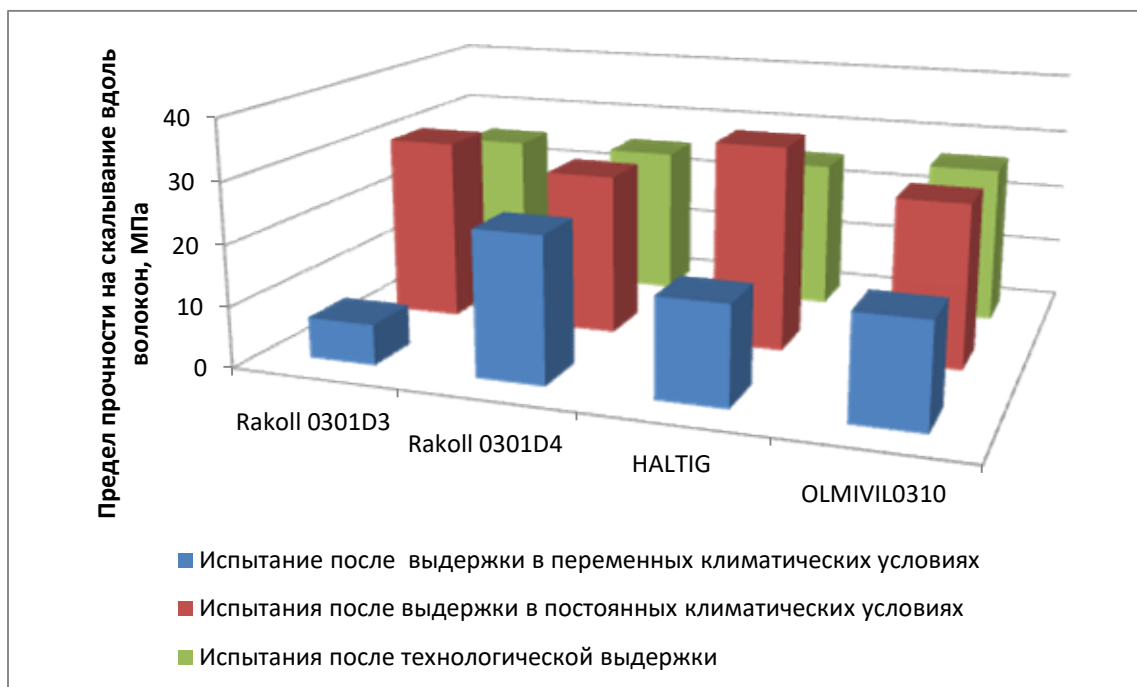


Рис. 6. Зависимость предела прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон древесины бука от вида клея
 Источник: собственные вычисления (разработки)

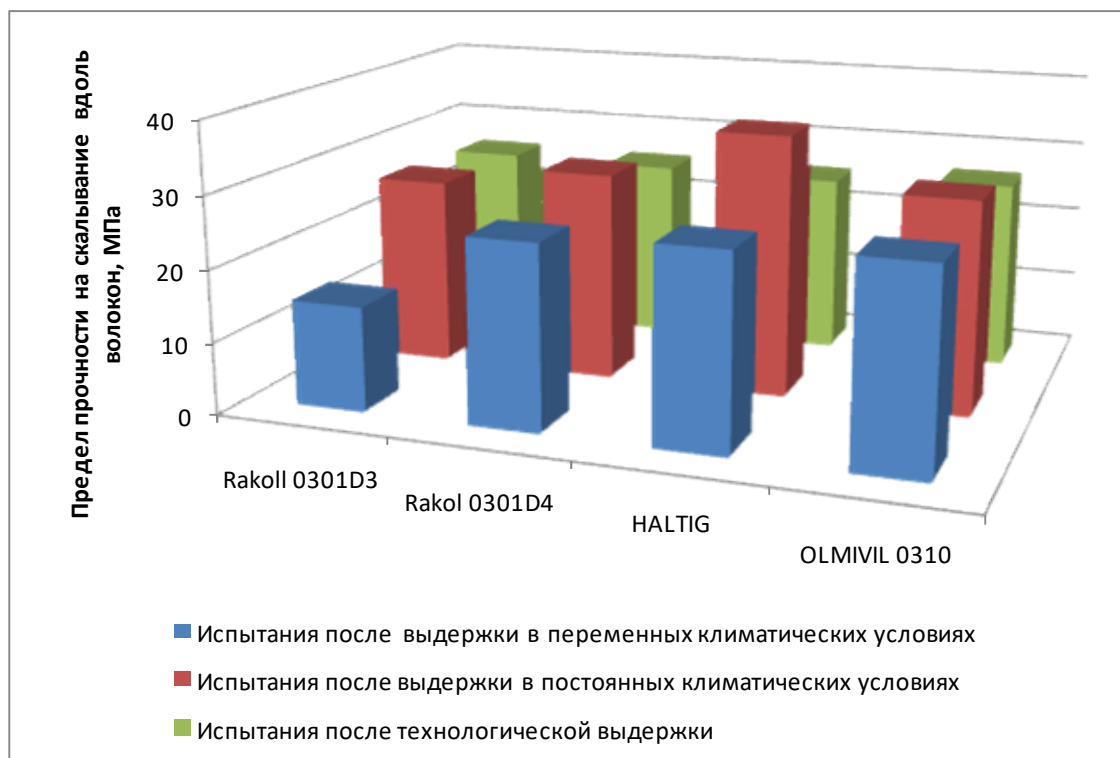


Рис. 7. Зависимость предела прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон древесины ясеня от вида клея

Источник: собственные вычисления (разработки)

При выдержке в переменных климатических условиях образцы из древесины ясеня показывают более высокую прочность в сравнении с образцами из бука, хотя и ниже образцов первой и второй группы. Стоит отметить, что все клеи показали прочность, соответствующую требованиям стандартов.

Выводы

1. Наиболее приемлемыми для склеивания заготовок из древесины твердых лиственных пород по толщине и ширине являются клеи на основе поливинилацетата. Заметных отличий прочности клеевых соединений образцов из древесины бука и ясеня после технологической выдержки не зафиксировано, что объясняется их практически одинаковой плотностью.

2. При эксплуатации изделий в постоянных климатических условиях прочность клеевых швов не только не снижается, но для некоторых видов клеев даже повышается.

3. При эксплуатации изделий в переменных климатических условиях прочность клеевых швов в значительной степени снижается, вплоть до 80 %, за счет постоянных деформаций и изменений раз-

меров и форм склеенных заготовок. Поэтому чем меньше (до известной степени) составляющие конструктивный элемент ламели, тем в большей степени он обладает формоустойчивостью.

4. Прочность клеевых швов по буку в большей степени снижается под влиянием переменных климатических факторов, чем по ясеню. Это объясняется тем известным фактом, что бук сильнее впитывает влагу из воздуха, относится к сильноусыхающим породам с объемным коэффициентом усушки 0,47. Кроме того, по шкале стойкости, принятой в России (единица – это стойкость заболони липы) бук обладает следующими показателями: спелая древесина – 3,3 (ядровый дуб – 5,2), заболонь древесины бука – 2,5 (заболонь древесины ясеня – 4,6). Все это способствует нарушению структуры клеевого слоя, его разрушению и снижению прочности.

5. Полученные данные не только позволяют обосновать выбор типа клея и прогнозировать поведение изделия в различных условиях эксплуатации, но и способствуют выбору породы древесины, а также ассортимента выпускаемых изделий в целом.

Библиографический список

1. Гарин, В. А. Технология изделий из древесины : учеб. пособие / В. А. Гарин, Н. А. Михайлов. – Воронеж, 1985. – 223 с.
2. ГОСТ 33120-2014. Конструкции деревянные клееные. Методы определения прочности клеевых соединений.: издание официальное : дата введения 2015-07-01. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 18 с.
3. DIN EN 205-2016 Adhesives – Wood adhesives for non-structural applications – Determination of tensile shear strength of lap joints.
4. EN 302-1:2013 Adhesives for load-bearing timber structures – Test methods – Part 1: Determination of longitudinal tensile shear strength; German version EN 302-1:2013.
5. Experimental study on flexural behavior of glulam and laminated veneer lumber beams / W. Q. Liu [et al.] // Modern bamboo structures: 1st International Conference on Modern Bamboo Structures Location: Hunan Univ, Changsha, PEOPLES R CHINA, 2008. – P. 159–169.
6. Кантиева, Е. В. Клеевые материалы в производстве современных древесных плит / Е. В. Кантиева, Л. В. Пономаренко, А. А. Хайят // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – Т. 5. № 5 (31). – С. 319–324.
7. Laminated veneer lumber from Rowan (*Sorbusaucuparia-Lipsky*) / H. S. Kol, H. Keskin, S. Korkut, T. Akbulut // African journal of agricultural research. – OCT 2009. – P. 1101–1105. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183802001>.
8. Мазаник, Н. В. Эксплуатационные характеристики клеев для составных деревянных конструкций / Н. В. Мазаник, И. К. Божелко // Труды БГТУ. – 2016. – № 2 (184). – С. 136–139. – URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/18453>.
9. Матюшенкова, Е. Клеевые материалы для деревообработки / Е. Матюшенкова // ЛесПромИнформ. – 2010. – № 6 (72). – С. 64–72.
10. Овсянников, С. И. Повышение прочности клеевых соединений деревянных конструкций / С. И. Овсянников, Д. Ю. Шаповалов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2018. – Т. 4. – № 4. – 6 с.
11. Development of the adhesive composition for joining solid wood in the conditions of Siberia / G. P. Plotnikova [et al.] // Systems Methods Technologies. – 2017. – № 4 (36). – P. 169–175. – DOI: 10.18324/2077-5415-2017-4-169-175.
12. Разиньков, Е. М. Технология изделий из древесины, клееных материалов и древесных плит : тексты лекций / Е. М. Разиньков, Л. В. Пономаренко; ВГЛТА. – Воронеж, 2014. – 300 с.
13. Справочник мебельщика / под общ. ред. В. П. Бухтиярова. – 3-е изд., перераб. – Москва : Издательство Московского государственного университета леса, 2005. – 600 с.

References

1. Garin V.A., Mikhajlov N. A. *Tehnologija izdelij iz drevesiny: uchebnoe posobie* [Technology of wood products. Student's book]. Voronezh, 1985. 223 p. (in Russian).
2. *GOST 33120-2014. Konstrukcii derevjannye kleenye. Metody opredelenija prochnosti kleevyh soedinenij.: izdanie oficial'noe* [GOST 33120-2014. Glued wooden structures. Methods for determining the strength of adhesive joints: the official publication] : date of introduction 2015-07-01. Moscow: STANDARTINFORM, 2015 18 p. (in Russian).
3. DIN EN 205-2016 Adhesives – Wood adhesives for non-structural applications – Determination of tensile shear strength of lap joints.

4. EN 302-1:2013 Adhesives for load-bearing timber structures – Test methods – Part 1: Determination of longitudinal tensile shear strength; German version EN 302-1:2013.
5. Liu W. Q. [et al.] Experimental study on flexural behavior of glulam and laminated veneer lumber beams. Modern bamboo structures: 1st International Conference on Modern Bamboo Structures Location: Hunan Univ, Changsha, PEOPLES R CHINA, 2008. P. 159-169.
6. Kantieva E.V., Ponomarenko L.V., Hajjat A.A. *Kleevye materialy v proizvodstve sovremennykh drevesnykh plit* [Adhesive materials in the production of modern wood boards]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika*. 2017. Vol. 5. No. 5 (31). P. 319-324 (in Russian).
7. Kol H.S., Keskin H., Korkut S., Akbulut T. (2009) Laminated veneer lumber from Rowan (*Sorbus aucuparia*-Lipsky). *African journal of agricultural research*. OCT 2009, pp. 1101-1105. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183802001>.
8. Mazanik N.V., Bozhelko I.K. (2016) *Ekspluatatsionnye kharakteristiki kleev dlya sostavnykh derevyannykh konstruktsiy* [Performance characteristics of adhesives for composite wood structures]. *Trudy BGTU* [Works of BGTU]. Minsk: BGTU, No. 2 (184), pp. 136-139 (in Russian).
9. Matyushenkova E. (2010) *Kleevye materialy dlya derevoobrabotki* [Glue materials for woodworking]. *LesPromInform*. [LesPromInform]. No. 6 (72), pp. 64-72 (in Russian).
10. Ovsyannikov S.I., Shapovalov D.Yu. (2018) *Povyshenie prochnosti kleevykh soedineniy derevyannykh konstruktsiy* [Improving the strength of adhesive joints of wooden structures]. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii* [Bulletin of science and education of the North-West of Russia], Vol. 4, no. 4, 6 p. (in Russian).
11. Plotnikova G.P. et al. (2017) Development of the adhesive composition for joining solid wood in the conditions of Siberia. *Systems Methods Technologies*. № 4 (36) p. 169-175 (in Russian). DOI: 10.18324/2077-5415-2017-4-169-175.
12. Razinkov E.M., Ponomarenko L.V. *Tekhnologiya izdeliy iz drevesiny, kleemykh materialov i drevesnykh plit : teksty lektsiy* [Technology of wood products, glued materials and wood boards: texts of lectures]. VGLTA. Voronezh, 2014. 300 p. (in Russian).
13. *Spravochnik mebel'shchika pod obshch. red. V.P. Bukhtiyarova* [Handbook of furniture maker ed. by V.P. Bukhtiyarov]. 3-e izd., pererab. [3rd ed., remastered]. Moscow: Moscow State Forest University Press, 2005. 600 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Кантиева Екатерина Валентиновна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ekantieva@mail.ru.

Пономаренко Лариса Викторовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: lara.pon63@yandex.ru.

Послухаев Максим Алексеевич – исполнительный директор ООО ХК «Мебель Черноземья», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: somovo05@mail.ru.

Чернышев Александр Николаевич – заместитель генерального директора по техническому развитию ООО ХК «Мебель Черноземья», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: alnik19@yandex.ru.

Information about authors

Kantieva Ekaterina Valentinovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Technology of Wood, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: ekantieva@mail.ru.

Ponomarenko Larisa Viktorovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Technology of Wood, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: lara.pon63@yandex.ru.

Poslukhaev Maksim Alekseevich – Executive Director, LLC HC "Furniture of Chernozemye", Voronezh, Russian Federation; e-mail: somovo05@mail.ru.

Chernyshev Aleksandr Nikolaevich – Deputy Head on technical development, LLC HC "Furniture of Chernozemye", Voronezh, Russian Federation; e-mail: alnik19@yandex.ru.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГРАНУЛЯТОРА ООО «ДОЗА-АГРО» В СОСТАВЕ ЛИНИЙ ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВНЫХ ПЕЛЛЕТ

кандидат технических наук **А.Г. Сергеев**

ООО «Доза-Агро», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Большое теплосодержание, возобновляемость и низкая цена древесных отходов делает их перспективным видом топлива. Производство топливных пеллет позволяет обеспечить переход к малоотходной работе лесопромышленных предприятий. Максимальная производительность линии производства пеллет в первую очередь ограничена производительностью гранулятора. Целью работы является выявление зависимости производительности пресс-гранулятора с радиальной матрицей серии ДГ при производстве топливных гранул от содержания лигнина. Оценивалось влияние вида исходного сырья и диаметра фильер матрицы пресс-гранулятора на его производительность. В статье приведены схема гранулятора и принцип его работы. ООО «Доза-Агро» накоплена информация о работе пресс-гранулятора с радиальной матрицей серии ДГ в составе линий по производству топливных гранул серий ТП, ТП-П и ТП-С, работающих в различных регионах России. В результате обработки накопленной информации построено эмпирическое уравнение, описывающее влияние диаметра фильер матрицы и содержания лигнина в сырье на производительность пресс-гранулятора. Выявлено, что на его производительность в большей степени влияет содержание лигнина, его снижение в древесине лиственных пород с 24 % до 18 % ведет к снижению производительности на 20 %, в древесине хвойных пород – с 30 % до 27 % – на 15 %. Уменьшение диаметра фильер матрицы с 8 мм до 6 мм и содержания лигнина в древесине с 26 до 20 % снижает производительность гранулятора на 32 %.

Ключевые слова: диаметр матрицы, древесные отходы, лигнин, пеллеты, производительность гранулятора

RESEARCH RESULTS OF DOSA-AGRO GRANULATOR WORKING PROCESS IN THE PRODUCTION LINES OF FUEL PELLETS

PhD (Engineering) **A.G. Sergeev**

Dosa-Agro LLC, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract

High heat content, renewability and low price of wood waste makes them a promising type of fuel. Production of fuel pellets enables transition to low-waste work of timber enterprises. The maximum productivity of pellet production line is primarily limited by the productivity of the granulator. The aim of the work is to identify the dependence of performance patterns of a press granulator with a DG series radial matrix in the production of fuel granules on the lignin content. The influence of the feedstock type and die diameter of the press granulator matrix on its performance has been evaluated. The granulator scheme and the principle of its operation are presented in the article. Doza-Agro LLC accumulated information on the operation of a press granulator with a radial matrix of the DG series as part of the production lines for the production of fuel pellets of the TP, TP-P and TP-S series operating in various regions of Russia. As a result of processing the accumulated information, an empirical equation is constructed. It describes the effect of the die matrix diameter and the lignin content in the raw material on the performance of press granulator. It has been revealed that its productivity is more affected by the lignin content. Its decrease in hardwood from 24 % to 18 % leads to a decrease in productivity by 20%, decrease in coniferous wood from 30 % to 27 % – by 15 %. Reducing the diameter of the matrix die from 8 mm to 6 mm and lignin content from 26 to 20 % reduces the granulator's productivity by 32 %.

Keywords: die diameter, wood waste, lignin, pellets, granulator performance

Введение

Переработка лесов ведет к множеству негативных последствий. Проблемы, связанные с биоэнергией, по мнению некоторых авторов, могут привести к этическим проблемам [13]. Лесозаготовительное и деревоперерабатывающее производство влечет за собой накопление большого количества отходов. Отсутствие переработки отходов лесопромышленного комплекса приводит к ухудшению экологии на территориях отвалов [12]. Процесс медленного гниения большого объема древесных отходов с выделением теплоты может привести к их разогреванию и самовозгоранию, создавая пожароопасную обстановку [5, 7]. Исследования ряда авторов показали эффективность решения подобных проблем на уровне государств за счет субсидий на облесение, налоговых льгот для лесонасаждений и тарифов на импорт лесной продукции [14]. На уровне лесоперерабатывающих предприятий необходимо внедрение безотходных технологий переработки древесины. Большое теплосодержание, возобновляемость и низкая цена древесных отходов делает их перспективным видом топлива. Однако использование отходов лесопромышленного комплекса без предварительной обработки связано с рядом сложностей. В первую очередь, это проблема транспортировки. Низкая насыпная масса древесных отходов увеличивает стоимость транспортных расходов и делает невыгодной их перевозку на большие расстояния. Соответственно, использование непереработанных отходов в качестве топлива рационально только для обеспечения нужд лесоперерабатывающего предприятия, исключаящего их длительную перевозку. Также неравномерность гранулометрического состава, высокое содержание влаги и сложности организации автоматической подачи непереработанных древесных отходов снижают эффективность использования их в качестве топлива [1, 9].

Высокое теплосодержание, экологичность и направленность к безотходности производства обосновывают актуальность развития технологий производства биотоплива из древесных отходов. Из отходов лесопромышленного комплекса путем термохимической обработки могут быть получены такие виды топлива, как древесный уголь, пиро-

лизный, генераторный и синтезгаз, жидкое биотопливо. Кроме того, предварительно измельченные древесные отходы могут быть подвергнуты брикетированию и гранулированию для последующего сжигания [8, 10].

Производство топливных гранул (пеллет) позволяет обеспечить переход к малоотходной и более экологически чистой работе лесопромышленных предприятий, более высокая насыпная масса древесных гранул по сравнению с непереработанными отходами снижает расходы на транспортировку. Равномерный гранулометрический состав и небольшие размеры гранул обеспечивают более высокую эффективность сжигания и возможность организации автоматической подачи топлива с точным дозированием. Технология производства пеллет включает в себя предварительное измельчение древесных отходов, сушку, кондиционирование, гранулирование в матричных прессах, охлаждение и просеивание [9]. Максимальная производительность всей технологической линии для производства пеллет в первую очередь ограничена производительностью гранулятора. Принцип гранулирования заключается в продавливании измельченной древесной массы через цилиндрические фильеры матриц прижимными роликами. Сформированные при прохождении через матрицу гранулы срезаются ножами. На производительность гранулятора оказывают влияние такие режимные параметры, как скорость подачи сырья, расстояние между матрицей и роликом и давление прессования. Чем больше сырья подается в единицу времени, тем выше производительность оборудования. Однако при увеличении скорости подачи сырья требуется контроль нагрузки на пресс-узел, с целью повышения проходимости необходимо увеличивать частоту вращения матрицы, что приводит к увеличению энергозатрат. Кроме того, высокая скорость вращения матрицы может привести к снижению качества производимых пеллет и быстрому износу оборудования. Варьирование зазора между матрицей и роликом также необходимо с учетом влияния данного параметра на качество гранул и износ матрицы [3]. Давление прессования зависит от формы и геометрических параметров роликов, матрицы и фильер и влияет на качество производимых пеллет и расход

энергии [8]. Важнейшим параметром, определяющим качество гранул, является содержание лигнина в сырье. Кроме того, наряду с размерами фильер матрицы он оказывает значительное влияние на производительность гранулятора [11].

На сегодняшний день известны грануляторы с плоской и кольцевой (радиальной) матрицей, а также гибриды гранулятора с плоской и кольцевой матрицей [6]. В России и странах СНГ большое распространение получили матрицы кольцевой формы, отличающиеся большей производительностью по сравнению с плоскими матрицами. ООО «Доза-Агро» также освоено производство грануляторов с круглой матрицей серии ДГ.

Целью работы является выявление зависимости производительности пресс-гранулятора с радиальной матрицей серии ДГ при производстве топливных гранул от параметров исходного сырья.

Объектом исследования являлся процесс гранулирования топливных пеллет пресс-гранулятором с радиальной матрицей серии ДГ.

Предметом исследований выступили конструкционные параметры матрицы пресс-гранулятора и параметры исходного сырья, а также технологические показатели работы гранулятора.

Материалы и методы

Оценивалось влияние вида исходного сырья (по содержанию лигнина) и диаметра фильер матрицы пресс-гранулятора с радиальной матрицей серии ДГ на его производительность. Схема гранулятора приведена на рис. 1. На раме 25 пресс-гранулятора установлен привод 14, который приводит в движение матрицу 22. Сырье, подвергнутое гранулированию, под действием ворошителя 1 попадает в дозатор 2, который равномерно подает его в смеситель-кондиционер 4. При этом во время движения сырья между дозатором 2 и смесителем 4 из него выделяются металломагнитные примеси магнитным уловителем 3. В смесителе-кондиционере 4 для улучшения связующих свойств лигнина и повышения качества гранул проводится увлажнение сырья водой, которая подается через форсунку 5. При гранулировании твердых пород древесины или пересушенного сырья увлажнение сырья осуществляется паром через форсунку 6. В процессе гранулирования лишняя влага из зоны прессую-

щего узла выводится через патрубок 11. Увлажненное и перемешанное сырье из смесителя 4 принудительно выводится в пресс-узел 26, который состоит из кольцевой матрицы 22, двух пресс-вальцов 23, эксцентриковой системы регулировки пресс-вальцов 17 и срезного ножа 12. В камере прессования под действием вращающейся матрицы 22 и прессующих вальцов 23 материал продавливается в радиальные фильеры матрицы, где под действием большого давления и температуры происходит выделение связующего компонента древесины (лигнина) и формируется гранула. Выдавленные из отверстий гранулы наталкиваются на неподвижный нож 12 и обламываются. Сформованные гранулы под действием силы тяжести выводятся через отверстие крышки пресс-узла. Фиксация температуры сырья осуществляется термометром 8. Для разогрева и консервации матрицы, проведения отбора проб при определении свойств сырья используется технический люк 7 [2].

ООО «Доза-Агро» накоплена информация о работе пресс-гранулятора с радиальной матрицей серии ДГ в составе линий по производству топливных гранул серий ТП, ТП-П и ТП-С, работающих в различных регионах России (ИП Кабанов, ИП Братчиков, ООО «Пенза-Пеллет», ООО «Тольятинский пеллетный завод, ООО «Промлесилим», ООО «Маслянинский ЛПХ», ООО «Эколеспром», ООО «Брянский бройлер», ООО «Тандем ВП») из следующих видов древесины: 100 % хвойных мягких пород (содержание лигнина > 25 %); смеси, состоящей из 50 % хвойных пород и 50 % лиственных пород (содержание лигнина > 24 %); 100 % твердых лиственных пород (содержание лигнина 22-24 %) и 100 % мягких лиственных пород (содержание лигнина 18-21 %).

На основании накопленной статистической информации сформирована таблица, в которой отражено влияние диаметра отверстий матрицы d_m и содержания лигнина в древесине на рабочий процесс гранулятора. За критерий оценки работы гранулятора принималась производительность, оцененная в % от максимально возможной (табл. 1). Максимальная производительность гранулятора получена при производстве пеллет из сырья с оптимальными параметрами: измельченная на ротор-

но-молотковой дробилке (установленное сито 6 мм) до фракции 1-3 мм стружка из сосны средней полосы России с содержанием лигнина 28 %, влажностью 12 % на пресс-грануляторе с установленной матрицей производства Graf диаметром фильеры 8 мм длиной рабочего канала 52 мм.

Построение моделей регрессии, выявление влияния исследуемых факторов на критерий работы гранулятора топливных пеллет проводилось с использованием методов планирования эксперимента [4].

Результаты и обсуждение

После обработки статистических данных получено уравнение в закодированном виде, описывающее изменение производительности гранулятора в зависимости от содержания лигнина в древесине и диаметра матрицы:

$$y = 81,7 + 6,69 \cdot x_1 + 9,3 \cdot x_2 + 0,75 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,56 \cdot x_2^2. \quad (1)$$

Адекватность полученного выражения подтверждается высоким значением коэффициента детерминации, которое составляет 99,8 %. При анализе уравнения выявлено, что наибольшее влияние на производительность гранулятора оказывает содержание лигнина ($b_2 = 9,3$), диаметр отверстий матрицы на критерий оценки работы гранулятора влияет в меньшей степени ($b_1 = 6,69$). При увеличении обоих параметров производительность машины возрастает, и при $C_{л}$ более 25 %, диаметре матрицы $d_m = 8$ мм достигает максимального значения в 100 %.

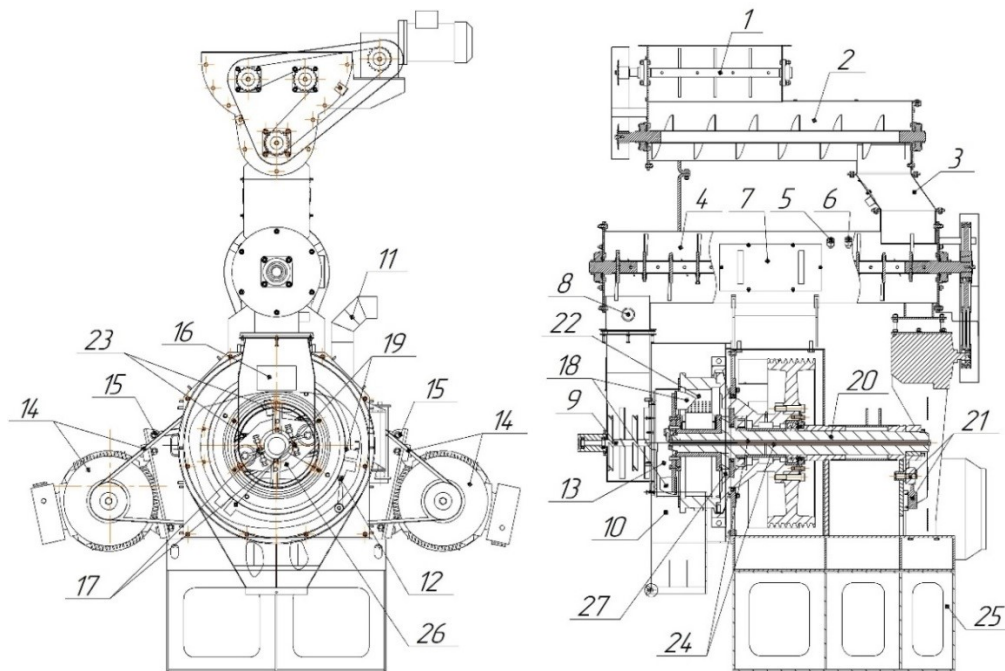


Рис. 1. Пресс-гранулятор с радиальной матрицей серии ДГ производства ООО «Доза-Агро»: 1 – двухвальный ворошитель; 2 – дозатор; 3 – магнитный уловитель; 4 – смеситель-кондиционер; 5 – форсунка воды; 6 – форсунка пара; 7 – технический люк обслуживания смесителя; 8 – термометр; 9 – кожух прессующего узла; 10 – кожух прессующего узла; 11 – патрубок отвода пара; 12 – срезной нож; 13 – накладка матрицы; 14 – основной привод; 15 – натяжитель электродвигателя; 16 – технологический люк питателя; 17 – механизм регулировки вальца; 18 – лопатки прессующего узла; 19 – хомут матрицы; 20 – главный вал; 21 – система защиты рабочих органов; 22 – матрица; 23 – пресс-вальцы; 24 – система автоматической смазки; 25 – рама; 26 – прессующий узел; 27 – планшайба
(Чертежи ООО «Доза-Агро»)

Влияние исследуемых параметров на производительность гранулятора

Номер опыта	Исследуемые факторы		Критерий оценки работы гранулятора
	Диаметр отверстий матрицы d_m , мм	Содержание лигнина в древесине C_l , %	Производительность гранулятора Q , в % от максимально возможной
	x_1	x_2	y
1	8	26	100
2	8	24	92
3	8	22	85
4	8	20	80
5	6	26	85
6	6	24	78,2
7	6	22	72,25
8	6	20	68

(Таблица составлена на основании накопленной информации о работе пресс-гранулятора в хозяйствах ИП Кабанов, ИП Братчиков, ООО «Пенза-Пеллет», ООО «Тольятинский пеллетный завод, ООО «Промлесим», ООО «Маслянинский ЛПХ», ООО «Эколеспром», ООО «Брянский бройлер», ООО «Тандем ВП»)

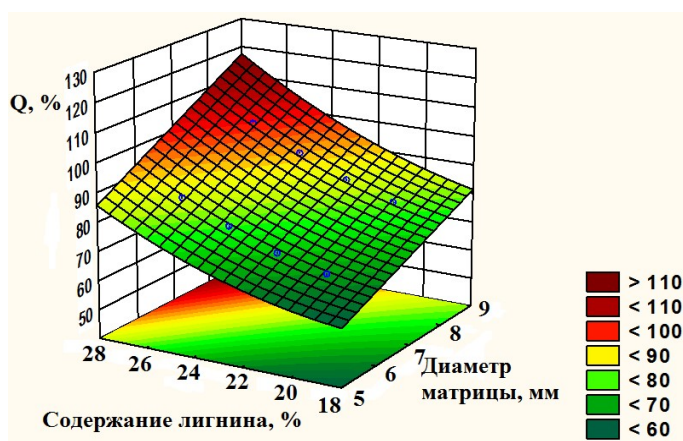


Рис. 2. Поверхность, характеризующая влияние диаметра матрицы d_m и содержания лигнина C_l в древесине на производительность гранулятора

(Поверхность построена на основании данных табл. 1 с использованием программы STATISTICA 10)

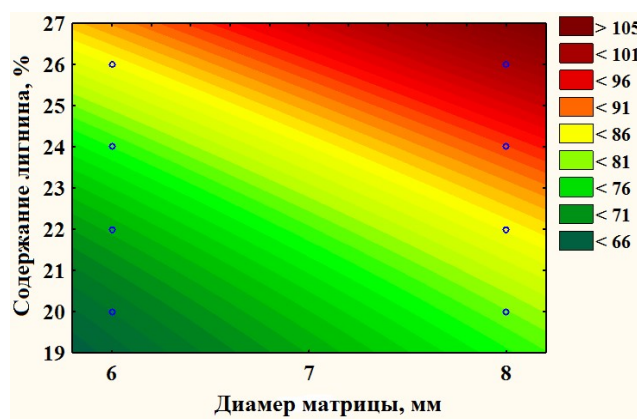


Рис. 3. Двумерное сечение поверхности, характеризующей влияние диаметра матрицы d_m и содержание лигнина C_l в древесине на производительность гранулятора (Сечение поверхности построено на основании данных табл. 1 с использованием программы STATISTICA 10)

Для наглядного представления протекания процесса приведены поверхность (рис. 2) и ее двумерное сечение (рис. 3), построенные по выражению (1). Анализ построенной поверхности позволяет сделать вывод о возможном повышении производительности гранулятора на 15-20 % за счет увеличения диаметра отверстий матрицы до 9 мм и содержания лигнина до 28 %. Однако размер гранул от 6 до 8 мм ограничен требованиями стандартов на топливные гранулы.

В исследуемой области увеличение диаметра фильера с 6 до 8 мм при одинаковом значении содержания лигнина в сырье ведет к росту производительности пресс-гранулятора на 12-15 %. Увеличение содержания лигнина в сырье при фиксированном значении диаметра фильера также способствует росту производительности машины на 20-23 % (рис. 3).

Выводы

Таким образом, в результате обработки накопленной информации по работе пресс-гранулятора с радиальной матрицей серии ДГ, входящего в состав линий по производству топливных гранул серий ТП, ТП-П и ТП-С ООО «Доза-Агро»:

1. Построено эмпирическое уравнение, описывающее влияние диаметра фильера матрицы и

содержания лигнина в сырье на производительность пресс-гранулятора с радиальной матрицей серии ДГ в составе линий по производству топливных гранул серий ТП, ТП-П и ТП-С.

2. Выявлено, что на производительность пресс-гранулятора в большей степени влияет содержание лигнина в сырье.

3. Выявлено, что снижение содержания лигнина в древесине лиственных пород с 24 % до 18 % ведет к снижению производительности на 20 %, в древесине хвойных пород с 30 % до 27 % ведет к снижению производительности на 15 %.

4. Обнаружено, что уменьшение диаметра фильера матрицы с 8 мм до 6 мм ведет к снижению производительности на 15 %.

5. Выявлено, что уменьшение диаметра фильера матрицы с 8 мм до 6 мм и содержания лигнина в древесине с 26 до 20 % ведет к снижению производительности пресс-гранулятора на 32 % (со 100 до 68 %).

Библиографический список

1. Вакалюк, Ю. В. Использование биотоплива на основе древесного сырья взамен каменного угля и мазута / Ю. В. Вакалюк, И. И. Подольский // Экология и промышленность России. – 2011. – № 10. – С. 24–27.
2. Грануляторы по производству топливных гранул. – URL: <https://www.dozagran.com/equipment/granulators/> (дата обращения: 07.10.2019).
3. Зотова, Е. В. Аналитическое исследование параметров, определяющих технологию производства древесных пеллет / Е. В. Зотова, А. О. Сафонов, А. Д. Платонов // Лесотехнический журнал. – 2014. – № 1 (13). – Т. 4. – С. 127–132.
4. Коновалов, В. В. Практикум по обработке результатов научных исследований с помощью ПЭВМ: учеб. пособие / В. В. Коновалов ; ПГСХА. – Пенза, 2003. – 176 с.
5. Коновалов, П. Н. Утилизация древесных отходов в качестве топлива / П. Н. Коновалов, В. Ю. Конохов, Е. Д. Данилова // Молодежный вестник ИРГТУ. – 2014. – № 2. – С. 10–14.
6. Оборудование для производства пеллет и цены на них. – URL: <https://slarkenergy.ru/bio/oborudovanie-dlya-pellet.html> (дата обращения: 07.10.2019).
7. Степанов, В. И. Отходы лесной промышленности и их использование в национальном хозяйстве / В. И. Степанов, Н. А. Мезина // Вестник Российского Экономического Университета им. Г.В. Плеханова. – 2012. – № 3 (45). – С. 83–88.

8. Пономарева, Н. Г. Совершенствование технологии производства топливных гранул из древесной коры: специальность 05.21.05 «Древесиноведение, технология и оборудование деревообработки»: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Пономарева Наталья Геннадьевна; ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». – Архангельск, 2017. – 20 с.
9. Севастьянова, С. Н. Биоэнергетика. Древесные (топливные) гранулы / С. Н. Севастьянова // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 10 (104). – С. 133–138.
10. Суханов, В. С. Роль биоэнергетики в повышении эффективности лесопромышленного комплекса / В. С. Суханов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2010. – № 1. – С. 2–5.
11. Technological quality parameters diagnosing for subsystem of coagulation structuring of granule / D. V. Donya, E. S. Miller, A. A. Popov, A. M. Popov, R. Y. Romanenko // Fundamental research. – 2014. – № 6 (part 6) – P. 1144–1148.
12. Carle, J. Wood from planted forests: a global outlook 2005–2030 / J. Carle, P. Holmgren // Forest Products Journal. – 2008; 58 (12) :6–18.
13. Bioenergy and Land Use: Framing the Ethical Debate / C. Gamborg, K. Millar, O. Shortall, P. Sandoe // Journal of Agricultural and Environmental Ethics. – 2012. – Vol. 25. – Iss. 6. – P. 909–925.
14. Gokmenoglu, K. K. Testing the Environmental Kuznets Curve Hypothesis: The Role of Deforestation / K. K. Gokmenoglu, G. O. Olasehinde-Williams, N. Taspinar // Energy and Environmental Strategies in the Era of Globalization. Green Energy and Technology. Springer / Shahbaz M., Balsalobre D. (eds). – Cham. 2019. – P. 61–83.

References

1. Vakalyuk Yu.V., Podolsky I.I. (2011) *Ispol'zovanie biotopliva na osnove drevesnogo syr'ya vzamen kamennogo uglya i mazuta* [The use of biofuels based on wood raw materials instead of coal and fuel oil]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], No. 10, pp. 24–27 (in Russian).
2. *Granulyatory po proizvodstvu toplivnykh granul* [Granulators for the production of fuel pellets]. URL: <https://www.dozagan.com/equipment/granulators/> (date of access: 07.10.2019).
3. Zotova E.V., Safonov A.O., Platonov A.D. (2014) *Analiticheskoe issledovanie parametrov, opredelyayushchikh tekhnologiyu proizvodstva drevesnykh pellet* [Analytical study of parameters determining the technology of wood pellets production]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal]. Vol. 4, No 1 (13), pp. 127–132 (in Russian).
4. Kononov V.V. *Praktikum po obrabotke rezul'tatov nauchnykh issledovaniy s pomoshch'yu PEVM: uchebnoe posobie* [Workshop on processing the results of scientific research with the help of PC: tutorial]. Penza, 2003. 176 p. (in Russian).
5. Kononov P.N., Konyukhov V.Yu., Danilova E.D. (2014) *Utilizatsiya drevesnykh otkhodov v kachestve topliva* [Utilization of wood waste as fuel]. *Molodezhnyy vestnik IRGTU* [Youth Bulletin of IRSTU], no 2, pp. 10–14 (in Russian).
6. *Oborudovanie dlya proizvodstva pellet i tseny na nikh* [Equipment for the production of pellets and their prices]. URL: <https://slarkenergy.ru/bio/oborudovanie-dlya-pellet.html>. (date of access: 07.10.2019).
7. Stepanov V.I., Mezin N.A. (2012) *Otkhody lesnoy promyshlennosti i ikh ispol'zovanie v natsional'nom khozyaystve* [Waste of forest industry and their use in the national economy]. *Vestnik Rossiyskogo Ekonomicheskogo Universiteta imeni G.V. Plekhanova* [Bulletin of The Russian University of Economics named after G.V. Plekhanov], no 3(45), pp. 83–88 (in Russian).
8. Ponomareva N.G. *Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva toplivnykh granul iz drevesnoj kory* [Improvement of production technology of fuel pellets from wood bark]: special'nost' 05.21.05 «drevesinovedenie, tekhnologiya i oborudovanie derevoobrabotki»: avtoref. dis. ...kand. tekhn. Nauk [PhD thesis abstracts]. Arhangel'sk, 2017. 20 s. (in Russian).

9. Sevast'yanova S.N. (2009) *Bioenergetika. Drevesnye (toplivnye) granuly* [Wood (fuel) pellets]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Orenburg state University], no. 10 (104), pp. 133-138 (in Russian).

10. Sukhanov V.S. (2010) *Rol' bioenergetiki v povyshenii effektivnosti lesopromyshlennogo kompleksa* [The role of bioenergy in increasing the efficiency of the timber industry]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry], no. 1, pp. 2-5 (in Russian).

11. Donya D.V., Miller E.S., Popov A.A., Popov A.M., Romanenko R.Y. (2014) Technological quality parameters diagnosing for subsystem of coagulation structuring of granule. *Fundamental research*. № 6 (part 6), pp. 1144-1148.

12. Carle J., Holmgren P. (2008) Wood from planted forests: a global outlook 2005–2030. *Forest Products Journal*. 58(12): 6–18.

13. Gamburg C., Millar K., Shortall O., Sandoe P. (2012) Bioenergy and Land Use: Framing the Ethical Debate. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*. Vol. 25, Iss. 6, pp. 909–925.

14. Gokmenoglu K.K., Olasehinde-Williams G.O., Taspinar N. (2019) Testing the Environmental Kuznets Curve Hypothesis: The Role of Deforestation. *Energy and Environmental Strategies in the Era of Globalization* / M. Shahbaz, D. Balsalobre (eds). Green Energy and Technology. Springer. Cham. 2019, pp 61-83.

Сведения об авторе

Сергеев Александр Георгиевич – кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Доза-Агро», г. Нижний Новгород, Российская Федерация; e-mail: office@ukdoza.com.

Information about the author

Sergeev Aleksandr Georgievich – PhD (Engineering), CEO of Doza-Agro LLC, Nizhny Novgorod, Russian Federation; e-mail: office@ukdoza.com.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФАНЕРЫ ФСФ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК К СВЯЗУЮЩЕМУ¹

кандидат технических наук **А.А. Федотов**

кандидат технических наук, доцент **Т.Н. Вахнина**

магистрант **С.А. Котиков**

ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», г. Кострома, Российская Федерация

Совершенствование процесса производства водостойкой фанеры ФСФ актуально с начала ее производства, меняются только критерии повышения качества фанерной продукции. На настоящем этапе затраты на повышение качества фанеры не могут компенсироваться увеличением цены, требуется снижение затрат на производство. Рациональный способ улучшения эксплуатационных свойств – снижение температуры прессования и введение модифицирующих добавок, повышающих адгезионную и когезионную прочность фенолоформальдегидного связующего. Проблема заключается в том, что при снижении температуры прессования до 150 °С и ниже фенолоформальдегидное связующее не достигает стадии резита, что негативно влияет на прочность и водостойкость фанеры ФСФ. Для связывания свободных метилольных групп олигомера и увеличения числа активных центров в сетке отверждаемого фенольного связующего принято решение использования в клеевой композиции модифицирующих добавок. В работе исследованы прочностные характеристики фанеры ФСФ с применением девяти модифицирующих добавок. Расход модификаторов варьировался в интервале 0,25-1,5 % с шагом 0,25 %. Прессование велось при температуре 120 °С. Установлено улучшение предела прочности фанеры при скалывании по клеевому слою на 5-15 % (в сравнении с контрольными образцами без добавки модификатора) при использовании в качестве модифицирующих добавок к фенолоформальдегидному связующему водных растворов шестиводного хлорида алюминия, безводного хлорида магния, восьмиводного сульфата цинка, сульфосалициловой кислоты, диметилглиоксима при различной доле добавки. Также повышается предел прочности при статическом изгибе фанеры при использовании модификаторов с различной долей добавки.

Ключевые слова: фанера ФСФ, фенолоформальдегидное связующее, модифицирующие добавки, температура прессования, прочность, скалывание, статический изгиб

IMPROVING STRENGTH INDICATORS OF FSF PLYWOOD BY USING MODIFIING ADDITIVES TO BINDING AGENT²

PhD (Engineering) **A.A. Fedotov**

PhD (Engineering), Associate Professor **T.N. Vakhnina**

Master's degree student **S.A. Kotikov**

FSBEI HE "Kostroma State University", Kostroma, Russian Federation

Abstract

Improving the production process of FSF waterproof plywood has been relevant since the beginning of its production. Only the criteria for improving the quality of plywood products are changing. At the present stage, the costs of

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и администрации Костромской области в рамках научного проекта № 19-43-440001.

² The study was supported by The Russian Foundation for Basic Research and Administration of the Kostroma Region as part of a scientific project № 19-43-440001.

improving the quality of plywood cannot be compensated by an increase in prices. Reduction in production costs is required. A rational way to improve operational properties is to reduce pressing temperature and introduce modifying additives that increase adhesive and cohesive strength of phenol-formaldehyde binder. The problem is that when pressing temperature is reduced to 150 °C or lower, phenol-formaldehyde binder does not reach the resite stage. It negatively affects the strength and water resistance of FSF plywood. It was decided to use modifying additives in the adhesive composition to bind free methylol groups of the oligomer and increase the number of active sites in the curable phenolic binder network. The strength properties of FSF plywood with the use of nine modifying additives have been investigated. The consumption of modifiers varied in the range of 0.25-1.5 % in increments of 0.25 %. Pressing was carried out at a temperature of 120 °C. An improvement in the tensile strength of plywood when shearing on the adhesive layer was found to be 5-15 % (in comparison with control samples without the addition of a modifier) when aqueous solutions of hexavalent aluminum chloride, anhydrous magnesium chloride, eight-zinc zinc sulfate, sulfosalicylic acid, dimethylglyoxime with a different proportion of additives were used as modifying additives to phenol-formaldehyde binder. Tensile strength under static bending of plywood is also increased when using modifiers with different proportion of additives.

Keywords: FSF plywood, phenol-formaldehyde binder, modifying additives, pressing temperature, strength, chipping, static bending

Введение

Объемы производства и потребления водостойкой фанеры ФФСФ продолжают увеличиваться, растущие требования потребителей ставят новые задачи, поэтому перед производителями фанеры (как и других композитов на основе древесины) стоит непростая задача совершенствования свойств готовой продукции при условии снижения себестоимости. Традиционный подход к решению данной задачи – модификация фенолоформальдегидной смолы на стадии синтеза или перед нанесением связующего на шпон. Используются способы замены части фенола на лигнин или производные лактозы в процессе синтеза смолы [3, 6, 11]. Модификация смолы в готовом виде более предпочтительна вследствие гибкости и простоты реализации процесса. В цикле работ ученых Санкт-Петербургской лесотехнической академии исследуется влияние модифицирующих добавок в смолу (до 10-15 %): пектола, лигносульфонатов технических, шлама холодного отстоя, черных сланцев, угольной пыли электрофильтров (последних до 1-1,8 %), благодаря которым снижается продолжительность отверждения клея, снижается содержание свободного формальдегида в фанере, существенно повышается прочность готовой продукции за счет увеличения доли мостиковых фрагментов. Введение данных добавок позволяет снизить себестоимость готовой продукции и утилизировать отходы алюминиевого и целлюлозно-бумажного производств [7, 24].

Повышению прочностных и экологических свойств фанеры с одновременным снижением энергоёмкости производства благодаря снижению времени прессования способствует модификация меламинокарбамидоформальдегидными смолами с введением комбинированного отвердителя (раствора двуххромовокислого натрия, карбамида в воде) [25]. Для ускорения отверждения фенолоформальдегидной смолы могут использоваться ускорители отверждения (2-гидроксиметилфенол и 4-гидроксиметилфенол) [1]. Улучшению прочностных свойств также способствует модификация ФФС шунгитовыми сорбентами [15] и алюмосиликатами [17]. Прочность и водостойкость готовой фанеры улучшается при введении в связующее фурфуролацетонового мономера ФА [9].

В исследованиях российских и зарубежных ученых в качестве модификатора ФФС используются пероксид водорода [8], винная кислота, хлорид железа III, фталевый ангидрид и экстракт квебрахо [10], порошок коры [5], танины из коры [2]. Помимо модификации самого связующего известна поверхностная модификация шпона 5 %-м раствором пероксида водорода [12], однако данный способ не является экономически эффективным вследствие введения дополнительной технологической операции.

Известны исследования, посвященные производству фанеры ФФСФ из шпона лиственницы при пониженной температуре прессования (ниже

100 °С) [29], однако результаты получены при повышенном расходе связующего (140-150 г/м²), а в составе модифицирующей добавки содержится дорогостоящий резорцин.

Из работ, где рассматривалась фанера из березового шпона, только в работах Я. Седлячека с коллегами [8] и Р. Мирски [4] удалось уменьшить температуру прессования фанеры с сохранением (а во втором случае – с повышением) свойств фанеры ФСФ. В работе научного коллектива Я. Седлячека положительный эффект достигается при использовании в качестве модификатора пероксида водорода, в работе Р. Мирски с коллегами – спиртов и сложных эфиров. При этом в обеих работах также наблюдался высокий расход связующего – 140-160 г/м², что непременно отразится на экономической составляющей готовой фанеры.

Целью данного исследования является разработка способа повышения прочностных показателей фанеры ФСФ, изготавливаемой при сниженной температуре прессования, путем углубления процесса структурообразования за счет использования модифицирующих добавок к связующему.

Необходимым условием повышения прочности является формирование правильной пространственной структуры фенольного связующего в пределах клевого слоя и на границе «клеевой слой – шпон», имеющего последовательное чередование звеньев и сшивок. Обеспечение когезионной прочности было бы достаточно легко реализуемой задачей при реализации теоретической модели отвержденного ФФС, когда весь клеевой слой можно рассматривать как одну гигантскую макромолекулу из олигомерных цепей и пространственных сшивок. В идеальном блок-полимере клевого шва нет (а вернее, не должно быть) несшитых макромолекул и свободных активных группировок, которые могут реагировать с сорбируемой из внешней среды влагой и образовывать растворимую золь-фракцию. Задача усложняется из-за того, что реальный фенолоформальдегидный полимер, отвержденный при пониженной температуре, имеет дефекты пространственной структуры. Следует отметить, что обусловлены они не только недостаточно глубокой степенью поликонденсации, но и особенностями строения фенолоформальдегидного оли-

гомера. Еще на стадии синтеза ФФС олигомер построен из глобул, наращивающих свои размеры в процессе конденсации. Химические связи формируются между скрученными цепями [13]. Коллоидная природа связующего усложняет процессы межфазного взаимодействия.

Большое влияние на характер адгезионного взаимодействия оказывает смачивание фенольным связующим шпона (подложки) и его растекаемость. Теоретические модели смачиваемости подложки клеем построены из условия растекания капли на поверхности идеального плоского тела [14]. Однако в реальных условиях многие факторы влияют на смачиваемость шпона связующим – его влажность, шероховатость поверхности, наличие макродефектов, адсорбция компонентов клея на подложке и др. Вопросы микрореологии формирования клевого шва разрабатывались в работах В.Е. Гуля с сотрудниками [16], Б.Д. Сумма и Ю.В. Горюнова [26] и др. Еще в 1980 г. А.С. Фрейдин и К.Т. Вуба отмечали как твердо установленный факт, что строение и свойства полимера в пограничных слоях отличаются от его объемных характеристик [28]. Однако, по мнению Г.М. Магомедова, в настоящее время для композитов все еще недостаточно разработаны концепции установления взаимосвязи структуры полимерной матрицы с макроскопическими физико-механическими свойствами композитов и их анизотропией [22].

Теоретические и экспериментальные исследования в области фазового разделения отверждающихся систем «связующее-наполнитель» представлены в работах [18, 23] и др. В исследованиях с использованием растровой электронной микроскопии подтверждена неоднородность неотвержденного олигомера в граничных слоях «полимер-наполнитель», для фенолоформальдегидных связующих установлена гетерофазная структура.

На рис. 1 представлена схема слоев клевого соединения связующего и шпона. Структурирование клевого шва происходит еще до приложения температуры и давления в прессе для горячего прессования. Глобулы фенольного олигомера, не связанные поперечными сшивками, мигрируют к шпону, ориентируясь полярными группами к полярным группам древесных составляющих.

Как только расстояние между макромолекулами клея и древесины станет меньше 0,5 нм, начнут действовать ванн-дер-ваальсовы силы и установится адсорбционное равновесие. Концентрация фенольного олигомера в поверхностном нано-слое 2 увеличивается из-за проникновения низкомолекулярной фракции в поры и луцильные трещины древесного шпона 1. Растекаемость в граничном слое ухудшается из-за наличия микронеровностей поверхности, которые ограничиваются 200 мкм для березового шпона и 320 мкм для шпона хвойных пород. Процесс проникновения олигомера в микро- и макронеровности поверхности шпона формирует механическую составляющую адгезионного взаимодействия. Но синергия склеивания возникает при приложении температуры и давления в прессе и формировании ковалентных связей адгезионного и когезионного характера.

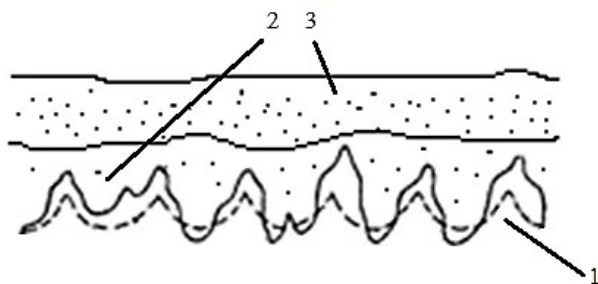


Рис. 1. Схема клевого соединения:
1 – шпон; 2 – граничный слой связующего;
3 – внутренний слой связующего

Для создания более равномерного клевого слоя необходимо формирование структуры с меньшим размером глобул и более равномерным распределением поперечных сшивок и узлов пространственной сетки отверждаемого связующего. В работе выдвинуто предположение, что равномерность пространственной сетчатой сетки отвержденного фенолоформальдегидного полимера можно обеспечить путем введения в фенольное связующее комплексообразователей, способных формировать разветвленную пространственную структуру. Такими модификаторами могут быть соли, содержащие ионы Al^{+3} , Fe^{+3} , Fe^{+2} , Zn^{+2} и др.

Активные комплексообразователи образуют комплексы с группами OH . В водных растворах солей металлов-комплексообразователей вокруг центрального иона металла образуются гидрат-ионы [20]. Ионы OH , входящие во внутреннюю сферу комплекса, могут взаимодействовать с другими гидроксильными группами посредством смежных оксостомиков. В результате взаимодействия образуется разветвленная структура пространственных связей полимера.

Материалы и методы

В работе исследовалось влияние модифицирующих добавок (табл. 1) на прочностные свойства фанеры ФСФ с применением фенолоформальдегидного связующего на основе смолы СФЖ-3014 (ГОСТ 20907–2016). Добавка каждого модификатора варьировалась от 0,25 до 1,5 % от массы связующего (с шагом 0,25 %). Доля добавки модификаторов была ограничена 1,5 %, т. к. исследование выявило существенное ухудшение растекаемости связующего и появление гелеобразных точечных центров при увеличении доли добавки модификаторов свыше 1,5 %. Добавки вносились в растворе 20 %-й концентрации.

Изготавливалась пятислойная фанера на основе лущеного березового шпона номинальной толщиной 1,5 мм (ГОСТ 99-2016). Шпон предварительно высушивался до влажности (7 ± 1) %. После формирования пакета и нанесения связующего выполнялось горячее прессование в лабораторном гидравлическом прессе П100-400 при следующих постоянных факторах: температура прессования – 120 °С; время прессования – 5 мин; удельное давление прессования – 1,6 МПа; расход связующего – 100 г/м². Изготовленная фанера охлаждалась в течение 24 ч, затем раскраивалась на образцы для проведения испытаний на прочность при скалывании согласно ГОСТ 9624–2009. Перед проведением испытаний образцы выдерживались в кипящей воде при температуре 100 °С в течение 1 ч с последующим выдерживанием при комнатной температуре в течение (10 ± 1) мин.

Добавки, используемые для модификации ФФС при изготовлении фанеры ФФС

Вид модификатора	Химическая формула
Пероксид водорода (3 %-й водный раствор)	H_2O_2
Сульфат цинка восьмиводный (водный раствор)	$ZnSO_4 \cdot 8H_2O$
Железоаммонийные квасцы (водный раствор)	$NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$
Хлорид магния безводный (водный раствор)	$MgCl_2$
Хлорид железа шестиводный (водный раствор)	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$
Хлорид алюминия шестиводный (водный раствор)	$AlCl_3 \cdot 6H_2O$
Диметилглиоксим (в сухом виде и в виде суспензии)	$C_4H_8N_2O_2$
Сульфат алюминия восемнадцативодный (водный раствор)	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$
Сульфосалициловая кислота двухводная (водный раствор)	$C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$

Для проведения испытаний на растяжение использовали разрывную машину Р-5 (ГОСТ 28840), оборудованную клиновыми захватами. За результат испытания принимали среднее арифметическое показателя по пяти дублированным опытам. Прочность фанеры при статическом изгибе определялась согласно ГОСТ 9625–2013, испытывались четыре образца, два из них верхней пластью вверх, два – верхней пластью вниз. За результат определения прочности фанеры при статическом изгибе принимали среднее арифметическое показателей по испытаниям четырех образцов.

Результаты и обсуждение

Графические зависимости влияния доли добавки модификатора на предел прочности фанеры при скалывании по клеевому слою после кипячения в течение 1 ч представлены на рис. 2-4.

При тех же режимах был изготовлен контрольный образец фанеры ФФС без модификатора. Предел его прочности при скалывании по клеевому слою после кипячения в течение 1 ч составил 1,89 МПа, предел прочности при статическом изгибе вдоль волокон – 117,83 МПа.

На рис. 2 представлены результаты испытаний образцов с добавкой хлоридов алюминия, железа и магния на предел прочности фанеры при скалывании по клеевому слою. Улучшение значения показателя по сравнению с контрольным образцом достигается при введении шестиводного хлорида алюминия (доля добавки от 0,75 до 1,25 %). Хлорид магния при добавке в количестве 1,5 % повышает прочность фанеры при скалывании по клеевому шву. Хлорид железа не оказывает положительного влияния на показатель.

Из сульфосодержащих модификаторов положительно влияют на прочность фанеры при скалывании сульфосалициловая кислота при малых значениях добавок (0,25-0,6 %) и сульфат цинка при добавке в количестве 1,5 %. Одной из причин того, что добавка сульфосалициловой кислоты повышает прочность фанеры при скалывании, т. е. клеящую способность фенольного связующего, является то, что она относится к активным комплексообразователям [19], создающим соединения с ионами железа, в фенольной же смоле ионы Fe^{+2} содержатся в долях процента. Второй причиной положительного влияния добавки сульфосалициловой кислоты на создание более прочной структуры отвержденного связующего является то, что при нагревании до температуры плавления она отщепляет фенол.

Сульфосалициловая кислота представляет собой бесцветные игольчатые кристаллы, хорошо растворимые в воде. $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ кристаллизуется из воды в виде дигидрата с температурой плавления $T_{пл} = 120\text{ }^\circ\text{C}$ [21]. Полная термическая деструкция химически чистой безводной сульфосалициловой кислоты на фенол и салициловую кислоту наблюдается в интервале температур 177-180 °С. Однако следует отметить, что температура плавления сульфосалициловой кислоты зависит от «свежести» реактива. Только что высушенная кислота плавится при температуре около 180 °С. Если же ее некоторое время подержать на воздухе, то плавиться она будет уже примерно при 110 °С (именно такова температура плавления кислоты, поставляемой производителями для продажи). Двухводная сульфосалициловая кислота $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$ начинает отщеплять фенол при температуре 110-120 °С.

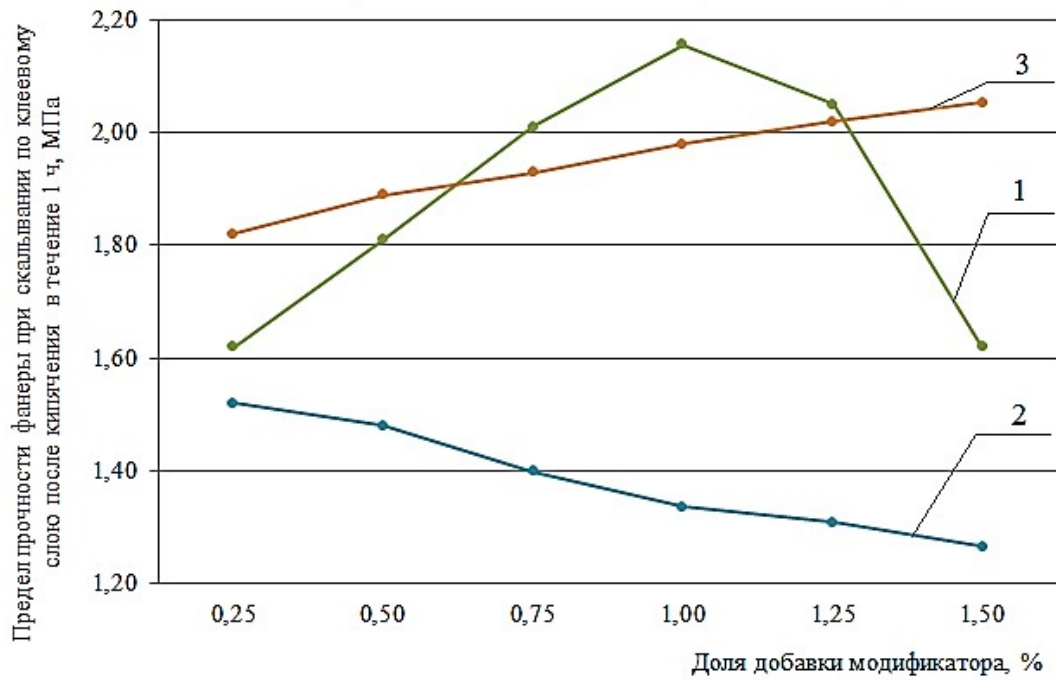


Рис. 2. Влияние доли добавки хлоридов алюминия, железа и магния на предел прочности фанеры при скальвании:
1 – AlCl₃·6H₂O; 2 – FeCl₃·6H₂O; 3 – MgCl₂

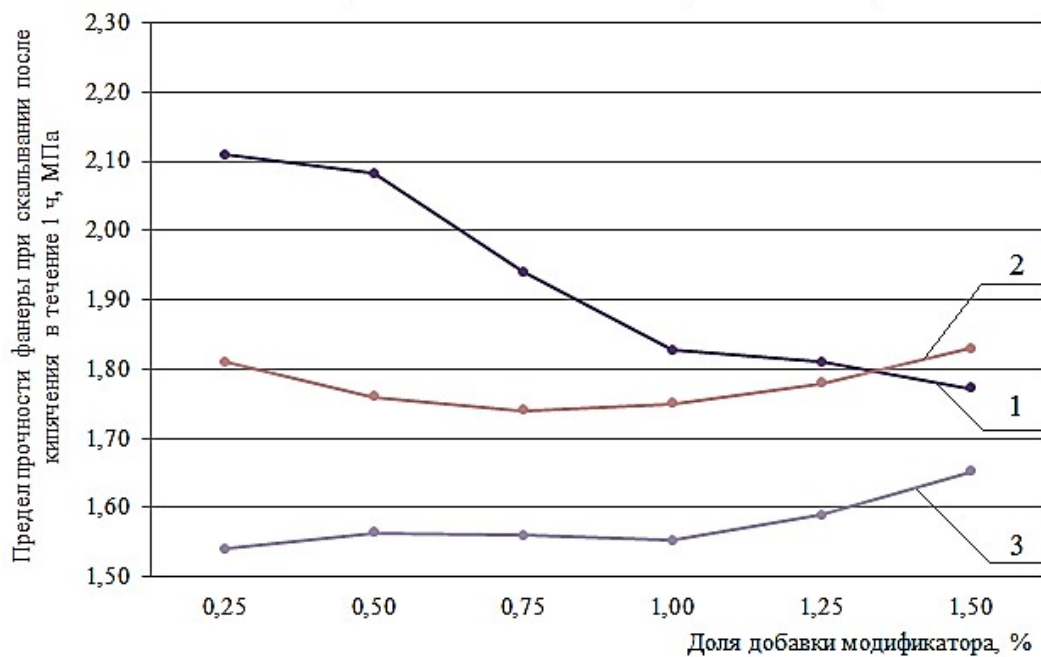


Рис. 3. Влияние доли сульфосодержащих добавок на предел прочности фанеры при скальвании:
1 – сульфосалициловая кислота; 2 – сульфат цинка восьмиводный;
3 – сульфат алюминия восемнадцативодный

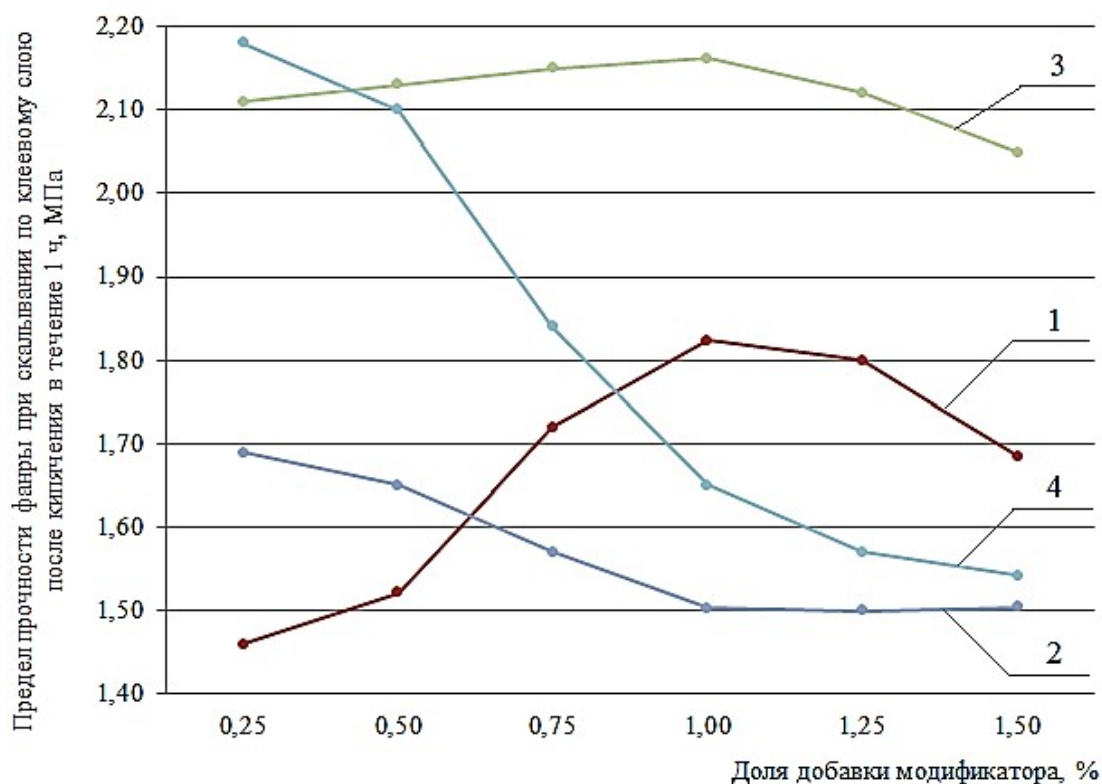


Рис. 4. Влияние доли добавки модификаторов на предел прочности фанеры при скалывании:
 1 – перексид водорода (3 %-й водный раствор), 2 – железоаммонийные квасцы,
 3 – диметилглиоксим (суспензия), 4 – диметилглиоксим (в сухом виде)

Таблица 2

Прочность при статическом изгибе образцов фанеры ФСФ на модифицированном связующем

Вид модификатора	Прочность при статическом изгибе, МПа, образцов на связующем с долей добавки модификатора, %					
	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5
Перексид водорода H_2O_2	120.54	121.38	122.57	123.44	119.40	117.25
Сульфат цинка $ZnSO_4 \cdot 8H_2O$	133.96	131.90	126.13	124.10	122.41	123.50
Железоаммонийные квасцы $NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	118.51	124.08	130.62	132.10	131.04	129.66
Хлорид магния $MgCl_2$	120.54	122.64	123.12	123.85	125.41	127.13
Хлорид железа $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	127.64	126.71	126.10	124.68	116.34	108.05
Хлорид алюминия $AlCl_3 \cdot 6H_2O$	120.51	125.30	127.47	125.65	118.83	105.24
Диметилглиоксим $C_4H_8N_2O_2$ (в сухом виде)	130.51	128.48	124.38	119.25	108.51	93.53
Диметилглиоксим $C_4H_8N_2O_2$ (в виде суспензии)	139.20	137.98	128.92	120.99	114.37	110.73
Сульфат алюминия $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	120.51	119.41	116.51	113.67	112.54	111.57
Сульфосалициловая кислота $C_7H_6O_6S \cdot 2H_2O$	136.21	135.21	133.86	132.51	131.67	129.64
Контрольные образцы без добавки модификатора	117.83					

Опыт работ Л. Физера [27] по использованию сульфосалициловой кислоты в качестве модификатора синтетического связующего подтверждает, что данный модификатор работает при малых долях добавки.

Вызывает интерес то, что один из активных комплексообразователей – ион Al^{+3} – при наличии сульфо-аниона в сравнении с хлорсодержащим анионом не улучшает структурообразование связующего. Это свидетельствует о том, что роль ионов-комплексообразователей в формировании структуры отвержденного фенольного связующего более сложна, чем кажется на первый взгляд.

Классический модификатор фенольного связующего – пероксид водорода при увеличении доли добавки до 1 % повышает прочность фанеры при скалывании, однако результат хуже, чем для немодифицированного связующего. Следует отметить, что добавка пероксида водорода положительно сказывается на растекаемости связующего, пероксид практически не дает гелеобразных центров в приготовленном связующем. Наилучшие показатели при определении скалывания фанеры по клеевому шву дает диметилглиоксим, вносимый как в сухом виде, так и в виде суспензии. Диметилглиоксим относится к органическим лигандам. Для определения вида комплексов, образуемых с его участием в полимере, необходимо дальнейшее спектроскопическое исследование.

Результаты определения прочности фанеры при статическом изгибе представлены в табл. 2. Модификаторы групп хлор- и сульфосодержащих добавок, а также диметилглиоксим, повышающие прочность фанеры ФСФ при скалывании по клеевому шву, оказывают положительное влияние и на предел прочности фанеры при статическом изгибе.

Выводы

Добавка в связующее до 1 % хлоридов алюминия, железа и магния позволяет увеличить прочность фанеры при статическом изгибе в сравнении с контрольными образцами на немодифицированном связующем. Хлорид алюминия при доле добавки 0,75-1,0 % обеспечивает максимальную прочность фанеры при скалывании и один из самых

высоких значений прочности при статическом изгибе. Хлорид магния при доле добавки 1,25-1,5 % также позволяет на 5,8-8,5 % увеличить прочность фанеры при скалывании и на 6,0-7,6 % повысить прочность при статическом изгибе.

Из сульфосодержащих добавок наиболее эффективно повышает прочностные показатели фанеры сульфосалициловая кислота в количестве 0,25-0,5 %.

Добавка пероксида водорода дает более низкие значения прочности фанеры при скалывании, чем результаты контрольных образцов без модификатора; для показателя «прочность при статическом изгибе» пероксид водорода при доле добавки 0,5-1,5 % обеспечивает повышение. Однако его положительное влияние на прочность при статическом изгибе может объясняться лучшей растекаемостью связующего при нанесении на шпон и, как следствие – более равномерным клеевым швом.

Диметилглиоксим при доле добавки 0,25-0,5 % повышает прочностные показатели фанеры на 11-15 %, причем предпочтительнее его внесение в виде эмульсии для обеспечения более равномерно распределенной клеевой композиции.

В целом можно отметить, что наилучшие прочностные показатели обеспечиваются при использовании в качестве модификаторов диметилглиоксима и сульфосалициловой кислоты, что может объясняться их способностью создавать комплексные соединения, однако это предположение требует спектроскопического исследования. Влияние сульфосалициловой кислоты на прочностные показатели фанеры ФСФ объясняется отщеплением при нагреве в процессе прессования фенола, связывающего свободный формальдегид отверждающегося связующего. Хорошие показатели фанеры также обеспечивают хлориды активных комплексообразователей – железа и магния.

Повышение прочностных показателей фанеры, изготовленной на модифицированном связующем при пониженной температуре, экспериментально подтверждает выдвинутую гипотезу о влиянии данных добавок на углубление структурообразования фенолоформальдегидного связующего.

Библиографический список

1. Conner, A. H. Accelerated Cure of Phenol-Formaldehyde Resins: Studies With Model Compounds / A. H. Conner, L. F. Lorenz, K. C. Hirth // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2002. – Vol. 86. – no. 1. – P. 3256–3263. – DOI: 10.1002/app.11106.
2. Fortification of sulfited tannin from the bark of *Acacia mangium* with phenol–formaldehyde for use as plywood adhesive / Y. B. Hoong, M. T. Paridah, C.A. Luqman, M.P. Koh, Y.F. Loh // *Industrial Crops and Products*. – 2009. – Vol. 30. – P. 416–421. – DOI:10.1016/j.indcrop.2009.07.012.
3. Preparation of environmental friendly phenol-formaldehyde wood adhesive modified with kenaf lignin / M. H. Hussin, H. H. Zhang, N. A. Aziz [et al.] // *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*. – 2017. – Vol. 6. – P. 409–418. – DOI.org/10.1016/j.bjbas.2017.06.004.
4. Mirski, R. Potential of shortening pressing time or reducing pressing temperature for plywood resinated with PF resin modified using alcohols and esters / R. Mirski, D. Dziurka, J. Lecka // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2011. – Vol. 69. – no. 2. – P. 317–323. – DOI: 10.1007/s00107-010-0436-8.
5. Miyazaki, J. Effect of the addition of *Acacia mangium* bark on thermosetting of phenol–formaldehyde resin / J. Miyazaki, Y. Hirabayashi // *Wood Sci Technology*. – 2011. – Vol. 45. – P. 449–460. – DOI: 10.1007 / s00226-010-0342-6.
6. Synthesis and characterization of phenol-formaldehyde resin using enzymatic hydrolysis lignin // W. Qiao, S. Li. G. Guo, S. Han, S. Ren, Y. Ma // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2015. – Vol. 21. – P. 1417–1422.
7. Rusakov, D. S. Modification of Phenol- and Carbamide-Formaldehyde Resins by Cellulose By-products / D. S. Rusakov, G. S. Varankina, A. N. Chubinskii // *Polymer Science, Series D*. – 2018.– Vol. 11.– no. 1. – P. 33–38. – DOI: 10.1134/S1995421218010185.
8. Sedliacik, J. Technology of low-temperature production of plywood bonded with modified phenol–formaldehyde resin / J. Sedliacik, P. Bekhta, O. Potapova // *Wood research*. – 2010. – Vol. 55(4). – P. 124–130.
9. Ugryumov, S. A. The Use of Furan Oligomers for Modifying Phenol-Formaldehyde Resin in Plywood Industry / S. A. Ugryumov, R. V. Patrakov // *Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials*. – 2011. – Vol. 4. – No. 1. – P. 38–40. – DOI: 10.1134/S1995421211010175.
10. Valyova, M. Modified phenol – phormaldehyde resins used for plywood gluing / M. Valyova, Y. Ivanova // *International Journal – Wood, Design & Technology*. – 2015. – Vol. 4. – no. 1. – P. 35–38.
11. Viswanathan, T. Whey modified phenol–Formaldehyde resins as plywood adhesives / T. Viswanathan, A. Toland // *Carbohydrate Polymers*. – 1991. – Vol. 15. – no. 1. – P. 41–49.
12. Yamamoto, A. Surface modification of birch veneer by peroxide bleaching / A. Yamamoto, A. Rohumaa, M. Hughes, T. Vuorinen, L. Rautkari // *Wood Sci Technology*. – 2017. – Vol. 51. – P. 85–95. – DOI: 10.1007/s00226-016-0880-7.
13. Аскадский, А. А. Физико-химия полимерных материалов и методы их исследования / А. А. Аскадский, М. Н. Попова, В. И. Кондращенко. – Москва : АСВ, 2015. – 408 с. – ISBN 978-5-4323-0072-0.
14. Берлин, А. А. Основы адгезии полимеров / А. А. Берлин, В. Е. Басин. – Москва : Химия, 1974. – 391 с.
15. Варанкина, Г. С. Анализ эффективности снижения токсичности и сокращения продолжительности склеивания древесных материалов различными модификаторами / Г. С. Варанкина // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. – 2015. – Вып. 210. – С. 138–148.
16. Гуль, В. Е. Структура и прочность полимеров / В. Е. Гуль. – Москва : Химия, 1978. – 327 с.
17. Модификация алюмосиликатами фенолоформальдегидных смол для склеивания фанеры / А. М. Иванов, Д. С. Русаков, Г. С. Варанкина, А. Н. Чубинский // *Клеи. Герметики. Технологии*. – 2017. – № 3. – С. 13–17.

18. Кобец, Л. П. Структурообразование в термореактивных связующих и матрицах композиционных материалов на их основе / Л. П. Кобец, И. С. Деев // Российский химический журнал. – 2010. – Т. LIV. – № 1. – С. 67–78.
19. Комплексные соединения в аналитической химии : Теория и практика применения / Ф. Умланд, А. Янсен, Д. Тириг, Г. Вюнш. – Москва : Мир, 1975. – 531 с.
20. Кукушкин, Ю. Н. Химия координационных соединений : учеб. пособие / Ю. Н. Кукушкин. – Москва : Высшая школа, 1985. – 455 с.
21. Лурье, Ю. Ю. Справочник по аналитической химии / Ю. Ю. Лурье. – 6-е изд., пер. и доп. – Москва : Химия, 1989. – 448 с.
22. Магомедов, Г. Н. Особенности релаксационных свойств волокнистых, слоистых, гибридных и дисперсно-наполненных полимерных композитов : специальность 02.00.06 «Высокомолекулярные соединения» : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : защищена 21.04.2005 / Магомедов Гасан Мусаевич; Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук. – Москва, 2005. – 285 с.
23. Малинский, Ю. М. Исследование в области физикохимии гетерогенных полимерных систем : специальность 02.00.04 «Физическая химия» : автореф. дис. ... д-ра хим. наук / Малинский Юрий Михайлович ; Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л. Я. Карпова. – Москва, 1970. – 46 с.
24. Русаков, Д. С. Модификация фенолоформальдегидных смол отходами производства алюминия и целлюлозы / Д. С. Русаков, Г. С. Варанкина, А. Н. Чубинский // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2019. – № 2. – С. 130–140. – DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.130.
25. Соколова, Е. Г. Обоснование режимов склеивания шпона при производстве фанеры, изготовленной с применением модифицированной фенолоформальдегидной смолы / Е. Г. Соколова // Системы. Методы Технологии. – 2018. – № 4 (40). – С. 125–131. – DOI: 10.18324/2077-5415-2018-4-125-131.
26. Сумм, Б. Д. Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. Д. Сумм, Ю. В. Горюнов. – Москва : Химия, 1976. – 231 с.
27. Физер, Л. Реагенты для органического синтеза / Л. Физер, М. Физер. – Москва : Мир, 1970. – Т. 3. – 445 с.
28. Фрейдин, А. С. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины / А. С. Фрейдин, К. Т. Вуба. – Москва : Лесная промышленность, 1980. – 224 с.
29. Чубов, А. Б. Отверждение фенолоформальдегидной смолы при пониженной температуре / А. Б. Чубов, А. А. Залипаев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2003. – Вып. 170. – С. 105–109.

References

1. Conner A.H., Lorenz L.F., Hirth K.C. (2002) Accelerated Cure of Phenol-Formaldehyde Resins: Studies With Model Compounds. *Journal of Applied Polymer Science*. Vol. 86. no. 1, pp. 3256-3263. DOI: 10.1002/app.11106.
2. Hoong Y.B., Paridah M.T., Luqman C.A., Koh M.P., Loh Y.F. (2009) Fortification of sulfited tannin from the bark of *Acacia mangium* with phenol-formaldehyde for use as plywood adhesive. *Industrial Crops and Products*. Vol. 30, pp. 416-421. DOI:10.1016/j.indcrop.2009.07.012.
3. Hussin M.H., Zhang H.H., Aziz N.A. (et al.) (2017) Preparation of environmental friendly phenol-formaldehyde wood adhesive modified with kenaf lignin. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*. Vol. 6, pp. 409-418. DOI.org/10.1016/j.bjbas.2017.06.004.
4. Mirski R., Dziurka D., Lecka J. (2011) Potential of shortening pressing time or reducing pressing temperature for plywood resinated with PF resin modified using alcohols and esters. *European Journal of Wood and Wood Products*. Vol. 69. no. 2, pp. 317-323. – DOI: 10.1007/s00107-010-0436-8.

5. Miyazaki J., Hirabayashi Y. (2011) Effect of the addition of Acacia mangium bark on thermosetting of phenol-formaldehyde resin. *Wood Sci Technology*. Vol. 45, pp. 449-460. DOI: 10.1007 / s00226-010-0342-6.
6. Qiao W., Li S., Guo G., Han S., Ren S., Ma Y. (2015) Synthesis and characterization of phenol-formaldehyde resin using enzymatic hydrolysis lignin. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Vol. 21, pp. 1417-1422.
7. Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinskii A.N. (2018) Modification of Phenol- and Carbamide-Formaldehyde Resins by Cellulose By-products. *Polymer Science, Series D*. Vol. 11, no. 1, pp. 33-38. DOI: 10.1134/S1995421218010185.
8. Sedliacik J., Bekhta P., Potapova O. (2010) Technology of low-temperature production of plywood bonded with modified phenol-formaldehyde resin. *Wood research*. Vol. 55(4), pp. 124-130.
9. Ugryumov S.A., Patravok R.V. (2011) The Use of Furan Oligomers for Modifying Phenol-Formaldehyde Resin in Plywood Industry. *Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials*. Vol. 4, no. 1, pp. 38-40. – DOI: 10.1134/S1995421211010175.
10. Valyova M., Ivanova Y. (2015) Modified phenol – phormaldehyde resins used for plywood gluing. *International Journal – Wood, Design & Technology*. Vol. 4, no. 1, pp. 35-38.
11. Viswanathan T., Toland A. (1991) Whey modified Phenol-Formaldehyde resins as plywood adhesives. *Carbohydrate Polymers*. Vol. 15, no. 1, pp. 41-49.
12. Yamamoto A., Rohumaa A., Hughes M., Vuorinen T., Rautkari L. (2017) Surface modification of birch veneer by peroxide bleaching. *Wood Sci Technology*. Vol. 51, pp. 85-95. DOI: 10.1007/s00226-016-0880-7.
13. Askadskiy A.A., Popova M.N., Kondrashchenko V.I. *Fiziko-khimiya polimernykh materialov i metody ikh issledovaniya* [Physico-chemistry of polymeric materials and methods of their research]. Moscow, ASV, 2015. 408 p. (In Russian).
14. Berlin A.A., Basin V.E. *Osnovy adgezii polimerov* [Bases of adhesion of polymers]. Moscow, Chemistry, 1974. 321 p. (In Russian).
15. Varankina G.S. (2015) *Analiz effektivnosti snizheniya toksichnosti i sokrashcheniya prodolzhitel'nosti skleivaniya dreves-nyh materialov razlichnymi modifikatorami* [Analysis of the effectiveness of reducing toxicity and reducing the duration of bonding of wood materials with various modifiers]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg forestry Academy], issue 210. pp. 138-148 (In Russian).
16. Gul' V.E. *Struktura i prochnost' polimerov* [Structure and strength of polymers]. Moscow, Chemistry, 1978. 327 p. (In Russian).
17. Ivanov A.M., Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinskij A.N. (2017) *Modifikaciya alyumosilikatami fenoloformal'degidnyh smol dlya skleivaniya fanery* [Modification with aluminosilicates of phenol-formaldehyde resins for plywood bonding]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Glues. Sealants. Technologies], no. 3. pp. 13-17 (In Russian).
18. Kobets L.P., Deev I.S. (2010) *Strukturoobrazovanie v termoreaktivnykh svyazuyushchikh i matritsakh kompozitsionnykh materialov na ikh osnove* [Structure formation in thermosetting binders and matrices of composite materials based on them]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian chemical journal], vol. LIV, no. 1. pp. 67-78 (In Russian).
19. Umland F., Yansen A., Tirig D., Vyunsh G. *Kompleksnye soedineniya v analiticheskoy himii : Teoriya i praktika primeneniya* [Complex compounds in analytical chemistry: Theory and practice of application]. Moscow: Mir, 1975. 531 p. (In Russian).
20. Kukushkin Yu. N. *Himiya koordinatsionnykh soedinenij : uchebnoe posobie* [Chemistry of coordination compounds: tutorial]. Moscow: Vysshaya shkola [Higher school], 1985. 455 p. (In Russian).
21. Lurie Yu. Yu. *Spravochnik po analiticheskoy himii* [Handbook of analytical chemistry]. Moscow, Chemistry, 1989. 448 p. (In Russian).
22. Magomedov G.N. *Osobennosti relaksatsionnykh svoystv voloknistykh, sloistykh, gibridnykh i dispersno-napolnennykh polimernykh kompozitov* : diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Features of relaxation properties of fibrous, layered,

hybrid and dispersion-filled polymer composites. DSc (Physics and Mathematics) thesis]. Moscow, 2005. 285 p. (In Russian).

23. Malinskij Yu. M. *Issledovanie v oblasti fizikohimii geterogennyh polimernyh system* : Avtoref. diss. dokt. himich. nauk [Research in the field of physical chemistry of heterogeneous polymer systems. DSc (Chemistry) thesis abstract]. Moscow, 1970. 46 p. (In Russian).

24. Rusakov D.S., Varankina G.S., Chubinskij A.N. (2019) Modification of phenol-formaldehyde resins by wastes of aluminum and cellulose production. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal* [Proceedings of higher educational institutions. Forest journal], no. 2, pp. 130-140. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.130.

25. Sokolova E.G. (2018) The rationale for the modes of bonding veneer in the manufacture of plywood, manufactured using modified phenol-formaldehyde resin. *Systems. Methods. Technologies*, no. 4 (40), pp. 125-131. DOI: 10.18324/2077-5415-2018-4-125-131.

26. Summ B.D., Goryunov Yu.V. *Fiziko-himicheskie osnovy smachivaniya i rastekaniya* [Physical and chemical bases of wetting and spreading]. Moscow, Chemistry, 1976. 231 p. (In Russian).

27. Fizer L., Fizer M. *Reagenty dlya organicheskogo sinteza* [Reagents for organic synthesis]. Moscow: Mir, 1970. Vol. 3. 445 p. (In Russian).

28. Frejdin A.S., Vuba K.T. *Prognozirovanie svojstv kleevyh soedinenij drevesiny* [Prediction of properties of wood glue joints]. Moscow, Forest industry, 1980. 224 p. (In Russian).

29. Chubov A.B., Zalipaev A.A. (2003) *Otverzhenie fenoloformal'degidnoj smoly pri ponizhennoj temperature* [Curing of phenol-formaldehyde resin at low temperature]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii* [Proceedings of the St. Petersburg forestry Academy], issue 170, pp. 105-109 (In Russian).

Сведения об авторах

Федотов Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», г. Кострома, Российская Федерация; e-mail: aafedotoff@yandex.ru.

Вахнина Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», г. Кострома, Российская Федерация; e-mail: t_vachnina@mail.ru.

Котиков Сергей Алексеевич – магистрант кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», г. Кострома, Российская Федерация; e-mail: galich1917@yandex.ru.

Information about authors

Fedotov Aleksandr Andreevich – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Logging and Wood Processing Industries, FSBEI HE "Kostroma State University", Kostroma, Russian Federation; e-mail: aafedotoff@yandex.ru.

Vakhnina Tatyana Nikolaevna – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logging and Wood Processing Industries, FSBEI HE "Kostroma State University", Kostroma, Russian Federation; e-mail: t_vachnina@mail.ru.

Kotikov Sergey Alekseevich – Master's degree student of the Department of Logging and Wood Processing Industries, FSBEI HE "Kostroma State University", Kostroma, Russian Federation; e-mail: galich1917@yandex.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТАБИЛИЗАТОРОВ НА СВОЙСТВА КАРБАМИДОФОРМАЛЬДЕГИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО И ФАНЕРЫ ФК

кандидат технических наук **А.А. Федотов**

кандидат технических наук, доцент **Т.Н. Вахнина**

доктор технических наук, доцент **А.А. Титунин**

кандидат химических наук, доцент **А.В. Свиридов**

ФГБОУ ВО «Костромской государственной университет», г. Кострома, Российская Федерация

Проблема стабилизации свойств карбамидоформальдегидного связующего в процессе хранения актуальна как для производителей клееной продукции, так и для предприятий, выпускающих смолы. Изменение показателей смолы в процессе хранения затрудняет нанесение связующего и приводит к ухудшению физико-механических свойств фанеры. В работе изучено влияние глицерина, моно- и триэтанолamina, а также смеси глицерина и моноэтанолamina на условную вязкость смолы после 56 суток хранения. Использование глицерина и моноэтанолamina (в том числе в комплексе) снижает условную вязкость смолы на 13,5-24,8 %. Использование в качестве стабилизатора триэтанолamina позволяет на 35 % снизить условную вязкость в сравнении с показателем нестабилизированного олигомера. Проведено исследование механических свойств фанеры ФК на основе стабилизированного и нестабилизированного связующего. Установлено, что добавка глицерина и глицерина в комплексе с моноэтанолaminом существенно снижает прочностные показатели фанеры, что делает нерациональным использование данных стабилизаторов. Добавка в КФС 0,2 % триэтанолamina позволяет на 35 % снизить условную вязкость смолы, при этом когезионная прочность связующего уменьшается на 1,5 %, результат находится в рамках рассеяния показателя, т. е. снижение прочности незначимо. Прочность при статическом изгибе фанеры на стабилизированном триэтанолaminом связующем имеет большее значение, чем у контрольных образцов без добавки стабилизаторов. Результаты исследования позволяют рекомендовать добавку триэтанолamina в количестве 0,2 % от веса карбамидоформальдегидной смолы в качестве рационального стабилизатора.

Ключевые слова: карбамидоформальдегидная смола, поликонденсация, хранение, вязкость, стабилизация, глицерин, моноэтанолamin, триэтанолamin, фанера ФК, клеевой шов, скалывание, статический изгиб

STUDY OF THE INFLUENCE OF STABILIZERS ON THE PROPERTIES OF CARBAMIDE FORMALDEHYDE BINDER AND FC PLYWOOD

PhD (Engineering) **A.A. Fedotov**

PhD (Engineering), Associate Professor **T.N. Vakhnina**

DSc (Engineering), Associate Professor **A.A. Titunin**

PhD (Chemistry), Associate Professor **A.V. Sviridov**

FSBEI HE "Kostroma State University", Kostroma, Russian Federation

Abstract

The problem of stabilizing the properties of the urea-formaldehyde binder during storage is relevant for both glued products and resins. Changing the performance of the resin during storage makes it difficult to apply a binder and leads to a deterioration in the physical and mechanical properties of plywood. The effect of glycerol, mono- and triethanolamine, as well as a mixture of glycerol and monoethanolamine on the nominal viscosity of the resin after 56 days of storage, has been studied. The use of glycerol and monoethanolamine (including in the complex) reduces the nominal viscosity of the resin by 13.5-24.8 %. The use of triethanolamine as a stabilizer makes it possible to reduce the nominal

viscosity by 35 % in comparison with the index of an unstabilized oligomer. Mechanical properties of FC plywood based on the stabilized and unstabilized binder has been studied. It was found that glycerol additive (or glycerol in combination with monoethanolamine) significantly reduces strength characteristics of plywood, which makes it irrational to use these stabilizers. The addition of 0.2 % triethanolamine to CFS allows a 35 % reduction in the nominal viscosity of the resin, while the cohesive strength of the binder decreases by 1.5 %. The result is within the framework of the dispersion of the indicator, i.e. strength reduction is negligible. The static bending strength of plywood with a stabilized triethanolamine binder is more important than that of control specimens without the addition of stabilizers. The results of the study enable to recommend the addition of triethanolamine in an amount of 0.2 % by weight of urea-formaldehyde resin as a rational stabilizer.

Keywords: urea-formaldehyde resin, polycondensation, storage, viscosity, stabilization, glycerin, monoethanolamine, triethanolamine, FC plywood, adhesive joint, chipping, static bending

Введение

Объемы производства фанеры в России ежегодно увеличиваются, и в ближайшей перспективе эта тенденция сохранится [9]. В последнее время акцент делается в первую очередь на качество фанеры, которое будет зависеть от используемых клеевых материалов. К сожалению, не все российские фанерные предприятия самостоятельно выпускают связующее для своих внутренних потребностей, а закупают у химических заводов. Срок хранения синтетических смол хоть и велик, но не бесконечен (для карбамидоформальдегидных смол не превышает 2 месяцев). Несовершенство логистики может внести дополнительные коррективы в процесс доставки и транспортировки.

Процесс поликонденсации смолы, скорость которого зависит от условий хранения, спонтанно идет до отверждения полимера [7, 13]. В процессе хранения смолы (основной реакцией является образование метиленов, соседних с вторичными аминогруппами) происходит изменение ее структурного состава, которое влияет на срок хранения и вызывает ухудшение физико-механических и экологических показателей [1, 4, 5].

С.Г. Седунов с коллегами, проанализировав механизмы структурообразования карбамидоформальдегидных смол (КФС), выдвигают предположение, что в качестве групп, обуславливающих возможные процессы старения КФС, можно выделить метиленовые, аминные, амидные и карбонильные фрагменты смолы [10].

Работы Н.Н. Семенова сформировали представление о механизме действия стабилизаторов полимеров в теории цепных разветвленных и вы-

рожденно разветвленных реакций [11]; они были развиты в трудах Н.М. Эмануэля, Е.Т. Денисова и других ученых. Цепные и ступенчатые процессы, несмотря на различия протекания, имеют и нечто общее – в процессе синтеза образуется полимер. Процесс поликонденсации, который затормозили на стадии синтеза, продолжается со скоростью, зависящей от температуры, срока хранения, химических инициаторов или ингибиторов реакции. Если активная группа стабилизатора атакует макромолекулу продукта, возникает эффект ингибирования реакции. Поскольку поликонденсационные полимеры существенно отличаются по составу и структуре, нет и не может быть единого подхода к стабилизации олигомеров. Как в XX в., так и в настоящее время основным подходом к стабилизации поликонденсационных смол и других полимеров является эмпирический подбор. Следует отметить, что для цепных реакций развиваются теоретические основы стабилизации полимеров [6], в то время как для поликонденсационных процессов эмпирический подход остается основным.

Известен ряд трудов в области направленного изменения состава КФС с целью увеличения срока хранения. С конца XX в. известно, что для КФС стабилизирующими свойствами обладают производные спиртов, кетонов, аминов, сульфидов [6]. В качестве стабилизаторов карбамидоформальдегидных смол могут применяться спирты (глицерин, н-бутанол, этанол) в количестве 1 % от массы смолы [4], этанол, метанол, изопропанол, гидрохинон, глицерин, этиленгликоль, фенол, циклогексанон, изобутанол, моноэтаноламин, тиурам Д, триэтиламин в количестве 1, 5, 10 % от массы смо-

лы [6, 10], 20 %-й раствор безводного хлорида магния в количестве 1 % от массы сухой смолы [3].

Вид и доля добавки стабилизатора зависят от того, на какой стадии необходимо стабилизировать олигомер. На стадии хранения смолы традиционными стабилизаторами являются спирты. На стадии использования КФС как компонента клея необходимую жизнеспособность можно придать, используя уротропин, меламин, тиурам Д. Добавка к КФС 1 % аммиачной воды или 0,5 % меламина или уротропина удлинит жизнеспособность клеевой смеси более чем в два раза, а добавка 3 % меламина – в 18 раз [12].

Для предприятий, не имеющих цехов по производству смол и работающих на покупных полимерных материалах, актуальной задачей является увеличение срока хранения смолы. В данных условиях замедление скорости реакции поликонденсации является актуальным как для фанерного производства, так и для других производств, использующих связующие на основе карбаминоформальдегидных смол. Ввиду сложности структуры поликонденсационного полимера и необходимости сохранения клеящих свойств и/или улучшения экологических показателей и увеличения срока хранения связующего данная задача не всегда имеет однозначное решение. В исследованиях В. Ли с коллегами был использован метод модификации КФС на стадии синтеза продуктами разложения древесины – пиролизными маслами [2]. Увеличение доли добавки пиролизных масел снижает эмиссию формальдегида, однако при этом срок хранения начинает снижаться.

Целью настоящего исследования является выявление веществ-стабилизаторов (в том числе их комбинаций), способных повышать срок хранения карбаминоформальдегидных смол, определение влияния стабилизированных смол на свойства фанеры ФК.

Материалы и методы

В работе исследовалось влияние стабилизаторов: глицерина (0,4; 1; 1,6 % от массы жидкой смолы), моноэтаноламина (0,2; 0,4; 1; 1,6 % от массы жидкой смолы), триэтаноламина (0,2 % от массы жидкой смолы), комбинированный стабилизатор глицерин+моноэтаноламин (в соотношениях 1:1;

2:1; 3:1, взятые в процентах от массы жидкой смолы) на условную вязкость карбаминоформальдегидной смолы КФН-66Ф при длительном хранении. Исследования проводились в течение 8 недель с еженедельным определением показателя.

Для определения условной вязкости использовался вискозиметр, который помещался в штатив и с помощью уровня устанавливался в горизонтальном положении. Под сопло вискозиметра ставился сосуд. Отверстие сопла закрывалось пальцем, смола наливалась в вискозиметр с избытком, чтобы образовался выпуклый мениск над верхним краем вискозиметра. Вискозиметр наполнялся медленно для предотвращения образования пузырьков воздуха. Избыток материала и образовавшиеся пузырьки воздуха удалялись при помощи стеклянной пластинки, сдвигаемой по верхнему краю воронки в горизонтальном направлении таким образом, чтобы не образовалась воздушная прослойка. Открывалось отверстие сопла, и одновременно с появлением испытуемого материала из сопла включался секундомер. В момент первого прерывания струи испытуемого материала секундомер останавливался, и отсчитывалось время истечения (ГОСТ 8420-74). За результат определения показателя принималось среднее арифметическое трех испытаний.

Для исследования влияния стабилизаторов на свойства фанеры ФК изготавливалась пятислойная фанера на основе стабилизированной карбаминоформальдегидной смолы и лущеного березового шпона номинальной толщиной 1,5 мм (ГОСТ 99-2016). Шпон предварительно высушивался до влажности (7 ± 1) %. После формирования пакета и нанесения связующего выполнялось горячее прессование в лабораторном гидравлическом прессе П100-400 при следующих постоянных факторах: температура прессования – 105 °С; время прессования – 5 мин; удельное давление прессования – 1,6 МПа; расход связующего – 100 г/м².

Изготовленная фанера охлаждалась в течение 24 ч, затем раскраивалась на образцы для проведения испытаний на прочность при скалывании согласно ГОСТ 9624–2009. Перед проведением испытаний образцы выдерживались в холодной воде в течение 24 ч с последующим выдерживанием при комнатной температуре в течение

(10±1) мин. Для проведения испытаний на скалывание по клеевому слою использовали разрывную машину Р-5 (ГОСТ 28840), оборудованную клиновыми захватами. За результат испытания принимали среднее арифметическое показателя по пяти дублированным опытам.

Прочность фанеры при статическом изгибе определялась согласно ГОСТ 9625–2013, испытывались четыре образца, два из них верхней пластью вверх, два – верхней пластью вниз. За результат определения прочности фанеры при статическом изгибе принимали среднее арифметическое показателей по испытаниям четырех образцов.

Результаты и обсуждение

Графические зависимости влияния стабилизаторов на условную вязкость карбамидоформальдегидной смолы в сравнении с контрольными значениями (без стабилизаторов) представлены в табл. 1 и на рис. 1-4.

В процессе хранения карбамидоформальдегидного олигомера между линейными макромолекулами в результате взаимодействия метилольных групп –CH₂ОН между собой и водородом амидных групп –NH– образуются поперечные сшивки. При

этом существенно увеличивается трение между слоями олигомера, растет вязкость. Введение в систему веществ с гидроксильными группами позволяет блокировать метилольные группы и замедлить процесс отверждения. Использование глицерина и моноэтаноламина (в том числе в комплексе) снижает условную вязкость КФС на 13,5-24,8 %, однако закономерности динамики роста вязкости не меняются.

Рационально было бы предположить, что стабилизаторы с тремя гидроксильными группами – глицерин и триэтаноламин – имеют сходную степень влияния на замедление поликонденсации КФС. Однако реакционная способность вторичной гидроксильной группы глицерина (выделено) HOCH₂-CH(OH)-CH₂OH ниже, чем первичных [8]. Это объясняет более высокую стабилизирующую способность триэтаноламина в сравнении с глицерином. Использование в качестве стабилизатора триэтаноламина позволяет на 35 % снизить условную вязкость в сравнении с показателем нестабилизированного олигомера.

Таблица 1

Влияние стабилизаторов на условную вязкость карбамидоформальдегидной смолы

Добавка стабилизатора к смоле, %, количество (соотношение)	Сутки							
	7	14	21	28	35	42	49	56
0	51.0	53.0	54.3	55.7	60.7	86.7	114.3	133.3
Глицерин HOCH ₂ -CH(OH)-CH ₂ OH								
0.4	50.3	51.3	54.2	55.3	60.3	64.3	101.3	119.7
1.0	50.7	50.0	50.3	54.3	60.3	64.3	102.0	115.0
1.6	52.7	52.3	55.5	58.3	63.3	65.7	102.3	123.3
Моноэтаноламин HO-CH ₂ CH ₂ -NH ₂								
0.2	49.7	50.3	51.7	56.3	60.3	67.0	103.3	117.3
0.4	49.0	49.7	51.7	53.3	60.0	66.6	102.7	119.7
1.0	47.0	48.7	49.0	52.0	60.0	66.3	102.3	119.3
1.6	48.0	49.0	50.1	51.7	59.7	64.3	100.3	129.7
Глицерин+моноэтаноламин HOCH ₂ -CH(OH)-CH ₂ OH + HO-CH ₂ CH ₂ -NH ₂								
1:1	44.7	47.0	49.0	51.7	59.0	66.3	109.0	119.7
2:1	44.3	46.6	48.0	49.7	54.0	59.3	96.3	109.7
3:1	42.0	45.3	47.0	49.3	50.3	53.7	90.1	100.3
Триэтаноламин (HO-CH ₂ CH ₂) ₃ N								
0.2	43.0	45.3	48.3	50.3	50.7	59.7	70.3	85.5

Источник: собственные разработки авторов

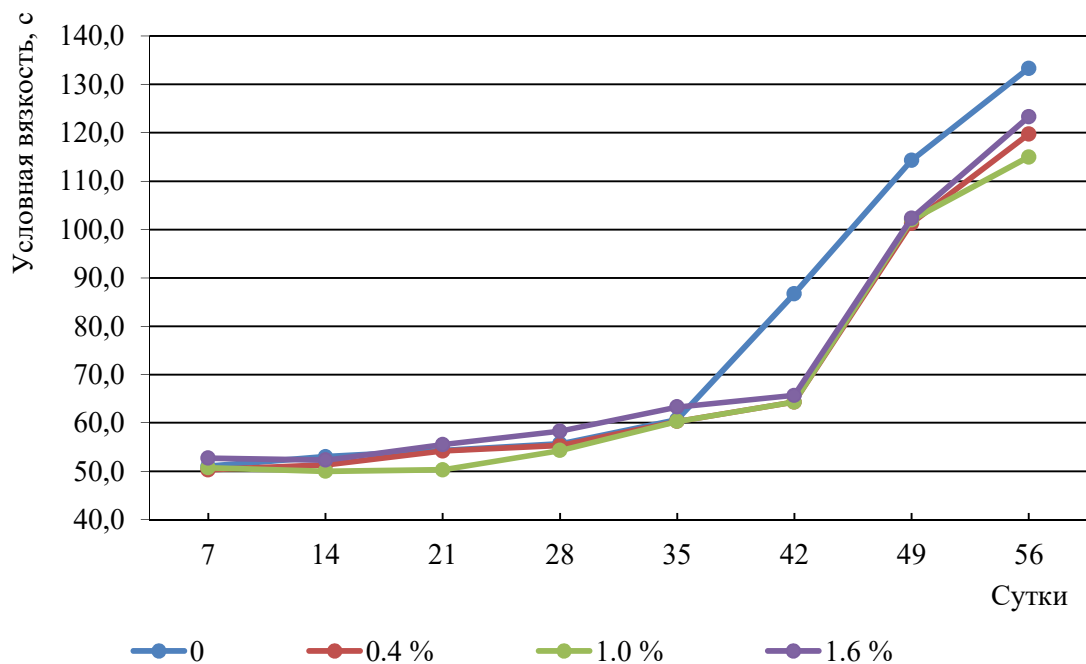


Рис. 1. Влияние доли добавки глицерина (от 0,4 до 1,6 %) на условную вязкость КФС
Источник: собственные разработки авторов

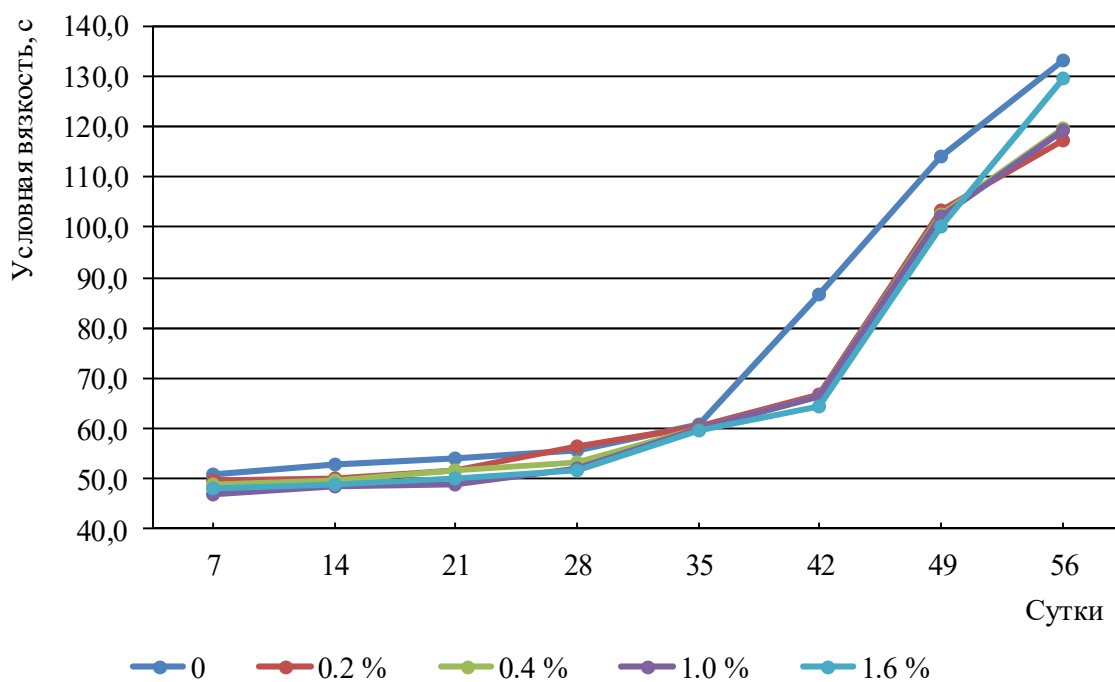


Рис. 2. Влияние доли добавки моноэтаноламина (от 0,4 до 1,6 %) на условную вязкость КФС
Источник: собственные разработки авторов

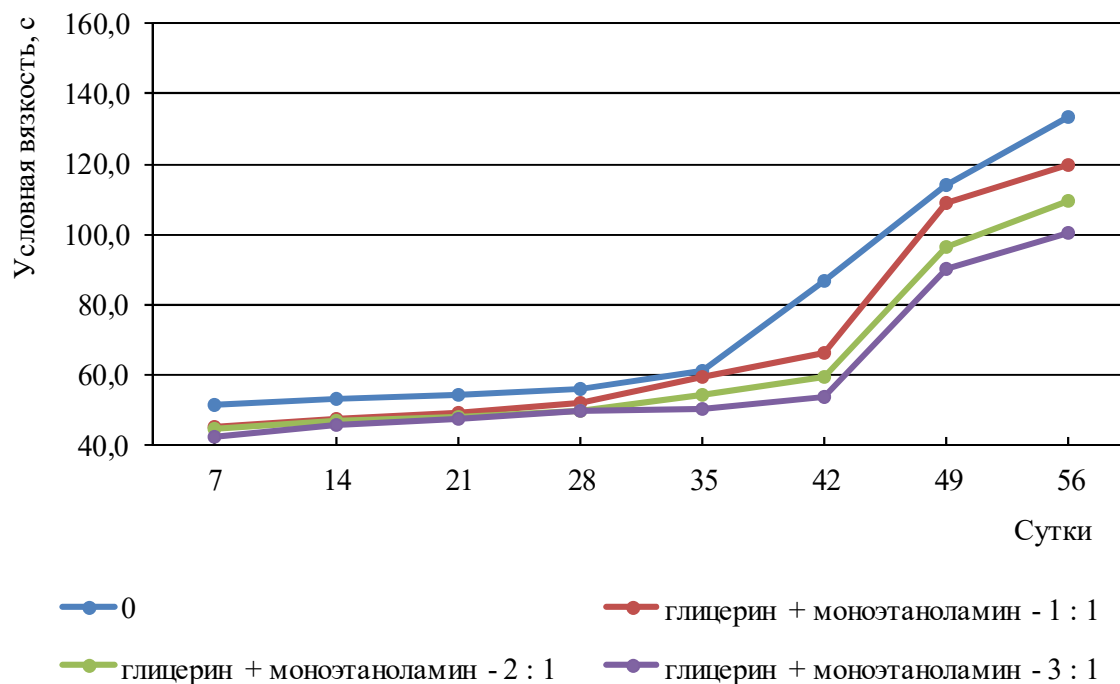


Рис. 3. Влияние доли добавки комбинированного стабилизатора (глицерин + моноэтаноламин в различных соотношениях) на условную вязкость КФС

Источник: собственные разработки авторов

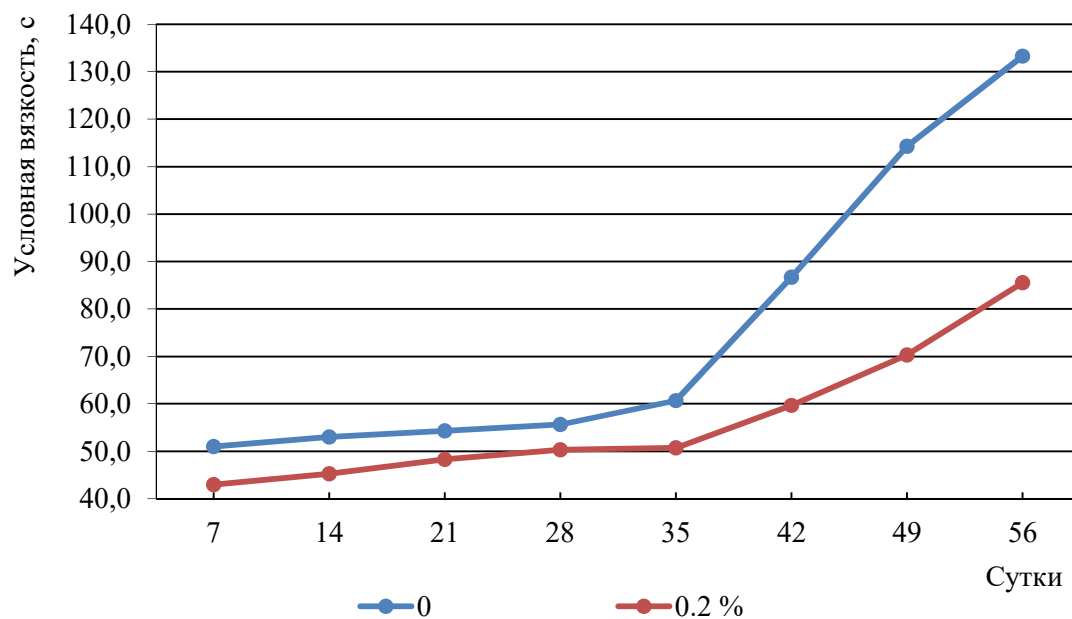


Рис. 4. Влияние доли добавки триэтаноламина на условную вязкость КФС

Источник: собственные разработки авторов

Механические свойства фанеры ФК на основе стабилизированного карбамидоформальдегидного связующего после выдержки в течение 56 суток

Вид стабилизатора; доля добавки, %	Предел прочности при статическом изгибе вдоль волокон, МПа	Предел прочности при скалывании по клеевому слою после вымачивания в течение 24 ч, МПа
Без стабилизатора	108.1	1.29
Глицерин + моноэтаноламин; 3:1	98.1	0.73
Глицерин + моноэтаноламин; 2:1	117.9	1.31
Глицерин + моноэтаноламин; 1:1	119.3	1.20
Моноэтаноламин; 1.6	87.4	0.79
Моноэтаноламин; 1.0	104.5	1.03
Моноэтаноламин; 0.4	98.7	1.45
Моноэтаноламин; 0.2	117.0	1.44
Триэтаноламин; 0.2	115.0	1.27
Глицерин; 1.6	59.5	0.79
Глицерин; 1.0	112.9	1.32
Глицерин; 0.4	118.4	1.37

Источник: собственные разработки авторов

Стабилизаторы КФС, имеющие ОН-группы, обычно негативно влияют на когезионную прочность отвержденного связующего. Поэтому основным критерием выбора стабилизатора является влияние на механические показатели клееной продукции. Результаты влияния стабилизаторов на механические свойства фанеры ФК после 56 суточной выдержки представлены в табл. 2.

Выводы

Чем меньше доля добавки моноэтаноламина, тем выше прочность фанеры при статическом изгибе и скалывании по клеевому шву, наилучшие результаты по механическим показателям дает доля добавки моноэтаноламина 0,2 % от веса смолы. Однако при этом снижение вязкости составляет всего 12 %, т. е. с технологической точки зрения процесс нанесения будет существенно затрудняться.

Добавка глицерина и глицерина в комплексе с моноэтаноламином существенно снижает прочностные показатели фанеры, что делает нерациональным использование данных стабилизаторов.

Добавка в КФС 0,2 % триэтаноламина позволяет на 35 % снизить условную вязкость смолы, при этом когезионная прочность связующего уменьшается на 1,5 %, результат находится в рамках рассеяния показателя, т. е. снижение прочности незначимо. Прочность при статическом изгибе фанеры на стабилизированном триэтаноламином связующем имеет большее значение, чем у контрольных образцов без добавки стабилизаторов.

Результаты исследования позволяют рекомендовать добавку триэтаноламина в количестве 0,2 % от веса карбамидоформальдегидной смолы КФН-66Ф в качестве рационального стабилизатора смолы.

Библиографический список

1. Structural changes in urea-formaldehyde resins during storage / P. Christjanson, K. Siimer, T. Pehk, I. Lasn // Holz als Roh- und Werkstoff. – 2002. – Vol. 60. – P. 379–384. – DOI 10.1007/s00107-002-0326-9.
2. Preparation and characterization of bio-oil modified urea-formaldehyde wood adhesives / B. Li, J. Z. Zhang, X. Y. Ren, J. M. Chang, J. S. Gou // BioResources. – 2014. – Vol. 9. – No. 3. – P. 5125–5133. – DOI: 10.15376/biores.9.3.5125-5133.

3. Влияние функционального состава карбамидоформальдегидной смолы на свойства древесностружечных плит. Часть 1. Изменение функционального состава КФС при длительном хранении / В. Г. Буриндин, О. В. Стоянов, А. В. Артёмов, Е. В. Масленникова, Ю. И. Рудневская // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 6. – С. 164–166.
4. Глазков, С. С. Стабилизация показателей карбамидоформальдегидных смол спиртами / С. С. Глазков, Е. В. Снычева, В. С. Мурзин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2005. – № 6. – С. 100–105.
5. Изменение функционального состава и свойств карбамидоформальдегидных смол при хранении / В. В. Глухих, В. Г. Буриндин, Н. И. Коршунова, В. Б. Войт, В. М. Балакин // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 1996. – № 4-5. – С. 153–159.
6. Горбунов, Б. Н. Химия и технология стабилизаторов полимерных материалов / Б. Н. Горбунов, Я. А. Гурвич, И. П. Маслова. – Москва : Химия, 1981. – 368 с.
7. Доронин, Ю. Г. Синтетические смолы в деревообработке / Ю. Г. Доронин, С. Н. Мирошниченко, М. М. Свиткина. – Москва : Лесная промышленность, 1979. – 208 с.
8. Оудиан, Дж. Основы химии полимеров / Дж. Оудиан. – Москва : Мир, 1974. – 614 с.
9. Россия в цифрах. 2019 : Крат. стат. сб. / Росстат. – Москва, 2019. – 549 с.
10. Исследования по созданию стабилизирующих добавок, увеличивающих срок хранения карбамидоформальдегидных смол / С. Г. Седунов, О. М. Демидов, С. В. Лебедев [и др.] // Молекулярные технологии. – 2012. – № 6. – С. 276–295.
11. Семенов, Н. Н. Цепные реакции / Н. Н. Семенов. – Москва : Наука, 1986. – 535 с.
12. Темкина, Р. З. Синтетические клеи в деревообработке / Р. З. Темкина. – Москва : Лесная промышленность, 1970. – 288 с.
13. Цветков, В. Е. Исследование технологических свойств модифицированных карбамидоформальдегидных смол / В. Е. Цветков, Т. Н. Карпова // Клеи. Герметики. Технологии. – 2011. – № 5. – С. 16-17.

References

1. Christjanson P., Siimer K., Pehk T., Lasn I. (2002) Structural changes in urea-formaldehyde resins during storage. *Holz als Roh- und Werkstoff*. Vol. 60, pp. 379-384. DOI 10.1007/s00107-002-0326-9.
2. Li B., Zhang J.Z., Ren X.Y., Chang J.M., Gou J.S. (2014) Preparation and characterization of bio-oil modified urea-formaldehyde wood adhesives. *BioResources*. Vol. 9, no. 3, pp. 5125-5133. DOI: 10.15376/biores.9.3.5125-5133.
3. Buryndin V.G., Stoyanov O.V., Artyomov A.V., Maslennikova E.V., Rudnevskaya Yu.I. (2014) *Vliyanie funkcional'nogo sostava karbamidoformal'degidnoj smoly na svoystva drevesnostru-zhechnyh плит. CHast' 1. Izmenenie funkcional'nogo sostava KFS pri dlitel'nom hranenii* [Influence of the functional composition of urea-formaldehyde resin on the properties of particle boards. Part 1. Changing the functional composition of CFS during long-term storage]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan technological University], vol. 17, no. 6. pp. 164-166 (In Russian).
4. Glazkov S.S., Snycheva E.V., Murzin V.S. (2005) *Stabilizaciya pokazatelej karbamidoformal'degidnyh smol spirtami* [Stabilization of urea-formaldehyde resins with alcohols]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal* [News of higher educational institutions. Forest journal], no. 6. pp. 100-105 (In Russian).
5. Gluhih V.V., Buryndin V.G., Korshunova N.I., Vojt V.B., Balakin V.M. (1996) *Izmenenie funkcional'nogo sostava i svoystv karbamidoformal'degidnyh smol pri hranenii* [Changes in the functional composition and properties of urea-formaldehyde resins during storage]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal* [News of higher educational institutions. Forest journal], no. 4-5, pp. 153-159 (In Russian).

6. Gorbunov B.N., Gurvich Ya.A., Maslova I.P. *Himiya i tekhnologiya stabilizatorov polimernyh materialov* [Chemistry and technology of stabilizers in polymeric materials]. Moscow, Chemistry, 1981. 368 p. (In Russian).
7. Doronin Yu.G., Miroshnichenko S.N., Svitkina M.M. *Sinteticheskie smoly v derevoobrabotke* [Synthetic resins in woodworking]. Moscow, Forest industry, 1979. 208 p. (In Russian).
8. Oudian Dzh. *Osnovy khimii polimerov* [Fundamentals of polymer chemistry]. Moscow, Mir, 1974. 614 p. (In Russian).
9. *Rossiya v tsifrakh. 2019* [Russia in numbers. 2019]. Rosstat. Moscow, 2019. 549 p. (In Russian).
10. Sedunov S.G., Demidov O.M., Lebedev S.V. (et al.) (2012) *Issledovaniya po sozdaniyu stabiliziruyushchih dobavok, uvelichivayushchih srok hraneniya karbamido-formal'degidnyh smol* [Research on the creation of stabilizing additives that increase the shelf life of urea-formaldehyde resins]. *Molekulyarnye tekhnologii* [Molecular technologies], no. 6. pp. 276-295 (In Russian).
11. Semenov N.N. *Tsepnye reaktsii* [Chain reactions]. Moscow, Science, 1986. 535 p. (In Russian).
12. Temkina R.Z. *Sinteticheskie klei v derevoobrabotke* [Synthetic adhesives in woodworking]. Moscow, Forest industry, 1970. 288 p. (In Russian).
13. Tsvetkov V.E., Karpova T.N. (2011) *Issledovanie tekhnologicheskikh svoystv modificirovannykh karbamido-formal'degidnyh smol* [Research of technological properties of modified urea-formaldehyde resins]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Glues. Sealants. Technologies], no. 5. pp. 16-17 (In Russian).

Сведения об авторах

Федотов Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», г. Кострома, Российская Федерация; e-mail: aafedotoff@yandex.ru.

Вахнина Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», г. Кострома, Российская Федерация; e-mail: t_vachnina@mail.ru.

Титунин Андрей Александрович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», г. Кострома, Российская Федерация; e-mail: a_titunin@ksu.edu.ru.

Свиридов Александр Васильевич – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры химии ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет», г. Кострома, Российская Федерация; e-mail: avsviridov09@mail.ru

Information about authors

Fedotov Aleksandr Andreevich – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Logging and Wood Processing Industries, FSBEI HE "Kostroma State University", Kostroma, Russian Federation; e-mail: aafedotoff@yandex.ru.

Vachnina Tatyana Nikolaevna – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Logging and Wood Processing Industries, FSBEI HE "Kostroma State University", Kostroma, Russian Federation; e-mail: t_vachnina@mail.ru.

Titunin Andrey Aleksandrovich – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Logging and Wood Processing Industries, FSBEI HE "Kostroma State University", Kostroma, Russian Federation; e-mail: a_titunin@ksu.edu.ru.

Sviridov Aleksandr Vasilyevich – PhD (Chemistry), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry, FSBEI HE "Kostroma State University", Kostroma, Russian Federation; e-mail: avsviridov09@mail.ru.

ПОЛЗУЧЕСТЬ И ОБРАТНАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ НАТУРАЛЬНОЙ И ПЛАСТИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ ПРИ ПРЕССОВАНИИ ПОПЕРЕК ВОЛОКОН

соискатель ученой степени **О.И. Шакирова**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

Прессование (модифицирование) древесины – этот технологический процесс представляет собой реализацию процессов сушки, пропитки и прессования. Плотность древесины прессованной – в пределах от 750 до 850 кг/м³ в зависимости от степени прессования. Такая древесина, по сравнению с натуральной, в несколько раз более прочная и твердая. Для антисептирования древесины чаще всего используют каменноугольное масло, ЖТК (жидкость термokatалитического крекинга), сланцевое масло. Они являются пластификаторами и меняют характер деформаций при прессовании. Для получения сравнительных данных были проведены эксперименты с натуральной и прессованной древесиной, содержащей 10 % по массе от абсолютной сухой древесины маслянистого антисептика ЖТК. В качестве исходного материала использовалась древесина березы. При этом антисептик в количестве 8-10 % от массы сухой древесины равномерно распределяется по всему сечению образца. Изучена прямая и обратная ползучесть для оценки изменения состава деформаций сжатой поперек волокон древесины во времени. Измерения проводились на рычажной установке. Полученные режимы могут быть использованы при оптимизации технологии получения пластифицированной древесины, т. к. пластификация древесины маслом ЖТК снижает жесткость в первой фазе деформирования в 3-5 раз, во второй фазе – в 1,1-1,5 раза, в третьей фазе – в 2,5-3 раза. Коэффициент поперечной деформации увеличивается в 1,2-1,3 раза. По кривым ползучести пластифицированной древесины установлено, что пропитка маслом дает в 4-5 раз больше снижение доли упругих деформаций и, соответственно, увеличивает остаточные.

Ключевые слова: береза, модифицированная древесина, прессование, пропитка, масло ЖТК, рычажная установка, измерение, деформация, ползучесть

CREEP AND REVERSE CREEP OF NATURAL AND PLASTICIZED BIRCH WOOD WHEN PRESSING ACROSS THE FIBERS

applicant for a degree **O.I. Shakirova**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

Pressed (modified) wood is a technological process of drying, impregnation and pressing (R 54577-2011 State Standard). The density of pressed wood, depending on the degree of pressing, ranges from 750 to 850 kg/m³. Strength, hardness toughness of this wood is several times greater than of natural wood. Coal oil, TCL (thermocatalytic cracking liquid), shale oil are most often used as wood antiseptics. They are plasticizers and change the nature of deformations during pressing. Experiments with natural and were conducted to obtain comparative data. Pressed wood contained 10% of TCL oily antiseptic by weight of absolute dry wood. Birch wood was used as the starting material. In this case, an antiseptic agent in an amount of 8-10% by weight of dry wood is evenly distributed over the entire cross section of the specimen. Direct and reverse creep was studied to assess time changes in deformation composition of wood, pressed across fibers. Measurements of direct and reverse creep of wood were carried out on a lever installation. The obtained modes can be used to optimize the technology of obtaining plasticized wood, because plasticization of wood with TCL

oil reduces toughness 3-5 times (in the first phase of deformation), in the second phase – 1.1-1.5 times, in the third phase – 2.5-3 times. Transverse strain coefficient increases 1.2-1.3 times. Using creep curves of plasticized wood, it was found that oil impregnation gives 4-5 times greater reduction in the proportion of elastic deformations and, accordingly, increases the residual ones.

Keywords: birch, modified wood, pressing, impregnation, TCL oil, lever installation, measurement, deformation, creep

Введение

Прессование (модифицирование) древесины – этот технологический процесс представляет собой реализацию процессов сушки, пропитки и прессования (ГОСТ Р 54577-2011).

Известно несколько способов модифицирования древесины, которые регламентируются пятью независимыми методами [2]:

1) древесину, предварительно пропаренную или нагретую, прессуют в плоскости поперек волокон. Меняется макроструктура древесины, свойства, происходит увеличение плотности и улучшение прочностных показателей – термомеханическое модифицирование. Древесина, полученная таким методом, называется прессованной древесиной. Ее можно дополнительно модифицировать с целью улучшения свойств;

2) древесину предварительно обрабатывают аммиаком, карбамидом или другими пластификаторами, затем осуществляется уплотнение и стабилизация форм и размеров – химико-механическое модифицирование;

3) древесину пропитывают смолами или олигометрами (карбамидные, виниловые, полиэфирные, фурановые), потом идет сушка и отверждение пропитывающего вещества – термохимическое модифицирование;

4) пропиточный состав наполняет пористую структуру древесины, с последующим отверждением или полимеризацией под воздействием ионизирующих излучений – радиационно-химическое модифицирование;

5) древесину обрабатывают уксусным ангидридом, кетоном и другими веществами, которые изменяют химический состав и тонкую структуру древесины, – химическое модифицирование.

В экспериментальном исследовании при производстве модифицированной древесины применен метод термомеханической модификации. Натуральную древесину, пропитанную масляни-

стым раствором антисептика со стабилизатором, прессуют поперек волокон по всей длине заготовки. Плотность древесины прессованной – в пределах от 750 до 850 кг/м³ в зависимости от степени прессования. Такая древесина, по сравнению с натуральной, в несколько раз более прочная и твердая. Наполнение (пропитка) древесины антисептиком и стабилизатором повышает биостойкость и формоустойчивость модифицированной древесины, это предположительно повысит срок ее эксплуатации до 30–50 лет [1, 3, 13].

Для получения модифицированной древесины большое значение имеют процессы, протекающие при сжатии древесины поперек волокон.

При прессовании древесной заготовки ее объем уменьшается почти в два раза, при этом в процессе деформирования в древесине накапливаются внутренние напряжения, сопровождающиеся микро разрушениями и даже образованием трещин. Процесс деструкции конструктивных элементов древесины можно значительно снизить введением в древесину пластифицирующих агентов, таких как водяной пар, аммиак, карбамид и др. [7, 8].

Для антисептирования древесины чаще всего используют масла, такие как каменноугольное масло, ЖТК (жидкость термokatалитического крекинга), сланцевое масло. Все эти масла, особенно ЖТК, по отношению к древесине являются пластификаторами и значительно меняют характер деформаций при прессовании [5, 6].

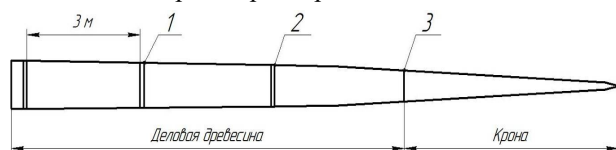
Была изучена прямая и обратная ползучесть для оценки изменения состава деформаций сжатой поперек волокон древесины во времени.

Материалы и методы

Для экспериментального исследования в качестве исходного материала использовалась древесина березы (*Betula verrucosa* Linn) [4]. Деревья были отобраны по ГОСТ 16483.6-80 «Древесина. Метод отбора модельных деревьев и кряжей для определения физико-механических свойств древес-

ных насаждений». Затем деревья разрезались на кряжи [12], по 3 кряжа длиной 3 метра. Раскряжевка дерева происходит от комля согласно схеме, представленной на рис. 1.

Далее из кряжа выпиливалась заготовка для получения модифицированной древесины в виде бруса сечением 235×250×2750 мм. В течение 6 месяцев выдерживалась в эксикаторах для сернокислотной гидростабилизации в помещении с постоянной влажностью $\varphi = 67\%$. Плотность сырья при влажности 12 % составляла $640 \pm 20 \text{ кг/м}^3$, обязательным являлось отсутствие сучков, трещин и гнили. Выпиливались образцы размерами 20×20×30 мм.



1, 2, 3 – срезы древесины, выпиленные из ствола через 3 м

Рис. 1. Схема выпилки заготовок из ствола дерева
Источник: результат получен автором

Прессование древесины следует осуществлять на лабораторной установке СПК-1М для получения шпальных заготовок из модифицированной древесины размерами 235×250×2750 мм. Из прессованных заготовок вырезаются в различных местах образцы 20×20×30 мм. Образцы из модифицированной древесины должны пройти сернокислотную гидростабилизацию в течение 6 месяцев в эксикаторах. Параметры стабилизации при концентрации серной кислоты 35-40 %, плотности 1265-1310 кг/м^3 , температуре 15-20 °С составят 60-67 %.

Для того чтобы получить сравнительные данные, необходимо провести эксперименты с натуральной и прессованной древесиной, содержащей 10 %, по массе от абсолютной сухой древесины, маслянистого антисептика ЖТК. При этом антисептик в количестве 8-10 % от массы сухой древесины равномерно распределяется по всему сечению образца.

Для измерения прямой и обратной ползучести древесины в зоне больших деформаций применяется рычажная установка, установленная на испытательной машине ЦДМУ-30 (рис. 2). Установка может работать в режиме нагружения машины

ЦДМУ-30, а также в автономном режиме, путем нагружения грузами массой 10-100 кг.

Экспериментальные исследования охватывают в первую очередь коэффициент релаксации древесины в зависимости от температуры, влажности и времени. Затем исследуется показатель формы релаксационной кривой, рассчитываются и проверяются модули упругости и время релаксации.

Затем исследуется прямая и обратная ползучесть натуральной и прессованной древесины с различными начальными напряжениями (1-12 МПа) и конечным напряжением 30 МПа.

Результаты и обсуждение

Испытывались образцы на упругую податливость при начальном напряжении 2 МПа. Средняя деформация 0,048 мм развивалась в древесине плотностью 613 кг/м^3 при 2,62 МПа, а плотностью 730 кг/м^3 – при 3,43 МПа. Итак, различие податливостей менее значительно в средних зонах сжимаемой древесины. А податливость при сжатии в тангенциальном направлении уменьшается более чем вдвое вблизи контактных поверхностей при возрастании плотности натуральной древесины на 19 %.

При напряжении 1,8 МПа натуральная древесина при влажности 5 % уменьшилась за 600 с на 31 %, а при влажности 10 % – на 24 %. Можно сказать, что в среднем величина упругой деформации натуральной древесины мало изменяется со временем.

Деформации сжатия и остаточные отмечались при напряжении 4,3 МПа. Такое напряжение лежит на границе потери устойчивости клеточной стенки и представляет большой интерес как пороговое в процессе прессования. При увеличении влажности древесины с 10 до 20 % податливость возрастает на 37,5 %. Одновременно прослеживается существенная роль начальной плотности. Так, образцы с плотностью 613 кг/м^3 имели общую податливость 3,6 ГПа^{-1} , а с плотностью 730 кг/м^3 – вдвое меньше показатели: 1,6 ГПа^{-1} .

Начинает заметно прессоваться древесина березы с влажностью 10 % и более при напряжении 8,0 МПа, т. е. вторая фаза деформирования.



1 – опора; 2 – нагрузчитель; 3 – передатчик усилия (рычаг); 4 – пульт управления; 5 – обогреваемая прессформа с образцом древесины

Рис. 2. Рычажная установка

Источник: результат получен автором

Для пластифицированной древесины плотностью 720-790 кг/м³ податливость является функцией влажности. Очевидно, упругая податливость материала мало меняется с влажностью. В то же время общая податливость при повышении влажности возрастает со все большей крутизной (рис. 3).

За период испытаний упругие деформации при напряжении 4,3 МПа и влажности 30 % уменьшаются на 24 %, а при влажности 10 % – на 12 %. При напряжении 8,0 МПа уменьшение упругих деформаций, а следовательно, рост податливости за 600 с достигало 27 %. Таким образом, в натуральной древесине во времени накапливаются остаточные деформации и уменьшаются упругие при практически постоянном уровне деформаций ползучести.

Процесс зависит от влажности и начального напряжения. Наиболее значительно изменение во времени характера снятия деформаций ползучести. Так, при напряжении 8,0 МПа восстановление размеров образца после снятия нагрузки происходит по весьма пологой кривой. Следовательно, степень задержки скорости упругого последействия зависит от величины начальной деформации.

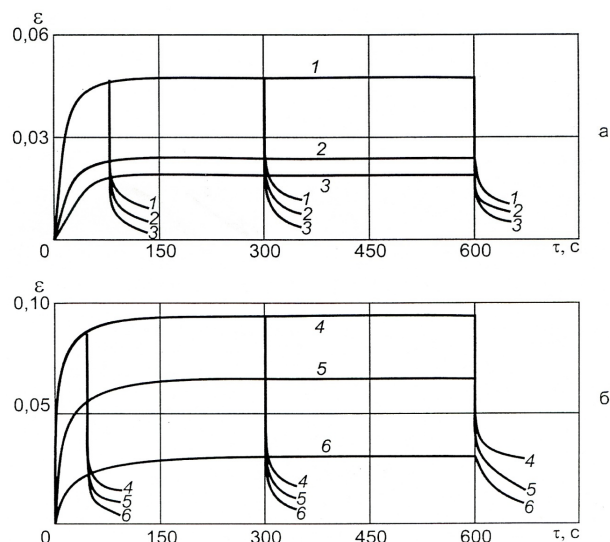


Рис. 3. Кривые ползучести натуральной древесины при различной влажности (а) и различных напряжениях (б): 1, 2, 3 – соответственно влажностью 21, 13, 10 % (напряжения 1,8 МПа); 4, 5, 6 – соответственно напряжениям 8,0, 4,3, 1,8 МПа (влажности 10 %)

Источник: результат получен автором

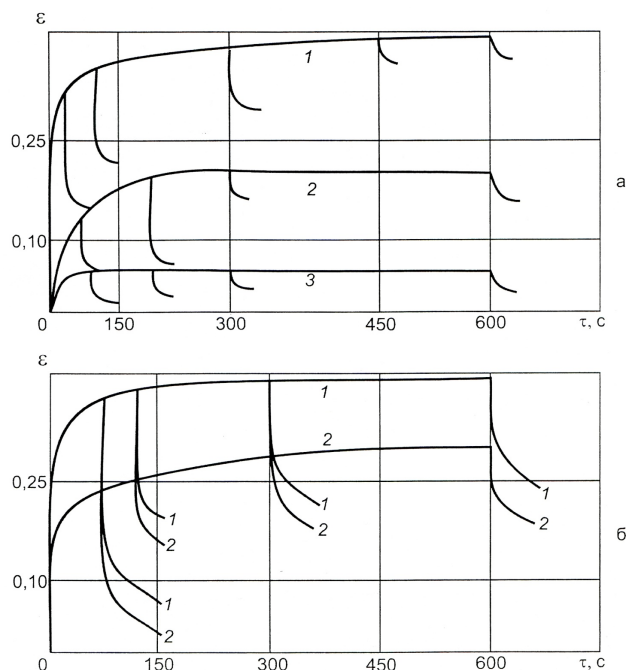


Рис. 4 Кривые ползучести пластифицированной древесины влажностью 5 % (а) и 20 % (б) при различных нагрузках: 1, 2, 3 – соответственно 8,0, 4,3, 1,8 МПа

Источник: результат получен автором

Пропитка древесины маслом ЖТК приближает деформативные показатели древесины к соответствующим более влажным (рис. 4). Со временем уменьшается упругая составляющая, но не возрастают и остаточные деформации. Остается практически постоянной сумма упругих и остаточных деформаций, следовательно, пластифицированная древесина имеет неявный характер трансформации упругих деформаций в остаточные. По-видимому, со временем в древесине происходит накопление связей, препятствующих быстрому восстановлению размеров после снятия нагрузки.

Остаточные деформации для пластифицированной древесины при малой влажности пропорциональны приложенному напряжению и нарастают в течение периода испытаний с затуханием.

Следовательно, пропитка древесины маслом приводит к резкому (в 3-6 раз) снижению доли упругих деформаций, быстро убывающих во времени, причем по мере выдержки под давлением замедляется скорость обратной ползучести. Оценивая роль пластификатора, можно сделать вывод, что пропитка маслом в несколько раз повышает податливость древесины во влажном состоянии при сжатии. С другой стороны, после разгрузки наблюдается переход упругих деформаций в задержанные, а часть задержанных переходит в остаточные. Следовательно, в пластифицированной древесине происходит интенсивная релаксация напряжений, связанная с переходом в новое равновесное состояние.

Кинетика спада напряжений в сжатом образце протекает в условиях сушки, т. е. помимо основных составляющих деформаций (упругих, упруго-залаздывающих и остаточных) проявляются и деформации сушки. Деформации сушки способствуют ускорению процесса релаксации напряжений. По величине в направлении прессования у запрессованной древесины коэффициент усушки почти вдвое больше соответствующего коэффициента натуральной древесины [9, 10, 11].

На процесс деформирования древесины под действием ступенчатой постоянной нагрузки определяющее влияние оказывает температура процесса. Исследование ползучести и обратной ползучести натуральной и пластифицированной древесины в процессе прессования поперек волокон в ради-

альном направлении проводилось при температуре 20 и 95 °С.

Во избежание существенных искажений формы образца при больших прессующих деформациях его высота задавалась в среднем в 5 раз меньшей поперечных размеров.

На рис. 5 представлена ползучесть и обратная ползучесть древесины березы плотностью 676 кг/м³ и влажностью порядка 10 % в условиях сушки. Итак, кривая *a* отражает развитие общих деформаций древесины, нагретой до 95 °С. Конечная влажность после испытаний в течение $7,2 \cdot 10^3$ с (2 часов) приближалась к 2,5 %, т. е. процесс велся в условиях сушки и потеря влаги составила 3/4 от исходной. Начальная скорость потери влаги более чем втрое превышала конечную. А развитие деформаций в древесине при комнатной температуре и постоянной влажности отражает кривая *b*. Для обоих случаев в начале нагружения развитие деформаций происходит при фактически постоянной влажности и отражает, в основном, влияние температуры. Значит, к увеличению общей деформации в 1,5 раза приводит повышение температуры в 4,75 раза.

При испытании остаточная деформация возросла в обоих случаях. Условно-упругая деформация составила 0,032 – при нагревании древесины до 95 °С, а при комнатной температуре – 0,056. Остаточные деформации в результате температурного ускорения релаксационных процессов и усушки за время испытаний возрастают в 2,3 раза. Следовательно, по мере нагружения в условиях сушки уменьшается упругая составляющая деформации и увеличивается остаточная.

При оценке влияния фактора влажности (рис. 6) кривые развития деформаций в сжатой древесине различной влажности в условиях усушки сходны между собой. Следовательно, температурное воздействие и потеря до 3/4 влаги существенно не изменяет механизм деформирования древесины. По мере нагружения во времени возрастают, в основном, остаточные деформации.

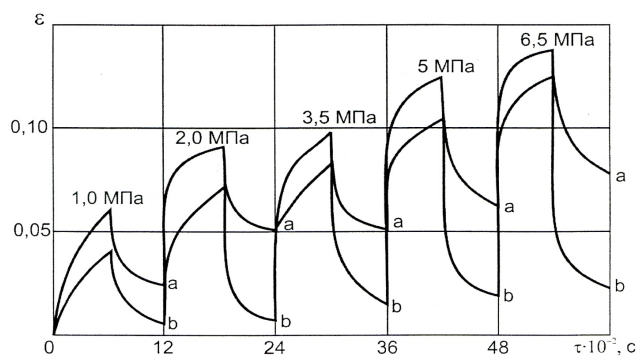


Рис. 5. Ползучесть и обратная ползучесть сжатых волокон пластифицированной древесины при температуре: а – 95 °С; б – 23 °С
Источник: результат получен автором

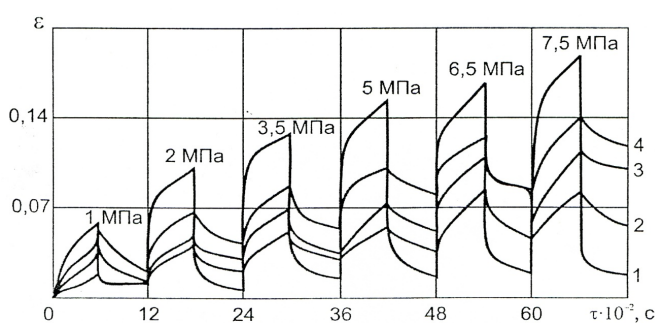


Рис. 6. Развитие во времени ползучести и обратной ползучести при температуре 95 °С натуральной древесины с влажностью: 1-10 %, 2-10 %, 3-15 %, 4-20 %
Источник: результат получен автором

Переходные процессы, отражаемые группой задержанных (запаздывающих) деформаций, тем более продолжительны, чем выше начальная влажность древесины. Это свидетельствует о том, что эти деформации формируются во времени из числа обратимых (эластических), а также из задержанных за счет увеличения времени задержки. По мере потери влаги ускоряется общий переход в новое равновесное состояние, причем наиболее интенсивно релаксируют напряжения в древесине с минимальной влажностью.

Введение в древесину масла ЖТК в количестве 10 % по массе приводит к образованию пластифицированной древесины. В первую очередь

повышается плотность материала – с 622 до 657 кг/м³. При сушке отмечается возрастание усушки. Следовательно, следует предположить возможность и некоторых качественных изменений в структуре механизма деформирования такой древесины, особенно при повышенных температурах. Сравнение кривых ползучести и обратной ползучести натуральной и наполненной маслом древесины представлено на рис. 5 и 6. Условно-упругие деформации наполненной маслом древесины по сравнению с натуральной в целом уменьшаются при нарастании остаточных, т. е. изменяется характер эластичности материала.

Механизм возникновения и развития упруго-запаздывающих деформаций, судя по кривым (рис. 5 и рис. 6), одинаков для натуральной и наполненной древесины.

Сохраняется практически одна кривизна переходных участков, что говорит о неизменности упруго-вязкого деформирования в стадии запаздывания. Воздействуя прежде всего на лигноуглеводный комплекс, масло ЖТК повышает эластичность и податливость древесины, снижая деструктивные проявления. При этом модуль прессования возрастает с 10 до 50 МПа при потере влаги около 5 %.

Выводы

1. Пластификация древесины маслом ЖТК снижает жесткость в первой фазе деформирования в 3-5 раз, во второй фазе – в 1,1-1,5 раза, в третьей фазе – в 2,5-3 раза. Коэффициент поперечной деформации увеличивается в 1,2-1,3 раза.
2. По кривым ползучести пластифицированной древесины установлено, что пропитка маслом дает в 4-5 раз больше снижение доли упругих деформаций и, соответственно, увеличивает остаточные.
3. Установлены численные величины длительного и мгновенного модуля упругости, время ползучести, показатели формы кривой ползучести.
4. Полученные режимы могут быть использованы при оптимизации технологии получения пластифицированной древесины.

Библиографический список

1. Хухрянский, П. Н. Прессование древесины / П. Н. Хухрянский. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Лесная промышленность, 1964. – 361 с. – Библиогр.: с. 360.
2. Шамаев, В. А. Модифицирование древесины : монография / В. А. Шамаев, Н. С. Никулина, И. Н. Медведев. – Москва : ФЛИНТА : Наука, 2013. – 448 с.
3. Navi, P. Combined densification and thermo-hydro-mechanical processing of wood / P. Navi, F. Heger // *MRS Bull.* – 2004. – No. 29. – P. 332–336.
4. Effect of thermal modification on mechanical properties of Canadian white birch (*Betula papyrifera*) / S. Lekounougou, D. Kocaefe, N. Oumarou, Y. Kocaefe, S. Poncsak // *International Wood Products Journal.* – 2011. – Vol. 2. – P. 101–107.
5. Nikolic, M. Use of nanofillers in wood coatings: a scientific review / M. Nikolic, J. M. Lawther, A. R. Sanadi // *J. Coat. Technol. Res.* – 2015. – No. 12. – P. 445. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9659-2>.
6. Hřčka, R. High temperature effect on diffusion coefficient / R. Hřčka, M. Babiak, R. Németh // *Wood. Res. Slovak.* – 2008. – No. 53. – P. 37–46.
7. Губанова, Н. В. Моделирование процесса пропитки древесины жидкостью / Н.В. Губанова // *Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник.* – 2013 – № 3 (95). – С. 134–138.
8. Бурлов, С. А. Влияние температуры на твердость прессованной древесины / С. А. Бурлов, В. А. Шамаев // *Лесной журнал.* – 1989. – № 3. – С. 86–89.
9. Медведев, И. Н. Деформирование древесины при равномерном сжатии с одновременной сушкой / И. Н. Медведев, О. И. Шакирова, В. А. Шамаев // *Лесотехнический журнал.* – 2012. – № 2 (6). – С. 15–21.
10. Пропитка древесины жидкостями под давлением / В. А. Шамаев, О. А. Куницкая, И. В. Григорьев [и др.] / *Системы. Методы. Технологии.* – 2018. – № 4 (40). – С. 152–156. – DOI 10.18324/2077-5415-2018-4-152-156.
11. Шакирова, О. И. Процесс пропитки и сушки под давлением модифицированной древесины для шпал / О. И. Шакирова // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика.* – 2016. – Т. 4. – № 5-1 (25-1). – С. 253–256.
12. ГОСТ 16483.6-80 (СТ СЭВ 1141-78). Древесина. Метод отбора модельных деревьев и краёв для определения физико-механических свойств древесины насаждений: издание официальное : дата введения 1981.01.01. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 6 с.
13. Durability of Modified Wood – Laboratory vs Field Performance. Westin Mats, Technical Research Institute of Sweden, Boras, Sweden, 2010, 142.

References

1. Khukhryanskiy P.N. *Pressovanie drevesiny* [Wood pressing]. 2-e izd., isprav. i dop. [2nd ed., corr.]. M.: *Lesnaya promyshlennost'*. 1964. 361 p. (In Russian).
2. Shamaev V.A., Nikulina N.S., Medvedev I.N. Modification of wood: monograph. M.: FLINTA: Nauka, 2013. 448 p.
3. Navi P., Heger F. (2004) Combined densification and thermo-hydro-mechanical processing of wood. *MRS Bull* 29:332-336.
4. Lekounougou S., Kocaefe D., Oumarou N., Kocaefe, Y., Poncsak S. (2011) Effect of thermal modification on mechanical properties of canadian white birch (*Betula papyrifera*). *International Wood Products Journal*. Vol. 2, p. 101-107.
5. Nikolic M., Lawther J.M., Sanadi A.R. (2015) Use of nanofillers in wood coatings: a scientific review. *J Coat Technol Res*. 12: 445. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11998-015-9659-2>.

6. Hřčka R., Babiak M., Németh R. (2008). High temperature effect on diffusion coefficient. *Wood Res Slovak* 53:37–46.
7. Gubanova N. (2013) Modeling the process of wood impregnation with liquid. *Bulletin of Moscow State Forest University - Forest Bulletin*. № 3 (95). p. 134–138 (in Russian).
8. Burlov S.A., Shamaev V.A. (1989) The effect of temperature on the hardness of pressed wood. *Forest Journal*. № 3. P. 86-89 (in Russian).
9. Medvedev I.N., Shakirova O.I., Shamaev V.A. (2012) Wood deformation under uniform compression with simultaneous drying. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 2, № 2 (6). P. 15-21 (in Russian).
10. Shamaev V.A., Kunitskaya O.A., Grigoryev I.V. (et al.) (2018) Impregnation of wood with liquids under pressure. *Systems. Methods. Technology*. № 4 (40). P. 152-156. DOI 10.18324/2077-5415-2018-4-152-156.
11. Shakirova O.I. (2016) The process of impregnation and drying of modified wood under pressure for railroad sleepers. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. Vol. 4. № 5-1 (25-1). P. 253-256 (in Russian).
12. 16483.6-80 State Standard (COMECON Standard 1141-78) Wood. A method for selecting model trees and logs to determine physical and mechanical properties of tree stands: Official Edition - Date of Entry: 1981-01-01. Moscow: Standardinform, 2005 6 p. (in Russian).
13. Durability of Modified Wood – Laboratory vs Field Performance. Westin Mats, Technical Research Institute of Sweden, Boras, Sweden, 2010, 142.

Сведения об авторе

Шакирова Оксана Ивановна – соискатель ученой степени, документовед учебно-методического управления ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: oks.vrn36@yandex.ru.

Information about the author

Shakirova Oksana Ivanovna – applicant for a degree, records manager of the educational institution, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: oks.vrn36@yandex.ru.

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОБРЕЗЧИКА ВЕТВЕЙ В САПР

доктор технических наук, профессор **И.М. Бартнев**

кандидат технических наук, доцент **Л.Д. Бухтояров**

кандидат технических наук **В.П. Попиков**

аспирант **А.В. Придворова**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

При уходе за лесными культурами необходимо проводить обрезку ветвей. Обрезка вершин осуществляется в питомниках, удаление кустарника – на вырубках, формирование кроны – у лесозащитных полос. Оператору сложно одновременно управлять несколькими гидроцилиндрами и выдерживать требуемое положение рабочего органа. С развитием цифровых средств визуального контроля и автоматического управления появляется возможность автоматизировать процесс обрезки ветвей. Для автоматизации работы оператора требуется определить управляющие воздействия на гидроцилиндры обрезчика ветвей. Современное технологическое оборудование проектируется в системах автоматизированного проектирования (САПР), которые позволяют численным методом провести компьютерный эксперимент на имитационной модели. Нами была спроектирована конструкция обрезчика в Solidworks и составлена имитационная модель. Имитационная модель учитывает геометрические, кинематические и инерционные параметры звеньев обрезчика. Исследовано перемещение рабочего органа обрезчика из транспортного положения в рабочее. В модуле Motion Solidworks на звенья были установлены виртуальные датчики перемещения и получены траектории движения обрезчика. Полученные управляющие воздействия могут быть использованы как входной параметр для имитационных моделей в других математических средах и при создании прототипов управляющих механизмов обрезчика.

Ключевые слова: обрезчик ветвей, имитационное моделирование, САПР, манипулятор, автоматизация

CAD SIMULATOR MODEL OF A CUTTER

DSc (Engineering), Professor **I.M. Bartenev**

PhD (Engineering), Associate Professor **L.D. Bukhtoyarov**

PhD (Engineering), Associate Professor **V.P. Popikov**

post-graduate student **A.V. Pridvorova**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

When caring for forest crops, it is necessary to prune the branches. Cutting of top branches is carried out in nurseries, removal of shrubs - on clearings, the formation of crowns - in forest shelterbelts. It is difficult for the operator to simultaneously control several hydraulic cylinders and maintain the required position of the working body. It becomes possible to automate the process of pruning branches with the development of digital means of visual and automatic control. It is necessary to determine the control actions on the hydraulic cylinders of the branch cutter to automate the work of the operator. Modern technological equipment is designed in computer-aided design (CAD) systems. It enables using a numerical method to conduct a computer experiment on a simulation model. The design of the cutter in Solidworks have been made. A simulation model has been compiled. The simulation model takes into account geometric, kinematic and

inertial parameters of the cutter chains. The movement of the cutter working body from the transport position to the working one has been studied. Virtual displacement sensors have been installed on the chains in the Motion Solidworks module, and cutter paths have been obtained. The resulting control actions can be used as an input parameter for simulation models in other mathematical environments, and when creating prototypes of cutting control mechanisms.

Keywords: branch cutter, simulation, CAD, manipulator, automation

Введение

При уходе за лесными культурами необходимо проводить обрезку ветвей. Обрезка вершин осуществляется в питомниках, удаление кустарника – на вырубках, формирование кроны – у лесозащитных полос [1]. С внедрением автоматизированных средств слежения как в целом за машиной, так и за объектами ухода возникает возможность повысить производительность проводимых операций и снизить требования и нагрузку на оператора [2, 3]. При рассмотрении гидравлической системы, приводящей в требуемое положение рабочий орган обрезчика ветвей, оператору необходимо управлять тремя гидроцилиндрами. Однако если мы знаем, как следует расположить рабочий орган, то путем моделирования можем найти требуемый ход штоков гидроцилиндров.

В настоящее время проектирование технологического оборудования ведется в системах автоматизированного проектирования. При разработке конструкции детали объединяются в сборочный чертеж и обладают инерционными свойствами в соответствии с их размерами и выбранным материалом. Используя 3D модель технологического оборудования, можно установить виртуальные датчики перемещения на его звенья. Расположив звенья обрезчика ветвей в транспортное и рабочее положение, мы получим показания перемещения его гидроцилиндров, а значит, управляющие воздействия оператора. Такой подход позволяет совместить операции по движению сразу трех гидроцилиндров, что повышает производительность работы. Для функционирования обрезчика в реальных условиях необходимо снабдить прототип датчиками перемещения штока гидроцилиндра и калибровать расположением звеньев относительно их начального положения, а также разработать механизм подачи давления в соответствии с цифровыми значениями оборудования.

Материалы и методы

Используя САПР SolidWorks, создадим звенья, укажем их сопряжения в сборке, установим материал. Общий вид 3D модели обрезчика ветвей показан на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид обрезчика ветвей (собственная разработка авторов)

Обрезчик состоит из рамы, которая присоединяется к навеске трактора, колонны, вращающейся в вертикальной плоскости двумя гидроцилиндрами, соединенной со стрелой, на конце которой установлен зубчатый механизм поворота рабочего органа с тремя пильными дисками. Вращение на пильные диски передается ременной передачей от гидромотора. Поворот рабочего органа осуществляется за счет перемещения штока гидроцилиндра, выполняющего функцию шатуна. Ширина захвата 1,4 м. Диаметр срезаемых ветвей до 10 см. Пилы расположены в шахматном порядке, перекрывая рабочую зону друг друга. Частота вращения пил

1000 об/мин, диаметр 0,5 м, окружная скорость резания 25 м/с, что предотвращает отклонение тонких ветвей при резании. Общая масса конструкции 350 кг.

Обозначим характерные точки обрезчика ветвей: А – шарнир крепления первого гидроцилиндра, В – шарнир крепления штока первого гидроцилиндра, С – шарнир поворота стрелы относительно колонны, D – шарнир второго гидроцилиндра (на колонне), E – шарнир штока второго гидроцилиндра (на стреле), F – шарнир третьего гидроцилиндра (на стреле), G – шарнир третьего штока, L – крайняя левая точка на диске пилы, R – крайняя правая точка на диске пилы (рис. 2).

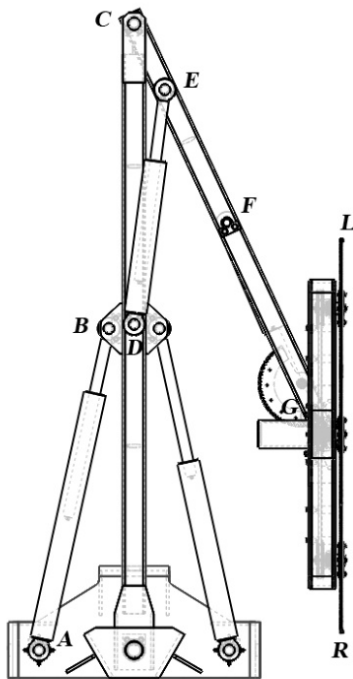


Рис. 2. Транспортное положение обрезчика
(собственная разработка авторов)

Путем движения звеньев переведем механизм в транспортное положение (рис. 2). Установим виртуальные датчики, которые будут отслеживать координаты по осям OX, OY (рис. 3). Также установим датчики, которые отслеживают перемещение штоков гидроцилиндра относительно их начального значения.

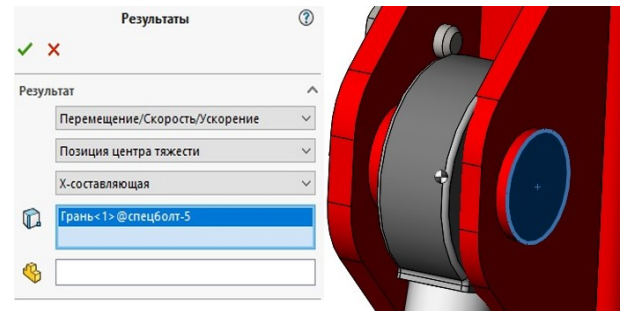


Рис. 3. Датчик движения шарнира В по оси OX
(собственная разработка авторов)

Обрезчик монтируются на навеске трактора. На рис. 4 показан вид спереди, в то время как система координат сориентирована по ходу движения трактора, а значит положительные значения оси OX будут направлены влево. Процесс перемещения рабочего органа исследуем при неподвижной машине, а значит, пренебрегаем осью OZ.

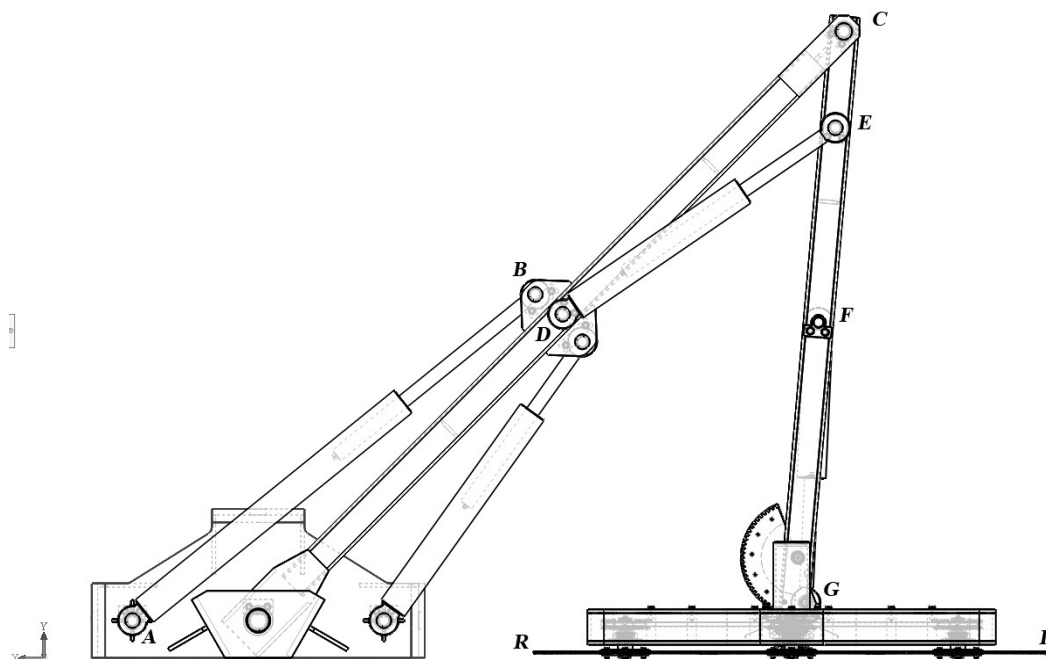


Рис. 4. Рабочее положение обрезчика ветвей (вид спереди) (собственная разработка авторов)

Таблица 1

Координаты характерных точек обрезчика
в транспортном и рабочем положениях

№ п/п	Датчик	X_t , мм	Y_t , мм	X_p , мм	Y_p , мм
1	A	340	100	-340	100
2	B	90	1254	-749	977
3	C	0	1086	-698	798
4	D	0	1265	-824	924
5	E	-110	2104	-1561	1425
6	F	-332	1629	-1516	902
7	G	-578	995	-1431	214
8	L	-743	1566	-2137	12
9	R	-743	166	-737	12

(собственная разработка авторов)

Используя виртуальные датчики, расположенные в шарнирах A, B, C, D, E, F, G и крайних точках рабочего органа R, L, сведем начальные и конечные координаты механизма в табл. 1. Обозначим индексом т – транспортное положение, а индексом р – рабочее положение.

Результаты и обсуждение

Для повышения жесткости конструкции поворотная колонна вращается двумя гидроцилиндрами. Так как гидроцилиндры расположены симметрично друг другу, следует ожидать симметрию при перемещении их штоков при повороте колонны.

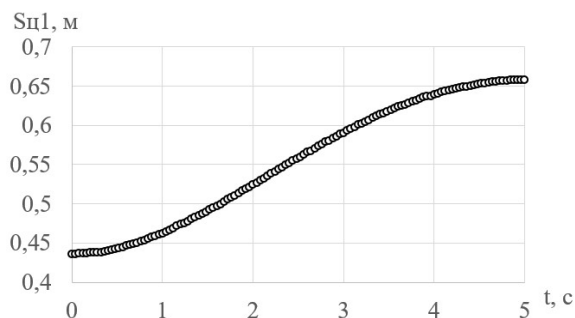


Рис. 5. Показания виртуального датчика перемещения штока первого гидроцилиндра (собственная разработка авторов)

Данное предположение подтверждается показаниями виртуальных датчиков. Перемещение штока гидроцилиндров составило 0,2 м, характеристики показаны на рис. 5, 6.

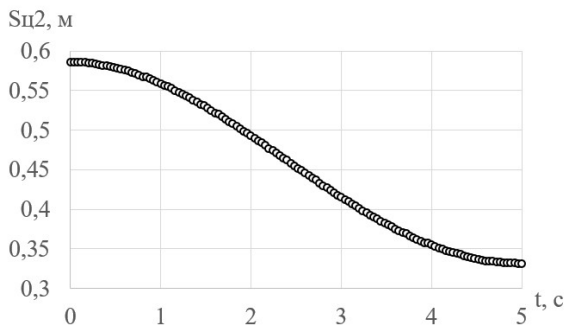


Рис. 6. Показания виртуального датчика перемещения штока второго гидроцилиндра (собственная разработка авторов)

Перемещение штока третьего гидроцилиндра DE составило 0,05 м. Управляя гидроцилиндрами DE и AB, рабочий орган располагается по осям OX, OY на требуемые вылет и высоту. Характеристика перемещения показана на рис. 7.

Перемещение штока четвертого гидроцилиндра FG составило 0,002 м. Шток гидроцилиндра выполняет функцию шатуна, приводя в движение зубчатое зацепление с передаточным отношением $u = 0,4$.

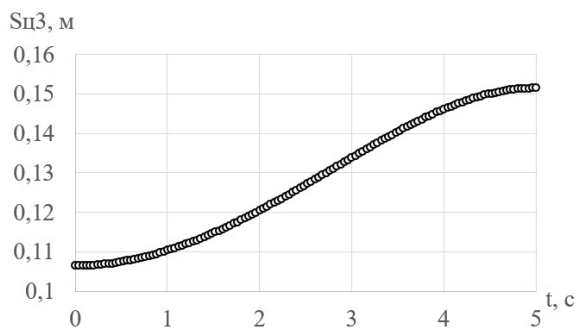


Рис. 7. Показания виртуального датчика перемещения штока третьего гидроцилиндра (собственная разработка авторов)

Шарнир крепления штока на зубчатом колесе проходит через нижнюю мертвую точку и возвращается обратно, что соответствует полученным значениям перемещения с виртуального датчика (рис. 8).

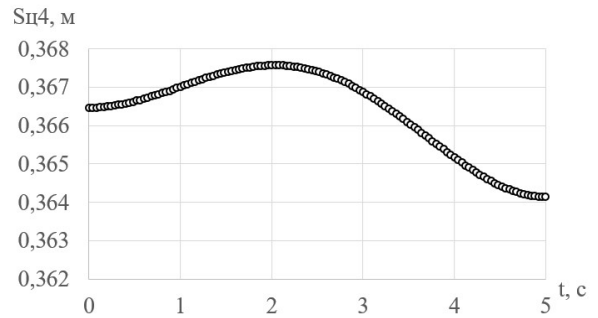


Рис. 8. Показания виртуального датчика перемещения штока четвертого гидроцилиндра (собственная разработка авторов)

Полученные на рис. 5, 6, 7, 8 значения перемещения штоков гидроцилиндров представляют собой требуемые воздействия оператора на гидроцилиндры, которые необходимо выполнить для перевода рабочего органа обрезчика из транспортного положения в рабочее. Целесообразно заложить полученные значения перемещения в автоматизированный механизм, который по нажатию одной кнопки выполнит данную работу.

Для контроля результатов управляющих воздействий нами были установлены виртуальные датчики на рабочем органе.

Показания датчика координаты Y для точки R приведены на рис. 9.

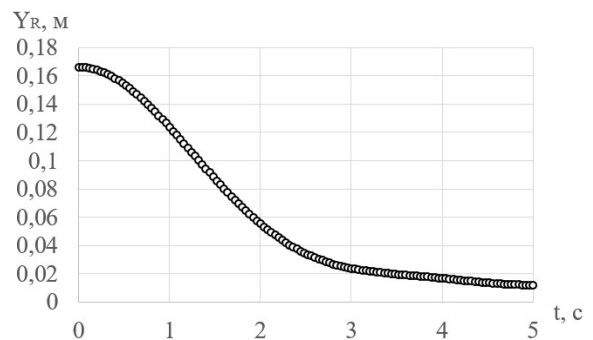


Рис. 9. Показания виртуального датчика координаты Y точки R (собственная разработка авторов)

Из графика следует, что в транспортном положении точка R (см. рис. 2) находилась на высоте 1,56 м, а после управляющего воздействия переместилась в рабочее положение (см. рис. 3) на высоту 0,012 м.

Управляющие воздействия производились параллельно, поэтому вылет координаты X точки R за счет поворота колонны компенсировался поворотом стрелы и разворотом на 90° рабочего органа. Перемещение координаты X составило $0,005$ м, а сама координата изменилась с $-0,742$ м в транспортном положении до $-0,737$ м в рабочем положении (рис. 10).

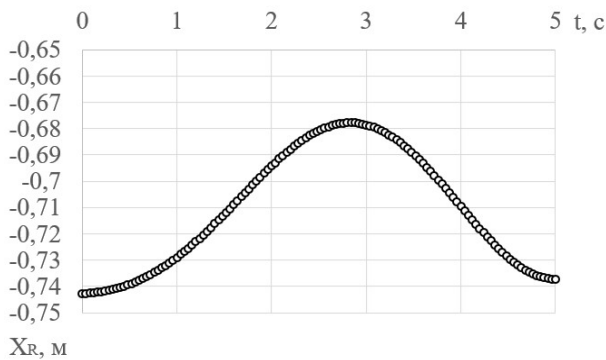


Рис. 10. Показания виртуального датчика координаты X точки R (собственная разработка авторов)

Аналогично были получены зависимости координат от времени для точки L . Для наглядной демонстрации перемещения рабочего органа в вертикальной плоскости построим зависимости координат X от Y для точки L (рис. 11).

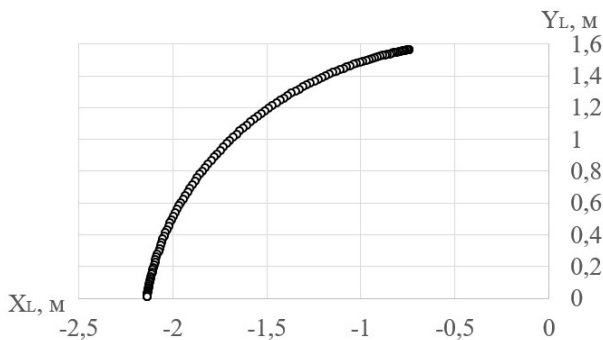


Рис. 11. Перемещение точки L рабочего органа в вертикальной плоскости (собственная разработка авторов)

Из рис. 11 следует, что точка L движется в плоскости XOY по дуге из верхнего положения, соответствующего транспортному, в нижнее левое (относительно хода движения машины).

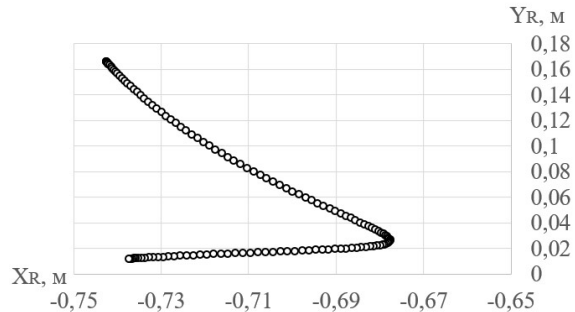


Рис. 12. Перемещение точки R рабочего органа в вертикальной плоскости (собственная разработка авторов)

Из рис. 12 следует, что точка L движется в плоскости XOY незначительно, изменяя свое положение из верхнего положения, соответствующего транспортному, в нижнее левое (относительно хода движения машины).

Выводы

1. На основании полученной имитационной модели были установлены управляющие воздействия, которые позволяют перевести рабочий орган из транспортного в рабочее положение.
2. Для предложенной конструкции обрезчика ветвей определены рабочая зона резания ($1,4$ м) и траектории движения рабочего органа.
3. Найденные управляющие воздействия могут быть использованы как входные параметры для моделирования обрезчика в других средах и для создания устройства, автоматизирующего работу оператора обрезчика.

Библиографический список

1. Гидроманипуляторы и лесное технологическое оборудование: монография / З. К. Емтыль, И. М. Бартнев, М. В. Драпалюк [и др.] ; под ред. И. М. Бартенева. – Москва : ФЛИНТА, Наука, 2011. – 408 с.
2. Бухтояров, Л. Д. Автоматизированный привод для управления ручными гидрораспределителями / Л. Д. Бухтояров, М. Н. Лысыч, Р. В. Мирзаханов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сб. науч. трудов по матер. междунар. заочной научно-практической конференции. – Воронеж, 2015. – № 7, ч. 1 (18-1). – С. 187–190.
3. Панченко, А. И. Основные направления гидрофикации мобильной техники / А. И. Панченко, А. А. Волошина, Ю. П. Обернихин // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2013. – № 13. – Т. 6. – С. 3–19.
4. An energy-saving nonlinear position control strategy for electro-hydraulic servo systems / K. Baghestan, S. Rezaei, H. Talebi, M. Zareinejad // ISA Transactions. – 2015. – P. 268–279.
5. Variable structure methods in hydraulic servo systems control / A. Bonchis, P. Corke, D. Rye, Q. Ha // Automatica. – 2001. – No. 4 (37). – P. 589–595.
6. An electro-hydraulic servo control system re-search for CFETR blanket RH / C. Chen, H. Tang, S. Qi [et al.] // Fusion Engineering and Design. – 2014. – No. 11. – P. 2806–2813.
7. Keles, O. Theoretical and experimental investigation of a pulse-width modulated digital hydraulic position control system / O. Keles, Y. Ercan // Control Engineering Practice. – 2002. – No. 6. – P. 645–654.
8. Lee, J. Design and experimental evaluation of a robust position controller for an electrohydrostatic actuator using adaptive antiwindup sliding mode scheme / J. Lee, S. Park, J. Kim // The Scientific World Journal. – 2013. – P. 1–16.
9. Behavioural prediction of hydraulic step-up switching converters / V. De Negri, P. Wang, A. Plummer, D. Johnston // International Journal of Fluid Power. – 2014. – No. 1 (15). – P. 1–9.
10. Sirouspour, M. R. On the nonlinear control of hydraulic servo-systems / M. R. Sirouspour, S. E. Salcudean // Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on. – 2000. – Vol. 2. – P. 1276–1282.

References

1. Emtyl Z.K., Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Tatarenko A.P., Bukhtoyarov L.D. *Gidromanipulyatory i lesnoe tekhnologicheskoe oborudovanie* [Hydromanipulators and the wood process equipment]. Moscow, 2011, 408 p. (in Russian).
2. Bukhtoyarov L.D., Lysych M.N., Mirzekhanov R.V. *Avtomatizirovanniy privod dlya upravleniya ruchnymi gidroraspredelitelnyami* [The automated drive for management of manual hydrodistributors]. *Aktual'nye Napravleniya Nauchnykh Issledovaniy XXI Veka: Teoriya I Praktika* [Actual Directions of Scientific Researches of the XXI-st century: the Theory And Practice]. Voronezh, 2015, no. 7-1 (18-1) (3), pp. 187-190 (in Russian).
3. Panchenko A.I., Voloshina A.A., Obernikhin Yu.P. (2013) *Osnovnye napravleniya gidrofikatsii mobil'noy tekhniki* [The basic directions hydraulic the mobile technics]. *Pratsi Tavriys'kogo derzhavnogo agrotekhnologichnogo universitetu* [Works of Tavrijsky state agrotechnical university], no. 13, vol. 6, pp. 3-19 (in Russian).
4. Baghestan K., Rezaei S., Talebi H., Zareinejad M. (2015) An energy-saving nonlinear position control strategy for electro-hydraulic servo systems. *ISA Transactions*, pp. 268-279.
5. Bonchis A., Corke P., Rye D., Ha Q. (2001) Variable structure methods in hydraulic servo systems control. *Automatica*, no. 4 (37), pp. 589-595.
6. Chen C., Tang H., Qi S. (et al.) (2014) An electro-hydraulic servo control system research for CFETR blanket RH. *Fusion Engineering and Design*, no. 11, pp. 2806-2813.

7. Keles O., Ercan Y. (2002) Theoretical and experimental investigation of a pulse-width modulated digital hydraulic position control system. *Control Engineering Practice*, no. 6, pp. 645-654.

8. Lee J., Park S., Kim J. (2013) Design and experimental evaluation of a robust position controller for an electrohydraulic actuator using adaptive antiwindup sliding mode scheme. *The Scientific World Journal*, pp. 1-16.

9. De Negri V., Wang P., Plummer A., Johnston D. (2014) Behavioural prediction of hydraulic step-up switching converters. *International Journal of Fluid Power*, no. 1 (15), pp. 1-9.

10. Sirouspour M.R., Salcudean S.E. (2000) On the nonlinear control of hydraulic servo-systems. *Robotics and Automation*, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference, vol. 2, pp. 1276-1282.

Сведения об авторах

Бартенева Иван Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru.

Бухтояров Леонид Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: vglta-mlx@yandex.ru.

Попиков Виктор Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: kafedra.laip@inbox.ru.

Придворова Анастасия Викторовна – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: anastasija.pridvorova@gmail.com.

Information about authors

Bartenev Ivan Mikhailovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru.

Bukhtoyarov Leonid Dmitrievich – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: vglta-mlx@yandex.ru.

Popikov Viktor Petrovich – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Landscape Architecture and Soil Science, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: kafedra.laip@inbox.ru.

Pridvorova Anastasiya Viktorovna – post-graduate student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: anastasija.pridvorova@gmail.com.

К ВОПРОСУ МЕХАНИЗАЦИИ ВЫСЕВА ДРАЖИРОВАННЫХ ЛЕСНЫХ СЕМЯН

доктор технических наук, профессор **И.М. Бартнев**

доктор технических наук, профессор **М.В. Драпалюк**

аспирант **Н.О. Ушаков**

кандидат технических наук, доцент **А.И. Новиков**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

Производство лесного посадочного материала включает множество технологических процессов, обеспечивающих впоследствии выход конечного продукта. Одним из основных процессов является механизированный высев. Выбор технологии и технических средств для высева лесных семян формируется на основании аналитической информации о типе участка, структуре почв, способах подготовки и высева семян в науке и практике искусственного лесовосстановления. Основанием для проведения исследований является необходимость нахождения оптимальной конструкции прототипа сеялки для механизированного высева дражированных семян, удовлетворяющих требованиям пониженной энергоемкости и повышенной экологической безопасности. В качестве метода исследования использовался систематический и патентный поиск, обеспечивающий качественный и сбалансированный отбор релевантных документов. Установлено, что использование того или иного технологического процесса механизированного высева дражированных семян в структуре затрат на искусственное лесовосстановление должно складываться в зависимости от геоморфологии восстанавливаемой площади, структуры, каменистости и влажности почв, способов подготовки почв и способов высева семян. Установлено, что наиболее эффективным размещением при высеве будет широкострочное, строго параллельное на дне канавок, при котором дражированные семена входят в плотный контакт с уплотненной почвой, находящейся постоянно во влажном состоянии за счет капиллярного поступления воды, а возвращенный верхний слой играет роль мульчи, предотвращающей испарение влаги и, следовательно, создаются оптимальные условия для всхожести семян и развития сеянцев. Тем не менее, в дальнейшем необходимо ответить на следующие вопросы: насколько согласованы мнения ученых о целесообразности использования наземного механизированного высева? Каковы априори основные критерии, влияющие на эффективность параметров точного высева дражированных семян?

Ключевые слова: механизированный высев, сеялка, сошник, лесовосстановление, лесные дражированные семена, высевающий аппарат

SOWING MECHANIZATION OF DRESSED FOREST SEEDS

DSc (Engineering), Professor **I.M. Bartenev**

DSc (Engineering), Professor **M.V. Drapalyuk**

post-graduate student **N.O. Ushakov**

PhD (Engineering), Associate Professor **A.I. Novikov**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

Production of forest planting material includes many technological processes that subsequently provide the output of the final product. One of the main processes is mechanized sowing. The choice of technology and technical tools for sowing forest seeds is formed on the basis of analytical information about the type of plot, soil structure, methods of preparing and sowing seeds in science and practice of artificial reforestation. The basis for research is the need to find the optimal design of the prototype seeder for the mechanized sowing of dressed seeds that meet the requirements of low energy consumption and increased environmental safety. Systematic and patent search has been used as a research method, providing high-quality and balanced selection of relevant papers. It has been established that the use of one or another technological process of mechanized sowing of dressed seeds in the cost structure for artificial reforestation should be developed depending on the geomorphology of the recovered area, structure, stoniness, soil moisture, soil preparation methods and seed sowing methods. It has been established that the most effective placement during sowing will be a wide-line, strictly parallel at the bottom of the grooves, in which dressed seeds come into tight contact with compacted soil, which is constantly wet due to capillary water, and the returned upper layer plays the role of mulch preventing evaporation moisture. Therefore, optimal conditions are created for seed germination and seedling development. Nevertheless, in the future it is necessary to answer the following questions: how agreed are the opinions of scientists on the feasibility of using ground mechanized seeding? What are a priori the main criteria affecting the effectiveness of the parameters for the precise sowing of dressed seeds?

Keywords: mechanized sowing, seeder, furrow opener, reforestation, dressed forest seeds, sowing machine

Введение

Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года, утвержденная 20 сентября 2018 г. Распоряжением Правительства РФ № 1989-р, предусматривает «реализацию комплекса мер по развитию питомнических хозяйств и развитие материально-технической базы путем обеспечения модернизации парка лесохозяйственных машин и оборудования [1]» в современном лесовосстановлении, что «предполагает сосредоточение усилий научного, производственного и административного контингента в установлении взаимосвязи «посадочный материал – питомник – арендаторы лесных земель [2]» и разработку «*quality management techniques for forest regeneration in privately-owned forests*¹ [3]».

¹ (англ.) методов управления качеством лесовосстановления в арендованных лесах.

Опыт стран с развитым лесным хозяйством показывает, что баланс между выбором технологического процесса посадки семян [3–13] и прямого высева [3, 14–20] для технологии восстановления лесов постепенно, но неуклонно смещается в сторону высева. Так, в Финляндии при искусственном лесовосстановлении «*the proportion of planting decreased from 82 to 74 %, and the proportion of direct seeding increased from 18 to 26 %*² [3]». Сравнение основных факторов, влияющих на результаты искусственного лесовосстановления при использовании механизированного наземного высева (в среднем более 80 % от всего объема засеянных площадей в мире [3]), показало, что наибольшее влияние на эффективность технологического процесса ока-

² (англ.) доля создания лесных культур посадкой уменьшилась с 82 до 74 %, а доля прямого высева увеличилась с 18 до 26 %.

зывают тип почв и способы её подготовки. В этой связи интересен опыт Финляндии в начале XXI века: инвентаризация восстановленных за 7 лет участков посевом семян сосны обыкновенной общей площадью 4948 га (выход сеянцев составил 3075 ± 1644 шт./га) показала, что наиболее распространенным способом обработки почвы было дискование (*disc trenching*) (77 %) [21–23], а механизация высева составила 58 % [3]. Для мелких лесных семян хвойных пород (сосны, лиственницы, ели) прямой посев статистически значим. Значимыми факторами являются тип участка, подготовка и структура почвы, способ посева, каменистость и влажность почвы. Каменистая почва уменьшила количество сеянцев на 30–32 % [3, 18, 24–26]. Переувлажненная почва, со своей стороны, сократила количество всходов на 31–33 % [3, 15, 18]. Дискование [23, 27–31] было наиболее распространенным методом подготовки почвы и использовалось в качестве эталонного. Отсутствие подготовки почвы уменьшило количество сеянцев на 44 % [3, 15, 18]. Частичная обработка почвы площадками, напротив, увеличила количество саженцев на 9 % [3, 24, 25]. Почти 90 % курганных участков были засеяны вручную, а остальные участки засеивались сеялкой, которая крепилась к экскаватору [23]. Другие способы подготовки почвы не давали статистически значимых отличий от дискования.

Немаловажным фактором для качественного механизированного высева семян является подготовка семенного материала [32–35]. С точки зрения рабочих органов сеялки, взаимодействующих с семенами, последние должны обладать выровненными геометрическими размерами, определенной влажностью и сыпучестью. От правильного планирования проектов [36, 37] разработки технологического процесса предпосевной обработки, связанного с использованием оптоэлектронных технологий, зависит степень выхода посадочного материала с единицы площади. Несмотря на широко используемое разделение семян по размерам на решетных установках (ВСС АВ, Швеция), весьма перспективным представляется дражирование семян [38], которое хотя и увеличивает затраты на предпосевную подготовку, но одновременно снижает риски повреждения семян, заражения вредителями и болезнями, а также

риски низкой энергии прорастания и всхожести.

Цель исследования – на основании существующих способов наземного механизированного высева лесных семян рассмотреть варианты развития технологического процесса высева дражированных лесных семян и предложить новые способы и устройства как для лесных питомников, так и для лесокультурных площадей.

Методы исследования основаны на систематическом поиске, подробно представленном в работе [39], и унифицированной методике поиска патентной информации, изложенной в работе [40].

Результаты и обсуждение

Предпосылками детального изучения процессов механизированного высева, особенно в отношении дражированных лесных семян, служат как спрос на более высокое качество исполнения технологических операций предпосевной подготовки [41, 42], характеризующееся ростом энергосбережения, и, соответственно, высокое качество посадочного материала [43], так и переход к применению специализированного оборудования в лесном хозяйстве [33, 44].

Технологический процесс наземного высева лесных семян традиционно включает операции сдвига верхнего слоя почвы с образованием базовой поверхности, нарезки борозды на заданную глубину от базовой поверхности, высева и заделки лесных семян. Для получения качественного посадочного материала в обоснованно короткие сроки необходимо снижать энергоемкость выполнения этих операций за счет проектирования и разработки новых конструкций входящих в них элементов.

Операция сдвига верхнего слоя – самая энергоемкая технологическая операция, зависящая от типа почвы и состояния её поверхности. Обычно после сдвига на базовой поверхности образуются почвенные валки из влажного слоя почвы с обеих сторон борозды, которые после высева возвращаются в борозду (Авторское свидетельство СССР № 820695, А01С7/00, опублик. 25.01.1981, бюл. № 14). Технически операция осуществляется с помощью планировщика для сдвига верхнего подсушенного слоя почвы и образования базовой поверхности [45, 46].

Операция нарезки борозды (борозд) фокусирует на себе все последующие операции по уходу за

сеянцами, способность рационального движения агрегатов. Операция определяет как оптимальное количество строк и расстояние между ними, так и глубину нарезки и степень уплотненности борозды. Так, при широкострочном высеве в сравнении с узкорядным увеличивается энергия прорастания мелких семян, всходы появляются дружнее и раньше на 2-9 дней, грунтовая всхожесть повышается на 20 %, выход посадочного материала увеличивается в 1,5-2 раза [47]. По другим исследованиям установлено, что «уплотнение дна борозды способствует быстрому прорастанию семян, так как в этом случае вода поднимается к семенам из нижних слоев почвы [48]».

Операции высевы напрямую связаны с качеством предпосевной обработки семян, их морфологическими и динамическими параметрами. Их вклад в энергоемкость технологического процесса минимален, однако от уровня точности (шага и глубины заделки, расстояния между строками при многострочном высеве) зависит рациональное выполнение последующих технологических процессов ухода и выкопки сеянцев, а также их рост и развитие на ювенильной стадии онтогенеза [49].

Операция заделки семян, как правило, осуществляется с помощью загортачей или катков. Зачастую операцию заделки семян производят путем обрушения стенок борозды, в результате чего происходит перемешивание подсушенных верхних и влажных нижних почвенных частиц, приводящее к изреженным всходам и неравномерному развитию растений (Авторское свидетельство СССР № 371883, кл. А01С7/00, 1970), что противоречит агротехническим требованиям.

Существующий технологический процесс содержит достаточно большое число операций по взаимодействию рабочих органов сеялки с почвой, технологически и экономически не оправданных:

- сдвиг верхнего подсушенного слоя в обе стороны относительно линии прохода;
- образование борозды;
- образование боковых валков из влажной почвы;
- возврат ранее сдвинутого верхнего подсушенного слоя и выравнивание его до уровня дневной поверхности почвы, выполняемые отдельными рабочими органами, усложняющими конструкцию и увеличивающими габариты сеялки.

Совмещение технологических операций, согласно собственной разработке авторов, в технологическом процессе высевы дражированных семян осуществляется следующим образом (рис. 1, а и б). При поступательном движении в почве на глубине “а” вырезается слой U-образной формы и поднимается на высоту “h”, образуя пустоту 3, то есть борозду. При этом подсушенный 1 и влажный нижний 2 слои не меняют своего положения относительно друг друга и не перемешиваются между собой. В образовавшуюся пустоту 3 со стороны ее боковых стенок под поднятый слой почвы подаются семена, которые укладываются на дно. Затем поднятый слой почвы под действием собственной силы тяжести возвращается в борозду, т. е. на прежнее место, заделывая семена влажным слоем. Техническая реализация универсальной технологической операции достигается применением устройства в виде U-образной скобы (рис. 2), установленной под острым углом вхождения в почву α, имеющей в стойках 1 полые каналы 2 в виде трубок, оканчивающихся в нижней части отверстиями 3 для выхода семян, которые укладываются на дно борозды и заделываются почвой, поступающей с наклонного ножа 4. В результате необходимость и целесообразность челночного перемещения верхнего подсушенного слоя «туда и обратно» в горизонтальной плоскости, образование почвенных валков при образовании борозды и обратное перемещение их в борозду заменяется на выполнение всего лишь одной операции – вырезание слоя почвы на заданной глубине посева семян и его подъем над дном борозды, а заделка борозды с размещенными на дне семенами производится в результате свободного опускания его под действием собственной силы тяжести без перемешивания почвенных слоев, то есть заделка семян осуществляется влажным слоем почвы, что обеспечивает их всхожесть и развитие в соответствии с предъявляемыми требованиями.

Комплекс требований к выполнению всех операций технологического процесса высевы дражированных семян мог быть реализован с помощью сеялки для широкострочного посева семян, которая включает раму, навеску, бункер для семян,

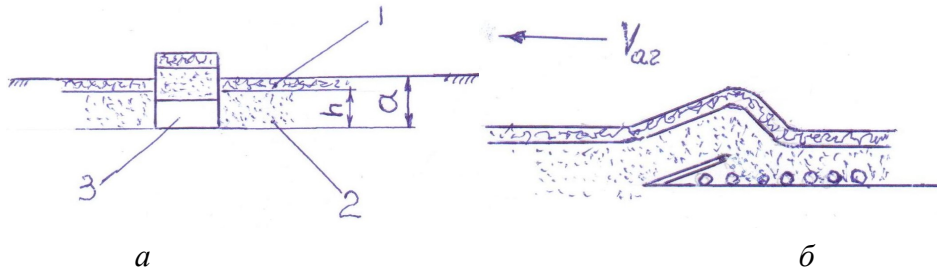


Рис. 1. Схема образования борозды в поперечной (а) и продольной (б) плоскостях (собственная разработка авторов): 1 – подсушенный слой; 2 – влажный нижний слой; 3 – борозда

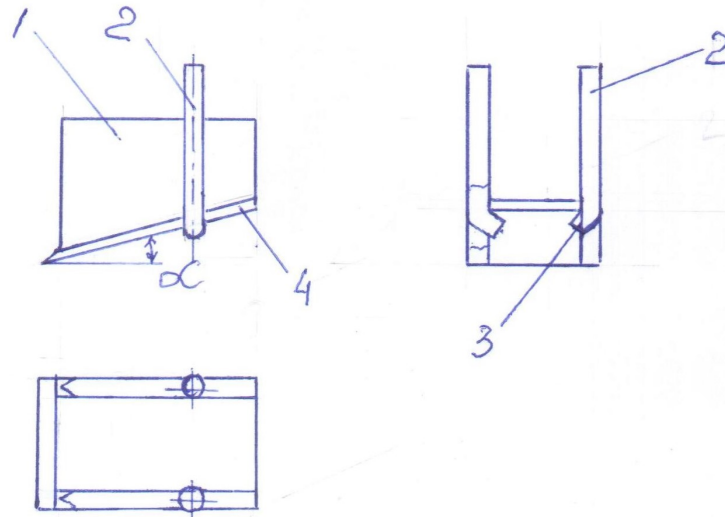


Рис. 2. Универсальная скоба для одновременного высева и заделки дражированных лесных семян (собственная разработка авторов): 1 – стойки; 2 – семяпровод в виде полый трубки; 3 – отверстие для выхода семян; 4 – наклонный нож

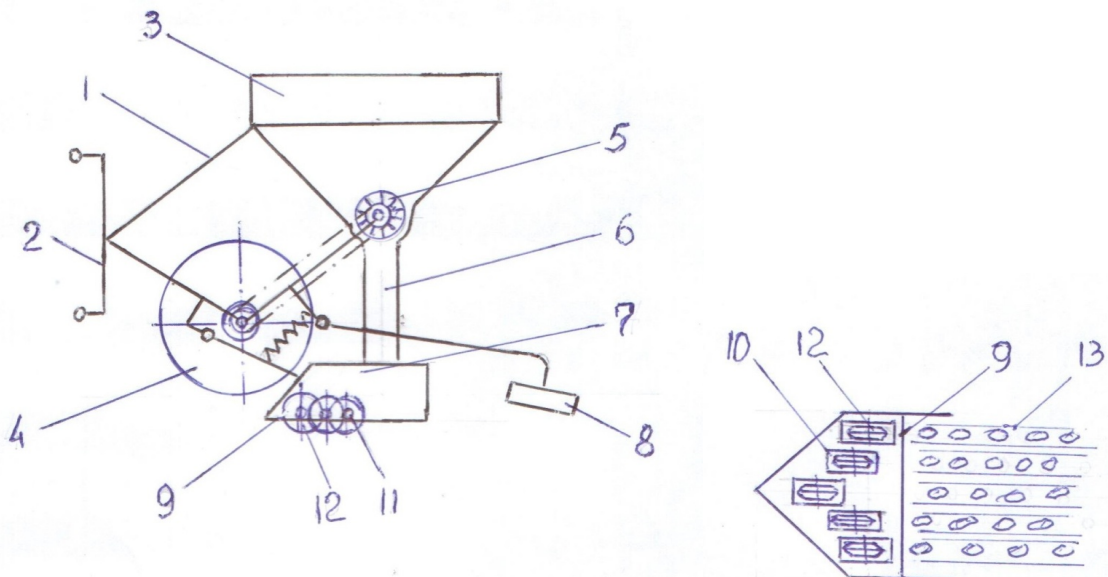


Рис. 3. Функциональная схема прототипа сеялки для высева дражированных лесных семян (а) и сошник (б) с дополнительным устройством для образования канавок на дне борозды и уплотнения почвы в них (собственная разработка авторов): 1 – рама; 2 – механизм навески; 3 – посевной бункер; 4 – опорное колесо; 5 – высевая аппарат; 6 – семяпровод; 7 – коробчатый сошник; 8 – заделывающий рабочий орган (загортач или каток); 9 – днище; 10 – прорези; 11 – ось; 12 – катки с коническим ободком; 13 – канавки

сошник, планировщик, высевающий аппарат, распределитель, семяпровод, заделывающие рабочие органы [50]. Однако семена укладываются на рыхлое дно борозды неравномерно и хаотично и заделываются рыхлой почвой, поверхностный слой которой уплотняется заравнивающим устройством. Отсутствие уплотнения дна борозды исключает хорошую подачу по почвенным капиллярам воды из нижних влажных слоев. Уплотнение поверхностного слоя ведет к потере влаги, уходящей при испарении в атмосферу. Все это ведет к большой разнородности выращиваемых сеянцев с разной степенью развития по размерам, а также разной жизнеспособностью в культурах.

Поэтому для дражированных лесных семян необходимо спроектировать прототип и обосновать его параметры и режимы работы, учитывающие вышеприведенные особенности. Прототип сеялки должен содержать раму 1, механизм навески 2, посевной бункер 3, опорное колесо 4, высевающий аппарат 5, семяпровод 6, коробчатый сошник 7 и заделывающий рабочий орган 8. В нижней передней части коробчатого сошника (рис. 3) должно быть выполнено днище 9 с прорезями 10, в которых на горизонтальных осях вращения размещены в шахматном порядке катки 12 с коническим ободком, образующие канавки 13 с уплотненными наклонными стенками и дном. При этом угол наклона боковых стенок канавок должен быть больше угла трения семян о поверхность почвы (угол трения подбирается для схожих по морфологическим параметрам семян). При этом предполагаемый процесс высева дражированных семян будет осуществляться следующим образом. При поступательном движении посевного агрегата сошник заглубляется в почву на заданную глубину, образует борозду путем сдвига верхнего подсушенного слоя почвы в обе стороны, катки в процессе своего вращения образуют уплотненные клинообразные в поперечном сечении канавки, создавая этим самым рифленую поверхность дна борозды. Семена, подаваемые

высевающим аппаратом, поступают по семяпроводу на рифленую поверхность дна борозды. Те семена, которые поступают на вершину или боковую поверхность канавки, скатываются в канавки. Таким образом, семена укладываются строго параллельными рядами на дно канавок, т. е. их размещение в широкой строчке упорядочивается, и входят в плотный контакт с уплотненной почвой, находящейся постоянно во влажном состоянии за счет капиллярного поступления воды, а возвращенный верхний слой играет роль мульчи, предотвращающей испарение влаги, и, следовательно, создаются оптимальные условия для всхожести семян и развития ростков.

Заключение

1. С учетом современного уровня развития технологии наземного высева необходимо разработать комплекс технических средств для высева лесных семян, в том числе и дражированных. В настоящее время данное направление интенсивно разрабатывается авторами совместно с российскими коллегами. Поданы две заявки на патент РФ. Предварительный анализ конструкции показывает, что себестоимость лабораторного образца сеялки может составить не более 200-220 тыс. руб., мелкосерийного – не более 150-170 тыс. руб.

2. Необходимо разработать конструкцию высевающего аппарата сеялки и провести исследование априорных моделей данного устройства с учетом морфологических особенностей семян.

Благодарности

Отдельную благодарность авторы выражают кафедре механизации лесного хозяйства и проектирования машин ВГЛТУ за предоставленную возможность проводить исследования в лабораториях кафедры и ценные замечания в методических аспектах.

Библиографический список

1. Правительство РФ. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года : распоряжение № 1989-р от 20.09.2018. URL: <http://static.government.ru/media/files/cA4eYSe0MOBgNpm5hSavTdIxID77KCTL.pdf> (accessed: 30.01.2020).
2. Драпалюк, М. В. Анализ операционных механизированных технологий сепарации семян при искусственном лесовосстановлении / М. В. Драпалюк, А. И. Новиков // Лесотехнический журнал. – 2018. – Т. 8. – № 4. – С. 207–220.
3. Kankaanhuhta, V. Variation in the results of Norway Spruce planting and Scots pine direct seeding in privately-owned forests in Southern Finland / V. Kankaanhuhta, T. Saksa, H. Smolander // *Silva Fenn.* – 2009. – Vol. 43. – № 1. – P. 51–70.
4. Amounts of logging residues affect planting microsites: A manipulative study across northern forest ecosystems / A. Trottier-Picard [et al.] // *For. Ecol. Manage.* – 2014. – Vol. 312. – P. 203–215.
5. Post-fire ponderosa pine regeneration with and without planting in Arizona and New Mexico / J. Ouzts [et al.] // *For. Ecol. Manage. Elsevier.* – 2015. – Vol. 354. – P. 281–290.
6. Early performance of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* – a comparison between seedling size, species and geographic location of the planting site / K. Johansson [et al.] // *Scand. J. For. Res. Taylor and Francis AS.* – 2014. – Vol. 30. – № 5. – P. 1–39.
7. Сохранность и рост культур сосны, созданных посадочным материалом с закрытой корневой системой в условиях Карелии / А. И. Соколов, В. А. Харитонов, А. Н. Пеккоев, Т. И. Кривенко // *Известия вузов – Лесной журнал.* – 2015. – № 6 (348). – С. 46–56.
8. Height-Diameter Relationships for Different Genetic Planting Stock of Loblolly Pine at Age 6 / S. Egbäck [et al.] // *For. Sci. Society of American Foresters.* – 2015. – Vol. 61. – № 3. – P. 424–428.
9. Ward, J. S. Effects of planting stock quality and browse protection-type on height growth of northern red oak and eastern white pine / J. S. Ward, M. P. Gent, G. R. Stephens // *For. Ecol. Manage.* – 2000. – Vol. 127. – № 1–3. – P. 205–216.
10. Оводов, А. В. Качество древесины сосны в насаждениях, созданных посевом и посадкой : специальность 06.03.01 «Лесные культуры, селекция, семеноводство» : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / Оводов Александр Владимирович. – Архангельск, 2010. – 17 с.
11. Luoranen, J. Autumn versus spring planting: the initiation of root growth and subsequent field performance of Scots pine and Norway spruce seedlings / J. Luoranen // *Silva Fenn.* – 2018. – Vol. 52. – № 2.
12. Jäärats, A. Growth parameters of coniferous planting stock influenced by principal growing technologies in Estonia / A. Jäärats, A. Sims, H. Seemen // *Scand. J. For. Res.* – 2010. – Vol. 25. – № sup8. – P. 92–100.
13. Luoranen, J. Field performance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings planted in disc trenched or mounded sites over an extended planting season / J. Luoranen, R. Rikala // *New For.* – 2013. – Vol. 44. – № 2. – P. 147–162.
14. Winsa, H. Effects of seed invigoration and microsite preparation on seedling emergence and establishment after direct sowing of *Pinus sylvestris* L. at different dates / H. Winsa, K. Sahlén // *Scand. J. For. Res.* – 2001. – Vol. 16. – № 5. – P. 422–428.
15. Derr, H. J. Direct-seeding pines in the South / H. J. Derr, W. F. J. Mann // *Agriculture Handbook. Washington: Forest Service, USDA.* – 1971. – Vol. 391. – 73 p.
16. Wennström, U. Seedling establishment and growth after direct seeding with *Pinus sylvestris*: effects of seed type, seed origin, and seeding year / U. Wennström, U. Bergsten, J.-E. Nilsson // *Silva Fenn.* – 2007. – Vol. 41. – № 2. – P. 299–314.

17. Erefur, C. Establishment of direct seeded seedlings of Norway spruce and Scots pine: Effects of stand conditions, orientation and distance with respect to shelter tree, and fertilisation / C. Erefur, U. Bergsten, M. de Chantal // *For. Ecol. Manage.* – 2008. – Vol. 255. – № 3–4. – P. 1186–1195.
18. Direct Seeding Black Spruce and Jack Pine: A Field Guide for Northern Ontario / M. J. Adams [et al.]. – 2005. – 528 p.
19. Reque, J. A. Designing acorn protection for direct seeding of quercus species in high predation areas / J. A. Reque, E. Martin // *For. Syst. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentacion.* – 2015. – Vol. 24. – № 1. – P. 018.
20. Выращивание посадочного материала сосны обыкновенной с использованием безрешетной технологии сортирования семян / Л. Т. Свиридов, А. Д. Голев, А. И. Новиков [и др.] // *Интеграция фундаментальной науки и высшего лесотехнического образования по проблемам ускоренного воспроизводства, использования и модификации древесины : матер. междунар. науч.-практ. конференции : в 2 т.* – Воронеж : Воронеж. гос. лесотехн. акад., 2000. – Т. 2. – С. 284–289.
21. The impact of disc settings and slash characteristics on the Bracke three-row disc trencher's performance / B. T. Ersson [et al.] // *Int. J. For. Eng.* – 2017. – Vol. 28. – № 1. – P. 1–9.
22. Soil organic matter and nitrogen cycling in response to harvesting, mechanical site preparation, and fertilization in a wetland with a mineral substrate / J. W. McLaughlin [et al.] // *For. Ecol. Manage.* – 2000. – Vol. 129. – № 1–3. – P. 7–23.
23. Mechanical site preparation for forest restoration / M. Löf [et al.] // *New For.* – 2012. – Vol. 43. – № 5–6. – P. 825–848.
24. Mexal, J. G. Bareroot Seedling Culture / J. G. Mexal, D. B. South. – 1991. – P. 89–115.
25. Pyke, D. A. Does Seeding After Wildfires in Rangelands Reduce Erosion or Invasive Species? / D. A. Pyke, T. A. Wirth, J. L. Beyers // *Restor. Ecol.* – 2013. – Vol. 21. – № 4. – P. 415–421.
26. Forest Regeneration Manual / eds. M. L. Duryea, P. M. Dougherty. – Dordrecht : Springer Netherlands, 1991. – Vol. 36.
27. Dumins, K. Forest regeneration quality – factors affecting first year survival of planted trees / K. Dumins, D. Lazdina. – 2018. – P. 53–58.
28. Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review / U. Sikström [et al.] // *Silva Fenn.* – 2020. – Vol. 54. – № 2.
29. Hjelm, K. The demand of hybrid aspen (*Populus tremula* × *P. tremuloides*) on site conditions for a successful establishment on forest land / K. Hjelm, L. Rytter // *Silva Fenn.* – 2018. – Vol. 52. – № 5, id 10036.
30. Effects of site preparation treatments on early growth and survival of planted longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) seedlings in North Carolina / B. O. Knapp [et al.] // *For. Ecol. Manage.* – 2006. – Vol. 226. – № 1–3. – P. 122–128.
31. Site Preparation Techniques for Forest Restoration / M. Löf [et al.] // *Restoration of Boreal and Temperate Forests, Second Edition.* – 2016. – P. 85–102.
32. Новиков, А. И. Исследование спектрометрических параметров семенной кожуры сосны обыкновенной в ИК-диапазоне / А. И. Новиков, В. В. Саушкин // *Лесотехнический журнал.* – 2018. – Т. 8. – № 3. – С. 30–37.
33. Бартенев, И. М. Совершенствование технологий и средств механизации лесовосстановления / И. М. Бартенев, М. В. Драпалюк, В. И. Казаков. – Москва : Флинта, 2013. – 208 с.
34. Guideline to Collecting Cones of B.C. Conifers (interim) / R. C. Dobbs [et al.]. – Victoria, Canada : Pacific Forest Research Centre, 1974. – 96 p.
35. Edwards, D. G. W. Collection, processing, testing, and storage of true fir seeds – a review / D. G. W. Edwards // *Proceedings of the biology and management of true fir in the Pacific Northwest Symposium.* – Washington, USA : USDA Forest Service, 1982. – P. 113–137.
36. Planning the implementation of special projects / T. P. Belyaeva [et al.] // *Radiation resistance of electronic systems “Resistance-2011.”* – Moscow, 2011. – P. 239–241.

37. Соколов, С. В. Новые оптоэлектронные системы экспресс-анализа семян в лесохозяйственном производстве / С. В. Соколов, А. И. Новиков // Лесотехнический журнал. – 2019. – Т. 9. – № 2. – С. 5–13.
38. Способы предпосевной подготовки семян и методика их моделирования / И. И. Бартев, О. А. Подвигина, Д. С. Гаврин, И. В. Подосинников // Лесотехнический журнал. – 2018. – Т. 8. – № 4. – С. 199–207.
39. Pullin, A. S. Guidelines for Systematic Review in Conservation and Environmental Management / A. S. Pullin, G. B. Stewart // *Conserv. Biol.* – 2006. – Vol. 20. – № 6. – P. 1647–1656.
40. Иванов, В. К. Унифицированная методика поиска патентной информации и обработки его результатов / В. К. Иванов, Н. В. Виноградова // Изобретательство. – 2014. – Т. 14. – № 12. – С. 23–32.
41. Новиков, А. И. Дисковые сепараторы семян в лесохозяйственном производстве : моногр. / А. И. Новиков. – Воронеж : ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2017. – 159 с.
42. Новиков, А. И. Экспресс-анализ лесных семян биофизическими методами / А. И. Новиков. – Воронеж : ВГЛТУ, 2018. – 128 с.
43. Ivetić, V. The role of forest reproductive material quality in forest restoration / V. Ivetić, A. I. Novikov // *For. Eng. J.* – 2019. – Vol. 9. – № 2. – P. 56–65.
44. Драпалюк, М. В. Перспективные технологии выращивания посадочного материала в лесных питомниках : моногр. / М. В. Драпалюк. – Воронеж, 2006. – 247 с.
45. Пошарников, Ф. В. Перспективы применения точного посева лесных семян в питомниках / Ф. В. Пошарников // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2000. – № 3. – С. 112–116.
46. Пошарников, Ф. В. Новые технологии и машины для посева лесных семян в питомниках : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесного хозяйства и лесозаготовок» : дис. ... д-ра техн. наук : защищена 21.05.1993 / Пошарников Феликс Владимирович. – Воронеж, 1993. – 530 с.
47. Пошарников, Ф. В. Лесные сеялки: теория и расчет / Ф. В. Пошарников. – Воронеж : ВГЛТА, 2007. – 267 с.
48. Эдельштейн, В. И. Овощеводство / В. И. Эдельштейн. – Москва : Сельхозгиз, 1953. – 324 с.
49. Novikov, A. I. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site / A. I. Novikov, V. Ivetić // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* – 2019. – Vol. 226. – P. 012043.
50. Пошарников, Ф. В. Новые способы и технологические средства для высокоэффективного посева лесных семян в питомнике / Ф. В. Пошарников // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2000. – № 3. – С. 105–112.

References

1. *Strategiya razvitiya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda* [Strategy of development of the forest complex of the Russian Federation till 2030]. URL: <http://static.government.ru/media/files/cA4eYSe0MObgNpm5hSavTdIxID77KCTL.pdf> (Accessed 28 March 2020).
2. Drapalyuk M.V., Novikov A.I. (2018) *Analiz operacionnyh mehanizirovannyh tehnologij separacii semjan pri iskusstvennom lesovosstanovlenii* [Analysis of operational mechanized technologies of seed separation under artificial forest restoration]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*, Vol. 8, no. 4, pp. 207-220 (in Russian).
3. Kankaanhuhta V., Saksa T., Smolander H. (2009) Variation in the results of Norway Spruce planting and Scots pine direct seeding in privately-owned forests in Southern Finland. *Silva Fenn.*, Vol. 43, no. 1, pp. 51-70.
4. Trottier-Picard A. (et al.) (2014) Amounts of logging residues affect planting microsites: A manipulative study across northern forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.*, Vol. 312, pp. 203-215.

5. Ouzts J. (et al.) (2015) Post-fire ponderosa pine regeneration with and without planting in Arizona and New Mexico. *For. Ecol. Manage. Elsevier*, Vol. 354, pp. 281-290.
6. Johansson K. (et al.) (2014) Early performance of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* – a comparison between seedling size, species and geographic location of the planting site. *Scand. J. For. Res. Taylor and Francis AS*, Vol. 30, no. 5, pp. 1-39.
7. Sokolov A.I. (et al.) (2015) *Sohrannost' i rost kul'tur sosny, sozdannyh posadochnym materialom s zakrytoj kornevoj sistemoj v uslovijah Karelii* [Preservation and Growth of Pine Cultivated by Ball-Rooted Planting Stock in Karelia]. *Lesnoy zhurnal*, no. 6 (348), pp. 46-56 (in Russian).
8. Egbäck S. (et al.) (2015) Height-Diameter Relationships for Different Genetic Planting Stock of Loblolly Pine at Age 6. *For. Sci. Society of American Foresters*, Vol. 61, no. 3, pp. 424-428.
9. Ward J.S., Gent M.P., Stephens G.R. (2000) Effects of planting stock quality and browse protection-type on height growth of northern red oak and eastern white pine. *For. Ecol. Manage.*, Vol. 127, no. 1-3, pp. 205-216.
10. Ovodov A.V. *Kachestvo drevesiny sosny v nasazhdeniyakh, sozdannykh posevom i posadkoy: avtoreferat dis. kand. s.-h. nauk* [The quality of pine wood in the plantations created by sowing and planting. PhD thesis]. Arkhangelsk, 2010, 17 p. (in Russian).
11. Luoranen J. (2018) Autumn versus spring planting: the initiation of root growth and subsequent field performance of Scots pine and Norway spruce seedlings. *Silva Fenn.*, Vol. 52, no. 2.
12. Jäärats A., Sims A., Seemen H. (2010) Growth parameters of coniferous planting stock influenced by principal growing technologies in Estonia. *Scand. J. For. Res.*, Vol. 25, no. sup8, pp. 92-100.
13. Luoranen J., Rikala R. (2013) Field performance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings planted in disc trenched or mounded sites over an extended planting season. *New For.*, Vol. 44, no. 2, pp. 147-162.
14. Winsa H., Sahlén K. (2001) Effects of seed invigoration and microsite preparation on seedling emergence and establishment after direct sowing of *Pinus sylvestris* L. at different dates. *Scand. J. For. Res.*, Vol. 16, no. 5, pp. 422-428.
15. Derr H.J., Mann W.F.J. *Direct-seeding pines in the South. Agriculture Handbook*. Washington: Forest Service, USDA, 1971, Vol. 391, 73 p.
16. Wennström U., Bergsten U., Nilsson J.-E. (2007) Seedling establishment and growth after direct seeding with *Pinus sylvestris*: effects of seed type, seed origin, and seeding year. *Silva Fenn.*, Vol. 41, no. 2, pp. 299-314.
17. Erefur C., Bergsten U., de Chantal M. (2008) Establishment of direct seeded seedlings of Norway spruce and Scots pine: Effects of stand conditions, orientation and distance with respect to shelter tree, and fertilization. *For. Ecol. Manage.*, Vol. 255, no. 3-4, pp. 1186-1195.
18. Adams M.J. (et al.) *Direct Seeding Black Spruce and Jack Pine: A Field Guide for Northern Ontario*, 2005, 528 p.
19. Reque J.A., Martin E. (2015) Designing acorn protection for direct seeding of quercus species in high predation areas. *For. Syst. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentacion*, Vol. 24, no. 1, p. 018.
20. Sviridov L.T. (et al.) *Vyrashchivanie posadochnogo materiala s ispol'zovaniem bezreshetnoy tekhnologii sortirovaniya semyan* [The cultivation of seedlings of Scots pine using a sieveless technology sorting of seeds]. *Integracija fundament. nauki i vysshego lesotekhnicheskogo obrazovanija po problemam uskoren. vosproizvodstva, ispol'zovanija i modifikacii drevesiny* [Integration of basic science and higher forestry education on the problems of accelerated reproduction, use and modification of wood]. Voronezh, 2000, Vol. 2, pp. 284-289 (in Russian).
21. Ersson B.T. (et al.) (2017) The impact of disc settings and slash characteristics on the Bracke three-row disc trencher's performance. *Int. J. For. Eng.*, Vol. 28, no. 1, pp. 1-9.
22. McLaughlin J.W. (et al.) (2000) Soil organic matter and nitrogen cycling in response to harvesting, mechanical site preparation, and fertilization in a wetland with a mineral substrate. *For. Ecol. Manage.*, Vol. 129, no. 1-3, pp. 7-23.
23. Löf M. (et al.) (2012) Mechanical site preparation for forest restoration. *New For.*, Vol. 43, no. 5-6, pp. 825-848.

24. Mexal J.G., South D.B. Bareroot Seedling Culture, 1991, pp. 89-115.
25. Pyke D.A., Wirth T.A., Beyers J.L. (2013) Does Seeding After Wildfires in Rangelands Reduce Erosion or Invasive Species? *Restor. Ecol.*, Vol. 21, no. 4, pp. 415-421.
26. Forest Regeneration Manual / eds. M.L. Duryea, P.M. Dougherty. Dordrecht: Springer Netherlands, 1991, Vol. 36.
27. Dumins K., Lazdina D. Forest regeneration quality – factors affecting first year survival of planted trees, 2018, pp. 53-58.
28. Sikström U. (et al.) (2020) Influence of mechanical site preparation on regeneration success of planted conifers in clearcuts in Fennoscandia – a review. *Silva Fenn.*, Vol. 54, no. 2.
29. Hjelm K., Rytter L. (2018) The demand of hybrid aspen (*Populus tremula* × *P. tremuloides*) on site conditions for a successful establishment on forest land. *Silva Fenn.*, Vol. 52, no. 5, id 10036.
30. Knapp B.O. (et al.) (2006) Effects of site preparation treatments on early growth and survival of planted longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) seedlings in North Carolina. *For. Ecol. Manage.*, Vol. 226, no. 1–3, pp. 122-128.
31. Löf M. (et al.) Site Preparation Techniques for Forest Restoration. Restoration of Boreal and Temperate Forests, Second Edition, 2016, pp. 85-102.
32. Novikov A.I., Saushkin V.V. (2018) *Issledovanie spektrometricheskikh parametrov semennoj kozhury sosny obyknovЕННОj v IK-diapazone* [Infrared range spectroscopy: the study of the pine seed coat parameters]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*, Vol. 8, no. 3, pp. 30-37 (in Russian).
33. Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Kazakov V.I. *Sovershenstvovanie tekhnologii i sredstv mekhanizatsii lesovosstanovleniya* [Improvement of technologies and means of mechanization of reforestation]. Moscow, 2013, 208 p. (in Russian).
34. Dobbs R.C. (et al.) Guideline to Collecting Cones of B.C. Conifers (interim). Victoria, Canada: Pacific Forest Research Centre, 1974, 96 p.
35. Edwards D.G.W. Collection, processing, testing, and storage of true fir seeds—a review. Proceedings of the biology and management of true fir in the Pacific Northwest Symposium. Washington, USA: USDA Forest Service, 1982, pp. 113-137.
36. Belyaeva T.P. (et al.) Planning the implementation of special projects. Radiation resistance of electronic systems “Resistance-2011”. Moscow, 2011, pp. 239-241.
37. Sokolov S.V., Novikov A.I. (2019) *Novye optoelektronnye sistemy ekspress-analiza semyan v lesohozyajstvennom proizvodstve* [New optoelectronic systems for express analysis of seeds in forestry production]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*, Vol. 9, no. 2, pp. 5-13 (in Russian).
38. Bartenev I. (et al.) (2018) *Sposoby predposevnoy podgotovki semyan i metodika ikh modelirovaniya* [Methods of pre-seeding preparation of seeds and method of their simulation]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*, Vol. 8, no. 4, pp. 199-207 (in Russian).
39. Pullin A.S., Stewart G.B. (2006) Guidelines for Systematic Review in Conservation and Environmental Management. *Conserv. Biol.*, Vol. 20, no. 6, pp. 1647-1656.
40. Ivanov V.K., Vinogradova N.V. (2014) *Unificirovannaja metodika poiska patentnoj informacii i obrabotki ego rezul'tatov* [Unified method of searching for patent information and processing its results]. *Izobretatel'stvo* [Inventiveness], Vol. 14, no. 12, pp. 23-32 (in Russian).
41. Novikov A.I. *Diskovye separatory semjan v lesohozjajstvennom proizvodstve: monografiya* [Disc separators in forest seed production: a monograph]. Voronezh, 2017, 159 p. (in Russian).
42. Novikov A.I. *Ekspress-analiz lesnykh semyan biofizicheskimi metodami* [Rapid analysis of forest seeds: biophysical methods]. Voronezh, 2018, 128 p. (in Russian).
43. Ivetić V., Novikov A.I. (2019) The role of forest reproductive material quality in forest restoration. *For. Eng. J. [Lesotekhnicheskij zhurnal – Russ.]*, Vol. 9, no. 2, pp. 56-65.

44. Drapalyuk M.V. *Perspektivnye tekhnologii vyrashchivaniya posadochnogo materiala v lesnykh pitomnikakh* [Perspective technologies of cultivation of planting material in forest nurseries]. Voronezh, 2006, 247 p. (In Russian).
45. Posharnikov F.V. (2000) *Perspektivy primeneniya tochnogo poseva lesnykh semyan v pitomnikakh* [Prospects of application of the accurate sowing of forest seed in nurseries]. *Lesnoy Vestnik* [Forest Bulletin], no. 3, pp. 112-116 (in Russian).
46. Posharnikov F.V. *Novye tekhnologii i mashiny dlja poseva lesnyh semjan v pitomnikah* : dis. doktora tehniceskikh nauk [New technologies and machines for sowing forest seeds in nurseries: DSc thesis]. Voronezh, 1993, 530 p. (in Russian).
47. Posharnikov F.V. *Lesnye sejalki: teoriya i raschet* [Forest seeders: theory and calculation]. Voronezh, 2007, 267 p. (in Russian).
48. Edelshtein V.I. *Ovoshchevodstvo* [Vegetable Growing]. Moscow, 1953, 324 p. (in Russian).
49. Novikov A.I., Ivetic V. The effect of seed coat color grading on height of one-year-old container-grown Scots pine seedlings planted on post-fire site. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019, Vol. 226, pp. 012043.
50. Posharnikov F.V. (2000) *Novye sposoby i tekhnologicheskie sredstva dlya vysokoeffektivnogo poseva lesnykh semyan v pitomnike* [New methods and technological means for high-efficiency sowing of forest seeds in the nursery]. *Lesnoy Vestnik* [Forest Bulletin], no. 3, pp. 105-112 (in Russian).

Сведения об авторах

Бартенев Иван Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru.

Драпалюк Михаил Валентинович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Ушаков Никита Олегович – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: ushakov-racing@mail.ru.

Новиков Артур Игоревич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобилей и сервиса ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: nvatdo@gmail.com.

Information about authors

Bartenev Ivan Mikhailovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru.

Drapalyuk Mikhail Valentinovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Ushakov Nikita Olegovich – post-graduate student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: ushakov-racing@mail.ru.

Novikov Artur Igorevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Cars and Service, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: nvatdo@gmail.com.

ОСНОВА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН С ПОВЕРХНОСТЯМИ ДВИЖЕНИЯ

доктор технических наук, профессор **О.Н. Бурмистрова**¹

Е.В. Тетеревлева¹

доктор технических наук, профессор **И.В. Григорьев**²

доктор технических наук, профессор **О.А. Куницкая**²

доктор технических наук, доцент **А.Ю. Мануковский**³

кандидат технических наук **С.Е. Рудов**⁴

аспирант **Д.С. Востриков**³

1 – ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация

3 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

4 – ФГКВБОУ ВПО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного»,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Цель исследований, результаты которых изложены в настоящей статье, – проанализировать научное описание свойств слабонесущих поверхностей движения лесных машин. Анализ показал, что универсальные математические модели взаимодействия колесного движителя с почвогрунтом строятся на положениях механики грунтов. Данный подход апробирован в науке о лесозаготовительном производстве, успешно используется современными отечественными и зарубежными исследователями. Однако с точки зрения разработки и реализации математического описания взаимодействия колесного движителя сверхнизкого давления, например, вездеходной колесной машины, с опорными поверхностями требуется учитывать соотношение сторон пятна контакта движителя с почвогрунтом, поскольку: давление движителя на грунт определяется как частное нагрузки на единственный движитель и площади пятна контакта; от соотношения длины и ширины пятна контакта зависит распределение сжимающего напряжения по глубине массива почвогрунта; несущая способность, характеризующая сопротивление сдвигу слоев почвогрунта, зависит не только от его физико-механических свойств, но и от параметров пятна контакта, что учитывается специальными поправочными коэффициентами, значения которых зависят от соотношения сторон пятна контакта; для учета числа проходов колесного вездехода по трассе и его скорости рассматривается реология почвогрунта, одной из характеристик воздействия движителя является время воздействия; при определении времени воздействия движителя на почвогрунт также используется значение длины пятна контакта.

Ключевые слова: лесные машины, лесозаготовки, колесные движители, почвогрунты, математическое моделирование

BASIS OF MATHEMATICAL INTERACTION MODELS OF WHEEL PROPELLERS OF FORESTRY MACHINES WITH SLIDING SURFACES

DSc (Engineering), Professor **O.N. Burmistrova**¹

E.V. Teterevleva¹

DSc (Engineering), Professor **I.V. Grigoryev**²

DSc (Engineering), Professor **O.A. Kunitskaya**²

DSc (Engineering), Associate Professor **A.Yu. Manukovsky**³

PhD (Engineering) **S.E. Rudov**⁴

post-graduate student **D.S. Vostrikov**³

1 – FSBEI HE "Ukhta State Technical University", Ukhta, Russian Federation

2 – FSBEI HE "Yakut State Agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation

3 – FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",

Voronezh, Russian Federation

4 – Federal State Military Educational Institution of Higher Education "Military Telecommunications Academy named after the Soviet Union Marshal S.M. Budenny", Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract

The purpose of the research, the results of which are presented in this article, is to analyze the scientific description of the properties of weak bearing movement surfaces of forest machines. The analysis has showed that universal mathematical models of the wheel propeller interaction with soil are based on the provisions of soil mechanics. This approach has been tested in the science of forestry production. It is successfully used by modern domestic and foreign researchers. However, with regard to the development and implementation of a mathematical description of interaction of ultra-low pressure wheeled mover (for example, in all-terrain wheeled vehicle) with supporting surfaces, it is necessary to take into account the ratio of the sides of the mover's contact spot with the soil, since: mover pressure on the ground is defined as the partial load of a single mover and the area contact spots; the distribution of compressive stress over the depth of the soil mass depends on the ratio of the length and width of the contact spot; the bearing capacity characterizing the resistance to shear of the soil layers depends not only on its physical and mechanical properties, but also on the parameters of the contact spot, which is taken into account by special correction factors, the values of which depend on the aspect ratio of the contact spot. Soil rheology is considered to take into account the number of passes of a wheeled all-terrain vehicle along the route and its speed. One of the characteristics of the impact of the mover is exposure time. Value of the length of the contact spot is also used when determining the impact time of the mover on the soil.

Keywords: forest machines, logging, wheel movers, soils, mathematical modeling

Лесной почвогрунт представляет собой многокомпонентную систему, состоящую из мягкого плодородного слоя, почвы – смеси органического вещества с минеральными частицами – и подстилающего слоя (либо слоев) неорганического грунта, причем граница слоев может быть размыта, слои могут быть перемешаны [1]. В ряде случаев лесозаготовительная техника работает на слабонесущих задернованных поверхностях, верхний (дерновый) слой которых прочнее подстилающего слоя [2].

Значения угла внутреннего трения φ , удельного сцепления C , модуля деформации E , коэффициента Пуассона ν , плотности ρ и толщины деформируемого слоя H для различных категорий лесного почвогрунта представлены в [1, 6–9]. Сведения об ориентировочных значениях угла внутреннего трения φ , удельного сцепления C и модуля деформации E заболоченных грунтов представлены на рис. 1 [2, 4, 5].

Универсальные математические модели взаимодействия колесного движителя с грунтом строятся в рамках теории движения автотранспорта в условиях бездорожья, основанной на положениях механики грунтов [4, 5]. Для вывода уравнения осадки опорной поверхности под воздействием движителя пользуются схемой, представленной на рис. 2.

В науке о лесозаготовительном производстве такой подход широко распространен и использовался, например, в работах [9–32], причем к настоящему времени были разработаны методы расчета показателей взаимодействия движителей с неоднородными опорными поверхностями [31, 32]. Отдельное направление исследований представляет собой изучение взаимодействия движителей с мерзлыми грунтами и снегом [33-36].

18	40	1,025
6		
5,5		0,115
19	7	0,19
	9	
13	35,5	1,315
14,5	11	0,315
13	13,5	0,395
	6,5	0,275
φ, °	С, кПа	Е, МПа
■ Осушенное, гипново-осоково-лесной		
■ Лесное, березово-лесной в межкочечных понижениях		
■ Травяное, осоковый покров с межкочечными понижениями		

Рис. 1. Свойства заболоченных грунтов [2, 4, 5]

Функция распределения сжимающего напряжения по глубине деформируемого грунта принимается с учетом затухания напряжения и геометрических свойств пятна контакта [4, 5]:

$$\sigma = \frac{Jp}{1 + (Az)^2}, \quad (1)$$

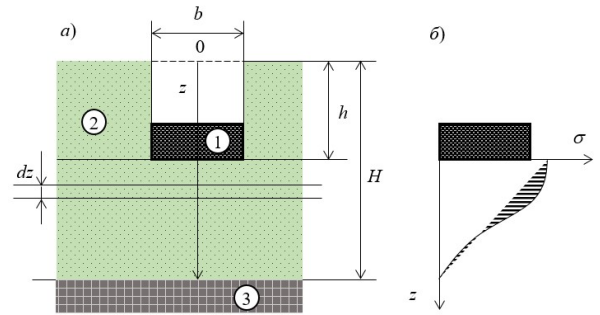


Рис. 2. Схема к расчету осадки опорной поверхности под воздействием движителя [4, 5]:

а) – расчетная схема, 1 – движитель, 2 – деформируемая опорная поверхность, 3 – жесткое подстилающее основание, б) – эпюра нормального сжимающего напряжения, затухающего по глубине

где J – коэффициент, учитывающий форму и геометрию пятна контакта, A – коэффициент, учитывающий толщину деформируемого слоя грунта.

Коэффициенты J, A рассчитывают по формулам [4, 5]

$$J = \frac{0,03 + l/b}{0,6 + 0,43l/b}, \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{0,64 \cdot b \cdot (1 + b/H)}, \quad (3)$$

где l – длина пятна контакта, b – ширина пятна контакта.

При исследовании взаимодействия гусеничных движителей с почвогрунтом длину пятна контакта определяют исходя из длины горизонтальной проекции гусеницы на грунт. В этом случае длина пятна контакта условно не зависит от деформации почвогрунта и принимается как входной параметр. Для колесного движителя длину пятна контакта следует определять расчетным путем, причем с учетом радиальной деформации движителя h_z и грунта h [4, 5]:

$$l_1 = 2\sqrt{dh_z - h_z^2}, \quad (4)$$

$$l_2 = \sqrt{d \cdot (h_z + h) - (h_z - h)^2}, \quad (5)$$

$$l = l_1 + l_2 = 2\sqrt{dh_z - h_z^2} + \sqrt{d \cdot (h_z + h) - (h_z - h)^2}, \quad (6)$$

где d – диаметр колеса.

Радиальная деформация колесного движителя определяется его конструкцией и жесткостью, зависящей от рабочего внутреннего давления, а также механическими свойствами опорной поверхности (при прочих равных условиях, на прочных почвогрунтах радиальная деформация колеса выше, чем на слабонесущих) [9].

От соотношения длины и ширины пятна контакта зависит значение повышающего коэффициента J в формуле (2). Кроме того, давление движителя на грунт p , используемое в той же формуле, определяется как частное нагрузки на единичный движитель G_w и площади пятна контакта [9]

$$p = \frac{G_w}{bl} \quad (7)$$

С использованием уравнения нормального напряжения (1) определяют сжатие элементарного слоя почвогрунта под воздействием движителя [4, 5]

$$dh^* = \frac{\sigma}{E - \sigma} dz, \quad (8)$$

как следствие, общая деформация сжатия деформируемого слоя почвогрунта определяется путем интегрирования [4, 5]:

$$h^* = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\sigma}{E - \sigma} dz, \quad (9)$$

где z_1, z_2 – вертикальные координаты зоны распространения сжимающего нормального напряжения.

Фактическую осадку почвогрунта определяют с учетом воздействия сдвиговых напряжений, вызывающих увеличение глубины образующейся колеи. Влияние сдвиговых деформаций на фактическую осадку учитывают при помощи коэффициента потери несущей способности [4, 5]

$$h = k_p h^*, \quad (10)$$

где k_p – коэффициент учета потери несущей способности [4, 5]

$$k_p = \frac{p_s}{p_s - p}, \quad (11)$$

где p_s – несущая способность почвогрунта.

Интегрирование уравнения (9) приводит к получению формулы [4, 5]

$$h = \frac{Jp \operatorname{arctg} \left(\frac{AEz}{\sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}} \right) \Big|_{z=z_1}^{z=z_2}}{A \sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}} \quad (12)$$

Согласно схеме на рис. 2, пределы интегрирования z_2 и z_1 равны соответственно $H - h$ и 0, следовательно [4, 5],

$$h = \frac{Jp \operatorname{arctg} \left(\frac{AE(H - h)}{\sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}} \right)}{A \sqrt{(p_s - Jp) \cdot E}}. \quad (13)$$

Несущую способность почвогрунта определяют по формуле [4, 5]

$$p_s = \frac{\pi}{2} p_{s0} \alpha \operatorname{arctg} \frac{\pi \cdot (H - h)}{2b}, \quad (14)$$

где p_{s0} – несущая способность слоя почвогрунта неограниченной толщины, α – коэффициент, учитывающий ограниченную толщину деформируемого слоя почвогрунта.

Коэффициент α рассчитывают по уравнению [4, 5]

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \operatorname{arctg} \frac{\pi \cdot (H - h)}{2b}. \quad (15)$$

Несущая способность слоя почвогрунта неограниченной толщины зависит не только от его физико-механических свойств, но и от параметров пятна контакта, что учитывается специальными поправочными коэффициентами [4, 5]

$$p_{s0} = K_{\beta 1} I_1 X_1 b + K_{\beta 2} I_2 X_2 + X_3 h, \quad (16)$$

где X_1, X_2, X_3 – коэффициенты учета влияния физико-механических свойств грунта, I_1, I_2 – коэффициенты учета геометрических параметров пятна контакта, $K_{\beta 1}, K_{\beta 2}$ – коэффициенты учета угла приложения нагрузки.

Расчет коэффициентов I_1, I_2 проводят по формулам [4, 5]

$$I_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, \quad (17)$$

$$I_2 = \frac{l + b}{l + 0,5b}. \quad (18)$$

В уравнениях (17), (18) вновь используется значение длины пятна контакта. Следовательно, жесткость колесного движителя оказывает влияние не только на нормальное давление на опорную поверхность и распространение сжимающих напряжений по глубине деформируемого грунта, но и на несущую способность почвогрунта под воздействием движителя.

Для расчета коэффициентов $K_{\beta 1}$, $K_{\beta 2}$ получены уравнения [4, 5, 37, 38]

$$K_{\beta 1} = \frac{\pi - 4\beta \operatorname{tg} \varphi}{\pi + 4\beta \operatorname{tg} \varphi}, \quad (19)$$

$$K_{\beta 2} = \frac{3\pi - 2\beta}{3\pi + 2\beta}, \quad (20)$$

где β – отклонение угла приложения результирующей нагрузки от нормали к опорной поверхности [4, 5]

$$\beta = \arccos \frac{P}{\sqrt{P^2 + \tau^2}}, \quad (21)$$

где τ – касательное напряжение.

Для учета времени воздействия движителя на грунт, связанного с числом проходов машины по трассе и ее скоростью, используют поправочный коэффициент динамичности к давлению движителя на грунт [4, 5]

$$p = p_0 k_d, \quad (22)$$

где p_0 – давление движителя на опорную поверхность в статике, k_d – коэффициент динамичности, учитывающий время действия нагрузки.

Коэффициент динамичности рассчитывается с учетом принятой реологической модели грунта, в качестве которой чаще всего используется модель Максвелла [4, 5]

$$k_d \approx t / (t + t_p), \quad (23)$$

где t – суммарное время воздействия на грунт [4, 5];

$$t = n \frac{l}{v}, \quad (24)$$

где n – число проходов движителя по колее, v – поступательная скорость машины, t_p – время релаксации напряжений в грунте (экспериментальная величина, зависящая от типа и состояния грунта).

Резюмируя вышеизложенный анализ, отметим, что использование поправочного коэффициента динамичности в уравнении (22), полученного на основе

реологической модели Максвелла, обосновано для случаев изучения воздействия лесных машин на почвогрунты, толщина деформируемого слоя которых ограничена [9, 28].

Применение модели Максвелла при описании реологии поверхностей движения, например, колесных вездеходных машин, деформируемый слой которых не ограничен (например, заболоченных почвогрунтов), не вполне корректно, поскольку деформации таких поверхностей не затухают по времени [9, 28]. Кроме того, реализация математических моделей выполнена при значениях времени воздействия на почвогрунт, характерных для небольших рабочих скоростей машин, в пределах 5-10 км/ч [2, 9, 10, 27–30]. Рабочие скорости колесных вездеходных машин, форвардеров на магистральных волоках много выше и могут достигать 50 км/ч, следовательно, подход к моделированию развития деформаций лесных почв и грунтов во времени нуждается в уточнении.

В формуле (24) при определении времени воздействия движителя на почвогрунт также фигурирует длина пятна контакта. Следовательно, жесткость движителя оказывает влияние и на степень развития деформаций почвогрунта.

Предшественниками были получены уравнения для радиальной деформации колесных движителей лесных машин типовой конструкции, с рабочим внутренним давлением свыше 0,15 МПа [2, 9, 10, 27–30]. Для движителей сверхнизкого давления такие зависимости неизвестны, что осложняет разработку математической модели, позволяющей качественно прогнозировать показатели воздействия движителя сверхнизкого давления на опорную поверхность.

Универсальные математические модели взаимодействия колесного движителя лесных машин с почвогрунтом строятся на положениях механики грунтов. Данный подход апробирован в науке о лесозаготовительном производстве, успешно используется современными исследователями. Разработка и реализация математических моделей взаимодействия колесного движителя сверхнизкого давления с опорными поверхностями требует учитывать соотношение сторон пятна контакта движителя с почвогрунтом, поскольку: давле-

ние движителя на грунт определяется как частное нагрузки на единичный движитель и площади пятна контакта. От соотношения длины и ширины пятна контакта зависит распределение сжимающего напряжения по глубине массива почвогрунта. Несущая способность, характеризующая сопротивление сдвигу слоев почвогрунта, зависит не только от его физико-механических свойств, но и от параметров пятна контакта, что учитывается специальными поправочными коэффициентами, значения которых зависят от соотношения сторон пятна контакта. Для учета числа проходов колесного вездехода по трассе и его скорости рассматривается реология почвогрунта, одной из характеристик воздействия движителя является время воздействия. При определении времени воздействия движителя на почвогрунт также используется значение длины пятна контакта.

Для колесного движителя сверхнизкого давления длину пятна контакта следует определять расчетным путем, причем с учетом радиальной деформации движителя и грунта. Радиальная деформация колесного движителя определяется его конструкцией и жесткостью, зависящей от рабочего внутреннего давления, а также механическими свойствами опорной поверхности (при прочих равных условиях, на прочных почвогрунтах радиальная деформация колеса выше, чем на слабонесущих). Следовательно, жесткость колесного движителя оказывает влияние на целый комплекс параметров, определяющих показатели взаимодействия машины с грунтом.

Библиографический список

1. Григорьев, И. В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных трелевочных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования / И. В. Григорьев. – Санкт-Петербург : ЛТА, 2006. – 236 с.
2. Дмитриева, М. Н. Моделирование взаимодействия колесного движителя малогабаритных лесных машин со слабонесущим грунтом : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Дмитриева Мария Николаевна. – Архангельск : С(А)ФУ, 2018. – 20 с.
3. Цытович, Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цытович. – Москва : Высшая школа, 1983. – 288 с.
4. Агейкин, Я. С. Пройдемость автомобилей / Я. С. Агейкин. – Москва : Машиностроение, 1981. – 232 с.
5. Агейкин, Я. С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. Теория и расчет / Я. С. Агейкин. – Москва : Машиностроение, 1972. – 184 с.
6. Математическая модель уплотняющего воздействия динамики поворота лесозаготовительной машины на боковые полосы трелевочного волока / И. В. Григорьев, А. Б. Былев, А. М. Хахина, А. И. Никифорова // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2012. – № 8-1 (129). – С. 72–77.
7. New approach for forest production stocktaking based on energy cost / I. Grigorev, E. Khitrov, A. Kalistratov [et al.] // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2014. – P. 407–414.
8. Оценка уплотнения почвогрунта при ударных воздействиях на расстоянии от места удара / И. В. Григорьев, В. А. Макуев, А. Б. Былев [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2014. – Т. 18. – № S2. – С. 30–35.
9. Хитров, Е. Г. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : дис. ... канд. техн. наук : защищена 30.06.2015 / Хитров Егор Германович. – Архангельск, 2015. – 211 с.

10. Хитров, Е. Г. Повышение эффективности трелевки обоснованием показателей работы лесных машин при оперативном контроле свойств почвогрунта: науч. издание / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, А. М. Хахина. – Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2015. – 146 с.
11. The way to reduce ecological impact on forest soils caused by wood skidding / I. Grigorev, O. Burmistrova, M. Stepanishcheva, G. Gasparian // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2014. – P. 501–508.
12. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel / V. Ivanov, M. Stepanishcheva, E. Khitrov, D. Iliushenko // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. – 2018. – P. 997–1003.
13. Environment-friendly logging in the context of water logged soil and knob-and-ridge terrain / V. A. Ivanov, I. V. Grigorev, G. D. Gasparyan [et al.] // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2018. – Vol. 41. – № 2. – P. 22–27.
14. Kochnev, A. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover / A. Kochnev, E. Khitrov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. – 2018. – P. 1005–1012.
15. Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling / A. Y. Manukovsky, I. V. Grigorev, V. A. Ivanov [et al.] // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. – 2018. – Vol. 41. – № 2. – P. 35–41.
16. Лисов, В. Ю. Повышение работоспособности трасс трелевки путем снижения интенсивности колеобразования : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : дис. ... канд. техн. наук : защищена 24.12.2014 / Лисов Владимир Юрьевич. – Архангельск : С(А)ФУ, 2014. – 179 с.
17. Теоретическое исследование процесса разрушения массива грунта сферическими ножами при использовании комбинированных конструкций грунтометов для тушения лесных пожаров / В. Я. Шапиро, О. И. Григорьева, И. В. Григорьев, М. Ф. Григорьев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2018. – № 1 (361). – С. 61–69.
18. Калистратов, А. В. Моделирование циклического уплотнения в задачах снижения негативного воздействия лесных машин на почвогрунт : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Калистратов Александр Викторович. – Архангельск : САФУ, 2016. – 20 с.
19. Вариационный метод расчета параметров взаимодействия трелевочной системы с массивом мерзлых и оттаивающих почвогрунтов / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2019. – № 1 (41). – С. 68–77.
20. Хахина, А. М. Анализ зарубежных математических моделей взаимодействия движителей лесных машин с поверхностью движения / А. М. Хахина, И. В. Григорьев // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2017. – Т. 5. – № 10 (36). – С. 548–551.
21. Моделирование уплотнения почвогрунта в боковых полосах трелевочного волока с учетом изменчивости трассы движения / В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев, Д. В. Лепилин, А. И. Жукова // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2010. – № 6 (111). – С. 61–64.
22. Котенев, Е. В. Нормы выработки комплексов машин сортиментной заготовки древесины / Е. В. Котенев, В. Б. Песков, Е. Г. Хитров // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : матер. третьей междунар. науч.-техн. конференции. – 2018. – С. 187–189.
23. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation / I. Grigorev, A. Nikiforova, E. Khitrov [et al.] // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2014. – P. 443–446.

24. Экспериментальные исследования конусного индекса и физико-механических свойств заболоченного грунта / М. Н. Дмитриева, И. В. Григорьев, В. А. Лухминский [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2017. – Т. 7. – № 4 (28). – С. 167–174.
25. Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds / S. Rudov, V. Shapiro, I. Grigorev [et al.] // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 10. – № 1. – P. 2052–2071.
26. Modelling of indenter pressed into heterogeneous soil / A. Yu. Zhuk, A. M. Nahina, I. V. Grigorev [et al.] // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 13. – № S8. – P. 6419–6430.
27. Песков, В. Б. Совершенствование моделей для оценки колесобразования и уплотнения почвогрунтов под воздействием движителей колесных лесных машин : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Песков Валерий Борисович. – Архангельск : С(А)ФУ, 2018. – 20 с.
28. Хахина, А. М. Методы прогнозирования и повышения проходимости колесных лесных машин : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : дис. д-ра техн. наук : защищена 26.06.2018 / Хахина Анна Михайловна. – Архангельск : С(А)ФУ, 2018. – 332 с.
29. Модель для оценки радиальной деформации колеса лесной машины с учетом деформации почвогрунта / Е. Г. Хитров, И. В. Григорьев, В. А. Макуев [и др.] // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2015. – Т. 19. – № 6. – С. 87–90.
30. Устинов, В. В. Оценка тягово-сцепных свойств колесных движителей лесных машин методами теории движения автотранспорта по бездорожью : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Устинов Владимир Владимирович. – Архангельск : САФУ, 2016. – 20 с.
31. Experimental findings in forest soil mechanics / M. F. Grigorev, A. I. Grigoreva, I. V. Grigorev [et al.] // EurAsian Journal of BioSciences. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – P. 277–287.
32. Метод решения задачи о вдавливании штампа-двигателя в неоднородный массив грунта / Е. Г. Хитров, В. Б. Песков, Д. П. Казаков [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 2 (38). – С. 116–120.
33. Особенности контактного взаимодействия трелевочной системы с мерзлым почвогрунтом / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2019. – № 1 (367). – С. 106–119.
34. Математическое моделирование процесса уплотнения мерзлого почвогрунта под воздействием лесных машин и трелевочных систем / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Системы. Методы. Технологии. – 2018. – № 3 (39). – С. 73–78.
35. Особенности взаимодействия трелевочной системы с оттаивающим почвогрунтом / С. Е. Рудов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. – 2019. – Т. 23. – № 1. – С. 52–61.
36. Зайчик, М. И. Проектирование и расчёт специальных лесных машин / М. И. Зайчик, С. Ф. Орлов. – Москва : Лесн. пром-сть, 1976. – 208 с.
37. Хитров, Е. Г. Влияние угла поперечного наклона поверхности качения на тягово-сцепные свойства колесного движителя / Е. Г. Хитров, И. М. Бартенев // Лесотехнический журнал. – 2016. – Т. 6. – № 4 (24). – С. 225–232.
38. Хитров, Е. Г. Расчет глубины колеи колесного движителя лесных тракторов на склонах / Е. Г. Хитров, И. М. Бартенев // Лесотехнический журнал. – 2016. – Т. 6. – № 4 (24). – С. 233–239.

References

1. Grigorev I.V. *Snizhenie otricatel'nogo vozdeystviya na pochvu kolesnyh trelevochnykh traktorov obos-novaniem rezhimov ih dvizheniya i tehnologicheskogo oborudovaniya* [Reducing the negative impact on the soil of wheeled skidding tractors by improving their movement modes and technological equipment]. Saint-Petersburg, 2006, 236 p. (in Russian).
2. Dmitrieva M.N. *Modelirovanie vzaimodeystviya kolesnogo dvizhitelja malogabaritnykh lesnykh mashin so slabonesushhim gruntom*. Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk [Modeling of the interaction of the wheel mover of small-sized forest vehicles with low-weight soil. PhD thesis abstract]. Arkhangelsk, 2018, 20 p. (in Russian).
3. Tsytovich N.A. *Mehanika gruntov* [Mechanics of soils]. Moscow, 1983. 288 p. (in Russian).
4. Ageikin Ya.S. *Prohodimost' avtomobilej* [Passability of cars]. Moscow, 1981. 232 p. (in Russian).
5. Ageikin Ya.S. *Vezdehodnye kolesnye i kombinirovannye dvizhiteli. Teorija i raschet* [All-Terrain wheeled and combined engines. Theory and calculation]. Moscow, 1972. 184 p. (in Russian).
6. Grigorev I.V., Bylev A.B., Hahina A.M., Nikiforova A.I. (2012) *Matematicheskaja model' uplotnjajushhego vozdeystviya dinamiki povorota lesozagotovi-tel'noj mashiny na bokovye polosy trelevochnogo voloka* [Mathematical model of the condensing impact the dynamics of the rotation of the logging cars on side of strip skidding track]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific notes of Petrozavodsk state University], no. 8-1 (129), pp. 72-77 (in Russian).
7. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A. (et al.) New approach for forest production inventory based on energy cost. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Ge-ology and Mining Ecology Management, SGEM 2014, pp. 407-414.
8. Grigoriev I.V., Makuev V.A., Bylev A.B. (et al.) (2014) *Otsenka uplotneniya pochvogrunta pri udarnykh vozdeystvijah na rasstojanii ot mesta udara* [Estimation of compaction of soils under impact conditions at a distance from the point of impact]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa - Lesnoj vestnik* [Bulletin of Moscow state forest University - Forest Herald]. Vol. 18, no. S2, pp. 30-35 (in Russian).
9. Khitrov E.G. *Povyshenie jeffektivnosti trelevki obosnovaniem pokazatelej raboty lesnykh mashin pri operativnom kontrole svojstv pochvogrunta*. Diss. kand. tehn. nauk [Improving the efficiency of skidding by justifying the performance of forest machines for operational control of soil properties. PhD thesis]. Arkhangelsk, 2015, 211 p. (in Russian).
10. Khitrov E.G., Grigorev I.V., Khakhina A.M. *Povyshenie jeffektivnosti trelevki obosnovaniem pokazatelej raboty lesnykh mashin pri operativnom kontrole svojstv pochvogrunta*. *Nauchnoe izdanie* [Improving the efficiency of skidding by justifying the performance of forest machines for operational control of soil properties. Scientific publication]. Saint Petersburg, 2015, 146 p. (in Russian).
11. Grigorev I., Burmistrova O., Stepanishcheva M., Gasparian G. The way to reduce ecological impact on forest soils caused by wood skidding. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2014, pp. 501-508.
12. Ivanov V., Stepanishcheva M., Khitrov E., Iliushenko D. Theoretical model for evaluation of tractive performance of forestry machine's wheel. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018, pp. 997-1003.
13. Ivanov V.A., Grigorev I.V., Gasparyan G.D. (et al.) (2018) Environment-friendly logging in the context of water logged soil and knob-and-ridge terrain. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, Vol. 41, no. 2, pp. 22-27.
14. Kochnev A., Khitrov E. Theoretical models for rut depth evaluation after a forestry machine's wheel passover. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 18. 2018, pp. 1005-1012.

15. Manukovsky A.Y., Grigorev I.V., Ivanov V.A. (et al.) (2018) Increasing the logging road efficiency by reducing the intensity of rutting: mathematical modeling. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, Vol. 41, no. 2, pp. 35-41.
16. Lisov V.Yu. *Povyshenie rabotosposobnosti trass trelevki putem snizhenija intensivnosti koleeobrazovanija*. Diss. kand. tehn. nauk [Improving the performance of skidding tracks by reducing the intensity of the track formation. PhD thesis]. Arkhangelsk, 2014, 179 p. (in Russian).
17. Shapiro V.Ya., Grigoreva O.I., Grigorev I.V., Grigorev M.F. (2018) *Teoreticheskoe issledovanie processa razrushenija massiva grunta sfe-richeskimi nozhami pri ispol'zovanii kombinirovannykh konstrukcij gruntometov dlja tushenija lesnykh pozharov* [Theoretical study of the process of destruction of the soil mass with spherical knives when using combined structures of soil meters for extinguishing forest fires]. *Forest journal*, no. 1 (361), pp. 61-69 (in Russian).
18. Kalistratov A.V. *Modelirovanie ciklicheskogo uplotnenija v zadachah snizhenija negativnogo vozdejstvija lesnykh mashin na pochvogrunt*. *Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk* [Modeling of cyclic compaction in problems of reducing the negative impact of forest machines on the soil soil. PhD thesis abstract]. Arkhangelsk, 2016, 20 p. (in Russian).
19. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V. (et al.) (2019) *Variacionnyj metod rascheta parametrov vzaimodejstvija trelevochnoj sistemy s massivom merzlykh i ottaivajushhih pochvogruntov* [Variational method for calculating parameters of interaction of a skidding system with an array of frozen and thawing soils]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], no. 1 (41), pp. 68-77 (in Russian).
20. Khakhina A.M., Grigorev I.V. (2017) *Analiz zarubezhnykh matematicheskikh modelej vzaimodejstvija dvizhitelej lesnykh mashin s poverhnost'ju dvizhenija* [Analysis of foreign mathematical models of interaction of forest machine movers with the surface of motion]. *Aktual'nye napravlenija nauchnykh issledovanij XXI veka: teorija i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], Vol. 5, no. 10 (36), pp. 548-551 (in Russian).
21. Shapiro V.Ya., Grigorev I.V., Lepilin D.V., Zhukova A.I. (2010) *Modelirovanie uplotnenija pochvogrunta v bokovykh polosah trelevochnogo voloka s uchetom izmenchivosti trassy dvizhenija* [Modeling of soil compaction in the side lanes of the skidding portage taking into account the variability of the traffic route]. *Uchenye zapiski Pet-rozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Research notes of the Petrozavodsk state University], no. 6 (111), pp. 61-64 (in Russian).
22. Kotenev E.V., Sands V.B., Khitrov E.G. *Normy vyrabotki kompleksov mashin sortimentnoj zagotovki drevesiny* [Production of machines CTL wood]. *Les Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie Materialy tret'ej mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Forests of Russia: politics, industry, science, education Materials of the third international scientific and technical conference], 2018, pp. 187-189 (in Russian).
23. Grigorev I., Nikiforova A., Khitrov E. (et al.) Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2014, pp. 443-446.
24. Dmitrieva M.N., Grigorev I.V., Lukhminsky V.A. (et al.) (2017) *Jeksperimental'nye issledovanija konusnogo indeksa i fiziko-mehaničeskikh svojstv zabolochennogo grunta* [Experimental studies of the cone index and physical and mechanical properties of swampy soil]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 7, no. 4 (28), pp. 167-174 (in Russian).
25. Rudov S., Shapiro V., Grigorev I. (et al.) (2019) Specific features of influence of propulsion plants of the wheel-tyre tractors upon the cryomorphic soils, soils, and soil grounds. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, Vol. 10, no. 1, pp. 2052-2071.
26. Zhuk A.Yu., Hahina A.M., Grigorev I.V. (et al.) (2018) Modeling of indenter pressed into heterogenic soil. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 13, no. S8, pp. 6419-6430.
27. Peskov V.B. *Sovershenstvovanie modelej dlja ocenki koleeobrazovanija i uplotnenija pochvogruntov pod vozdejstviem dvizhitelej kolesnykh lesnykh mashin*. *Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk* [Improvement of models for assessing

the rut formation and compaction of soils under the influence of the movers of wheeled forest vehicles. PhD thesis abstract]. Arkhangelsk, 2018, 20 p. (in Russian).

28. Khakhina A.M. *Metody prognozirovaniya i povysheniya prohodimosti kolesnyh lesnyh mashin. Diss. dokt. tehn. nauk* [Methods to predict and improve cross-wheeled forest machines. DSc thesis]. Arkhangelsk, 2018, 332 p. (in Russian).

29. Khitrov E.G., Grigorev I.V., Makuev V.A. (et al.) (2015) *Model' dlja ocenki radial'noj deformacii koleasa lesnoj mashiny s uchetom deformacii pochvogrunta* [Model for estimating the radial deformation of the wheel of a forest machine taking into account the deformation of the soil]. *Lesnoj Vestnik*, Vol. 19, no. 6, pp. 87-90 (in Russian).

30. Ustinov V.V. *Ocenka t'jagovo-scepnnyh svoystv kolesnyh dvizhitelej lesnyh mashin metodami teorii dvizheniya avtotransporta po bezdorozh'ju. Avtoreferat diss. kand. tehn. nauk* [Evaluation of traction properties of wheeled forest vehicles by methods of the theory of off-road vehicle movement. PhD thesis abstract]. Arkhangelsk, 2016, 20 p. (in Russian).

31. Grigorev M.F., Grigoreva A.I., Grigorev I.V. (et al.) (2018) Experimental findings in forest soil mechanics. *EurAsian Journal of BioSciences*, Vol. 12, no. 2, pp. 277-287.

32. Khitrov E.G., Peskov V.B., Kazakov D.P. (et al.) (2018) *Metod reshenija zadachi o vdavlivanii shtampa-dvizhitelja v neodnorodnyj massiv grunta* [Method for solving the problem of pressing a stamp-mover into an inhomogeneous array of soil]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technology], no. 2 (38), pp. 116-120 (in Russian).

33. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V. (et al.) (2019) *Osobennosti kontaktного vzaimodejstviya trelevochnoj sistemy s merzlym pochvogruntom* [Features of contact interaction of the skidding system with frozen soil]. *Lesnoj zhurnal* [Forest journal], no. 1 (367), pp. 106-119 (in Russian).

34. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V. (et al.) (2018) *Matematicheskoe modelirovanie processa uplotneniya merzlogo pochvogrunta pod vozdejstviem lesnyh mashin i trelevochnykh sistem* [Mathematical modeling of the process of compaction of frozen soil under the influence of forest machines and skidding systems]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], no. 3 (39), pp. 73-78 (in Russian).

35. Rudov S.E., Shapiro V.Ya., Grigorev I.V. (et al.) (2019) *Osobennosti vzaimodejstviya trelevochnoj sistemy s ottaivajushhim pochvogruntom* [Features of interaction of the skidding system with thawing soil]. *Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin*, Vol. 23, no. 1, pp. 52-61 (in Russian).

36. Zaychik M.I., Orlov S.F. *Proektirovanie i raschjot special'nyh lesnyh mashin* [Design and calculation of special forest machines]. Moscow, 1976, 208 p. (in Russian).

37. Khitrov E.G., Bartenev I.M. (2016) *Vliyanie ugla poperechnogo naklona poverkhnosti kacheniya na tyagovo-stsepnnye svoystva kolesnogo dvizhitelya* [Influence of the angle of the transverse slope of the rolling surface on the traction properties of the wheel mover]. *Lesotekhnicheskij zhurnal* [Forestry engineering Journal], Vol. 6, no. 4 (24), pp. 225-232 (in Russian).

38. Khitrov E.G., Bartenev I.M. (2016) *Raschet glubiny kolei kolesnogo dvizhitelya lesnykh traktorov na sklonakh* [Calculation of the depth of the track of the wheel mover of forest tractors on slopes]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*, Vol. 6, no. 4 (24), pp. 233-239 (in Russian).

Сведения об авторах

Бурмистрова Ольга Николаевна – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и машин лесозаготовок» ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта, Российская Федерация; e-mail: oburmistrova@ugtu.net.

Тетеревлева Елена Владимировна – старший преподаватель кафедры электрификации и автоматизации технологических процессов ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», г. Ухта, Российская Федерация; e-mail: teterevleva.elena.v@mail.ru.

Григорьев Игорь Владиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: silver73@inbox.ru.

Куницкая Ольга Анатольевна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса» ФГБОУ ВО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия», г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Мануковский Андрей Юрьевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: mayu1964@mail.ru.

Рудов Сергей Евгеньевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры № 3 ФГКВБОУ ВПО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: 89213093250@mail.ru.

Востриков Дмитрий Сергеевич – аспирант кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: Vostrikov.9290105483@yandex.ru.

Information about authors

Burmistrova Olga Nikolaevna – DSc (Engineering), Professor, Head of the Department of logging Technologies and machines, FSBEI HE "Ukhta State Technical University", Ukhta, Russian Federation; e-mail: oburmistrova@ugtu.net.

Teterevleva Elena Vladimirovna – senior lecturer, Department of electrification and automation of technological processes, FSBEI HE "Ukhta State Technical University", Ukhta, Russian Federation; e-mail: teterevleva.elena.v@mail.ru.

Grigoryev Igor Vladislavovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex", FSBEI HE "Yakut State Agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation; e-mail: silver73@inbox.ru.

Kunitskaya Olga Anatolyevna – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department "Technology and equipment of the forest complex", FSBEI HE "Yakut State Agricultural Academy", Yakutsk, Russian Federation; e-mail: ola.ola07@mail.ru.

Manukovsky Andrey Yuryevich – DSc (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: mayu1964@mail.ru.

Rudov Sergey Evgenyevich – PhD (Engineering), senior lecturer, Department no. 3, Federal State Military Educational Institution of Higher Education "Military Telecommunications Academy named after the Soviet Union Marshal S.M. Budienny", Saint Petersburg, Russian Federation; e-mail: 89213093250@mail.ru.

Vostrikov Dmitry Sergeevich – post-graduate student of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: Vostrikov.9290105483@yandex.ru.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВЫРЕЗНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ДИСКОВ С ГИДРОПРИВОДОМ ЛЕСОПОЖАРНОЙ ГРУНТОМЕТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

кандидат технических наук **М.А. Гнусов**

доктор технических наук, профессор **М.В. Драпалюк**

доктор технических наук, профессор **П.И. Попиков**

аспирант **Н.А. Шерстюков**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,

г. Воронеж, Российская Федерация

В данной статье значительное внимание уделяется методике математического создания структурно сложной почвенной среды с растительностью. Определены конструктивные и технологические параметры взаимодействия рабочих органов лесопожарного грунтомета с почвогрунтом с помощью имитационно физико-математической модели взаимосвязи сферического диска, оснащенного режущей кромкой с полукруглыми вырезами, с почвенной средой. В матмодели представлены сложная геометрия всех форм активных рабочих плоскостей, а также взаимосвязь рабочих органов с элементами почвогрунта. Поверхности сложной конструкции в процессе применения метода конечных элементов преобразованы в большое количество упрощённых плоских фигур. Грунт в имитационно физико-математической модели описан как комплексная система большого количества элементов шарообразной формы, детерминированным образом связывающихся между собой, а также с рабочими плоскостями машины. Было определено, что взаимосвязь частиц почвогрунта при деформации имеет вязкоупругий характер взаимодействия. Представлен расчет сил в виде алгоритма взаимодействия элементов друг на друга в зависимости от расстояния их расположения. Используются уравнения движения, описывающие изменение динамического состояния грунта с течением времени. Движение рабочих органов агрегата, в том числе и сферических дисковых рабочих органов с вырезами в рамках математической модели, рассматривается в моделируемом пространстве, описанном как параллелепипед. Возможно моделирование взаимодействия рабочих органов лесопожарной грунтометательной машины с рабочей средой, в том числе с корнями растений, которые расположены рядом друг с другом в виде сферических элементов в геометрической области. Задача повышения эффективности рабочих процессов лесопожарной грунтометательной машины при прокладке противопожарных полос решена благодаря повышению качества подготовки сферическими дисками с гидроприводом, оснащёнными режущей кромкой с полукруглыми вырезами, почвенного вала, который впоследствии забирают фрезы-метатели и подают поток грунта в заданном направлении.

Ключевые слова: резание почвы, почвенная среда, рабочий орган, сферический диск, моделирование, метод конечных элементов, сферическая частица

MODELING THE WORK FLOW OF CUT-OUT SPHERICAL DISKS WITH HYDRAULIC DRIVE FOR FIRE-FIGHTING SOIL-THROWER

PhD (Engineering) **M.A. Gnusov**

DSc (Engineering), Professor **M.V. Drapalyuk**

DSc (Engineering), Professor **P.I. Popikov**

post-graduate student **N.A. Sherstyukov**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

In this article, considerable attention is paid to the method of mathematical creation of a structurally complex soil environment with vegetation. Structural and technological parameters of the interaction of the working bodies of the fire-fighting soil thrower with soil have been determined using a simulation-physical-mathematical model of the spherical disk relationship with the soil environment. The disk is equipped with a cutting edge with semicircular cuts. The mathematical model presents complex geometry of all forms of active work planes, as well as the relationship of the working bodies with soil elements. Surfaces of complex construction in the process of applying the finite element method have been transformed into a large number of simplified planar figures. The soil in the simulation physical-mathematical model is described as a complex system of a large number of spherical elements, determinately connecting with each other, as well as with the working planes of the machine. It has been determined that the relationship between the soil particles during deformation is viscoelastic in its nature. The calculation of forces is presented in the form of an algorithm for the interaction of elements on each other in relation to the distance of their location. The equations of motion are used that describe the change in the dynamic state of the soil over time. The movement of the working bodies of the unit, including spherical disk working bodies with cutouts in the framework of the mathematical model, has been considered in the simulated space, described as a parallelepiped. The ability to simulate the interaction of the working bodies of a forest fire soil-throwing machine with a working medium, including plant roots, which are located next to each other in the form of spherical elements in the geometric region. The task of increasing the efficiency of the forest fire-fighting soil-throwing machine when laying fire strips has been solved by improving the quality of preparing the soil shaft with spherical hydraulic disks equipped with a cutting edge with semicircular cuts, which are subsequently taken by thrower-cutters and feed the soil flow in a given direction.

Keywords: soil cutting, soil environment; working body; spherical disk, modeling, finite element method, spherical particle

Введение

Анализ литературных и патентных источников показал, что в наибольшей степени эффективными и производительными являются лесопожарные грунтометательные машины, совмещающие в своей конструкции дисковые рабочие органы и фрезы-метатели. Однако существующие конструкции этого типа имеют ряд недостатков: недостаточно разрыхленный почвенный вал перед фрезами-метателями, высокую массу и габариты, что значительно снижает мобильность машины и области её применения, а также высокую энергоёмкость технологического процесса. Параметры технологического процесса создания минерализован-

ных полос и метания грунта в зону огня и конструкции агрегатов с комбинированными рабочими органами недостаточно обоснованы, поэтому необходимо проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

На современном этапе развития науки и техники одним из основных этапов разработки наукоемкой продукции является моделирование сложных систем или процессов, поскольку современная технология является чрезвычайно сложным техническим объектом. При создании лесопожарной грунтометательной машины с высокими характеристиками производительности и качества работы целесообразно использовать математическое моделирование.

Цель исследования – повышение эффективности рабочих процессов лесопожарной грунтометательной машины за счет повышения качества подготовки почвенного вала вырезными сферическими дисками с гидроприводом.

Материалы и методы

Для достижения поставленной цели предложены новые технические решения и разработана конструктивно-технологическая схема лесопожарной грунтометательной машины, у которой привод сферических дисков, оснащенных режущей кромкой с полукруглыми вырезами, осуществлен от отдельных гидромоторов [1].

Для моделирования механического поведения элементов грунта используется метод динамики частиц [2–5]. Описание почвогрунта в модели имитации процесса определено исходя из возможности применения мощных современных компьютеров. В процессе применения, конечно-элементного приближения почвогрунт определен как соотношение большого количества (порядка 10^3-10^5) отдельных шарообразных элементов. Размеры элементов могут быть как одинаковыми для упрощения исследования, так и разными для исключения неблагоприятных эффектов периодичности плотной упаковки элементов. Элементы грунта механически участвуют в процессе, как между собой, так и с рабочими поверхностями машины.

При решении поставленной задачи наиболее подходит метод динамики частиц. На основании выбранного метода решения принимается во внимание, что рабочая среда, с которой будет происходить взаимодействие рабочих поверхностей, состоит из шаров с ограниченным диаметром от 0,04 до 0,08 м. В имитационной модели происходит максимально точное взаимодействие частиц грунта с грунтом, также учитывается и контакт рабочих поверхностей с грунтом с учетом сил сухого и вязкого трения, а также учтены упругие силы при взаимодействии элементов (рис. 1). Движение всех описанных элементов в процессе работы имитационной модели учитывает законы классической динамики. В модели необходимо воспроизвести изменение состояния грунта (процесс выгрузки или транспортировки) и определить показатели потока грунта: дальность выброса, кучность, высоту покрытия полосы пожара, подвергаемой тушению.

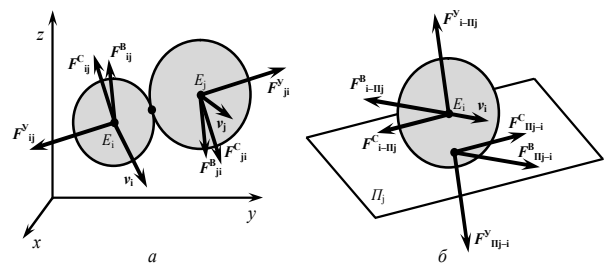


Рис. 1. Силы, возникающие при контакте двух элементов грунта между собой (а), а также между элементом грунта и поверхностью рабочих органов машины (б): F^N – упругие силы; F^C и F^B – силы сухого и вязкого трения (собственные разработки)

Визуализация и описание процесса происходит в трехмерном декартовом пространстве (x, y, z) . Расположение каждого компонента E_i обозначается шестью переменными: компонентами скорости (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) и координатами его центра (x_i, y_i, z_i) .

В ходе выполнения перманентно происходит корректировка координат всех вершин (точек) определенных треугольников T_{ij} (где i – номер треугольника, j – номер вершины). Изменение всех игрековых координат обозначенных треугольных поверхностей выполняется на основе прямолинейного равномерного поступательного движения грунтомета вдоль оси OY :

$$y_{ij}^{\tau} = y_{ij}^{\tau-1} + v \times \Delta t, \quad (1)$$

где y_{ij}^{τ} – координата j -й вершины i -го треугольника на шаге интегрирования τ ; v – скорость поступательного движения машины; Δt – величина шага интегрирования.

Возможности имитационной модели позволяют поэтапно подключать рабочие органы агрегата, и в процессе происходит постепенное углубление рабочих органов, что способствует определению сбалансированности агрегата при прямолинейном движении комбинированной конструкции в первые секунды работы. В момент времени $t = 0$ машина помещается над поверхностью почвогрунта (нижние точки рабочих поверхностей агрегата касаются плоскости почвогрунта), и за промежуток времени $t_{заг}$ машина выходит на установленную величину заглубления рабочих органов. Поэтому компьютерный эксперимент начинается после прихода грунтомета в равновесное положение.

Для задания в модели сферического диска с десятью вырезами задавали сначала отдельный структурный мотив диска (рис. 2). В теории симметрии структурным мотивом называется часть объекта, которая повторяется для получения всего объекта, в частности, рассматриваемый диск можно получить поворотным транслированием структурного мотива относительно оси диска.

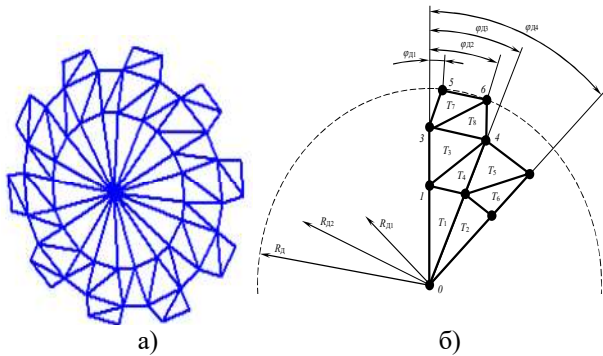


Рис. 2. Представление в модели сферического диска с вырезами как совокупности элементарных треугольников: а – внешний вид диска, установленного под двумя пространственными углами; б – индексация базовых точек и элементарных треугольников структурного мотива диска (собственные разработки)

Координаты шести точек структурного мотива задаются следующими выражениями (с учетом поворотной трансляционной симметрии, задаваемой параметром $i = 1...10$ и началом нумерации с индекса 401):

$$\begin{aligned}
 x_{400+6(i-1)+1} &= x_r + x_d - x_{d1}; \\
 y_{400+6(i-1)+1} &= y_r + y_d + R_{d1} \cos\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+1} &= z_r + z_d + R_{d1} \sin\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+2} &= x_r + x_d - x_{d1}; \\
 y_{400+6(i-1)+2} &= y_r + y_d + R_{d1} \cos\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d3}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+2} &= z_r + z_d + R_{d1} \sin\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d3}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+3} &= x_r + x_d - x_{d2}; \\
 y_{400+6(i-1)+3} &= y_r + y_d + R_{d2} \cos\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+3} &= z_r + z_d + R_{d2} \sin\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+4} &= x_r + x_d - x_{d2};
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
 y_{400+6(i-1)+4} &= y_r + y_d + R_{d2} \cos\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d3}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+4} &= z_r + z_d + R_{d2} \sin\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d3}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+5} &= x_r + x_d - x_{d3}; \\
 y_{400+6(i-1)+5} &= y_r + y_d + R_d \cos\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d1}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+5} &= z_r + z_d + R_d \sin\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d1}\right); \\
 x_{400+6(i-1)+6} &= x_r + x_d - x_{d3}; \\
 y_{400+6(i-1)+6} &= y_r + y_d + R_d \cos\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d2}\right); \\
 z_{400+6(i-1)+6} &= z_r + z_d + R_d \sin\left(\omega_d t + 2\pi \frac{i}{10} + \phi_{d2}\right),
 \end{aligned}$$

где x_d, y_d, z_d – смещения диска по декартовым осям относительно компоновочного центра грунтомета; R_d – радиус сферического диска относительно оси вращения (в базовом компьютерном эксперименте принят равным 0,32 м); R_{d1} и R_{d2} – радиусы окружностей дискретизации диска (соответственно 0,18 и 0,27 м); x_{d1}, x_{d2}, x_{d3} – смещения окружностей дискретизации в осевом направлении относительно кромки диска (соответственно 0,028, 0,060, 0,085 м); ω_d – угловая скорость вращения диска с гидроприводом; $\phi_{d1}, \phi_{d2}, \phi_{d3}$ – угловые ширины: передней кромки выступа диска, выступа вместе с передней кромкой без задней кромки, полная ширина выступа (соответственно равны 1,8; 9,0; 10,8°).

После задания предварительных координат базовых точек диска на каждом шаге интегрирования осуществляется пошаговый поворот сферического диска, оснащенного режущей кромкой с полукруглыми вырезами. Установка сферического диска на угол β по отношению к вертикальной плоскости производится с одновременным изменением координат базовых точек:

$$\begin{cases}
 r = \sqrt{(x_i - (x_r + x_d))^2 + (z_i - (z_r + z_d))^2}; \\
 \phi = \begin{cases} \arctan \frac{z_i - (z_r + z_d)}{x_i - (x_r + x_d)}, & x_i - (x_r + x_d) \geq 0; \\ \arctan \frac{z_i - (z_r + z_d)}{x_i - (x_r + x_d)} + 180^\circ, & x_i - (x_r + x_d) < 0; \end{cases} \tag{4} \\
 x_{iII} = x_r + x_d + r \cos(\phi + \beta); \\
 y_{iII} = y_i; \\
 z_{iII} = z_r + z_d + r \sin(\phi + \beta),
 \end{cases}$$

где r и ϕ – полярные координаты базовых точек

в системе координат, связанной с точкой размещения сферического диска; (x_i, y_i, z_i) и $(x_{iП}, y_{iП}, z_{iП})$ – координаты базовой точки i до и после преобразования вращения относительно оси ОУ.

Относительно направления движения агрегата сферический диск устанавливается на угол атаки α , при этом производится следующее преобразование поворота:

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \sqrt{(x_{иП} - (x_r + x_d))^2 + (y_{иП} - (y_r + y_d))^2}; \\ \phi = \begin{cases} \arctan \frac{y_{иП} - (y_r + y_d)}{x_{иП} - (x_r + x_d)}, & x_{иП} - (x_r + x_d) \geq 0; \\ \arctan \frac{y_{иП} - (y_r + y_d)}{x_{иП} - (x_r + x_d)} + 180^\circ, & x_{иП} - (x_r + x_d) < 0; \end{cases} \\ x_{иП2} = x_r + x_d + r \cos(\phi + \alpha); \\ y_{иП2} = y_r + y_d + r \sin(\phi + \alpha); \\ z_{иП2} = z_{иП}, \end{array} \right. \quad (5)$$

где $(x_{iП}, y_{iП}, z_{iП})$ и $(x_{iП2}, y_{iП2}, z_{iП2})$ – координаты базовой точки i до и после преобразования вращения относительно оси ОZ.

На основе базовых точек задаются элементарные треугольники рабочей поверхности сферического диска с вырезами. Структурный мотив i ($i = 1 \dots 10$) включает восемь треугольников:

$$\begin{aligned} & T_{61+8(i-1)+1}(P_{400}, P_{400+6(i-1)+1}, P_{400+6(i-1)+2}), \\ & T_{61+8(i-1)+2}(P_{400}, P_{400+6(i-1)+2}, P_{400+6(i-1)+6}), \\ & T_{61+8(i-1)+3}(P_{400+6(i-1)+1}, P_{400+6(i-1)+2}, P_{400+6(i-1)+3}), \\ & T_{61+8(i-1)+4}(P_{400+6(i-1)+2}, P_{400+6(i-1)+3}, P_{400+6(i-1)+4}), \\ & T_{61+8(i-1)+5}(P_{400+6(i-1)+3}, P_{400+6(i-1)+4}, P_{400+6(i-1)+5}), \\ & T_{61+8(i-1)+6}(P_{400+6(i-1)+4}, P_{400+6(i-1)+5}, P_{400+6(i-1)+6}), \\ & T_{61+8(i-1)+7}(P_{400+6(i-1)+2}, P_{400+6(i-1)+4}, P_{400+6(i-1)+6}), \\ & T_{61+8(i-1)+8}(P_{400+6(i-1)+4}, P_{400+6(i-1)+6}, P_{400+6(i-1)+3+6}), \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, сферический диск с вырезами представлен в модели 80 элементарными треугольными поверхностями.

В процессе имитации движения машины в пространстве задействованные поверхности всех рабочих органов описывают сложное вращательное и поступательное движение твердого тела по отношению к рабочей среде.

Размещение в пространстве точек центров сферических дисков с полукруглыми вырезами $(x_{Ц}, y_{Ц}, z_{Ц})$ осуществляется согласно величине заглубления дисков в грунт a_d , а также по заданным геометрическим параметрам машины (рис. 3):

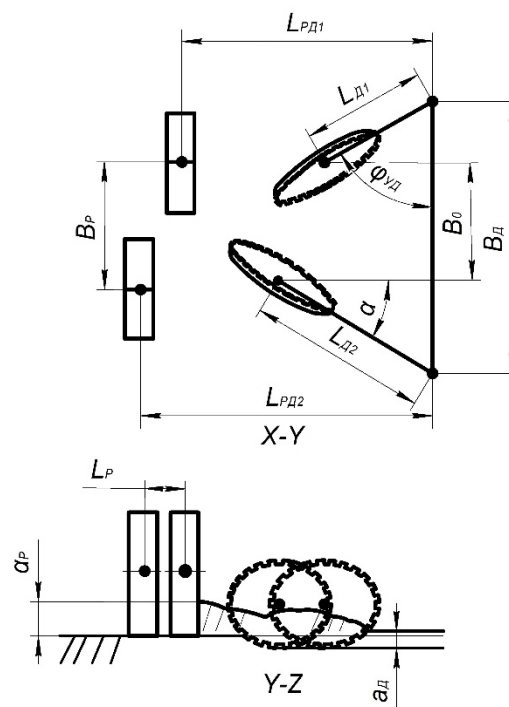


Рис. 3. Основные геометрические параметры компоновки рабочих органов лесопожарной грунтометательной машины (собственные разработки)

$$\begin{aligned} x_{Ц1} &= \frac{B_d}{2} - L_{D1} \cos \phi_{yD}; \\ y_{Ц1} &= y_M + L_{PD1} - L_{D1} \sin \phi_{yD}; \\ z_{ЦP1} &= R_d; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} x_{Ц2} &= -\frac{B_d}{2} + L_{D2} \cos \phi_{yD}; \\ y_{Ц2} &= y_M + L_{PD2} - L_{D2} \sin \phi_{yD}; \\ z_{ЦP2} &= R_d \end{aligned}$$

$$x_{ЦP1} = \frac{B_p}{2};$$

$$y_{ЦP1} = y_M;$$

$$x_{ЦP2} = -\frac{B_p}{2};$$

$$y_{ЦP2} = y_M + L_p;$$

$$z_{Ц1} = R_{D1} - a_d;$$

$$z_{Ц2} = R_{D2} - a_d.$$

где B_p – расстояние между осями роторов;

$L_{рд1}$ – расстояние от рамы до центра левого ротора;
 $L_{рд2}$ – расстояние от рамы до центра правого ротора;
 $L_{д1}$ – длина рычага крепления диска левого;
 α – угол атаки диска (угол установки к направлению движения); $\varphi_{уд}$ – угол между рычагом крепления диска и рамой; $L_{д2}$ – длина рычага крепления диска правого; B_0 – расстояние между центрами дисков; $B_д$ – расстояние между шарнирами крепления рычагов дисков на раме; a_p – глубина заглабления фрез-метателей; L_p – расстояние между фрезами-метателями; $a_д$ – величина заглабления диска; $У_M$ – координата машины вдоль линии ее движения.

Результаты и обсуждение

Для удобства моделирования разработана компьютерная программа «Программа для моделирования двухроторной грунтометательной машины» на языке ObjectPascal в интегрированной среде программирования BorlandDelphi 7. На рис. 4 представлена форма ввода исходных данных для моделирования двухроторной грунтометательной машины.

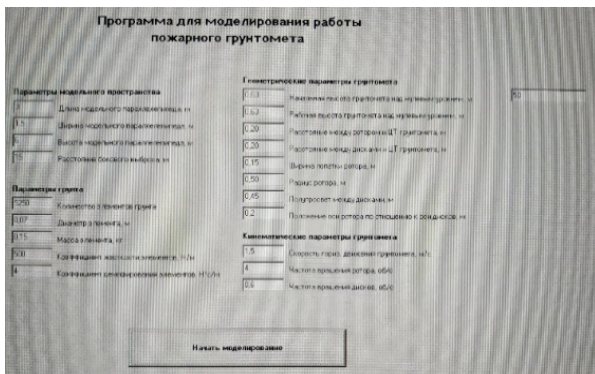


Рис. 4. Форма ввода исходных данных для моделирования двухроторной грунтометательной машины (собственные разработки)

Программа предназначена для имитации работы лесопожарной грунтометательной машины. Перед началом моделирования программа позволяет ввести геометрические и кинематические параметры машины, а также параметры грунта. В процессе работы программа непрерывно выводит на экран: три проекции работающей машины, профиль оставляемой борозды, числовые значения показателей качества работы машины и потребляемую мощность (рис. 5).

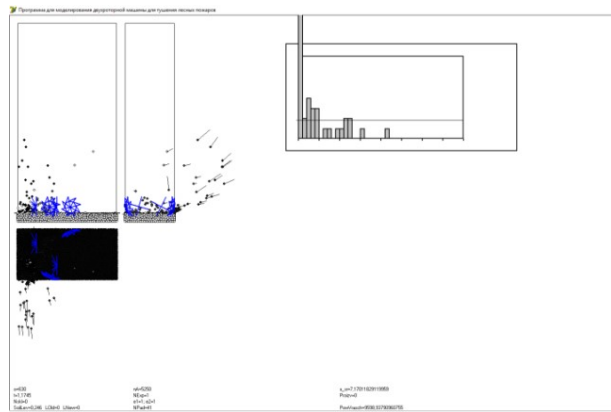


Рис. 5. Вывод результатов моделирования в разработанной программе для моделирования двухроторной грунтометательной машины (собственные разработки)

Выводы

Разработана имитационная модель комбинированного грунтомета, содержащего сферические диски с полукруглыми вырезами и фрезерные рабочие органы, позволяющая проводить предварительные испытания опытного образца грунтомета. Представленные в имитационной программе сферические диски позволяют решить задачу повышения эффективности рабочих процессов лесопожарной грунтометательной машины благодаря повышению качества подготовки сферическими дисками с гидроприводом, оснащенными режущей кромкой с полукруглыми вырезами, почвенного вала, который впоследствии забирают фрезы-метатели и подают поток грунта в требуемом направлении.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-38-60041 – Совершенствование методологической базы моделирования системы и процессов ликвидации лесных пожаров направленно-регулируемым потоком грунта.

Библиографический список

1. Патент 2684940 РФ, МПКЕ02F 3/18 (2006.01) E02F 5/00 (2006.01) A62C 3/02 92006.01). Пожарный грунтomet-полосопрокладыватель : 2018125062, 09.07.2018 ; заявл. 09.07.2018 ; опубл. 16.04.2019 / И. М. Барте́нев, П. И. Попиков, С. В. Малюков, С. В. Зимарин, Н. А. Шерстюков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ».
2. Математическая модель процесса подачи и выброса грунта рабочими органами комбинированной машины для тушения лесных пожаров / М. В. Драпалюк, И. М. Барте́нев, М. А. Гнусов [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84. – С. 232–246.
3. Hoover, W. G. Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations / W. G. Hoover // *Physica A*. – 1983. – Vol. 118. – P. 111–122.
4. Белоцерковский, О. М. Метод крупных частиц в газовой динамике / О. М. Белоцерковский, Ю. М. Давыдов. – Москва : Наука, 1982. – 392 с.
5. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – Москва : Мир, 1987. – 638 с.
6. Григорьев, Ю. Н. Численное моделирование методами частиц-в-ячейках / Ю. Н. Григорьев, В. А. Вшивков, М. П. Федорук. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2004. – 360 с.
7. Кривцов, А. М. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела / А. М. Кривцов, Н. В. Кривцова // Дальневосточный математический журнал ДВО РАН. – 2002. – Т. 3. – № 2. – С. 254–276.
8. Español, P. Hydrodynamics from Dissipative Particle Dynamics / P. Español // *Phys. Rev. E*. – 1995. – Vol. 52. – P. 1734–1742.
9. Jakob, C. Particle Methods. An Overview / C. Jakob, H. Konietzky. – Freiberg, 2012. – 24 p.
10. Particle Dynamics Modeling for Colloid Suspensions / D. S. Bolinteanu, G. S. Grest, J. B. Lechman [et al.] // *Comp. Part. Mech.* – 2014. – Vol. 1. – P. 321–356.
11. A Dissipative Particle Dynamics Method for Arbitrary Complex Geometries / Li Zhen, Bian Xin, Tang Yu-Hang, G. E. Karniadakis // arXiv:1612.08761v1.
12. Kovalev, O. O. On Simulation of Hydraulic Fracturing Using Particle Dynamics Method / O. O. Kovalev // Proc. of Summer School – Conference "Advanced Problems in Mechanics". – Saint-Petersburg, 2013. – P. 285–291.

References

1. Bartenev I.M., Popikov P.I., Malyukov S.V., Zimarin S.V., Sherstyukov N.A. *Pozharnyj gruntomet-polosoprokladyvatel'* [Firefighting soil-thrower and fire-break maker]. Patent RF, no. 2018125062, 2019.
2. Drapalyuk M.V., Bartenev I.M., Gnosov M.A. (et al.) (2012) *Matematicheskaya model' processa podachi i vybrosa grunta rabochimi organami kombinirovannoj mashiny dlja tusheniya lesnyh pozharov* [A mathematical model of the process of feeding and discharging soil by the working bodies of a combined machine for extinguishing forest fires]. *Politematicheskij setevoy jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polytematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], no. 84, pp. 232-246 (in Russian).
3. Hoover W.G. (1983) Atomistic Nonequilibrium Computer Simulations. *Physica A*, Vol. 118, pp. 111-122.
4. Belotserkovskij O.M., Davydov Ju.M. *Metod krupnyh chastic v gazovoj dinamike* [Method of large particles in gas dynamics]. Moscow, Nauka, 1982, 392 p. (in Russian).
5. Hokni R., Istvud Dzh. *Chislennoe modelirovanie metodom chastits* [Numerical simulation using the particle method]. Moscow, World, 1987, 638 p. (in Russian).

6. Grigoryev Ju.N., Vshivkov V.A., Fedoruk M.P. *Chislennoe modelirovanie metodami chastits-v-jacheykakh* [Numerical simulation using particle-in-cell methods]. Novosibirsk, Publishing house of SB RAS, 2004, 360 p. (in Russian).
7. Krivtsov A.M., Krivtsova N.V. (2002) *Metod chastits i yego ispol'zovanie v mekhanike deformiruемого tverdogo tela* [The particle method and its use in the mechanics of a deformable solid]. *Dal'nevostochnyj matematicheskij zhurnal DVO RAN* [Far Eastern mathematical journal of the Feb RAS], Vol. 3, no. 2, pp. 254-276 (in Russian).
8. Español P. (1995) Hydrodynamics from Dissipative Particle Dynamics. *Phys. Rev. E.*, Vol. 52, pp. 1734-1742.
9. Jakob C., Konietzky H. Particle Methods. AnOverview. Freiberg, 2012, 24 p.
10. Bolintineanu D.S., Grest G.S., Lechman J.B. (et al.) (2014) Particle Dynamics Modeling for Colloid Suspensions. *Comp. Part. Mech*, Vol. 1, pp. 321-356.
11. Zhen Li, Xin Bian, Yu-Hang Tang, Karniadakis G.E. A Dissipative Particle Dynamics Method for Arbitrary Complex Geometries. arXiv:1612.08761v1.
12. Kovalev O.O. On Simulation of Hydraulic Fracturing Using Particle Dynamics Method. Proc. of Summer School – Conference "Advanced Problems in Mechanics". St. Petersburg, 2013, pp. 285-291.

Сведения об авторах

Гнусов Максим Александрович – кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела (НИО) ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: mgnusov@yandex.ru.

Драпалюк Михаил Валентинович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Попиков Петр Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Шерстюков Никита Александрович – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: nikita.sherstyukov@mail.ru.

Information about authors

Gnusov Maksim Aleksandrovich – PhD (Engineering), researcher, Research Department (NIO), FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: mgnusov@yandex.ru.

Drapalyuk Mikhail Valentinovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Popikov Petr Ivanovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Sherstyukov Nikita Aleksandrovich – post-graduate student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: nikita.sherstyukov@mail.ru.

ОЦЕНКА ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА В РАЙОНЕ ПРЕДПОЛАГАЕМОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ЛЕСОВОЗНОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ

доктор технических наук, доцент **В.А. Зеликов**¹
кандидат технических наук, доцент **П.В. Тихомиров**²
кандидат технических наук, доцент **В.В. Никитин**³
студент **А.А. Скрыпников**⁴
аспирант **В.В. Самцов**⁴
аспирант **М.А. Бурдаков**¹

1 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет»,
г. Брянск, Российская Федерация

3 – ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)», г. Москва, Российская Федерация

4 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»,
г. Воронеж, Российская Федерация

На современном этапе развития нашей страны, при широком использовании инновационных методик, для решения сложных задач необходимо проводить комплексную оценку. Представленная статья содержит доказательств необходимости проведения комплексной оценки природных и техногенных условий строительства лесовозной автомобильной дороги. Разработанная методика комплексной оценки позволяет значительно упростить процесс выбора рационального местоположения трассы и исключить интуитивный подход к решению данной задачи. При проведении комплексной оценки на картосхемах наносится трасса проектируемой лесовозной дороги, проводится оценка природных условий и хозяйственной деятельности человека в районе изысканий. Предложенная методика позволяет легко и последовательно проанализировать особенности природных и техногенных условий в районе строительства лесовозной автомобильной дороги. Анализ основных компонентов ландшафтов позволяет сделать выводы об условиях увлажнения, высоте снежного покрова, количестве дней в году с метелями, рельефе района проложения лесовозной автомобильной дороги, физико-геологических явлениях, характеристиках грунтовых условий, характеристиках плотности населения, расположении уникальных природных комплексов и итоговом показателе сложности условий дорожного строительства. Показатель сложности строительства лесовозной автомобильной дороги отражает степень влияния природных условий, хозяйственной деятельности человека и ценность территорий. Представленная в статье методика помогает определить рациональное местоположение трассы лесовозной автомобильной дороги, оценивая влияние природных условий и хозяйственной деятельности человека на локальных территориях – микроландшафтах, каждый из которых представляет собой природный комплекс с различной сложностью условий дорожного строительства и ценностью земельных угодий. Предложенная комплексная оценка позволяет сравнивать микроландшафты по сложности дорожного строительства и находить территории, наиболее благоприятные для проложения лесовозной автомобильной дороги. Лесовозная автомобильная дорога, проложенная в пределах микроландшафтов, имеющих минимальный показатель сложности, будет отвечать экономическим и природоохранным требованиям. Минимальное значение итогового показателя характеризует микроландшафт с наиболее благоприятными условиями строительства лесовозной автомобильной дороги. Максимальное значение итогового показателя сложности характеризует микроландшафты с наиболее неблагоприятными условиями строительства лесовозной автомобильной дороги. При выборе варианта проложения трассы лесовозной автомобильной дороги срав-

нение предлагается производить по средневзвешенному показателю сложности дорожного строительства, средневзвешенному показателю ценности занимаемых земель и средневзвешенному итоговому показателю сложности дорожного строительства. Показатели сложности строительства лесовозной автомобильной позволяют в каждом дорожном ландшафте определять стоимость строительства по основным видам затрат. В рассматриваемой статье для оценки степени ландшафтного проложения лесовозной автомобильной дороги предложен ряд показателей, с помощью которых можно количественно охарактеризовать результаты трассирования. Представленная в статье методика позволяет осуществить выбор рационального местоположения трассы лесовозной автомобильной дороги.

Ключевые слова: лесовозная автомобильная дорога, комплексная оценка, природные и техногенные условия строительства, рациональное местоположение трассы, микроландшафт, средневзвешенный показатель сложности дорожного строительства, средневзвешенный показатель ценности занимаемых земель, средневзвешенный итоговый показатель сложности дорожного строительства, показатели трассирования, стоимость

EVALUATION OF HUMAN NATURAL CONDITIONS AND ECONOMIC ACTIVITIES IN THE AREA OF PROPOSED CONSTRUCTION OF A TRUCK HAUL ROAD

DSc (Engineering), Associate Professor **V.A. Zelikov**¹

PhD (Engineering), Associate Professor **P.V. Tikhomirov**²

PhD (Engineering), Associate Professor **V.V. Nikitin**³

student **A. A. Skrypnikov**⁴

post-graduate student **V.V. Samtsov**⁴

post-graduate student **M.A. Burdakov**¹

1 – FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

2 – FSBEI HE "Bryansk State Technological University of Engineering", Bryansk, Russian Federation

3 – FSBEI HE "Bauman Moscow State Technical University", Moscow, Russian Federation

4 – FSBEI HE "Voronezh State University of Engineering Technologies", Voronezh, Russian Federation

Abstract

At the present stage of development of our country with the widespread use of innovative methods, it is necessary to conduct a comprehensive assessment in order to solve complex problems. The presented article contains evidence of the need for a comprehensive assessment of the natural and man-made conditions for the construction of logging road. The developed methodology for integrated assessment can significantly simplify the process of choosing a rational location of the route and eliminate the intuitive approach to solving this problem. When conducting a comprehensive assessment, the route of the designed logging road is plotted on the cartographic diagrams, and the environmental conditions and human economic activities in the survey area are assessed. The proposed technique allows you to easily and consistently analyze the features of natural and technogenic conditions in the area of logging road construction. An analysis of the main components of the landscapes enables to draw conclusions about the conditions of humidification, the height of the snow cover, the number of days in a year with snowstorms, the relief of the area where the forest road was laid, physical and geological phenomena, characteristics of soil conditions, characteristics of population density, the location of unique natural complexes and the total complexity of road construction conditions. The complexity indicator for the logging road construction reflects the degree of influence of natural conditions, human economic activity and the value of the territories. The methodology presented in the article helps to determine the rational location of the forest road route by assessing the impact of natural conditions and human economic activity on local territories - micro-landscapes, each of which is a natural complex with varying complexity of road construction conditions and land value. The proposed comprehensive assessment enables to compare microlandscapes by the complexity of road construction and find the areas most favorable for logging road construction. A forest road constructed within micro-landscapes with a minimum complexity will meet economic and en-

vironmental requirements. The minimum value of the final indicator characterizes the micro landscape with the most favorable conditions for logging road construction. The maximum value of the final complexity indicator characterizes micro-landscapes with the most unfavorable conditions for the construction of a logging road. When choosing the option of laying the route of a forest road, a comparison is proposed to be made according to the weighted average indicator of the complexity of road construction, the average weighted indicator of the value of occupied land and the average weighted total indicator of the complexity of road construction. Indicators of the complexity of logging road construction make it possible to determine the cost of construction by the main types of costs for every road landscape. In this article a number of indicators have been proposed to assess the degree of landscape lying of logging road. These indicators can be used to quantitatively characterize the results of tracing. The methodology presented in the article makes it possible to choose a rational location of the forest road route.

Keywords: truck haul road, comprehensive assessment, natural and technological conditions of construction, rational location of the route, microlandscape, average weighted indicator of the complexity of road construction, average weighted indicator of the value of occupied land, average weighted total indicator of the complexity of road construction, tracing indicators, cost

Для оценки природных условий и хозяйственной деятельности человека в районе предполагаемого строительства лесовозной автомобильной дороги на картосхемах наносится трасса проектируемой дороги и проводится оценка природных условий и хозяйственной деятельности человека в районе изысканий [1, 2].

Данная методика позволяет легко и последовательно проанализировать особенности природных и техногенных условий в районе строительства и, опираясь на эти данные, разработать основные рекомендации по проектированию инженерного сооружения.

Для оценки природных условий и хозяйственной деятельности человека в районе проложения лесовозной автомобильной дороги используются карты-схемы, отражающие пространственное распределение и количественные характеристики компонентов ландшафта на территории.

Анализ основных компонентов ландшафтов, таких как климат, рельеф, неблагоприятные физико-геологические процессы, грунты, хозяйственная деятельность человека, позволяют сделать выводы о природных и техногенных условиях района строительства.

Опыт оценки природных условий и хозяйственной деятельности человека с помощью набора специальных картосхем компонентов географической среды позволяет сделать следующие выводы:

1. Региональное районирование исключает элемент недооценки природных и техногенных

характеристик компонентов ландшафта при проектировании лесовозных автомобильных дорог.

2. Акцентирует внимание проектировщиков и изыскателей на наиболее сложных и неблагоприятных природных процессах и явлениях.

3. Экономит время и средства на сбор и обработку исходных данных о характеристиках климата, рельефа, геологических условиях, хозяйственной деятельности человека, статистическую разработку многолетних наблюдений за высотой снегового покрова, влажностью грунтов открытого поля и др.

4. Значительно сокращает объем пояснительной записки, а самое важное, улучшает ее содержание.

Решения, связанные с выбором рационального проложения трассы лесовозной автомобильной дороги, рассматриваются и в процессе проведения подобных технических изысканий. Определяя местоположение трассы лесовозной автомобильной дороги, инженер сталкивается с необходимостью оценивать влияние природных условий и хозяйственной деятельности человека на локальных территориях – микроландшафтах, каждый из которых представляет собой природный (изученный хозяйственной деятельностью) комплекс с различной сложностью условий дорожного строительства и ценностью земельных угодий.

Комплексная оценка природных и техногенных условий строительства лесовозной автомобильной дороги позволяет значительно упростить

процесс выбора рационального местоположения трассы и исключить интуитивный подход к решению этой важнейшей задачи.

В практике могут встретиться два случая:

1. Наиболее благоприятный – имеется региональное районирование и по району изысканий крупномасштабные картографические материалы, аэрофотосъемка с применением беспилотных летательных аппаратов (1:25000; 1:10000);

2. Региональное районирование и картографический материал отсутствуют.

В первом случае для построения структурных моделей микроландшафтов используются материалы регионального районирования для определения основных характеристик географической среды. Рельеф изучается и оценивается по картографическому материалу.

Во втором случае характеристики рельефа, растительность, почвогрунты, хозяйственная деятельность человека определяются в ходе рекогносцировочных работ по воздушной линии между опорными точками трассы.

Для определения рационального проложения трассы лесовозной автомобильной дороги необходимо исследовать природные условия на локальных территориях по проведению, близкому к воздушной линии между контрольными точками, определенными заданием на проектирование [3, 4].

Оценка природных условий проводится в ходе линейного дорожно-ландшафтного районирования методом построения дорожно-ландшафтного профиля [5, 6].

Материалы для линейного районирования:

1. Ситуационный план района изысканий в М – 1:10000;

2. Продольный профиль по ранее намеченному варианту;

3. Рекогносцировочные исследования грунтово-геологических условий в районе строительства.

Ценность земель определена по данным экспертной оценки, исполненной применительно к специфике сельскохозяйственных угодий и природных комплексов на территории.

Основные характеристики компонентов микроландшафтов и показатели ценности земель в

районе проложения лесовозной автомобильной дороги приводятся в графах 1-9 дорожно-ландшафтного профиля.

Итоговый показатель сложности определяется по формуле

$$P_{ит} = ((P_{рк}^{п+0} + P_0^{п+0}) + (P_{rp}^3 + P_{hp}^3 + P_{3B}^3 + P_0^3)) \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 + (P_{rp}^и + P_{hp}^и + P_0^и) + (P_{BГ}^{МД} + \frac{P_0^{МД}}{K_y} + P_0^C) \cdot K_{цт} \cdot K_K. \quad (1)$$

Сложность строительства лесовозной автомобильной дороги определена на участках, границами которых являются высота снегового покрова, возможности снеготаносов, наличие и глубина болот, тип местности по условиям увлажнения, вид грунта.

Каждый из таких участков является микроландшафтом, которому присущи характерные особенности.

Показатели сложности определены по видам затрат и представлены в графах 10-16 дорожно-ландшафтного профиля.

В графе 16 приводится итоговый показатель сложности строительства лесовозной автомобильной дороги по каждому микроландшафту, отражающий степень влияния природных условий, хозяйственной деятельности человека и ценность территорий. Комплексная оценка позволяет сравнивать микроландшафты по сложности дорожного строительства и находить территории, наиболее благоприятные для проложения лесовозной автомобильной дороги.

Лесовозная автомобильная дорога, проложенная в пределах микроландшафтов, имеющих минимальный показатель сложности, будет отвечать экономическим и природоохранным требованиям [7-10].

Набор микроландшафтов с минимальным показателем сложности в направлении воздушной линии между контрольными точками трассы является искомым коридором трассирования [11, 12].

Показатели сложности дорожного строительства определены в ходе линейного ландшафтного районирования, изменяются в широком диапазоне значений от 1,18 до 6,45. Минимальное значение итогового показателя характеризует микроландшафт с наиболее благоприятными условиями

строительства лесовозной автомобильной дороги (песчаные и супесчаные грунты, первый тип местности по условиям увлажнения, территория в пределах микроландшафта не представляет ценности для сельскохозяйственного освоения). Максимальное значение итогового показателя сложности характеризует микроландшафты с наиболее неблагоприятными условиями строительства лесовозной автомобильной дороги (заторфованные территории с мощностью торфа до 8,0 м, ценные сельскохозяйственные угодья, сады).

Показатель сложности увеличивается в зависимости от ценности земель. Минимальные значения имеют территории, занятые кустарником, границы угодий, заторфованные площади. Максимальное значение $K_{цт} = 3,5$; $3,2$ имеют территории, занятые садами, пашней.

Таким образом, учитывая ценность территорий, ландшафтный коридор трассирования будет состоять из микроландшафтов, в которых $K_{цт}$ имеет минимальное значение.

Анализ микроландшафтов в районе изысканий позволяет наметить дополнительный вариант местоположения трассы лесовозной автомобильной дороги между контрольными точками, которые для сопоставления вариантов приняты общими.

Сравнение вариантов трассы дороги выполнено по следующим показателям:

1. Средневзвешенному показателю сложности дорожного строительства $P_{длм}$;
2. Средневзвешенному показателю ценности занимаемых земель $K_{цт}$;
3. Средневзвешенному итоговому показателю сложности дорожного строительства $P_{ит}$.

Результаты расчетов приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов

Показатели	Основной ход	Вариант
Показатель сложности $P_{длм}$	2,00	1,98
Показатель ценности земель $K_{цт}$	1,80	1,58
Итоговый показатель сложности $P_{ит}$	3,28	3,17

(собственные вычисления авторов)

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что варианты местоположения трассы лесовозной автомобильной дороги являются конкурирующими, однако предпочтение следует отдать варианту трассы, а не основному ходу, так как на 14 % сокращается площадь ценных земель, отводимых под строительство лесовозной автомобильной дороги, что, в свою очередь, дает определенный экономический эффект.

Оценка локальных территорий для определения рационального местоположения трассы лесовозной автомобильной дороги выполнена беспилотными летательными аппаратами путем рекогносцировочного исследования по линии дорожно-ландшафтного профиля.

Инженерно-ландшафтное районирование позволило выделить в районе изысканий микроландшафты с различными показателями сложности строительства и ценностью территорий и помимо основного хода, определенного заданием проектирования, наметить вариант, который по своим показателям является конкурирующим. Интересно отметить, что конкурирующим является традиционный водораздельный ход.

Как и в предыдущем примере, сравнение вариантов выполнено по средневзвешенному показателю сложности строительства лесовозной автомобильной дороги $P_{длм}$, коэффициенту ценности занимаемых земель $K_{цт}$ и итоговому показателю сложности строительства $P_{ит}$. Результаты сравнения приводятся в табл. 2.

Таблица 2

Результаты сравнения

Показатели	Основной ход	Вариант
$P_{длм}$	1,40	1,80
$K_{цт}$	2,04	1,58
$P_{ит}$	2,86	2,93

(собственные вычисления авторов)

При определении ориентировочной стоимости строительства, а также в процессе планирования капитальных затрат на строительство лесовозных автомобильных дорог могут быть использованы материалы регионального районирования. Определенные показатели сложности строительства лесовозной автомобильной ($P_{длм}$) позволяют в ка-

ждом дорожном ландшафте определять стоимость строительства по основным видам затрат (подготовительные работы, земляное полотно, морозозащитный слой, обстановка дороги). Разработан комплекс электронно-вычислительных программ, с помощью которого легко определить затраты на 1 км дороги для $P_{дл}$ в районе предполагаемого строительства.

Для определения стоимости строительства C^y расчет выполняется по формуле

$$C^y = (C + C^p + C^{до}) \cdot K_{п}, \quad (2)$$

где C – стоимость 1 км дороги, определяется по графику в зависимости от показателя сложности дорожного ландшафта;

C^p – стоимость рекультивации земель на 1 км лесовозной автомобильной дороги;

$C^{до}$ – стоимость 1 км дорожной одежды;

$K_{п}$ – коэффициент, учитывающий увеличение стоимости строительства за счет прочих работ и затрат.

Для оценки степени ландшафтного проложения лесовозной автомобильной дороги предложен ряд показателей (табл. 3), с помощью которых можно количественно охарактеризовать результаты трассирования.

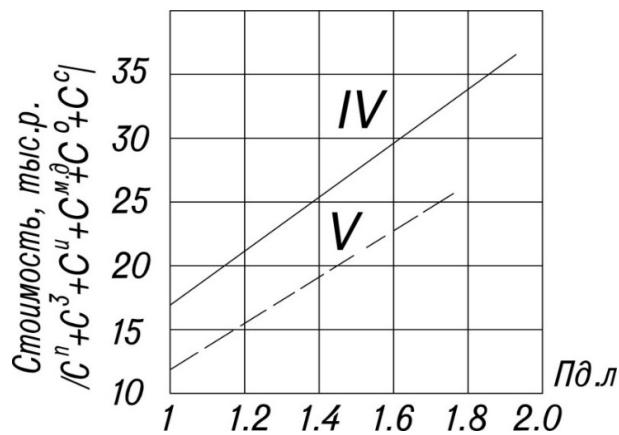


Рис. 1. График для определения стоимости строительства лесовозной автомобильной дороги (собственные разработки)

Таблица 3

Показатели количественных характеристик результатов трассирования

Показатели	Обозначения
Оценка экономичности	
Средневзвешенный показатель сложности дорожного строительства	$I_{дкм} = \frac{\sum P_{длм} \cdot l}{L}$
Оценка взаимосвязи трассы с рельефом	
Показатель ритма трассы в плане	$P_{рпл} = \frac{r_{пл}}{r_p}$
Показатель ритма трассы в проекте	$P_{рпр} = \frac{r_{пр}}{r_p}$
Показатель пространственной плавности	
Коэффициент ритмичности	$K_p = \frac{P_{рпл}}{P_{рпр}}$
Показатель взаимосвязи трассы с ситуационной обстановкой	
Стиль трассы	$C_{тр} = \frac{L_{кр}}{L}$
Оценка степени рационального использования земель	
Коэффициент использования ценности земель	$K_{цт} = \frac{\sum P_{цт} \cdot l}{L}$

(собственные экспериментальные данные авторов)

Первый приведенный в таблице показатель $P_{длм}$ отражает влияние природных и техногенных условий и определяется из отношения суммарного протяжения трассы в пределах микроландшафта с различными показателями сложности к общей длине трассы. Критерием оценки экономичности проложения трассы дороги предлагается считать наименьшее значение $P_{длм}$ в районе изысканий, т. е. $P_{длм} - P_{длм} \min$.

Показатель $P_{рпл}$ характеризует степень увязки трассы дороги в плане с рельефом и определяется как отношение ритма трассы к ритму рельефа или наоборот, в зависимости от того, какой из этих показателей имеет большее числовое значение.

$$R_{пл} = \frac{L}{n+1}, \quad (3)$$

где L – длина трассы, км;

n – количество вершин углов поворота в плане;

$n + 1$ – количество интервалов между вершинами углов поворота.

Оптимальное соотношение достигается при $P_{rПл} = 1,0$.

Показатель $P_{rПр}$ характеризует степень увязки трассы с рельефом в профиле. Этот показатель определяется как отношение ритма трассы в профиле к ритму рельефа или наоборот, в зависимости от того, какой из этих показателей имеет большее условное значение.

Количество пониженных и повышенных точек определяется по продольному профилю, при этом для лесовозных автомобильных дорог рекомендуется принимать перегибы с глубиной расчленения выше 5 м

$$r_{Пр} = \frac{L}{m+1}, \quad (4)$$

где L – длина трассы, км;

m – количество перегибов в профиле;

$m + 1$ – количество интервалов между перегибами.

Оптимальное состояние достигается при $P_{rПл} = 1,0$.

Считается доказанным, что пространственная плавность трасс обеспечивается совмещением в плане и профиле углов поворотов в кривых. Исходя из этого положения, мы предлагаем характеризовать пространственную плавность трассы коэффициентом ритмичности (K_r). Оптимальное значение этого показателя достигается при $K_r = 1,0$.

Стиль трассы ($C_{Ст}$) определяется как отношение суммы нелинейных участков к общей длине трассы и характеризует степень увязки трассы с ситуацией в районе проложения лесовозной автомобильной дороги. В природе отсутствуют несвойственные ей прямые линии, поэтому ландшафтная трасса должна иметь показатель $C_{Ст} = 1,0$. Коэффициент использования ценных земель $K_{ЦТ}$ характеризует рациональное проложение трассы лесовозной автомобильной дороги в пределах лесохозяйственных угодий и территорий различного хозяйственного использования. Этот коэффициент определяется из отношения суммарного протяже-

ния трассы в пределах контуров с различными показателями ценности земель к общему протяжению трассы. Критерием оценки рационального использования ресурсов является показатель $K_{ЦТ} = 1,0$.

Используя частные оценки, характеризующие степень удовлетворения экономических, эргономических и природоохранных показателей, рекомендуется общая оценка степени ландшафтного проложения дороги, которая определяется для равнинного рельефа по формуле

$$P_D = \frac{P_{ДЛМ} \cdot K_{ЦТ}}{C_{Ст}} - P_{ит} \min, \quad (5)$$

для пересеченного рельефа по формуле

$$P_L = \frac{P_{ДЛМ} \cdot K_{ЦТ}}{C_{Ст}} \cdot P_{rПл} \cdot P_{rПр} \cdot K_r - P_{ит} \min, \quad (6)$$

где P_L – показатель степени ландшафтного проложения трассы лесовозной автомобильной дороги;

$P_{ДЛМ}$ – средневзвешенный показатель сложности дорожного строительства;

$K_{ЦТ}$ – коэффициент использования ценных земель;

$C_{Ст}$ – стиль трассы;

K_r – коэффициент ритмичности;

$P_{ит} \min$ – показатель, характеризующий минимальную сложность дорожного строительства и ценность территории в пределах района изысканий;

$P_{rПл}$ – показатель, характеризующий степень увязки трассы в плане с рельефом;

$P_{rПр}$ – показатель, характеризующий степень увязки трассы в профиле с рельефом.

Разработанная комплексная оценка природных и техногенных условий строительства лесовозной автомобильной дороги позволяет значительно упростить процесс выбора рационального местоположения трассы и исключить интуитивный подход к решению этой важнейшей задачи.

Данная методика позволяет легко и последовательно проанализировать особенности природных и техногенных условий в районе строительства и, опираясь на эти данные, разработать основные рекомендации по проектированию инженерного сооружения.

Анализ микроландшафтов в районе изысканий позволяет наметить дополнительный вариант

местоположения трассы лесовозной автомобильной дороги между контрольными точками, который по своим показателям является конкурирующим.

Используя частные оценки, степень удовлетворения экономических, эргономических и природоохранных показателей, рекомендуется разработанная комплексная технико-экономическая оценка инженерно-ландшафтного проектирования проложения трассы лесовозной автомобильной дороги на основе введения количественных показателей,

характеризующих результаты трассирования лесовозной автомобильной дороги.

Проведенные исследования и проектные проработки позволяют предложить для проектирования набор методов и моделей, с помощью которых легко проводить общую оценку природных условий и хозяйственной деятельности человека при изысканиях и проектировании лесовозных автомобильных дорог.

Библиографический список

1. Козлов, В. Г. Методы, модели и алгоритмы проектирования лесовозных автомобильных дорог с учетом влияния климата и погоды на условия движения : специальность 05.21.01 «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» : дис. ... д-ра техн. наук : защищена 28.11.2017 / Козлов Вячеслав Геннадиевич. – Архангельск : САФУ, 2017. – 406 с.
2. Implementing road safety measures in conditions limited by budget / V. A. Korchagin, A. K. Pogodaev, V. E. Kliavin, V. A. Zelikov // *Transportation Research Procedia. Thirteenth International Conference on Organization and Traffic Safety Management in Large Cities Saint Petersburg, 27-29 September, 2018.* – Vol. 36. – P. 308–314. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146518304411>. – DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.090.
3. Афоничев, Д. Н. Совершенствование расчета объемов земляных работ в системе автоматизированного проектирования автомобильных дорог / Д. Н. Афоничев. – Воронеж, 2007. – 117 с.
4. Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points / A. V. Skrypnikov, V. G. Kozlov, A. N. Belyaev, E. V. Chernyshova // *Advances in Intelligent Systems and Computing.* – 2019. – Vol. 726. – P. 654–667.
5. Курьянов, В. К. Информационные технологии в лесопромышленном производстве : учеб. пособие : в 2-х ч. / В. К. Курьянов, В. Е. Межов, В. Н. Харин. – Воронеж : Воронеж. гос. лесотехн. акад., 2002. – 311 с.
6. Бабков, В. Ф. Дорожные условия и безопасность движения : учеб. для вузов / В. Ф. Бабков. – Москва : Транспорт, 1993. – 271 с.
7. Комплексные экспериментальные исследования изменения параметров и характеристик дорожных условий, транспортных потоков и режимов движения под влиянием климата и погоды / В. Г. Козлов, А. В. Скряпников, Е. Ю. Микова [и др.] // *Лесотехнический журнал.* – 2018. – Т. 8. – № 2 (30). – С. 156–168.
8. Methodology of Formation of Diagnostic Criteria for Evaluation of Safety of Motor Transport Public Service / M. Z. Erknepeshyan, V. A. Zelikov, K. A. Yakovlev, V. A. Ivannikov // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.* – 2016. – Vol. 11, № 3. – P. 1787–1792. – URL: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_0216_3568.pdf.
9. Повышение эффективности функционирования системы «Водитель-Автомобиль-Дорога-Среда» в лесном комплексе / В. К. Курьянов, О. В. Рябова, Е. В. Кондрашова [и др.]. – Москва : «Флинта», «Наука», 2010. – 130 с.
10. Mathematical models to determine the influence of road parameters and conditions on vehicular speed / V. G. Kozlov, A. V. Skrypnikov, V. V. Samcov [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series The proceedings International Conference "Information Technologies in Business and Industry".* – 2019. – P. 032041.
11. Формирование модели проектирования системы "дорожные условия – транспортные потоки" и пути ее реализации / В. Г. Козлов, А. В. Скряпников, Е. Ю. Микова [и др.] // *Лесотехнический журнал.* – 2018. – Т. 8. – № 1 (29). – С. 100–111.
12. Иванников, В. А. Моделирование информационных систем грузопотоков на лесозаготовительных предприятиях / В. А. Иванников, А. В. Быков, А. С. Сушков // *Строительные и дорожные машины.* – 2012. – № 2. – С. 24–28.

13. Бабков, В. Ф. Проектирование автомобильных дорог. Ч. I / В. Ф. Бабков, О. В. Андреев. – Москва : Книга по Требованию, 2013. – 368 с.
14. Трескинский, С. А. Склоны и откосы в дорожном строительстве / С. А. Трескинский. – Москва : Транспорт, 1984. – 157 с.
15. Теоретические основы рекреационной географии / [отв. ред. В.С. Преображенский] ; АН СССР, Ин-т географии. – Москва : Наука, 1975. – 224 с.

References

1. Kozlov V.G. *Metody, modeli i algoritmy proyektirovaniya lesovoznykh avtomobil'nykh dorog s uchetom vliyaniya klimata i pogody na usloviya dvizheniya*. Dis. dokt. tekhn. nauk [Methods, models and design algorithms of forest roads taking into account the influence of climate and weather on traffic condition. DSc thesis]. Arkhangel'sk, 2017, 406 p. (in Russian)
2. Korchagin V.A., Pogodaev A.K., Kliavin V.E., Zelikov V.A. (2018) Implementing road safety measures in conditions limited by budget. *Transportation Research Procedia*, Vol. 36, pp. 308-314. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146518304411>. doi: 10.1016/j.trpro.2018.12.090.
3. Afonichev D.N. *Sovershenstvovaniye rascheta ob'yemov zemlyanykh rabot v sisteme avtomatizirovannogo proyektirovaniya avtomobil'nykh dorog* [Improving the calculation of the volume of earthwork in the computer-aided design of roads]. Voronezh, 2007. 117 p. (in Russian).
4. Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Belyaev A.N., Chernyshova E.V. (2019) Theoretical foundations of the method of designing a clothoid track with approximation of succession of points. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 726, pp. 654-667.
5. Kuryanov V.K., Mezhev V.E., Kharin V.N. *Informatsionnyye tekhnologii v lesopromyshlennom proizvodstve* [Information technology in forestry production]. Voronezh, 2002. 311 p. (in Russian).
6. Babkov V.F. *Dorozhnyye usloviya i bezopasnost' dvizheniya* [Road conditions and traffic safety]. Moscow, 1993. 271 p. (in Russian)
7. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Mikova E.Yu. (et al.) (2018) *Kompleksnyye eksperimental'nyye issledovaniya izmeneniya parametrov i kharakteristik dorozhnykh usloviy, transportnykh potokov i rezhimov dvizheniya pod vliyaniem klimata i pogody* [Comprehensive experimental studies of changes in the parameters and characteristics of road conditions, traffic flows and traffic modes under the influence of climate and weather]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry engineering Journal], Vol. 8, no. 2 (30), pp. 156-168 (in Russian).
8. Erknepeshyan M.Z., Zelikov V.A., Yakovlev K.A., Ivannikov V.A. (2016) Methodology of Formation of Diagnostic Criteria for Evaluation of Safety of Motor Transport Public Service. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11, no. 3, pp. 1787-1792. URL: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_0216_3568.pdf.
9. Kuryanov V.K., Ryabova O.V., Kondrashova E.V. (et al.) *Povysheniye effektivnosti funktsionirovaniya sistemy «Voditel'-Avtomobil'-Doroga-Sreda» v lesnom komplekse* [Increasing the efficiency of the "Driver-Car-Road-Environment" system in the forest complex]. Moscow, 2010. 130 p. (in Russian).
10. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Samcov V.V. (et al.) (2019) Mathematical models to determine the influence of road parameters and conditions on vehicular speed. *Journal of Physics: Conference Series The proceedings International Conference "Information Technologies in Business and Industry"*, p. 032041.
11. Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Mikova E.Yu. (et al.) (2018) *Formirovaniye modeli proyektirovaniya sistemy "dorozhnyye usloviya - transportnyye potoki" i puti yeye realizatsii* [Formation of the design model of the system "road conditions - traffic flows" and the ways of its implementation]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 8, no. 1 (29), pp. 100-111 (in Russian).
12. Ivannikov V.A., Bykov A.V., Sushkov A.S. (2012) *Modelirovaniye informatsionnykh sistem gruzopotokov na lesozagotovitel'nykh predpriyatiyakh* [Modeling of information systems of cargo flows at logging enterprises]. *Stroitel'nyye i dorozhnyye mashiny* [Construction and road machines], no. 2, pp. 24-28 (in Russian).

13. Babkov V.F., Andreev O.V. *Proyektirovaniye avtomobil'nykh dorog* [Road design]. 2013, 368 p. (in Russian).
14. Treskinskiy S.A. *Sklony i otkosy v dorozhnom stroitel'stve* [Slopes and slopes in road construction]. Moscow, 1984. 157 p. (in Russian).
15. Preobrazhenskiy V.S. *Teoreticheskiye osnovy rekreatsionnoy geografii* [Theoretical foundations of recreational geography]. Moscow, 1975. 224 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Зеликов Владимир Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации перевозок и безопасности движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Тихомиров Петр Викторович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой транспортно-технологических машин и сервиса ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», г. Брянск, Российская Федерация; e-mail: vtichomirov@mail.ru.

Никитин Владимир Валентинович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: nikitinvv@bmstu.ru.

Скрыпников Алексей Алексеевич – студент факультета управления и информатики в технологических системах ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: skrypnikovasafe@mail.ru.

Самцов Вадим Викторович – аспирант кафедры информационной безопасности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: samcovVV@mail.ru.

Бурдаков Максим Алексеевич – аспирант автомобильного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: opbd_vglta@mail.ru.

Information about authors

Zelikov Vladimir Anatolyevich – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Tikhomirov Petr Viktorovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Transport-Technological Machines and Services, FSBEI HE "Bryansk State Technological University of Engineering", Bryansk, Russian Federation; e-mail: vtichomirov@mail.ru.

Nikitin Vladimir Valentinovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment for Forestry Production, FSBEI HE "Bauman Moscow State Technical University", Moscow, Russian Federation; e-mail: nikitinvv@bmstu.ru.

Skrypnikov Aleksey Alekseevich – student of the Faculty of Management and Informatics in Technological Systems, FSBEI HE "Voronezh State University of Engineering Technologies", Voronezh, Russian Federation; e-mail: skrypnikovasafe@mail.ru.

Samtsov Vadim Viktorovich – post-graduate student, Department of Information Security, FSBEI HE "Voronezh State University of Engineering Technologies", Voronezh, Russian Federation; e-mail: samcovVV@mail.ru.

Burdakov Maksim Alekseevich – post-graduate student, Faculty of Automotive, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: opbd_vglta@mail.ru.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ВЫКОПЧНОЙ МАШИНЫ НА КАЧЕСТВО ВЫКОПКИ ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА

кандидат технических наук **И.В. Казаков**

ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства»,
г. Пушкино, Российская Федерация

Одним из важных показателей качества выращиваемого в лесных питомниках посадочного материала является сохранность корней и количество почвы, остающейся на корневой системе растений при их выкопке. Применяемые в лесных питомниках для выкопки посадочного материала машины не в полной мере отвечают этим требованиям, так как недостаточно рыхлят почвенный пласт и не обеспечивают отделение почвы от корневых систем растений. Кроме того, для извлечения растений из почвы требуются значительные усилия, и при этом происходит обрыв части корней. Современные выкопчные машины с активными рабочими органами позволяют отделять почву от корневых систем растений и обеспечивают сохранность необходимого ее количества на них при снижении усилия на извлечение растений из почвы. В статье приведены результаты исследований влияния режимов работы выкопчной машины на качество уборки посадочного материала, на основании которых обоснована рациональная частота колебаний рычагов и бил в пределах 675 кол/мин при подаче на одно их колебание, равной 5,4 см/кол, и рабочей скорости движения агрегата 2,2 км/ч. Такие режимы работы выкопчной машины обеспечивают сохранность почвы на корневой системе укрупненных сеянцев ели в количестве 136,2 г и допустимое усилие на их извлечение из почвы в пределах 36,4 Н.

Ключевые слова: посадочный материал, питомник, выкопчная машина, режимы работы, корневая система

THE INFLUENCE OF PLANT LIFTER OPERATING MODES ON THE DIGGING QUALITY OF PLANTING MATERIAL

PhD (Engineering) **I.V. Kazakov**

FBI All-Russian Research institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (VNIILM),
Pushkino, Russian Federation

Abstract

One of the important indicators of the quality of planting material grown in forest nurseries is preservation of roots and the amount of soil remaining on the root system of plants when they are excavated. Machines used in forest nurseries for digging planting material do not fully meet these requirements, since soil layer is not sufficiently loosened and soil is not separated from the root systems of plants. In addition, considerable effort is required to extract plants from the soil, and part of the roots is cut off. Modern plant lifters with active working bodies enable to separate the soil from the root systems of plants and ensure safety of the required amount on them, reducing the effort to extract plants from the soil. The article presents the results of studies of the influence of plant lifter operating modes on the quality of planting material harvesting, on the basis of which the rational oscillation frequency of the levers and beats within 675 counts/min is substantiated when applying one oscillation of 5.4 cm/count and operating speed 2.2 km/h. These operation modes of plant lifter ensure the preservation of soil on the root system of enlarged spruce seedlings in the amount of 136.2 g and allowable effort to remove them from the soil within 36.4 N.

Keywords: planting stock, nursery, plant lifter, operating modes, root system

Введение

Выкопка посадочного материала в лесных питомниках является наиболее трудоемкой и ответственной технологической операцией при его выращивании [1, 4, 9–14]. Применяемые для выполнения этой операции выкопочные машины не в полной мере отвечают предъявляемым к ним требованиям, так как они обеспечивают только подрезку корневых систем растений, недостаточно рыхлят пласт почвы и не полностью отделяют почву от их корневых систем. [3, 7, 8]. Это требует значительных усилий на извлечение растений из почвы и приводит к обрыву части корней, особенно мелких, наиболее ценных и важных для последующего приживания посадочного материала при посадке на лесокультурной площади. Современные выкопочные машины с активными рабочими органами обеспечивают более интенсивное рыхление почвенного пласта и отделение почвы от корневой системы растений [2, 7, 8]. Однако из-за недостатка исследований влияния режимов работы выкопочных машин на качественные показатели уборки посадочного материала в лесных питомниках сдерживается более широкое их применение. В связи с этим обоснование рациональных режимов работы выкопочных машин с активными рабочими органами представляет научный и практический интерес для разработки новых и совершенствования конструкций существующих машин, предназначенных для уборки посадочного материала в лесных питомниках.

Методы и материалы

Исследования влияния режимов работы выкопочной машины с активными рабочими органами для отряхивания почвы от корневых систем растений на качественные показатели уборки посадочного материала проводили на экспериментальном образце выкопочной машины МВ-1,3 [5, 6]. Эта машина предназначена для выкопки в лесных питомниках посадочного материала с одновременным рыхлением подрезанного слоя почвы и активным отряхиванием почвы от корневой системы растений.

Экспериментальный образец выкопочной машины МВ-1,3 агрегируется с трактором МТЗ-82 и состоит из рамы 1, подкапывающей скобы 2, вала рыхлителя 3, конического редуктора 4,

карданного вала 5, кривошипов 6, шатунов 7, рычагов 8, бил 9, опорных колес 10 и стойки 11 (рис. 1) [5].

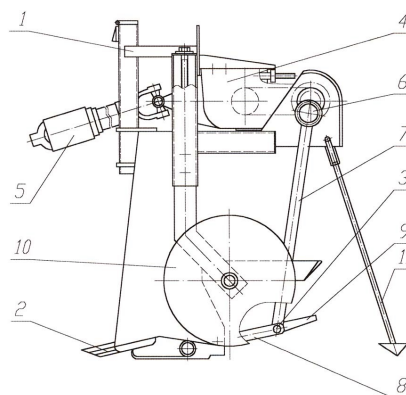


Рис. 1. Схема выкопочной машины МВ-1,3
(Казаков И.В. (2004))

Рама представляет собой сварную конструкцию и предназначена для монтажа на ней основных узлов машины.

Подкапывающая скоба 2 обеспечивает подрезку почвенного пласта и его рыхление и состоит из вала 3 с рычагами 8 и билами 9. Рычаги 8 являются продолжением подкапывающей скобы 2 и шарнирно присоединены к ее задней грани. Между билами на кронштейнах размещены ролики, которые взаимодействуют с рычагами и обеспечивают им колебание в вертикальной плоскости.

Механизм привода рабочих органов включает карданный вал 5, конический редуктор 4, вал рыхлителя 3, кривошипы 6 и шатуны 7, образующие кривошипно-шатунный механизм [5, 6, 9].

Колебания бил осуществляются от кривошипно-шатунного механизма, а рычагов – от вала рыхлителя через кронштейны с роликами. Била и рычаги колеблются в противофазе: когда била опускаются вниз, то рычаги поднимаются вверх и наоборот.

Била в количестве 10 штук и длиной около 300 мм и шириной 10 мм приварены к валу рыхлителя и приводятся в колебательное движение от двух кривошипно-шатунных механизмов, расположенных с обеих сторон машины. Расстояние между центрами бил принято из конструктивных сообра-

жений равным 120 мм и с учетом расстояния между рядками растений, которое для сеянцев составляет 22,5 см и для саженцев – 25 см. Рычаги в количестве 4 присоединены шарнирно к задней грани подкапывающей скобы и являются ее продолжением. Длина рычага составляет 450 мм при его ширине, равной 40 мм и расстоянием между их центрами, равном 240 мм. Частота колебаний рычагов и бил регулируется с помощью сменных звездочек в трансмиссии их привода и составляет 270, 415, 540 и 675 кол/мин.

Амплитуда колебаний рычагов и бил изменяется с помощью регулировочных отверстий на коромыслах и составляет 60, 100 и 140 мм. Эксцентриситет кривошипа принят равным 50 мм с учетом его назначения и конструктивного исполнения устройства. Опорные колеса 10 снабжены винтовым механизмом и предназначены для регулирования глубины выкопки растений от 15 до 30 см. Технологический процесс работы выкопчной машины МВ-1,3 заключается в следующем. При поступательном движении агрегата и включенном ВОМ тракторист с помощью гидросистемы переводит машину в рабочее положение. При этом подкапывающая скоба заглубляется в почву на предварительно установленную с помощью опорных колес глубину выкопки растений, и подрезанный пласт почвы надвигается на скобу.

Крутящий момент от ВОМ трактора посредством карданного вала передается на конический редуктор, на выходном валу которого установлена ведущая звездочка. Далее крутящий момент через цепную передачу передается на ведомую звездочку, закрепленную на промежуточном валу, и через кривошипно-шатунный механизм преобразуется в колебательное движение рычагов и бил. При этом рычаги и била рыхлят подрезанный пласт почвы с растениями и отделяют почву от их корневых систем.

Результаты и обсуждение

Исследования влияния режимов работы экспериментального образца выкопчной машины МВ-1,3 на качество уборки посадочного материала проводили в питомнике Сергиево-Посадского лесхоза на выкопке укрупненных сеянцев ели, средние показатели которых составили: высота – 31,8 см,

ширина кроны – 22,8 см, длина корней – 18,0 см и диаметр корневой шейки – 7,0 мм. Опыты проводили при выкопке укрупненных сеянцев ели на глубине, равной 20 см. Рабочая скорость выкопчной машины в агрегате с трактором МТЗ-82 составила 2,2 км/ч. Усилие на извлечение растений из разрыхленного слоя суглинистой почвы измеряли динамометром, а массу почвы, оставшейся на корневых системах после ее отделения от них, определяли с помощью лабораторных весов. Повторность опытов принималась пятикратной, с количеством замеров в каждом опыте не менее 30. Средняя влажность суглинистой почвы в период исследований в слое 0...10 см составила 23,0 % и в слое 10...20 см – 22,5 %. Подача на одно колебание рычага и била при рабочей скорости агрегата, равной 2,2 км/ч, изменялась от 5,4 до 13,5 см/кол.

В процессе проведения опытов было установлено, что при частоте колебаний рабочих органов (рычагов и бил), равной 540 кол/мин, и амплитуде их колебаний, равной 60 мм, подрезанный пласт почвы с укрупненными сеянцами ели практически был не разрыхлен и почва не отделена от их корневых систем. Это объясняется тем, что в насыщенном корнями верхнем слое почвы при глубине хода подкапывающей скобы, равной 20 см, рабочие органы при амплитуде их колебаний 60 мм практически не обеспечивали рыхления подрезанного пласта почвы. С увеличением амплитуды колебаний рабочих органов до 100 мм, т. е. до половины глубины выкопки посадочного материала, наблюдалось более интенсивное рыхление почвенного пласта и лучшее отделение почвы от корневых систем растений. При амплитуде колебаний рабочих органов, равной 140 мм, т. е. практически большей части (около 70 %) подрезанного пласта почвы, наблюдались случаи повреждений (поломки) стволиков укрупненных сеянцев ели и их корней. В связи с этим дальнейшие исследования влияния частоты колебаний рычагов и бил на качественные показатели выкопки укрупненных сеянцев ели проводили с амплитудой их колебаний, равной 100 мм.

Полученные результаты исследований приведены в таблице, анализ которой показывает, что при частоте колебаний рычагов и бил, равной

270 кол/мин, и подаче на одно их колебание 13,5 см/кол подрезанный пласт почвы практически не был разрыхлен. Усилие на извлечение растений из почвы составило 165,7 Н и превышало предусмотренное агротехническими требованиями (не более 100 Н). Масса почвы, связанной с корневой системой укрупненных сеянцев ели, составила 374,5 г, что также не соответствует агротехническим требованиям, предусматривающим количество почвы на корневой системе посадочного материала в пределах 100...150 г.

С увеличением частоты колебаний рабочих органов до 415 кол/мин и уменьшением подачи на одно колебание до 8,8 см/кол, масса почвы на корневой системе укрупненных сеянцев ели уменьшилась и составила 248,1 г. Это также превышает допустимую величину массы почвы на корневой системе растений и не соответствует агротехническим требованиям. Усилие на извлечение растений из почвы уменьшилось до 96,2 Н и соответствует агротехническим требованиям. При увеличении частоты колебаний рабочих органов до 540 кол/мин и уменьшении подачи на одно их колебание до 6,8 см/кол масса почвы на корневой системе укрупненных сеянцев ели снизилась до 177,4 г и усилие на их извлечение из почвы уменьшилось до 58,6 Н. Такой режим работы не полностью соответствует агротехническим требованиям, так как количество почвы на корневой системе сеянцев превышает допустимый предел.

При дальнейшем увеличении частоты колебаний рабочих органов до 675 кол/мин и уменьшении подачи на одно колебание до 5,4 см/кол масса почвы, остающейся на корневой системе укрупненных сеянцев ели, уменьшилась до 136,2 г и усилие на их извлечение снизилось до 36,4 Н. Эти режимы

работы машины полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к качеству выкопки посадочного материала, и их целесообразно использовать при разработке выкопочных машин для лесных питомников.

Таким образом, эти режимы работы выкопочной машины обеспечивают требуемые показатели качества уборки укрупненных сеянцев ели и полностью соответствуют агротехническим требованиям на выкопку посадочного материала в лесных питомниках. Повреждений стволиков растений и их корневых систем не наблюдалось. Следует также отметить, что благодаря существенному снижению усилия на извлечение растений из почвы производительность рабочих, занятых на уборке посадочного материала, повышается на 40-60 %.

Заключение

В результате проведенных исследований влияния режимов работы выкопочной машины на качество уборки укрупненных сеянцев ели установлено, что при рабочей скорости движения агрегата 2,2 км/ч частота колебаний рычагов и бил должна быть в пределах 675 кол/мин и подача на одно колебание рабочего органа – 5,4 см/кол, при этом масса почвы на корневой системе укрупненных сеянцев ели и усилие на их извлечение из почвы соответствуют агротехническим требованиям и составляют, соответственно, 136,2 г и 36,4 Н.

Полученные результаты исследований использованы при модернизации и разработке усовершенствованной конструкции выкопочной машины МВ-1,3А, которая успешно прошла опытно-производственную проверку и приемочные испытания и была рекомендована на серийное производство.

Таблица

Влияние частоты колебаний рабочих органов и подачи на качественные показатели выкопки укрупненных сеянцев ели

Номер опыта	Частота колебаний рычагов и бил, кол/мин	Подача на одно колебание рычага и била, см/кол	Средняя масса почвы на корневой системе укрупненных сеянцев ели, г	Среднее усилие на извлечение укрупненных сеянцев ели из почвы, Н
1	270	13,5	374,5±14,3	165,7±8,3
2	415	8,8	248,1±11,6	96,2±3,7
3	540	6,8	177,4±9,4	58,6±3,1
4	675	5,4	136,2±7,6	36,4±2,2

Источник: собственные вычисления автора

Библиографический список

1. Бартнев, И. М. Совершенствование технологий и средств механизации лесовосстановления: моногр. / И. М. Бартнев, М. В. Драпалюк, В. И. Казаков ; под. ред. И. М. Бартнева. – Москва : ФЛИНТА : Наука, 2013. – 208 с. – Библиогр.: с. 198–205. – ISBN 978-5-9765-1746-2.
2. Вялкова, П. Ф. Выбор типа и обоснование основных параметров рабочих органов для отделения корней от почвы на выкопочно-выборочных машинах: специальность 05.06.02 «Машины и механизмы лесоразработок, лесозаготовок, лесного хозяйства и деревообрабатывающих производств : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Вялкова Полина Федоровна ; Воронежский лесотехн. институт. – Воронеж, 1975. – 25 с.
3. Драпалюк, М. В. Перспективные технологии выращивания посадочного материала в лесных питомниках : моногр. / М. В. Драпалюк. – Воронеж, 2006. – 247 с. – Библиогр.: с. 208–246. – ISBN 5-9273-0974-7.
4. Казаков, В. И. Технологии и механизация выращивания посадочного материала в питомниках лесной зоны : моногр. / В. И. Казаков. – Москва : ВНИИЛМ, 2001. – 186 с. – Библиогр.: с. 179–185.
5. Казаков, И. В. Машины и оборудование для лесных питомников / И. В. Казаков. – Пушкино : ВНИИЛМ, 2004. – 60 с. – Библиогр.: с. 58–59.
6. Казаков, В. И. Аналитические исследования процесса разрушения почвенного пласта выкопочной машиной с активными рабочими органами / В. И. Казаков, И. В. Казаков // Лесотехнический журнал. – 2015. – Т. 5. – № 3. – С. 220–228. – Библиогр.: С. 226–227.
7. Климов, Г. Б. Выкопчные орудия и машины, их конструкция, параметры рабочих органов и элементы расчета / Г. Б. Климов, Е. И. Пожилов // Исследование и обоснование параметров новых лесохозяйственных машин : сб. науч. трудов. – Москва : ВНИИЛМ, 1976. – С. 83–104. – Библиогр.: с. 104.
8. Наставление по выращиванию посадочного материала древесных и кустарниковых пород в лесных питомниках РСФСР. – Москва : Лесн. пром-сть, 1979. – 175 с. – Библиогр.: с. 173–174.
9. Пошарников, Ф. В. Перспективные технологии выращивания лесопосадочного материала : моногр. / Ф. В. Пошарников, И. В. Казаков ; Фед. агентство по образованию, ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2007. – 290 с. – Библиогр.: с. 282–286. – ISBN 978-5-7994-0259-4.
10. Dureya, M. L. Forest Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings / M. L. Dureya, T. L. Landis. – M. Nijhoff / Dr W. Junk Publishers. – The Hague/Boston/Lancaster, for Forest Research Laboratory, Oregon State University. Corvallis, 1984. – 386 p.
11. Hallman, R. G. Equipment for Forest Nurseries / R. G. Hallman. – Part of the Forestry Sciences book series (FOSC, volume 11). – 1984. – P. 17–24.
12. Liegel, L. H. A Technical Guide for Forest Nursery Management in the Caribbean and Latin America / L. H. Liegel. – U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1987. – 156 p.
13. Lopushinsky, W. Relationship of shoot-root ratio to survival and growth of outplanted Douglas-fir and ponderosa pine seedlings / W. Lopushinsky. – U.S.D.A. Forest Serv., Pacific NW Forest and Range Exp. Sta., Portland, Oregon. Res. Note PNW-274. – 1976. – 7 p.
14. Mullin, R. E. Root pruning of nursery stock / R. E. Mullin // Forestry Chronicle. – 1966. – Vol. 42. – P. 256–264.

References

1. Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Kazakov V.I.; ed. by I.M. Bartenev. *Sovershenstvovanie tekhnologij i sredstv mekhanizacii lesovosstanovleniya: monografiya* [Improvement of technologies and means of mechanization of forest regeneration: a monograph]. M.: FLINTA: Nauka, 2013, 208 p. ISBN 978-5-9765-1746-2 (in Russian).
2. Vyalkova P.F. *Vybor tipa i obosnovanie osnovnyh parametrov rabochih organov dlya otdeleniya kornej ot pochvy na vykopochno-vyborochnyh mashinah: avtoref. diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Choice of type and justification of the

main parameters of working bodies for separation of roots from soil on digging-selective machines: specialty 05.06.02 "Machines and mechanisms for logging, logging, forestry and woodworking industries: DSc thesis abstract]. Vyalkova Polina Fedorovna. Voronezh, 1975. 25 p. (in Russian).

3. Drapalyuk M.V. *Perspektivnye tekhnologii vyrashchivaniya posadochnogo materiala v lesnyh pitomnikah: monografiya* [Promising technologies for growing planting material in forest nurseries: a monograph]. Voronezh, 2006. 247 p. ISBN 5-9273-0974-7 (in Russian).

4. Kazakov V.I. *Tekhnologii i mekhanizatsiya vyrashchivaniya posadochnogo materiala v pitomnikah lesnoj zony: monografiya* [Technologies and mechanization of growing planting material in nurseries of the forest zone: a monograph]. M.: VNIILM, 2001. 186 p. (in Russian).

5. Kazakov I.V. *Mashiny i oborudovanie dlya lesnyh pitomnikov* [Machines and equipment for forest nurseries]. Pushkino, VNIILM, 2004. 60 p. (in Russian).

6. Kazakov V.I., Kazakov I.V. (2015) *Analiticheskie issledovaniya processa razrusheniya pochvennogo plasta vykopchnoy mashinoj s aktivnymi rabochimi organami* [Analytical studies of the process of destruction of the soil formation by a digging machine with active working bodies]. *Lesotekhnicheskiy zhurnal* [Forestry Engineering Journal], Vol. 5, № 3, pp. 220-228 (in Russian).

7. Klimov G.B., Pozhilov E.I. *Vykopchnye orudiya i mashiny, ih konstrukciya, parametry rabochih organov i elementy rascheta* [Digging tools and machines, their design, parameters working bodies and the elements of the calculation]. *Research and substantiation of parameters of new forestry machines: sat. tr. M.*, VNIILM, 1976. pp. 83-104 (in Russian).

8. *Nastavlenie po vyrashchivaniyu posadochnogo materiala drevesnyh i kustarnikovyh porod v lesnyh pitomnikah RSFSR* [Instruction on the cultivation of planting material of wood and tartar species in the forest nurseries of the RSFSR]. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1979. 175 p. (in Russian).

9. Posharnikov F.V., Kazakov I.V. *Perspektivnye tekhnologii vyrashchivaniya lesoposadochnogo materiala: monografiya* [Promising technologies for growing planting material: a monograph]. Voronezh, 2007. 290 p. ISBN 978-5-7994-0259-4 (in Russian).

10. Duryea M.L., T.D. Landis (1984). *Forest Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings*. Martinus Nijhoff / Dr W. Junk Publishers. The Hague / Boston / Lancaster, for Forest Research Laboratory, Oregon State University. Corvallis. 386 p.

11. Hallman R.G. (1984). *Equipment for Forest Nurseries*. Part of the Forestry Sciences book series (FOSC, volume 11), pp. 17-24.

12. Liegel L.H. (1987) *A Technical Guide for Forest Nursery Management in the Caribbean and Latin America*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 156 p.

13. Lopushinsky W. (1976) *Relationship of shoot-root ratio to survival and growth of outplanted Douglas-fir and ponderosa pine seedlings*. U.S.D.A. Forest Serv., Pacific NW Forest and Range Exp. Sta., Portland, Oregon. Res. Note PNW-274. 7 p.

14. Mullin R.E. (1966) *Root pruning of nursery stock*. *Forestry Chronicle* 42: pp. 256-264.

Сведения об авторе

Казakov Игорь Владимирович – кандидат технических наук, заведующий отделом механизации лесохозяйственных работ и стандартизации ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», г. Пушкино, Российская Федерация, e-mail: igor.kazakov2015@bk.ru.

Information about the author

Kazakov Igor Vladimirovich – PhD (Engineering), Head of the Department of mechanization of forestry works and standardization, FBI "All-Russian Research Institute of Forestry and Mechanization of Forestry", Pushkino, Russian Federation; e-mail: igor.kazakov2015@bk.ru.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЛЕСОПОЖАРНОЙ ГРУНТОМЕТАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ С ГИДРОПРИВОДОМ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

доктор технических наук, профессор **П.И. Попиков**

кандидат технических наук **В.П. Попиков**

соискатель **А.В. Шаров**

аспирант **А.Ф. Петков**

аспирант **А.К. Поздняков**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

Во многих сферах деятельности человека, в особенности в сельском хозяйстве и лесопромышленном комплексе, обширное применение получили технологические машины и оборудование, имеющие в своем арсенале гидравлическую систему для подачи давления на используемые агрегаты для почвенной обработки, посевов, вырубков, корчевки и многих других. В статье рассмотрено использование энергосберегающего гидропривода и приведены экспериментальные данные использования его в лесопожарной грунтометательной машине. Эксперимент проводился с использованием лесохозяйственного трактора ЛХТ-55, на заднюю навеску которого навешивался лабораторный образец лесопожарной грунтометательной машины с приводом ротора-метателя от гидромотора. На задней части рамы трактора ЛХТ-55 установлен регулируемый гидронасос, на котором имеется регулятор объема подаваемой жидкости. В ходе экспериментальных исследований применялись методики, указанные в ГОСТ 20915–2011, ОСТ 70.2.16–73. При проведении экспериментов были определены основные показатели эффективности рабочих процессов лесопожарной грунтометательной машины: максимальный всплеск давления рабочей жидкости в гидроприводе за рабочий цикл P_m ; запасаемая пневмогидравлическим аккумулятором энергия за один рабочий цикл $E_{ц}$ (срабатывания предохранительного клапана); максимальная энергия, которую способен накопить пневмогидравлический аккумулятор с данными параметрами на пог. км или за смену $E_{общ}$; средняя дальность выброса грунта $L_{ср}$ и толщина слоя грунта в зависимости от дальности выброса T . Большое количество выбранных определяющих факторов позволило изобразить графически полученные данные и провести визуальный анализ для получения наиболее эффективных режимов работы лесопожарной грунтометательной машины с энергосберегающим гидроприводом. В работе приведено обоснование новой конструкции лесопожарной грунтометательной машины с энергосберегающим гидроприводом. Получены зависимости показателей эффективности рабочих процессов от конструктивных и технологических параметров лесопожарной грунтометательной машины.

Ключевые слова: грунтометательная машина, энергосберегающий гидропривод, дальность выброса грунта, гидромотор, гидроаккумулятор

INFLUENCE OF OPERATING MODES OF FOREST FIRE SOIL-THROWING MACHINE WITH HYDRAULIC DRIVE ON EFFICIENCY INDICATORS

DSc (Engineering), Professor **P.I. Popikov**

PhD (Engineering) **V.P. Popikov**

external PhD student **A.V. Sharov**

post-graduate student **A.F. Perkov**

post-graduate student **A.K. Pozdnyakov**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

Many areas of human activity, in particular, agriculture and the timber industry, use technological machines and equipment having in their arsenal a hydraulic system for supplying pressure to the used units for soil cultivation, sowing, cutting, rooting out and many others. The article discusses the use of an energy-saving hydraulic drive. It provides experimental data on its use in a forest fire soil-throwing machine. The experiment was carried out using the LHT-55 forestry tractor, on the rear hitch of which a laboratory sample of a fire-fighting soil-throwing machine with a rotor-thrower drive from a hydraulic motor has been mounted. An adjustable hydraulic pump is installed on the rear frame of LHT-55 tractor, on which there is a regulator of the volume of supplied fluid. In the course of experimental studies we used the methods, specified in State Standard 20915–2011, Industrial Standard 70.2.16–73. During the experiments, the main indicators of the efficiency of forest fire-fighting soil-throwing machine have been determined: the maximum surge in the pressure of the working fluid in the hydraulic drive for the duty cycle P_m ; the energy stored by the pneumohydraulic accumulator in one working cycle P_m (operation of the safety valve); the maximum energy that a pneumohydraulic accumulator with these parameters is able to accumulate per line kilometer or per shift E_{av} ; average range of the soil throwing L_{av} and the thickness of the soil layer depending on the distance of throw T . A large number of selected determining factors made it possible to depict graphically obtained data and conduct a visual analysis to obtain the most effective operating modes of a forest fire soil-throwing machine with an energy-saving hydraulic drive. The paper presents the rationale for the new design of a forest fire soil-throwing machine with an energy-saving hydraulic drive. The dependences of the efficiency indicators of working flows on the design and technological parameters of a forest fire soil-throwing machine have been obtained.

Keywords: soil-throwing machine, energy-saving hydraulic drive, distance of soil throwing, hydraulic motor, hydraulic accumulator

Введение

Лесной массив выделяется из очертаний нашей планеты. Сохранение и поддержание лесной экосистемы в актуальном состоянии – это одна из важнейших задач, стоящих перед человечеством. По многолетнему опыту можно сказать, что лесной пожар обычно наблюдается только тогда, когда он уже распространился на большую площадь, что делает его контроль и остановку трудными и даже невозможными [1]. Лесной пожар возникает как в дикой природе, так и в местах обитания человека. Ожесточенность распространения и сложный характер борьбы с огнем в лесном массиве в основном определяют виды лесных культур, природо-

пользование, климатические условия и рельеф местности. Данные факторы показывают, насколько сложной и длительной будет борьба с огнем, сколько гектар зеленых насаждений будет уничтожено. Законодательство Российской Федерации закрепляет правила природопользования, но огромные территории и зачастую отдаленные районы, наполненные легко воспламеняемыми и быстро горючими материалами, такими как сухие листья и ветви, идеально подходят для использования в качестве источника возгорания. Работы по созданию минерализованных полос для борьбы с неконтролируемыми лесными пожарами в лесопромышленном комплексе производятся как предупреди-

тельная мера с помощью агрегатов с пассивными и активными рабочими органами. Когда используемый агрегат оборудован активным рабочим органом, в том числе почвенной фрезой, то появляется возможность, кроме пассивного способа тушения, перейти и на активное направление почвогрунта в зону возгорания [2]. Используемые при тушении лесных пожаров грунтометы помимо преимуществ имеют обширный ряд недостатков, в том числе низкую поступательную скорость, высокие энергетические показатели, большие динамические нагрузки, высокое сопротивление в ходе движения агрегата. С каждым годом проводятся теоретические и экспериментальные исследования, происходит совершенствование и оптимизация конструкций. В ходе оптимизации конструктивных особенностей грунтометательной техники снижению энергозатрат при эксплуатации и, как следствие, уменьшению расхода топлива не придавалось значения по сравнению с другими проблемами [3–5]. На сегодняшний день динамика повышения стоимости нефтепродукта отражает необходимость снижения потребления энергии при выполнении противопожарных работ в лесопромышленном комплексе и повышения эффективности работ.

В последние годы обширное применение в конструкциях грунтометов получил гидропривод.

Цель исследования – совершенствование рабочих процессов при прокладке минерализованных полос и тушении кромки огня низовых лесных пожаров за счет уменьшения динамической нагрузки и энергоемкости новой лесопожарной грунтометательной машины с энергосберегающим гидроприводом.

Материалы и методы

Задача по совершенствованию рабочих процессов при прокладке минерализованных полос и тушении кромки огня низовых лесных пожаров решается за счет обоснования новой конструкции лесопожарной грунтометательной машины с энергосберегающим гидроприводом [6]. Это достигается тем, что лесопожарной грунтометательной машине с энергосберегающим гидроприводом, включающей раму 1 с механизмом навески 2, кожух-рыхлитель 6 с лемехом 7, имеющий расположенные симметрично с двух сторон окна 8 для выброса

грунта, ротор-метатель 4 с приводом от гидромотора 11, снабженный лопатками 3 для отбрасывания грунта в сторону, предохранительные ножи 9, гидромотор 11 сообщается через распределитель 12 и напорную гидролинию 13 с гидроаккумулятором 14, окна в кожухе-рыхлителе выполнены полуовальной формы без передней стенки, кромки лопаток ротора-метателя выполнены в виде рубящих ножей, а кожух-рыхлитель снабжен опорной лыжей 10 (рис. 1).

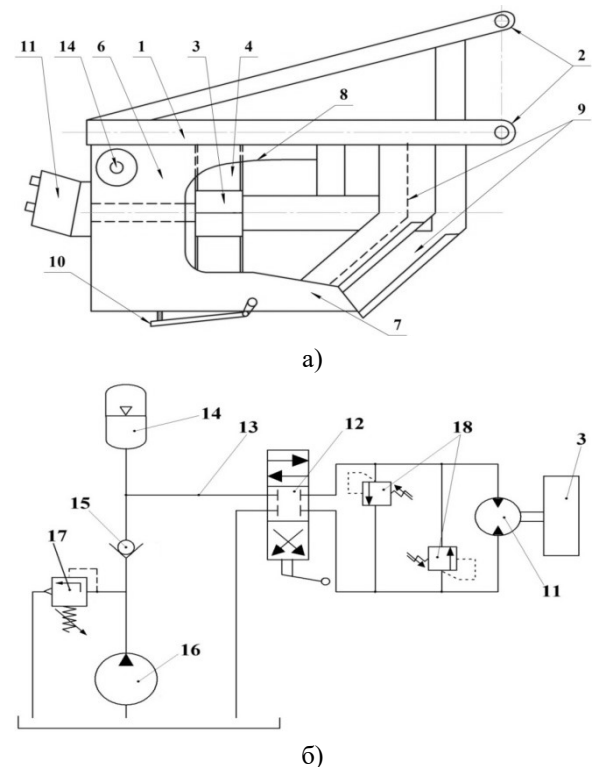


Рис. 1. Конструктивная (а) и гидравлическая (б) схемы лесопожарной грунтометательной машины с энергосберегающим гидроприводом [6]

При встрече с препятствием предохранительные клапаны 18 не срабатывают, а энергия накапливается в гидроаккумуляторе, которая после преодоления препятствия возвращается в гидросистему и обеспечивает более быстрый разгон ротора.

Согласно патенту [6] и теоретическим исследованиям [7] изготовлен опытный образец лесопожарной грунтометательной машины с энергосберегающим гидроприводом и проведены полевые испытания. Готовый опытный образец лесопожарной грунтометательной машины представлен на

рис. 2. Конструкция опытного образца лесопожарной грунтометательной машины состоит из защитного кожуха-рыхлителя, предохранительных черенковых ножей с тупым углом вхождения в почву, окон для выброса грунта, рамы, фрезерного рабочего органа с тремя подвижными лопатками, корпуса с закреплённой на нём верхней тягой, кожухов, позволяющих локализовать выброс грунта исключительно в окна, гидравлического мотора 1 марки 11М-20, закреплённого на задней части кожуха-рыхлителя, гидроаккумулятора 2, рукавов высокого давления 3.



Рис. 2. Опытный образец лесопожарной грунтометательной машины 1 – гидромотор; 2 – пневмогидроаккумулятор; 3 – рукава высокого давления [собственные исследования]

Для привода гидромотора ротора лесопожарной грунтометательной машины на задней части рамы трактора ЛХТ-55 установлен регулируемый гидронасос 11Д-20 (рис. 3). Гидронасос 11Д-20 имеет корпус 1, регулятор объема подаваемой жидкости 2; рычаг изменения направления движения жидкости 3; приводной вал 4, соединенный с редуктором привода трелевочной лебедки трактора.

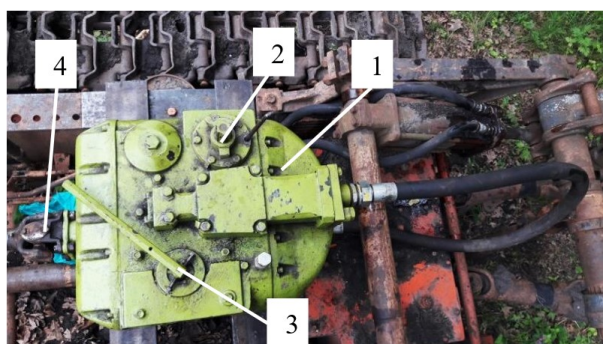


Рис. 3. Установка регулируемого гидронасоса марки 11Д-20 на трактор ЛХТ-55 [собственные исследования]

В перспективе на лесопожарной грунтометательной машине рекомендуются современные нерегулируемые аксиально-поршневые гидронасос и гидромотор серии 310.112.00.06 отечественного производства. Гидронасос 11Д-20 позволяет варьировать частоту вращения гидромотора, такая конструкторская особенность дает возможность наиболее точно снять показания числа оборотов активного рабочего органа [8–10]. Гидроаккумулятор, в свою очередь, предназначен для накопления энергии сжатого газа при преодолении препятствий и для сглаживания пульсации давлений при рабочих режимах лесопожарной грунтометательной машины. В разработанной конструкции использовался пневмогидравлический аккумулятор серии А5579-0.

Результаты и обсуждение

За показатели эффективности рабочих процессов лесопожарной грунтометательной машины приняты: максимальный всплеск давления рабочей жидкости в гидроприводе за рабочий цикл P_m ; запасаемая пневмогидравлическим аккумулятором энергия за один рабочий цикл $E_{ц}$ (срабатывания предохранительного клапана); максимальная энергия, которую способен накопить пневмогидравлический аккумулятор с данными параметрами на пог. км или за смену $E_{общ}$; средняя дальность выброса грунта $L_{ср}$ и толщина слоя грунта в зависимости от дальности выброса T [11, 12].

С учетом проведенного полнофакторного эксперимента (ПФЭ) для каждого критерия эффективности были получены следующие аналитические выражения:

$$E_{ц}(V_{ПГА}, P_{ПГА}) = 125,46 \times V_{ПГА}^2 + 7,36 \times P_{ПГА}^2 + 0,27 \times V_{ПГА} \times P_{ПГА} - 6,14 \times V_{ПГА} - 0,2 \times P_{ПГА} + 54,99; \quad (1)$$

$$P_m(V_{ПГА}, P_{ПГА}) = 0,76 \times V_{ПГА}^2 - 0,36 \times P_{ПГА}^2 - 0,02 \times V_{ПГА} \times P_{ПГА} + 0,12 \times V_{ПГА} + 0,01 \times P_{ПГА} + 5,03; \quad (2)$$

$$E_{общ}(V_{ПГА}, P_{ПГА}) = 8,16 \times V_{ПГА}^2 + 7,21 \times P_{ПГА}^2 + 0,54 \times V_{ПГА} \times P_{ПГА} + V_{ПГА} - 0,31 \times P_{ПГА} - 38,88; \quad (3)$$

$$E_{\text{общ}}(V_{\text{ПГА}}, P_{\text{ПГА}}) = V_{\text{ПГА}} P_{\text{ПГА}} \ln \frac{49,5}{P_{\text{ПГА}}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{ПГА}}$ имеет размерность литры, $P_{\text{ПГА}}$ – МПа, $E_{\text{ц}}$ – Дж, $P_{\text{м}}$ – МПа, $E_{\text{общ}}$ – кДж.

Эти выражения нужны для быстрой оценки энергосберегающего гидропривода. Для удобства восприятия и визуального анализа полученные закономерности $E_{\text{ц}}(V_{\text{ПГА}}, P_{\text{ПГА}})$, $P_{\text{м}}(V_{\text{ПГА}}, P_{\text{ПГА}})$ и $E_{\text{общ}}(V_{\text{ПГА}}, P_{\text{ПГА}})$ были отражены в виде поверхностей отклика (рис. 4).

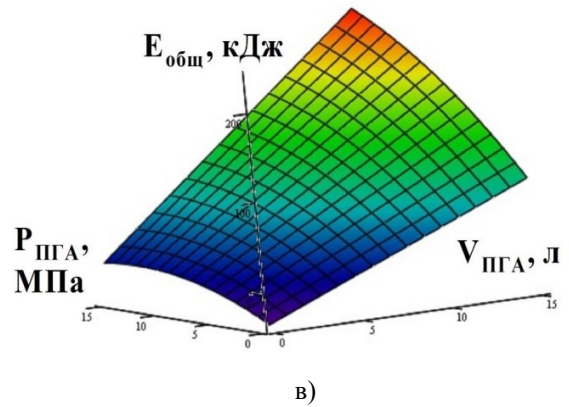
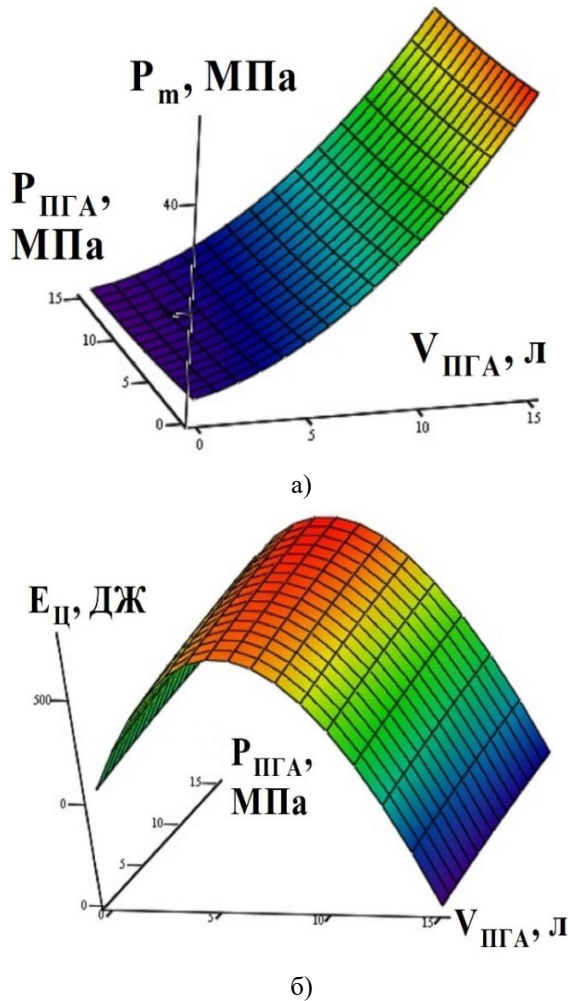


Рис. 4. Поверхности отклика к оптимизации параметров $P_{\text{м}}$, $E_{\text{ц}}$, $E_{\text{общ}}$ [собственные исследования]

При оптимальных значениях предварительной зарядки $P_{\text{ПГА}}$ и объеме гидроаккумулятора $V_{\text{ПГА}}$ энергосберегающий гидропривод обеспечивает: запаасаемую за рабочий цикл энергию $E_{\text{ц}}$ не менее 15 кДж; максимальный всплеск давления в гидросистеме $P_{\text{м}}$ не более 15 МПа; максимальную энергию $E_{\text{общ}}$ не менее 3000 кДж.

Общая оптимальная область занимает значительную долю факторного пространства, что говорит нам о надежности разработанного энергосберегающего гидропривода, а также широком диапазоне вариации параметров $V_{\text{ПГА}}$, $P_{\text{ПГА}}$ (на 1...2 л и на 0,5...1 МПа соответственно) в процессе эксплуатации, при которых эффективность энергосберегающего гидропривода остается оптимальной.

Зависимости средней дальности выброса грунта $L_{\text{ср}}$ от частоты вращения гидромотора привода ротора представлены на рис. 5. При проведении экспериментов частота вращения вала гидромотора привода ротора изменялась с помощью регулируемого насоса в диапазоне 4-10 с^{-1} с шагом интервала 2 с^{-1} .

Анализ полученных зависимостей показал, что при частоте вращения гидромотора привода ротора 8-10 с^{-1} средняя дальность выброса грунта составляет 17 м.

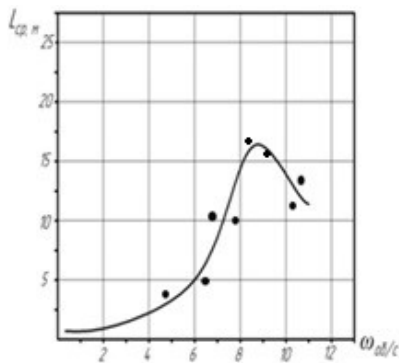


Рис. 5. Зависимость средней дальности выброса грунта L_{cp} от частоты вращения гидромотора привода ротора [собственные исследования]

При меньших значениях частоты вращения гидромотора привода рабочего органа наблюдается значительное снижение основных параметров качества технологического процесса и КПД. Получены зависимости средней дальности выброса грунта L_{cp} от величины заглубления кожуха-рыхлителя $h_{кр}$ (рис. 6). Глубина хода кожуха-рыхлителя устанавливалась при помощи опорной пластины в интервале 10-25 см с шагом интервала в 5 см.

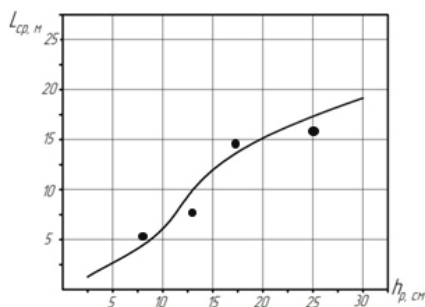


Рис. 6. Зависимости средней дальности выброса грунта L_{cp} от величины заглубления кожуха-рыхлителя [собственные исследования]

Максимальные значения дальности выброса грунта, равные 15-17,5 м, получены при значениях величины заглубления кожуха-рыхлителя, равных 20-25 см. При уменьшении величины заглубления кожуха-рыхлителя показатели эффективности технологического процесса работы орудия снижаются и не могут обеспечить требуемую дальность выброса грунта и толщину слоя грунта для тушения кромки огня.

При проведении экспериментальных исследований получены зависимости толщины слоя

грунта и средней дальности выброса грунта от производительности ротора-метателя (рис. 7, 8).

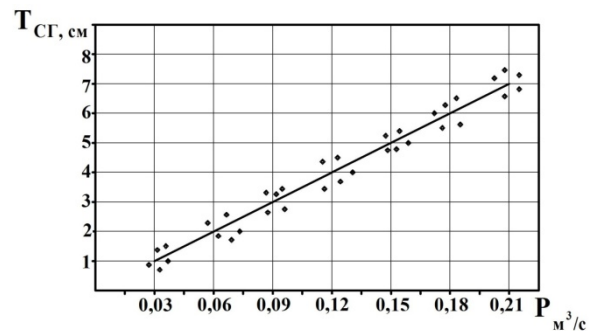


Рис. 7. Зависимость толщины слоя грунта от производительности ротора-метателя [собственные исследования]

Производительность ротора-метателя зависит от переменных факторов, которые получали за счет изменения заглубления кожуха-рыхлителя, скорости агрегата, частоты вращения ротора-метателя. Из полученных графиков следует, что эффективная толщина слоя грунта, равная 6-8 см, необходимая для тушения кромки огня, получена при производительности ротора-метателя 0,18-0,21 m^3/c и средней дальности выброса грунта 5,5-7 м.

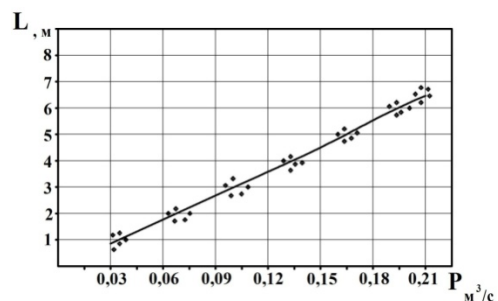


Рис. 8. Зависимость средней дальности выброса грунта от производительности ротора-метателя [собственные исследования]

Установлено, что при встрече с препятствием накапливается энергия в гидроаккумуляторе, которая после преодоления препятствия возвращается в гидросистему и обеспечивает более быстрый разгон ротора, при этом длина огреха снижается на 0,8-1,1 м, поэтому длина эффективной полосы с новым энергосберегающим гидроприводом увеличивается на 16-22 %.

Выводы

Установлено, что при оптимальных значениях предварительной зарядки $P_{ПГА}$ и объеме гидроаккумулятора $V_{ПГА}$ энергосберегающий гидропривод обеспечивает: запасаемую за рабочий цикл преодоления препятствия энергию $E_{ц}$ не менее 15 кДж; максимальный всплеск давления в гидросистеме P_m не более 15 МПа; максимальную энергию $E_{общ}$ не менее 3000 кДж. При частоте вращения гидромотора привода ротора 8-10 с⁻¹ средняя дальность выброса грунта составляет 17 м. Максимальные значения дальности выброса грунта, равные 15-17,5 м, получены при значениях величины заглубления

кожуха-рыхлителя, равных 20-25 см. Эффективная толщина слоя грунта, равная 6-8 см, необходимая для тушения кромки огня, получена при производительности ротора-метателя 0,18-0,21 м³/с и средней дальности выброса грунта 5,5-7 м. При встрече с препятствием в гидроаккумуляторе накапливается энергия, которая после преодоления препятствия возвращается в гидросистему и обеспечивает более быстрый разгон ротора, при этом длина огреха снижается на 0,8-1,1 м, поэтому длина эффективной полосы с новым энергосберегающим гидроприводом увеличивается на 16-22 %.

Библиографический список

1. Теоретические исследования рабочего процесса лесного пожарного грунтомета с энергосберегающим приводом / П. И. Попиков, П. Н. Щерблякин, А. В. Шаров [и др.] // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе : матер. междунар. науч.-практ. конференции. – Воронеж, 2018. – С. 151–156.
2. Малуков, С. В. Анализ путей обеспечения энергосбережения при работе лесопожарных агрегатов / С. В. Малуков, С. С. Бубнов, А. А. Аксенов // Воронежский научно-технический вестник. – 2019. – № 3 (29). – С. 118–123.
3. Комбинированный лесопожарный грунтомет и рекомендации по его применению / И. М. Бартевев, М. В. Драпалюк, П. Э. Гончаров [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 84 (10). – С. 327–336. – URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/26.pdf>.
4. Modern designs of forest fires machines for soil extinguishment of fire / I. M. Bartenev, S. V. Malyukov, M. A. Gnusov [et al.] // Engineering and earth sciences: applied and fundamental research (isees 2018). – Grozni, 2018. – P. 48–53.
5. Mikulas, M. Forest fires extinguishing using suitable fire-fighting equipment / M. Mikulas // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1001. – P. 318–323. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1001.318.
6. Патент № 196851 РФ, МПК А62С 27/00, Е02F 3/18. Лесопожарная грунтометательная машина с энергосберегающим гидроприводом : № 2019142070 ; заявл. 16.12.2019 ; опубл. 18.03.2020 / П. И. Попиков, П. Э. Гончаров, Д. С. Ступников, А. В. Шаров ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова». – Бюл. № 8. – 8 с.
7. Перспективные конструкции противопожарных грунтометов / П. Э. Гончаров, П. И. Попиков, М. А. Гнусов, Н. А. Шерстюков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – Воронеж, 2014. – Т. 2. – № 2-2 (7-2). – С. 54–59.
8. Румшицкий, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента : справочное руководство / Л. З. Румшицкий. – Москва : Наука, 1971. – 192 с.
9. Попиков, П. И. Исследование работы лесной почвообрабатывающей фрезы ФЛУ-0,8 с гидрообъемным приводом : дис. ... канд. техн. наук / Попиков Петр Иванович. – Воронеж, 1973. – 184 с.
10. Kozlowski, T. T. Soil Compaction and Growth of Woody Plants / T. T. Kozlowski // Scandinavian Journal of Forest Research. – 1999. – № 14 (6). – P. 596–619.

11. Haddock, W. H. Testing Unit for Soil Microsite Preparation / W. H. Haddock, A. E. Hassan // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. – 1981. – № 5. – P. 1141–1148.

12. Чукичев, А. Н. Технические средства для предупреждения и тушения лесных пожаров: обзорн. информ. / А. Н. Чукичев. – Москва : ЦБНТИ Гослесхоза СССР, 1985. – 32 с.

References

1. Popikov P.I., Sheheblykin P.N., Sharov A.V. (et al.) *Teoreticheskie issledovaniya rabocheho processa lesnogo pozhnogo gruntometa s jenergosberegajushhim privodom* [Theoretical studies of the working process of a forest fire dredger with an energy-saving drive]. *Jenergojeffektivnost' i jenergosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshhestve: Materialy mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii* [Energy Efficiency and Energy Saving in Modern Production and Society: Materials of the international scientific and practical conference]. Voronezh, 2018, pp. 151-156 (in Russian).

2. Malyukov S.V., Bubnov S.S., Aksenov A.A. (2019) *Analiz putej obespechenija jenergosberezhenija pri rabote lesopozharnyh agregatov* [Analysis of ways to ensure energy conservation during the operation of forest fire units]. *Voronezhskij nauchno-tehnicheskij vestnik* [Voronezh Scientific and Technical Bulletin], no. 3 (29), pp. 118-123 (in Russian).

3. Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Goncharov P.E. (et al.) (2012) *Kombinirovannyj lesopozharnyj gruntomet i rekomendacii po ego primeneniju* [Combined forest fire dredger and recommendations for its use]. *Politematicheskij setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Political Mathematical Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University], no. 84 (10), pp. 327-336 (in Russian). URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/26.pdf>.

4. Bartenev I.M., Malyukov S.V., Gnusov M.A. (et al.) Modern designs of forest fires machines for soil extinguishment of fire. Engineering and earth sciences: applied and fundamental research (ISEES 2018). Grozni, 2018, pp. 48-53.

5. Mikulas M. (2014) Forest fires extinguishing using suitable fire-fighting equipment. *Advanced Materials Research*, Vol. 1001, pp. 318-323. doi: 10.4028 / www.scientific.net / AMR.1001.318.

6. Popikov P.I., Goncharov P.E., Stupnikov D.S., Sharov A.V. *Lesopozharnaja gruntometatel'naja mashina s jenergo-sberegajushhim gidroprivodom* [Fire-fighting soil-throwing machine with energy-saving hydraulic drive]. Patent RF, no. 196851.

7. Goncharov P.E., Popikov P.I., Gnusov M.A., Sherstyukov N.A. (2014) *Perspektivnye konstrukcii protivopozharnyh gruntometov* [Promising design of fire gage]. *Aktual'nye napravlenija nauchnyh issledovanij XXI veka: teorija i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], Vol. 2, no. 2-2 (7-2), pp. 54-59 (in Russian).

8. Rumshisky L.Z. *Matematicheskaja obrabotka rezul'tatov eksperimenta: spravocnoe rukovodstvo* [Mathematical processing of experimental results: a reference guide]. Moscow, 1971, 192 p. (in Russian).

9. Popikov P.I. *Issledovanie raboty lesnoj pochvoobratyvajushhej frezy FLU-0,8 s gidroobemnym privodom: dis. kand. tehn. nauk* [Investigation of the work of the forest tillage cutter FLU-0.8 with hydrostatic drive: PhD thesis]. Voronezh, 1973, 184 p. (in Russian).

10. Kozlowski T.T. (1999) Soil Compaction and Growth of Woody Plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*, no. 14 (6), pp. 596-619.

11. Haddock W.H., Hassan A.E. (1981) Testing Unit for Soil Microsite Preparation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, no. 5, pp. 1141-1148.

12. Chukichev A.N. *Tehnicheskie sredstva dlja preduprezhdenija i tushenija lesnyh pozharov: obzorn. inform* [Technical means for the prevention and suppression of forest fires: a review]. Moscow, 1985, 32 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Попиков Петр Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Попиков Виктор Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры ландшафтной архитектуры и почвоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: viktorpopikov@yandex.ru.

Шаров Андрей Викторович – соискатель кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: androsharo@yandex.ru.

Петков Александр Федорович – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: alexanderpetkoff@mail.ru.

Поздняков Антон Константинович – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: mcak74@gmail.com.

Information about authors

Popikov Petr Ivanovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: popikovpetr@yandex.ru.

Popikov Viktor Petrovich – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Landscape Architecture and Soil Science, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: viktorpopikov@yandex.ru.

Sharov Andrey Viktorovich – applicant for the degree, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: androsharo@yandex.ru.

Petkov Aleksandr Fedorovich – post-graduate student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: alexanderpetkoff@mail.ru.

Pozdnyakov Anton Konstantinovich – post-graduate student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: mcak74@gmail.com.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ ЛЕСОВОЗНОГО АВТОМОБИЛЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

доктор технических наук, профессор **В.И. Посметьев**

доктор технических наук, профессор **М.В. Драпалюк**

кандидат технических наук, доцент **В.О. Никонов**

кандидат физико-математических наук, доцент **В.В. Посметьев**

аспирант **А.В. Авдюхин**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

Обоснована актуальность повышения эффективности вывозки лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом путем разработки перспективной схемы гидропневматической подвески. Приведена схема предлагаемой подвески модульной конструкции и лесовозного автомобиля, оснащенного подвесками такого типа, а также представлены результаты его имитационного моделирования. Для оценки использования в лесовозном автомобиле таких гидропневматических подвесок разработана математическая модель движения шестиколесного лесовозного автомобиля в трехмерном пространстве. Приведена расчетная схема для построения динамической модели лесовозного автомобиля. Описана последовательность численного интегрирования на каждом шаге по времени, включающая в себя семь многократно повторяющихся в процессе компьютерного эксперимента этапов. Разработана компьютерная программа, позволяющая исследовать согласованную работу гидропневматических подвесок и влияние их параметров на плавность хода лесовозного автомобиля. Проведены компьютерные эксперименты по преодолению лесовозным автомобилем с различной скоростью заданных параметров неровностей и препятствий на лесовозной дороге. Получены зависимости от времени объема пневматической полости гидропневматической подвески, давления и температуры газа в ней. Выявлено влияние средней высоты неровностей, количества препятствий на единицу длины, скорости движения лесовозного автомобиля на максимальное вертикальное ускорение лесовозного автомобиля, максимальные давление и перепад температур в пневматической полости исследуемой подвески.

Ключевые слова: лесовозный автомобиль, гидропневматическая подвеска, модульная конструкция, математическая модель, результаты имитационного моделирования, компьютерная программа, повышение эффективности

EFFICIENCY ESTIMATION OF HYDRO-PNEUMATIC SUSPENSION OF A TIMBER TRUCK ACCORDING TO THE RESULTS OF SIMULATION MODELLING

DSc (Engineering), Professor **V.I. Posmetyev**

DSc (Engineering), Professor **M.V. Drapalyuk**

PhD (Engineering), Associate Professor **V.O. Nikonov**

PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor **V.V. Posmetyev**

post-graduate student **A.V. Avdyukhin**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

The relevance of increasing the efficiency of timber transportation by forest transport vehicles through development of a promising hydropneumatic suspension scheme has been substantiated. A diagram of the proposed modular design suspension and logging vehicle equipped with this type of suspension has been presented. The results of its simulation have been also showed. A mathematical model of the movement of a six-wheeled timber truck in three-dimensional space has been developed to evaluate the use of such hydropneumatic suspensions in a forest car. The design scheme for constructing a timber truck dynamic model has been presented. The sequence of numerical integration at each time step has been described. It includes seven stages, repeated many times during the computer experiment. A computer program has been developed. It enables to investigate the coordinated operation of hydropneumatic suspensions and the influence of their parameters on the smooth running of a timber truck. Computer experiments have been carried out to overcome bumps and obstacles with given parameters at different speeds. The time dependences of the volume of the pneumatic cavity of the hydropneumatic suspension, pressure and gas temperature in it have been obtained. The influence of the average height of irregularities, the number of obstacles per unit length, the speed of timber truck on the maximum vertical acceleration of timber truck, the maximum pressure and temperature difference in the pneumatic cavity of the suspension under study has been revealed.

Keywords: timber truck, hydropneumatic suspension, modular design, mathematical model, simulation results, computer program, increasing efficiency

Введение

В России, занимающей первое место в мире по площади лесов, произрастает около 1/5 части всех лесов планеты. При этом запасы древесины в нашей стране одни из самых больших в мире, и более того, лес ежегодно прирастает, его объемы увеличиваются. Уже сейчас лесная промышленность РФ не в состоянии освоить в полной мере имеющиеся лесные ресурсы, следствием этого является то, что почти половина от общего запаса древесины в РФ – спелый лес, который подлежит вырубке и переработке. Также причиной недостаточного освоения лесных ресурсов является состояние предприятий лесозаготовительной отрасли, среди которых около половины находятся либо на грани убыточности, либо являются убыточными и не располагают необходимыми мощностями для развития.

Являясь неотъемлемой частью лесозаготовительных операций, вывозка лесоматериалов лесовозным автомобильным транспортом обеспечивает связь между заготовкой леса и потребителями. Данная операция имеет огромное экономическое значение, доля затрат на нее в себестоимости круглых лесоматериалов составляет около 47 % [1].

Значительное влияние на эффективность вывозки лесоматериалов оказывают конструктивные особенности лесовозных автомобилей, среди которых необходимо выделить степень конструктивного совершенства подвески, являющейся основным устройством, обеспечивающим защиту лесовозного автомобиля от динамических воздействий, вызванных неровностями лесовозной дороги. Повышение эксплуатационных свойств подвески играет особенно важную роль для лесовозных автомобилей, используемых в лесозаготовительном комплексе страны. Правильное определение параметров под-

рессоривания и выбор конструктивной схемы гидропневматической подвески лесовозного автомобиля позволит снизить прямые и косвенные затраты, связанные с перевозкой лесоматериалов [2].

В статье Demyanov D.N. и др. (2019) приводится существующая проблема управления элементами гидропневматической подвески автомобиля с колесной формулой 8×8 . Для ее решения разработаны алгоритмы управления гидропневматической подвеской, реализованные в среде Simulink. Выполненная проверка алгоритмов показала правильность их работы в соответствии с предъявляемыми требованиями, обеспечивающими равномерное движение автомобиля по неровностям дороги [3].

В работе Jiang Yi (2018) представлена модель опрокидывания транспортного средства, учитывающая угол наклона дороги, стратегию рулевого управления и характеристики гидропневматической подвески. Для оптимизации модели опрокидывания транспортного средства в реальном времени и прогнозирования угла наклона дороги использовалась трехслойная нейронная сеть. Полученные результаты показывают, что численный расчет оптимизированной модели опрокидывания хорошо согласуется с натурными испытаниями автомобиля [4].

Konieczny L. и др. (2016) в своих исследованиях приводят результаты выполненного анализа конструктивных схем и материалов, применяемых в газовых пружинах гидропневматических подвесок. Выявлены фундаментальные соотношения, характеризующие параметры газовой пружины с постоянной газовой массой, а также описаны материалы, применяемые для изготовления выбранных элементов газовой пружины [5].

В материалах статьи Feng J.Z. и др. (2015) описана новая иерархическая стратегия управления активными гидропневматическими системами подвесок транспортных средств. Результаты использования этой стратегии показывают, что система активной гидропневматической подвески, разработанная в этом исследовании, значительно улучшает характеристики комфорта вождения транспортных средств [6].

Исследование Dabrowska A. и др. (2015) направлено на изучение эффективности гидропневматической подвески в условиях телеуправляемых беспилотных испытаний наземных транспортных средств, характеризуемых наличием большого ко-

личества препятствий на пересеченной местности. Выявлены трудности при формировании характеристик таких систем, заключающиеся в отсутствии четких руководящих документов в доступных литературных источниках для телеуправляемых беспилотных транспортных средств [7].

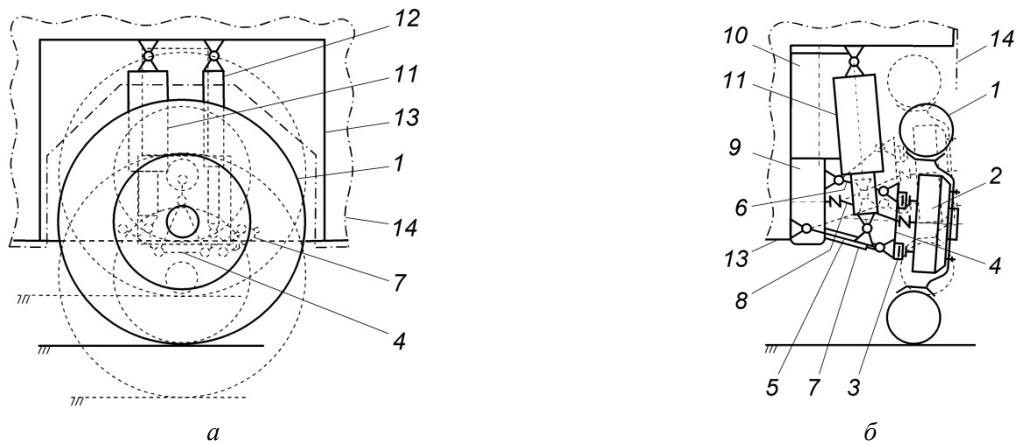
Sujatha C. и Tejesu P. (2002) провели исследование вертикальной динамической реакции двух грузовых автомобилей в различных нагрузочных, скоростных и дорожных условиях, причем первый грузовой автомобиль был оснащен рессорными подвесками, а второй – гидропневматическими. Выявлено, что для грузовиков, превышающих $2/3$ от полной нагрузки, гидропневматическая подвеска дает лучшее качество движения, чем рессорная, в то время как последняя дает более высокие результаты без нагрузки [8].

Проведенный анализ работ позволил установить, что в настоящее время все еще не разработаны конструкции гидропневматических подвесок, обеспечивающих: полный ход подвески на более чем 250 мм при сохранении высокой скорости движения в условиях лесовозных дорог; низкое положение грузовой платформы; возможности полезного использования подкузовного и межколесного пространства лесовозного автомобиля. Для устранения перечисленных недостатков авторами была разработана и предложена перспективная схема модульной гидропневматической подвески (рис. 1, а, б) [2].

Материалы и методы

Для оценки оснащения лесовозного автомобиля предлагаемой гидропневматической подвеской модульной конструкции необходимо выполнить предварительное исследование с целью выяснить: будет ли обеспечиваться согласованная работа гидропневматических подвесок колес при движении по существенно неровной опорной поверхности и будут ли достаточно оптимальными при этом параметры плавности хода. Для проведения данного исследования разработана математическая модель движения шестиколесного лесовозного автомобиля в трехмерном пространстве. Моделирование основано в целом на методах классической механики [9–12].

В рамках модели лесовозный автомобиль представлен как движущееся в трехмерном пространстве абсолютно твердое тело, взаимодействующее с опорной поверхностью в шести точках (количество колес) (рис. 2).



1 – колесо; 2 – ступица с тормозным барабаном; 3 – шкворень; 4 – стойка; 5 – нижний рычаг; 6 – верхний рычаг; 7 – гидроцилиндр рулевого управления; 8 – карданный вал; 9 – редуктор; 10 – гидродвигатель; 11 – пневмогидроцилиндр; 12 – амортизатор; 13 – рама; 14 – панель облицовочная

Рис. 1. Схема модульной гидропневматической подвески (а, б)
(собственные разработки)

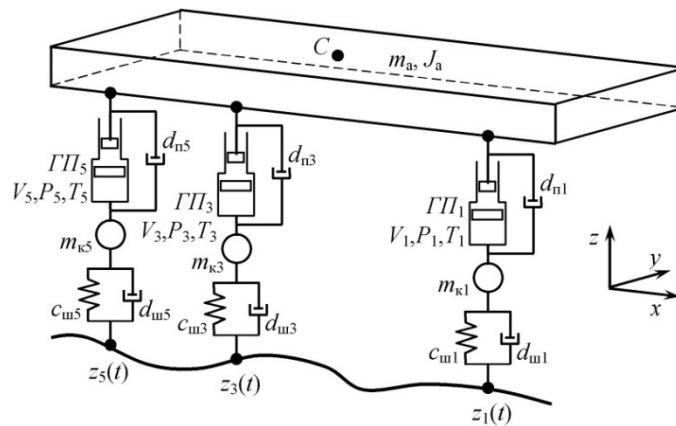


Рис. 2. Расчетная схема для построения динамической модели лесовозного автомобиля
(условно показаны только колеса левого борта)
(собственные разработки)

Лесовозный автомобиль характеризуется массой m_a и моментом инерции J_a , который рассчитывается для текущего момента времени относительно мгновенной оси вращения тела. Положение лесовозного автомобиля в пространстве характеризуется декартовыми координатами его центра тяжести (x_a, y_a, z_a) , а также углами отклонения локальной системы координат от неподвижной базовой $(\varphi_{xa}, \varphi_{ya}, \varphi_{za})$. Движение лесовозного автомобиля в модели описывается системой дифференциальных уравнений, составленной на базе основных законов динамики поступательного и вращательного движения:

$$\begin{cases} m_a \frac{d^2 x_a}{dt^2} = \sum_{i=1}^6 F_{ni}^x; \\ m_a \frac{d^2 y_a}{dt^2} = \sum_{i=1}^6 F_{ni}^y; \\ m_a \frac{d^2 z_a}{dt^2} = -m_a \cdot g + \sum_{i=1}^6 F_{ni}^z; \\ J_{ax} \frac{d^2 \varphi_{xa}}{dt^2} = \sum_{i=1}^6 M^x(F_{ni}); \\ J_{ay} \frac{d^2 \varphi_{ya}}{dt^2} = \sum_{i=1}^6 M^y(F_{ni}); \\ J_{az} \frac{d^2 \varphi_{za}}{dt^2} = \sum_{i=1}^6 M^z(F_{ni}), \end{cases} \quad (1)$$

где t – время; F_{ni} – силы, действующие на корпус от подвески i -го колеса; M^k – моменты рассматриваемых сил относительно декартовой оси k .

В рамках модели материальные точки, представляющие колеса, могут двигаться по вертикали вдоль оси OZ . Их координаты обозначаются далее z_{ki} , где i – номер колеса ($i = 1 \dots 6$). Для задания взаимодействия между колесом и опорной поверхностью использовали упрощенную – упруго-вязкую – модель шины, характеризующейся коэффициентами жесткости и демпфирования. Дифференциальное уравнение, описывающее движение i -го колеса, можно записать следующим образом:

$$m_{ki} \frac{d^2 z_{ki}}{dt^2} = -F_{ГПН} - c_i(z_i(x_i, y_i) + R_K - z_{0i}) - d_{ui} \left(\frac{dz_i(x_i, y_i)}{dt} - \frac{dz_{ki}}{dt} \right), \quad (2)$$

где m_{ki} – масса i -го колеса; $z_i(x, y)$ – вертикальная координата опорной поверхности под i -м колесом, равная координате нижней точки колеса; z_{0i} – вертикальная координата точки крепления колеса к корпусу; R_K – радиус колеса; c_{ui} , d_{ui} – коэффициенты жесткости и демпфирования упруго-вязкого взаимодействия колеса с опорной поверхностью через шину.

В модели также рассматриваются горизонтальные составляющие сил сцепления с покрытием дороги. Действуя в комплексе, вертикальные и горизонтальные составляющие силы и приводят к перемещению модельного лесовозного автомобиля в трехмерном пространстве.

Координаты точек контакта колес с опорной поверхностью z_i изменяются с течением времени, то есть являются функцией $z_i(t)$ или функцией двух переменных $z_i(x_i, y_i)$, рассматривая координаты точки контакта как функции времени $x_i(t)$ и $y_i(t)$.

Между центром масс колеса (z_{ki}) и точкой крепления к корпусу (z_{ai}) действуют силы со стороны гидропневматической подвески, зависящие от расстояния $z_{ai} - z_{ki}$ между указанными точками, от времени t и производной по времени от этого расстояния $d(z_{ai} - z_{ki})/dt$. Подключенный параллельно гидропневматической подвеске амортизатор, эффект от использования которого проверяется в данной статье, представляется в модели условным демпфером (коэффициент демпфирования d_{ni}). Сила F_{ni} , возникающая на гидропневматической подвеске с параллельно подключенным амортизатором (демпфером), рассчитывается по формуле

$$F_{ni} = P_i S_i - d_{ni} \left(\frac{dz_{ai}}{dt} - \frac{dz_{ki}}{dt} \right), \quad (3)$$

где P_i – давление в пневматической полости гидропневматической подвески, S_i – площадь поршня пневматической полости гидропневматической подвески; d_{ni} – коэффициент демпфирования амортизатора подвески.

Для решения системы дифференциальных уравнений второго порядка, лежащей в основе математической модели, используется численный метод Рунге-Кутты второго порядка. Численное решение дифференциальных уравнений заключается в дискретизации времени t на равные шаги, нумеруемые переменной τ , с длительностью шага Δt . На каждом шаге интегрирования рассчитываются силы F , действующие на тела, то есть правые части дифференциальных уравнений. После этого по известным координатам и скоростям движения тел на текущем шаге интегрирования рассчитываются координаты и скорости тел на следующем шаге интегрирования. Например, для декартовой составляющей x численное интегрирование движения условного тела в рамках рассматриваемого метода производится по формулам

$$\begin{cases} x_{\tau+1} = x_{\tau} + v_{x\tau} \cdot \Delta t + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \frac{(\Delta t)^2}{2}; \\ v_{x\tau+1} = v_{x\tau} + \frac{F_{x\tau}}{m} \cdot \Delta t, \end{cases} \quad (4)$$

где x_{τ} и $v_{x\tau}$ – координата и скорость движения тела массой m вдоль декартова направления x на предыдущем шаге интегрирования по времени τ ; x_{τ} и $v_{x\tau}$ – то же на последующем шаге интегрирования по времени $\tau + 1$. Таким же образом численное интегрирование производится для остальных декартовых составляющих y и z .

По мере пересчета предыдущих координат и скоростей в последующие получаются таблично заданные функции от времени координат и углов наклона корпуса лесовозного автомобиля, а также вертикальные координаты центров масс колес. Эти функции анализируются далее для оценки плавности хода лесовозного автомобиля.

В процессе эксплуатации гидропневматической подвески меняются в широких диапазонах давление и температура газа в пневматической полости. В данной статье не рассматривается гидравлическая подсистема, так как пневматическая подсистема ока-

зывает существенно более значимое влияние на работу подвески. Гидравлическую подсистему целесообразно учитывать совместно с системой управления перетеканием рабочей жидкости между подвесками различных колес при движении лесовозного автомобиля по существенно неровной поверхности.

Уравнения изменения состояния газа решаются тем же численным методом Рунге-Кутты, что и уравнения движения корпуса и колес, изложенные выше. Математическое описание состояния газа приведено ниже в конечных разностях для непосредственной интеграции с моделью механической подсистемы.

В начальный момент времени $t = 0$ (в численной схеме этому соответствует номер шага интегрирования по времени $\tau_0 = 0$) давление воздуха в пневматических полостях подвески задается равным определенному рабочему давлению P_p , а температура – равной температуре окружающей среды T_0 .

$$P_i^0 = P_p; \quad (5)$$

$$T_i^0 = T_0. \quad (6)$$

Начальное количество вещества (воздуха) v_i^0 в полости i -й гидропневматической подвески рассчитывается, исходя из уравнения состояния идеального газа:

$$v_i^0 = \frac{P_i^0 V_i^0}{R T_i^0}, \quad (7)$$

где V_i^0 – начальный (максимальный) объем пневматической полости; R – универсальная газовая постоянная.

С началом численного интегрирования на каждом шаге по времени τ_i проводится следующая последовательность действий:

1) определяется текущее положение поршня в пневматической полости x_{Pi} исходя из результатов моделирования механической подсистемы;

2) по известному положению поршня $x_{Pi}(t)$ (в разностной схеме используется обозначение x_{Pi}^τ) рассчитывается текущий объем пневматической полости V_i^τ :

$$V_i^\tau = x_{Pi}^\tau \pi \frac{D_{Pi}}{4}, \quad (8)$$

где D_{Pi} – диаметр пневматической полости цилиндрической формы;

3) изменение объема газа в пневматической полости вызывает изменение температуры, которое

рассчитывается в адиабатическом приближении для воздуха:

$$T_i^\tau = T_i^{\tau-1} \left(\frac{V_i^\tau}{V_i^{\tau-1}} \right)^{\frac{7}{5}}, \quad (9)$$

где индексы $\tau-1$ и τ означают предыдущий и текущий шаги интегрирования по времени.

4) в результате теплообмена газа с окружающей средой через стенки, поршень и заднюю стенку пневмоцилиндра происходит изменение температуры газа. Расчет изменения температуры производится по закону Ньютона-Рихмана:

$$T_i^\tau = T_i^{\tau-1} - \alpha_i (T_i^{\tau-1} - T_0) \Delta t, \quad (10)$$

где α_i – коэффициент теплоотдачи, зависящий от площади контакта пневмоцилиндра с окружающей средой и характера теплоизоляции стенок; Δt – шаг численного интегрирования по времени (в последующих расчетах принимался равным 0,002 с). В данной формуле равенство имеет смысл присваивания той же переменной T_i^τ ;

5) по текущим значениям объема и температуры рассчитывается текущее давление в пневматической полости на основе уравнения состояния идеального газа:

$$P_i^\tau = v_i R \frac{T_i^\tau}{V_i^\tau}; \quad (11)$$

6) превышение давления газа в пневматической полости над атмосферным давлением P_A приводит к утечке газа из полости. Для расчета используется следующая формула:

$$v_i^\tau = v_i^{\tau-1} - d_{iA} \sqrt{P_i^\tau - P_A}, \quad (12)$$

где d_{iA} – коэффициент дросселирования, размерность которого приведена к отношению количества вещества к давлению;

7) изменение количества вещества в результате утечки порции воздуха из пневматической полости приводит к изменению температуры газа:

$$T_i^\tau = T_i^{\tau-1} + (T_0 - T_i^{\tau-1}) \frac{v_i^{\tau-1} - v_i^\tau}{v_i^{\tau-1}}. \quad (13)$$

Далее перечисленные семь этапов многократно повторяются в процессе компьютерного эксперимента. На каждой итерации давление газа в пневматической полости $P_i(\tau)$ позволяет рассчитать силу, действующую между колесом и рамой лесовозного автомобиля.

Для исследования колебаний лесовозного автомобиля с гидропневматической подвеской необходимо задать функцию рельефа поверхности $z(x)$ для колес левого и правого бортов, где x – горизонтальная координата.

В рамках данной статьи изучено движение автомобиля по случайной неровной опорной поверхности, соответствующей грунтовой подъездной лесовозной дороге.

Ровность рельефа лесовозной дороги оказывает значительное влияние на технико-эксплуатационные показатели лесовозного автомобиля. Предельно-допустимыми значениями ровности покрытия лесовозной дороги, удовлетворяющими условиям эксплуатации лесовозных автомобилей, являются значения ровности для низших типов покрытий лесовозных дорог – 510 см/км и для переходных – 340 см/км [13].

Наиболее естественным с точки зрения физики и геометрии аналитическим представлением функции поверхности является суперпозиция большого количества гауссовых пиков

$$z(t) = \sum_{i=1}^{N_n} H_i \exp\left(-\frac{(v \cdot t - x_i)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (14)$$

где N_n – количество неровностей гауссовой формы на контрольном участке заданной длины L_k ; H_i – высота i -й неровности; x_i – координата центра i -й неровности; σ_i – характерная ширина i -й неровности (имеет смысл среднеквадратичного отклонения).

Для лесовозной грунтовой дороги можно задать линейную плотность неровностей $\lambda = N_n / L_k$, а также функции распределения случайных геометрических параметров неровностей. Данные параметры обычно приведены в таблицах основных геометрических параметров и функций распределения высот неровностей и протяженностей прямолинейных участков. Примеры сгенерированных поверхностей с неровностями различных параметров представлены на рис. 3.

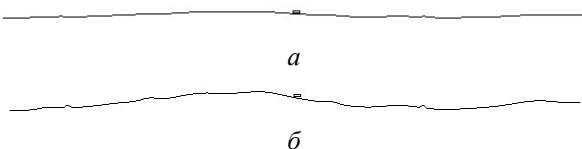


Рис. 3. Рельеф поверхности при различной средней высоте неровностей H_p : $a - H_p = 1$ м; $b - H_p = 3$ м. Прямоугольником отмечено пятно контакта шины с опорной поверхностью дороги

Для анализа эффективности работы гидропневматической подвески в ходе компьютерного эксперимента рассчитывались следующие показатели. Максимальное вертикальное ускорение a_{zm} центра тяжести лесовозного автомобиля рассчитывалось по формуле

$$a_{zm} = \max_{t_n < t < t_{кэ}} \frac{d^2 z_a(t)}{dt^2}, \quad (15)$$

где z_a – вертикальная координата центра тяжести лесовозного автомобиля; t_n – момент времени начала наблюдений, принятый равным 2 с (не совпадает с моментом времени начала компьютерного эксперимента, так как в первые моменты времени механическая система приходит в состояние равновесия); $t_{кэ}$ – длительность компьютерного эксперимента.

Максимальное давление газа в пневматической полости P_m рассчитывалось по формуле

$$P_m = \max_{i=1..6} P_i(t). \quad (16)$$

Максимальный перепад температур газа в пневматической полости ΔT_m определялся следующим образом:

$$\Delta T_m = \max_{i=1..6} \left(\max_{t_n < t < t_{кэ}} T_i(t) - \min_{t_n < t < t_{кэ}} T_i(t) \right). \quad (17)$$

Предложенный математический аппарат позволил составить компьютерную программу «Программа для моделирования движения лесовозного автомобиля с гидропневматической подвеской» на языке Object Pascal в среде программирования Borland Delphi 7. Программа предназначена для моделирования движения шестиколесного лесовозного автомобиля с гидропневматической подвеской по случайной неровной опорной поверхности с заданными статистическими параметрами неровностей, соответствующей подъездной грунтовой лесовозной дороге.

В процессе моделирования движения автомобиля программа выводит на экран схематичное изображение автомобиля, опорной поверхности, состояния каждой подвески, графики временных зависимостей объема, давления и температуры в выбранной подвеске (рис. 4).

Программа позволяет исследовать согласованную работу гидропневматических подвесок и влияние параметров подвески на плавность хода лесовозного автомобиля, которая применима для лесовозных автомобилей различных типов и опор-

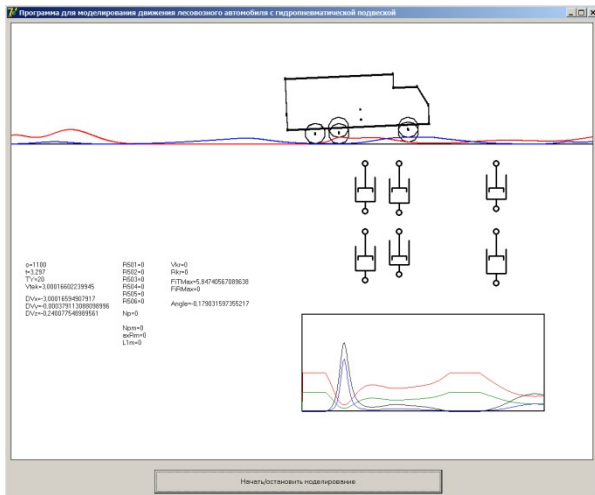


Рис. 4. Схематичное изображение двухмассовой упругой системы, графиков вертикальной координаты центра колеса и корпуса автомобиля, выводимое на экран в процессе работы программы (собственные разработки)

ных поверхностей с широким диапазоном статистических параметров.

Разработанная модель позволила изучить работу гидропневматической подвески в различных режимах движения лесовозного автомобиля и оценить влияние эксплуатационных параметров автомобиля на плавность его хода и предельные давление и температуру воздуха в пневматической полости подвески.

Взаимосвязь изучаемых параметров математической модели представлена на рис. 5.



Рис. 5. Основные параметры модели лесовозного автомобиля с гидропневматической подвеской и рассчитываемые показатели эффективности (собственные разработки)

Переменные, относящиеся к разработанной модели, можно разделить на группы: две группы

входных переменных и одну группу выходных переменных (показателей эффективности).

К первой группе входных переменных относятся параметры грунтовой дороги: H_n – максимальная высота неровностей гауссовой формы; λ_n – линейная плотность расположения неровностей (количество неровностей на единицу длины).

Вторая группа переменных связана с условиями эксплуатации лесовозного автомобиля: v – горизонтальная скорость движения лесовозного автомобиля; $m_{ка}$ – масса автомобиля (в рамках модели – суммарная масса с учетом шасси и колес).

Эффективность гидропневматической подвески оценивается следующими показателями: a_{zm} – максимальное вертикальное ускорение центра тяжести лесовозного автомобиля в ходе компьютерного эксперимента; P_m – максимальное давление газа в пневматической полости подвески; ΔT_m – максимальный перепад температуры в пневматической полости подвески. В ходе дальнейшего теоретического исследования на основе компьютерных экспериментов проверяется влияние входных переменных на показатели эффективности гидропневматической подвески.

Результаты и обсуждение

Для первичной оценки работоспособности модели и проверки ее физической адекватности проведен компьютерный эксперимент по последовательному преодолению со скоростью 10 км/ч лесовозным автомобилем двух заданных неровностей: впадины и выпуклости, описываемых одинаковыми гауссовыми функциями, но с противоположными знаками. Высота выпуклости и глубина впадины составляли 0,4 м; расстояние между центрами неровностей составляло 5 м (рис. 6). Неровности задавали для колес только правого борта, при этом как один из возможных случаев колеса левого борта двигались по ровной горизонтальной опорной поверхности.

В нулевой момент времени модельный лесовозный автомобиль располагался над опорной поверхностью (рис. 6, а). В начале компьютерного эксперимента автомобиль двигался вниз под действием сил тяжести, приходил в контакт с опорной поверхностью, и таким образом постепенно формировалось состояние устойчивого равновесия (рис. 6, б). По мере преодоления автомобилем неровностей колеса копировали рельеф поверхности, находясь в постоянном

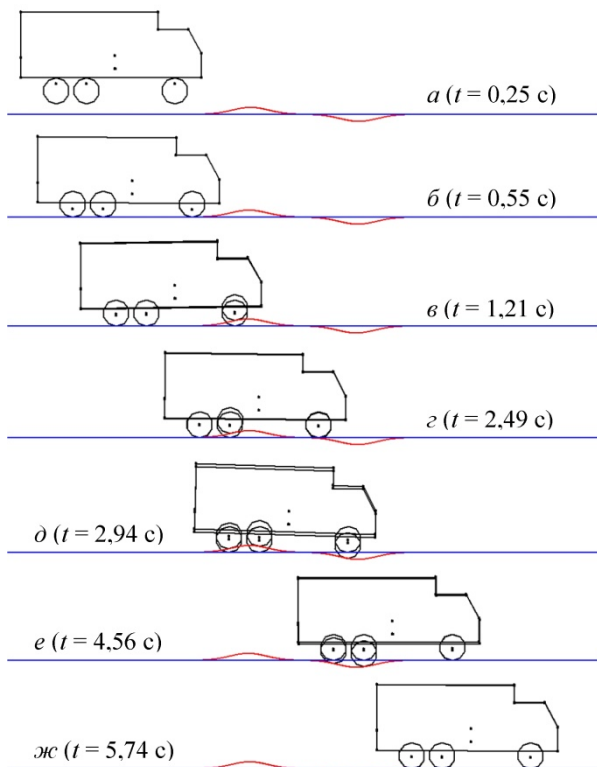


Рис. 6. Преодоление лесовозным автомобилем с гидропневматической подвеской выступа и впадины в базовом компьютерном эксперименте (собственные разработки)

контакте с поверхностью (рис. 6, *в ... е*). При преодолении выпуклости (рис. 6, *в*) и впадины (рис. 6, *д*) в передней правой гидропневматической подвеске сначала происходило уменьшение объема пневматической полости (в момент времени около 1,2 с), затем увеличение объема (в момент времени около 3 с) (рис. 7, *а*). Это, в свою очередь, вызывало сначала повышение давления и температуры, а затем снижение давления и температуры (рис. 7, *б, в*). После преодоления неровностей автомобиль постепенно приходил в состояние равновесия (рис. 6, *ж*), и термодинамические показатели газа постепенно стабилизировались (рис. 7, $t > 6$ с).

Несмотря на то что автомобиль преодолевал существенные неровности (амплитудой 0,4 м), это вызвало сравнительно небольшое увеличение давления (до 2,5 атм.) и приемлемые колебания температуры (от 0 до 520 °С). Таким образом, гидропневматическая подвеска не требует каких-то специальных конструктивных решений и специфических материалов по сравнению с широко применяемыми элементами пневмосистем.

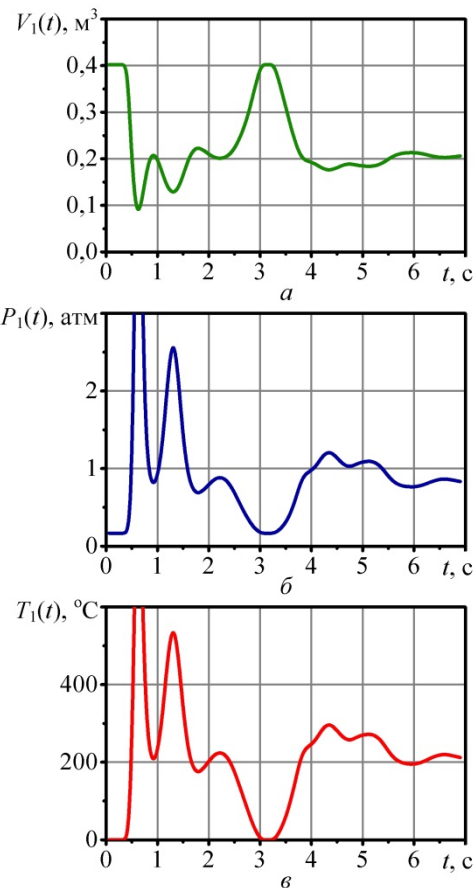


Рис. 7. Зависимости от времени объема (*а*) пневматической полости подвески переднего левого колеса, давления (*б*) и температуры (*в*) газа в ней (собственные разработки)

Высота неровностей грунтовой дороги является одним из наиболее важных факторов, определяющих интенсивность работы подвески. С целью изучения влияния высоты неровностей H_n на эффективность гидропневматической подвески проведена серия компьютерных экспериментов, в которой H_n изменяли от 0 до 1,0 м с шагом 0,2 м. Автомобиль двигался со скоростью 10 м/с.

При сравнительно низкой высоте неровностей (не более 0,4 м), что наиболее характерно для лесных подъездных грунтовых дорог, гидропневматическая подвеска эффективно гасит колебания корпуса автомобиля: корпус практически не наклоняется в продольном и поперечном направлениях (рис. 8, *а, б*), вертикальное ускорение находится в допустимых пределах (менее 4 м/с^2 , рис. 9, *а*), максимальное давление рабочего газа в гидропневматической подвеске не превышает 0,21 МПа (рис. 9, *б*),

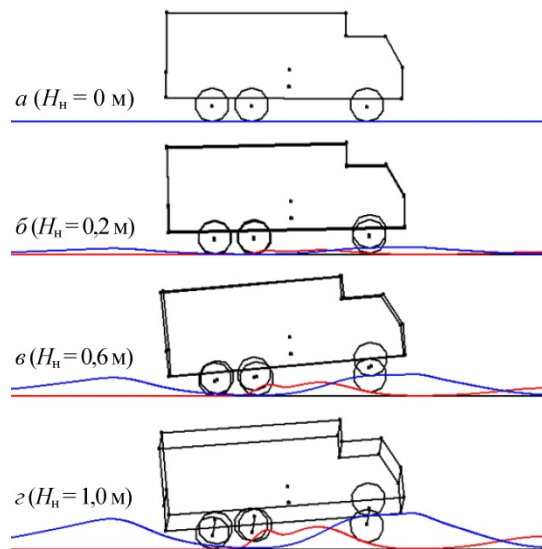


Рис. 8. Движение лесовозного автомобиля с гидропневматической подвеской по грунтовой дороге с различной средней высотой неровностей H_n (собственные разработки)

максимальный перепад температур газа не превышает $200\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 9, в).

При большой высоте неровностей (более $0,4\text{ м}$), что соответствует отдельным сложным участкам лесовозных грунтовых дорог, лесовозный автомобиль существенно наклоняется в продольном (рис. 8, в) и в поперечном (рис. 8, г) направлениях. Это приводит к высоким значениям вертикального ускорения $4\text{--}8\text{ м/с}^2$ и резкому росту с увеличением высоты неровностей максимального давления в пневматической полости с $0,2$ до $0,8\text{ МПа}$, а также максимальному перепаду температур с 190 до $710\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 9).

Таким образом, гидропневматическая подвеска эффективно снижает колебания лесовозного автомобиля на грунтовых дорогах с характерной высотой неровностей до $0,4\text{ м}$: обеспечивает вертикальное ускорение центра тяжести автомобиля не более $3,9\text{ м/с}^2$, максимальное давление газа в подвеске не более $0,21\text{ МПа}$, максимальный перепад температур не более $190\text{ }^\circ\text{C}$.

От частоты встречи неровностей колесами лесовозного автомобиля зависит интенсивность работы гидропневматической подвески. В зависимости от типа грунтовой дороги (дорожно-грунтовых условий) частота встречи неровностей может изменяться в широких пределах. Для исследования влияния количества неровностей на единице длины пути

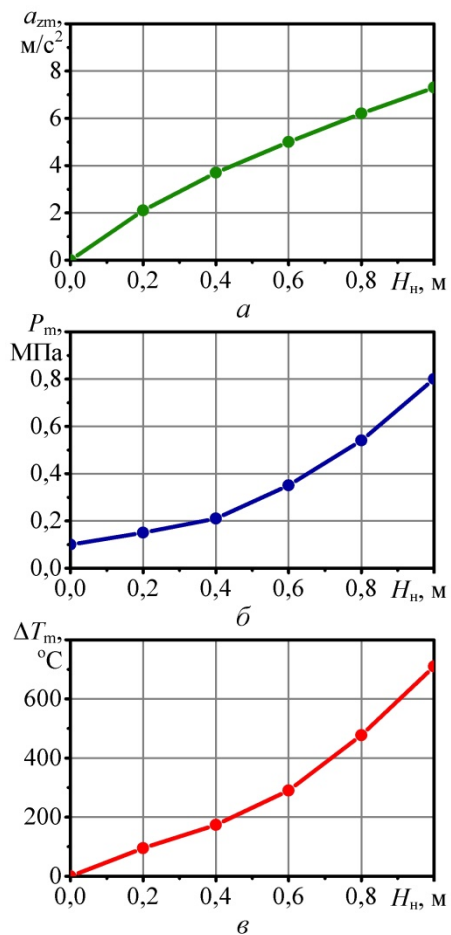


Рис. 9. Влияние средней высоты неровностей H_n на максимальное вертикальное ускорение автомобиля a_{zm} (а), максимальное давление P_m (б) и максимальный перепад температур ΔT_m (в) в пневматической полости подвески (собственные разработки)

λ_n проведена серия компьютерных экспериментов, в которой λ_n варьировали на уровнях $0, 200, 400, 600, 800, 1000\text{ км}^{-1}$. Максимальная высота неровностей составляла $0,4\text{ м}$, автомобиль двигался в горизонтальном направлении со скоростью 10 м/с .

С увеличением количества неровностей рельеф опорной поверхности становится более изрезанным и увеличивается количество неблагоприятных комбинаций неровностей, вызывающих резкие возмущения в подвесках колес автомобиля (рис. 10). Однако, начиная с плотности неровностей 600 км^{-1} , они расположены слишком часто и начинают переходить в плавную функцию рельефа, поэтому показатели эффективности гидропневматической подвески стабилизируются и далее практически не возрастают (рис. 11). Максимальное вертикальное ускорение

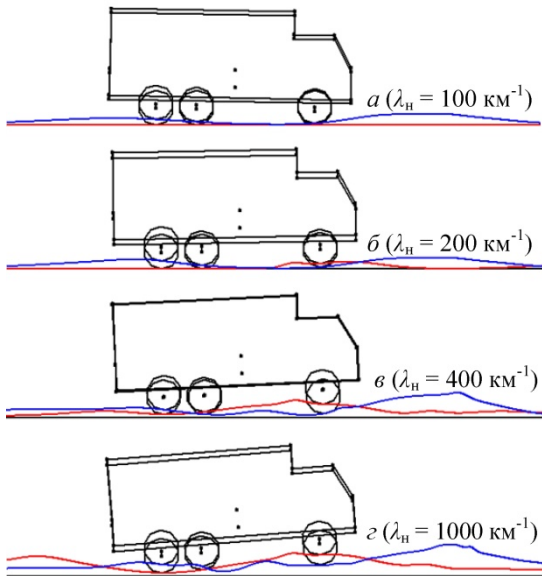


Рис. 10. Движение лесовозного автомобиля с гидропневматической подвеской по грунтовой дороге с различным количеством препятствий на единицу пути λ_n (собственные разработки)

автомобиля достигает 5,8 ... 6,2 м/с², максимальное давление в газовой полости подвески достигает 0,49 ... 0,55 МПа, максимальный перепад температур рабочего газа достигает 380 ... 430 °С.

Таким образом, при самых неблагоприятных частотах встречи и комбинациях неровностей грунтовой дороги с максимальной высотой 0,4 м критические показатели остаются в приемлемых диапазонах: вертикальное ускорение не превышает 6,2 м/с², максимальное давление в газовой полости не превышает 0,55 МПа, максимальный перепад температур рабочего газа не превышает 430 °С.

Скорость движения лесовозного автомобиля также является важным фактором, определяющим интенсивность работы гидропневматической подвески. Для изучения влияния горизонтальной скорости движения лесовозного автомобиля v на показатели эффективности гидропневматической подвески проведена серия компьютерных экспериментов, в которой v изменяли от 0 до 20 м/с с шагом 5 м/с. Максимальная высота неровностей составляла 0,4 м, частота встречи неровностей составляла 400 км⁻¹.

С увеличением скорости движения закономерно увеличиваются все три рассматриваемых показателя эффективности (рис. 12). Необходимо

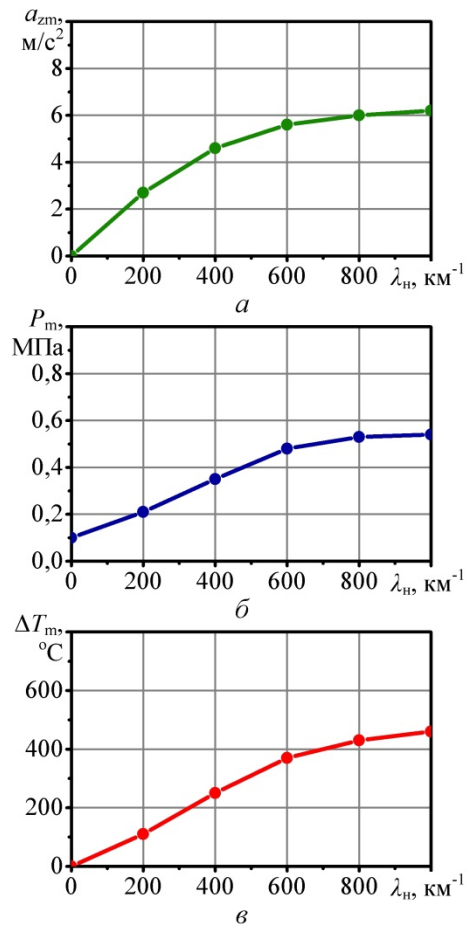


Рис. 11. Влияние количества препятствий на единицу длины λ_n на максимальное вертикальное ускорение автомобиля a_{zm} (а), максимальное давление P_m (б) и максимальный перепад температур ΔT_m (в) в пневматической полости подвески (собственные разработки)

отметить, что при увеличении скорости движения, начиная со скорости 10 ... 15 м/с, замедляется рост всех показателей, что на графиках отражается уменьшением угла наклона касательной к горизонтальному направлению. Результаты компьютерных экспериментов показали, что гидропневматическая подвеска остается работоспособной в широком диапазоне скоростей движения автомобиля.

Если учесть, что скорость движения по грунтовой дороге выбирается в зависимости от высоты и частоты встречи неровностей, по условию комфортной величины вертикального ускорения a_{zm} для водителя и надежного удержания груза – около 2...4 м/с², это позволяет двигаться по заданной

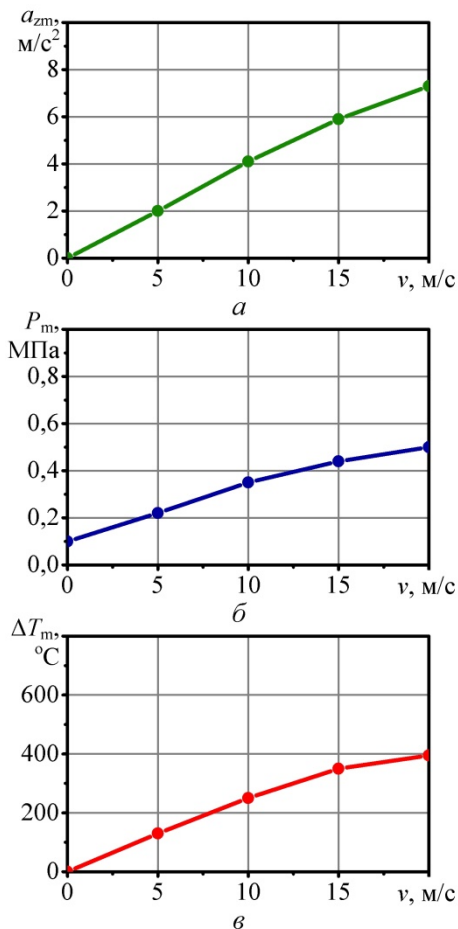


Рис. 12. Влияние скорости движения лесовозного автомобиля v на максимальное вертикальное ускорение автомобиля a_{zm} (а), максимальное давление P_m (б) и максимальный перепад температур ΔT_m (в) в пневматической полости подвески (собственные разработки)

грунтовой дороге (относится к классу сложных дорожно-грунтовых условий) со скоростью 5...10 м/с, максимальное давление газа в пневматической полости не превышает 0,21...0,37 МПа, максимальный перепад температур рабочего газа не превышает 140...250 °С.

Выводы

1. Разработана математическая модель движения лесовозного автомобиля колесной формулы 6×6 с гидропневматической подвеской по лесовозной дороге. На основе предложенной математической модели разработана компьютерная программа, позволяющая оценить плавность хода лесовозного автомобиля, оснащенного гидропневматической подвеской.

2. Преодоление лесовозным автомобилем выпуклостей и вогнутостей опорной поверхности амплитудой 0,4 м вызывает сравнительно небольшое возрастание величины давления (до 2,5 атм.) и приемлемые колебания температуры (от 0 до 520 °С), что не требует применения специальных конструктивных решений и специфических материалов по сравнению с широко применяемыми элементами пневмосистем.

3. Гидропневматическая подвеска эффективно снижает колебания лесовозного автомобиля на лесовозных дорогах с характерной высотой неровностей до 0,4 м, обеспечивает вертикальное ускорение центра тяжести автомобиля не более 3,9 м/с², максимальное давление газа в пневмосистеме подвески не более 0,21 МПа, максимальный перепад температур не более 190 °С.

4. При самых неблагоприятных частотах встречи и комбинациях неровностей лесовозной дороги с максимальной высотой 0,4 м критические показатели остаются в приемлемых диапазонах и не превышают: вертикальное ускорение – 6,2 м/с², максимальное давление в газовой полости – 0,55 МПа, максимальный перепад температур рабочего газа – 430 °С.

5. При движении в сложных условиях лесовозных дорог (максимальная высота неровностей 0,4 м, частота встречи неровностей 400 км⁻¹) гидропневматическая подвеска лесовозного автомобиля позволяет поддерживать скорость 5...10 м/с, обеспечивающую приемлемые для комфорта водителя и динамической нагрузки на сам автомобиль максимальное вертикальное ускорение 2...4 м/с², при этом максимальное давление газа в полости пневматического цилиндра подвески не превышает 0,21...0,37 МПа, а максимальный перепад температур рабочего газа находится в пределах 140...250 °С.

Библиографический список

1. Посметьев, В. И. Обоснование схемы лесовозного автомобиля, оснащенного перспективной конструкцией колесного модуля с гидроприводом / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Мир транспорта и технологических машин. – 2017. – № 3 (58). – С. 27–34. – Библиогр.: 20 назв.
2. Посметьев, В. И. Перспективы использования колесных модулей в грузовых автомобилях / В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Строительные и дорожные машины. – 2018. – № 10. – С. 37–43. – Библиогр.: 8 назв.
3. Demyanov, D. N. Clearance control of vehicle with hydropneumatic suspension and the wheel formula 8×8 / D. N. Demyanov, V. S. Karabtsev, A. I. Malinov // IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering 489 (2019) 012053. *Bibliogr.*: 3 titles. – DOI 10.1088/1757-899X/489/1/012053.
4. An improved rollover index based on BR neural for hudropneumatic suspension / X.T. Dong, Y. Jiang, Z. Zhong [et al.] // Mathematical problems in engineering. – 2018. – 7859521. *Bibliogr.*: 32 titles. – DOI 10.1155/2018/7859521.
5. Konieczny, L. Analysis of structural and material aspects of selected elements of a hydropneumatic suspension system in a passenger car / L. Konieczny, R. Burdzik, T. Wegrzyn // Arhives of metallurgy and materials. – 2016. – No. 61 (1). – P. 79–83. *Bibliogr.*: 26 titles. – DOI 10.1515/amm-2016-0018.
6. Hierarchical control strategy for active hydropneumatic suspension vehicles based of genetic algorithms / J. Z. Feng, C. Matthews, S. L. Zheng [et al.] // Advances in mechanical engineering. – 2015. – No. 7 (2), 951050. *Bibliogr.*: 25 titles. – DOI 10.1155/2014/951050.
7. Hydropneumatic suspension efficiency in terms of the teleoperated unmanned ground vehicle tests / A. Dabrowska, M. Przybysz, A. Rubiec, K. Spadlo // Intelligent technologies in logistics and mechatronics systems – ITELMS 2015. – P. 110–116. – *Bibliogr.*: 10 titles.
8. Sujatha, C. Heavy vehicle dynamics-comparison between leaf spring and hydropneumatic suspensions / C. Sujatha, P. Tejesu // Proceedings of imac-xx : structural dynamics vols I and II, 2002 4753. – P. 311–317. – *Bibliogr.*: 3 titles.
9. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях : учеб. пособие / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с. – *Библиогр.*: с. 284–286. – ISBN 5-283-04480-7.
10. Горский, В. Г. Планирование промышленных экспериментов (модели динамики) : учеб. пособие / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер, А. М. Талалай. – Москва : Металлургия, 1978. – 112 с. – *Библиогр.*: с. 105–110.
11. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений : учеб. пособие / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 279 с. – *Библиогр.*: с. 92.
12. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов : учеб. пособие / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. – Ленинград : Колос, 1980. – 168 с. – *Библиогр.*: с. 166–167.
13. Вырко, Н. П. Ровность дорожного покрытия – технико-эксплуатационный показатель работы автомобильного транспорта / Н. П. Вырко, И. И. Леонович, А. С. Федькин // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2012. – № 2. – С. 32–34. – *Библиогр.*: с. 34 (2 назв.).

References

1. Posmetyev V.I., Nikonov V.O. (2017) *Obosnovanie shemi lesovoznogo avtomobilya, osnaschennogo perspektivnoi konstrukciei kolesnogo modulya s gidroprivodom* [Justification of the scheme of a forest car equipped with a promising design of a hydraulically driven wheel module]. *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin* [World of transport and technological machines], no. 3(58), pp. 27-34 (in Russian).

2. Posmetyev V.I., Nikonov V.O. (2018) *Perspektivi ispolzovaniya kolesnih modulei v gruzovih avtomobilyah* [Prospects for the use of wheel modules in trucks]. *Stroitelnie i dorozhnie mashini* [Construction and road machines], no. 10, pp. 37-43 (in Russian).
3. Demyanov D.N., Karabtsev V.S., Malinov A.I. Clearance control of vehicle with hydropneumatic suspension and the wheel formula 8×8 . *Materials Science and Engineering* 489 (2019) 012053. doi: 10.1088/1757-899X/489/1/012053.
4. Dong X.T., Jiang Y., Zhong Z. (et al.) (2018) An improved rollover index based on BR neural for hdropneumatic suspension. *Mathematical problems in engineering*, 7859521. doi : 10.1155/2018/7859521.
5. Konieczny L., Burdzik R., Wegrzyn T. (2016) Analysis of structural and material aspects of selected elements of a hydropneumatic suspension system in a passenger car. *Arhives of metallurgy and materials*, 61(1), pp. 79-83. doi : 10.1515/amm-2016-0018.
6. Feng J.Z., Matthews C., Zheng S.L. (et al.) (2015) Hierarchical control strategy for active hydropneumatic suspension vehicles based of genetic algorithms. *Advances in mechanical engineering*, 7(2), 951050. doi: 10.1155/2014/951050.
7. Dabrowska A., Przybysz M., Rubiec A., Spadlo K. Hydropneumatic suspension efficiency in terms of the teleoperated unmanned ground vehicle tests. *Intelligent technologies in logistics and mechatronics systems – ITELMS 2015*, pp. 110-116.
8. Sujatha C., Tejesu P. Heavy vehicle dynamics-comparison between leaf spring and hydropneumatic suspensions, *Proceedings of imac-xx : structural dynamics vols I and II, 2002*, 4753, pp. 311-317.
9. Granovskii V.A., Siraya T.N. *Metodi obrabotki eksperimentalnih danih pri izmereniyah* [Methods for processing experimental data in measurements]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningr. Otdelenie, 1990, 288 p. (in Russian).
10. Gorskii V.G., Adler Yu.P., Talalai A.M. *Planirovanie promishlennih eksperimentov (modeli dinamiki)* [Planning of industrial experiments (dynamics models)]. Moscow: Metallurgy, 1978, 112 p. (in Russian).
11. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnih resheniy* [Planning an experiment when searching for optimal solutions]. Moscow: Nauka, 1976, 279 p. (in Russian).
12. Melnikov S.V., Aleshkin V.R., Roschin P.M. *Planirovanie eksperimenta v issledovaniyah sel'skokozyaistvennih processov* [Planning an experiment in research on agricultural processes]. Leningrad: Kolos, 1980, 168 p. (in Russian).
13. Virko N.P., Leonovich I.I., Fedkin A.S. (2012) *Rovnost dorozhnogo pokritiya – tehniko-eksplyuatsionniy pokazatel raboty avtomobilnogo transporta* [The evenness of the road surface is a technical and operational indicator of the operation of road transport]. *Trudi BGTU. Lesnaya i derevoobrabativayuschaya promishlennost* [Proceedings of BSTU. Timber and woodworking industry], no. 2, pp. 32-34 (in Russian).

Сведения об авторах

Посметьев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: posmetyev@mail.ru.

Драпалюк Михаил Валентинович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Никонов Вадим Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Посметьев Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: victorvpo@mail.ru.

Авдюхин Александр Владимирович – аспирант кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: 1988aav@mail.ru.

Information about authors

Posmetyev Valery Ivanovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Cars, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: posmetyev@mail.ru.

Drapalyuk Mikhail Valentinovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: md@vglta.vrn.ru.

Nikonov Vadim Olegovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Cars, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Posmetyev Viktor Valeryevich – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: victorvpo@mail.ru.

Avdyukhin Aleksandr Vladimirovich – post-graduate student of the Department of Production, Repair and Operation of Cars, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: 1988aav@mail.ru.

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГИДРОПРИВОДА ЛЕСОВОЗНОГО ТЯГАЧА С ПОЛУПРИЦЕПОМ

доктор технических наук, профессор **В.И. Посметьев**

кандидат технических наук, доцент **В.О. Никонов**

кандидат физико-математических наук, доцент **В.В. Посметьев**

доктор технических наук, доцент **В.А. Зеликов**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

Обоснована актуальность разработки новых устройств для аккумулирования и преобразования энергии сжатого воздуха в рекуперативном гидроприводе лесовозного тягача с полуприцепом. Приведены схема размещения рекуперативных механизмов на лесовозном тягаче с полуприцепом и схема рекуперативного гидропривода с подсистемами аккумулирования и преобразования энергии сжатого воздуха. Представлена упрощенная схема пневматической энергосберегающей системы для исследования функционирования подсистем аккумулирования и преобразования энергии сжатого воздуха. Разработана математическая модель для оценки эффективности использования пневматической энергосберегающей системы, включающая в себя уравнения изменения состояния газа в ее элементах, решаемые численным методом Эйлера. Описан алгоритм моделирования, состоящий из семи многократно повторяющихся этапов, выполняемых в процессе компьютерного моделирования. Представлена разработанная компьютерная программа, позволяющая исследовать пневматическую энергосберегающую систему. Приведены компьютерные эксперименты с наиболее типичным набором ее конструктивных и технологических параметров. Получены зависимости от времени объема рассматриваемых пневматических полостей, количества вещества в них, давления и температуры воздуха в рассматриваемых пневматических полостях. Выявлено влияние диаметра пневмоцилиндра на время заполнения ресивера, на количество ходов поршня и на тепловой КПД.

Ключевые слова: лесовозный тягач, полуприцеп, рекуперативный гидропривод, математическая модель, имитационное моделирование, аккумулирование, преобразование, энергия сжатого воздуха, ресивер

COMPUTER SIMULATION RESULTS OF FUNCTIONING OF THE PNEUMATIC SUBSYSTEM OF RECOVERABLE HYDRAULIC DRIVE OF A FOREST TRUCK WITH A SEMI-TRAILER

DSc (Engineering), Professor **V.I. Posmetyev**

PhD (Engineering), Associate Professor **V.O. Nikonov**

PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor **V.V. Posmetyev**

DSc (Engineering), Associate Professor **V.A. Zelikov**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

The relevance of developing new devices for accumulation and conversion of compressed air energy in a regenerative hydraulic drive of a timber truck with a semitrailer has been substantiated. The layout of recuperative mechanisms on a timber tractor with a semitrailer and the diagram of a recuperative hydraulic drive with subsystems for accumulating and converting compressed air energy are presented. A simplified diagram of a pneumatic energy-saving sys-

tem for studying the functioning of the subsystems of accumulation and energy conversion of compressed air is presented. A mathematical model has been developed to evaluate the efficiency of using a pneumatic energy-saving system, which includes the equations of change in the gas state in its elements, solved by the Euler numerical method. A modeling algorithm is described, consisting of seven repeating steps performed in the process of computer simulation. The developed computer program is presented, which allows studying pneumatic energy-saving system. Computer experiments with the most typical set of its design and technological parameters are presented. The time dependences of the volume of the pneumatic cavities under consideration, the amount of substance in them, pressure and air temperature in the pneumatic cavities under consideration are obtained. The influence of the diameter of the pneumatic cylinder on the filling time of the receiver, the number of strokes of the piston and thermal efficiency has been defined.

Keywords: timber truck, semitrailer, recuperative hydraulic drive, mathematical model, simulation, accumulation, conversion, compressed air energy, receiver

Введение

Интенсивное развитие технологий получения и использования рекуперированной энергии в процессе работы пневмо- и гидравлических приводов машин в последнее время подтвердило свою конкурентоспособность по отношению к традиционным способам их функционирования, как по экологическим, так и по экономическим соображениям. Наиболее существенной проблемой, оказывающей влияние на эффективное и надежное функционирование рекуперативных пневмо- и гидравлических приводов машин с подсистемами преобразования и аккумулирования энергии сжатого воздуха, является проблема разработки новых устройств аккумулирования энергии в них. Принципы аккумулирования энергии сжатого воздуха заключаются в переводе энергии давления рабочей жидкости в энергию сжатого воздуха с последующим ее преобразованием в энергию давления рабочей жидкости в необходимый период времени. В результате протекания тепло-массообменных процессов с окружающей средой при аккумулировании и преобразовании энергии сжатого воздуха происходит существенное снижение производительности аккумулирования. С учетом этого разработка и применение новых устройств аккумулирования энергии сжатого воздуха в пневмо- и гидравлических приводах машин, направленных на минимизацию возникающих тепловых потерь в процессе преобразования и аккумулирования, удовлетворяющих постоянно возрастающим требованиям эффективности, является актуальным.

В статье Qihui Yu и Qiancheng Wang (2019) приведено обоснование необходимости использо-

вания перспективных технологий хранения энергии сжатого воздуха. Описаны свойства реального газа, протекающие адиабатические и изотермические процессы, а также способы повышения эффективности этих процессов [1].

Laijun Chen и Tianwen Zheng (2016) в своей работе рассматривают современные технологии аккумулирования энергии сжатого воздуха, ими предпринимаются попытки продемонстрировать фундаментальные принципы, классификации и режимы работы этих технологий [2].

Работа Rafael Rivelino Silvo Bravo (2018) посвящена исследованию концепции накопления в ресиверах и дальнейшего использования в гидравлической системе энергии сжатого воздуха в процессе торможения транспортного средства, оснащенного гидропневматической гибридной трансмиссией. Выявлено, что предлагаемая система позволяет накапливать до 69 % энергии в процессе полного торможения транспортного средства [3].

В статье Sylvain Lemoufouet и Alfred Rufer (2006) приведена схема высокоэффективной гибридной системы накопления энергии сжатого воздуха в ресиверах с высоким жизненным циклом. Выявлены недостатки данной системы, заключающиеся в низких характеристиках пневматического двигателя. Предложен способ повышения термодинамического преобразования энергии сжатого воздуха в ресиверах, основанный на работе системы при высоком и переменном давлении в изотермическом процессе [4].

V.I. Posmetyev (2018) в своих исследованиях приводит математическую модель пневматической подсистемы устройства аккумулирования энергии

сжатого газа и разработанную на ее основе компьютерную программу, позволившие исследовать влияние геометрических и теплофизических параметров элементов пневмосистемы на эффективность аккумулирования энергии и тепловые потери. Выявлено, что наибольшее снижение потерь, с 9,7 до 5 %, происходит при толщине теплоизолирующего слоя 20-30 мм [5].

Во всех рассмотренных выше работах полученные результаты не имеют прямого отношения к рекуперативным гидроприводам лесовозных транспортных средств. В настоящее время имеются только разрозненные результаты исследований, касающиеся отдельных систем аккумулирования и преобразования энергии сжатого воздуха [6, 7].

На основании этого авторами предлагается рекуперативный гидропривод лесовозного тягача с полуприцепом, который включает в себя (рис. 1, 2): рекуперативные механизмы стрелы 1, рукояти 2, опорно-поворотного устройства 3 гидроманипулятора, рекуперативные механизмы колес 4, подвесок 5, седельно-сцепного устройства 6, механизм преобразования энергии 7, пневматический аккумуляторный агрегат 8, гидравлический насосный агрегат 9, всасывающую 10, сливные 11-14 и напорные 15, 16 гидравлические магистрали, гидролинии 17 подачи рабочей жидкости под давлением, пневмолинии 18, 19 подачи сжатого воздуха.

Предлагаемый рекуперативный гидропривод позволяет снизить нагрузку при работе основного гидравлического насоса и тем самым снизить нагрузку двигателя лесовозного тягача с полуприцепом и, соответственно, снизить расход топлива и токсичность выхлопных газов. Это достигается за

счет преобразования энергии рабочей жидкости, поступающей под давлением от рекуперативных механизмов стрелы, рукояти, опорно-поворотного устройства, подвески, гидромоторов колес, седельно-сцепного устройства, в энергию сжатого воздуха в механизме преобразования энергии, дальнейшего аккумулирования энергии сжатого воздуха в пневматическом аккумуляторном агрегате и преобразования этой энергии в энергию давления рабочей жидкости в гидравлическом насосном агрегате с последующим ее полезным использованием, как при движении лесовозного тягача с полуприцепом, так и при погрузке и разгрузке сортиментов гидроманипулятором.

Представим для исследования механизм преобразования энергии 7 сжатого воздуха и пневматический аккумуляторный агрегат 8 рекуперативного гидропривода (рис. 2) следующей упрощенной схемой пневматической энергосберегающей системы, содержащей три пневматические полости, соединенные обратными клапанами K_1 и K_2 (рис. 3).

Перевод механической энергии в энергию сжатого воздуха и обратно производится в пневмоцилиндре Π , положение поршня в котором задается параметром x_{Π} . Рабочая полость пневмоцилиндра характеризуется объемом V_{Π} , количеством газа в полости v_{Π} , давлением и температурой воздуха P_{Π} и T_{Π} соответственно. Коэффициенты теплоотдачи α_{Π} , α_t , α_a для рассматриваемых пневматических полостей зависят от геометрии внешней поверхности, ее состояния и характера обтекания окружающим воздухом и его температуры.

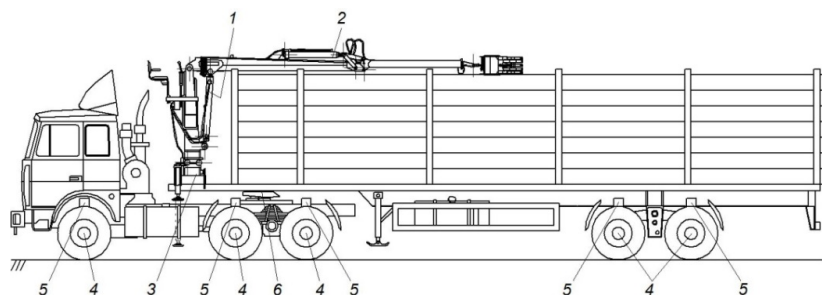


Рис. 1. Схема размещения рекуперативных механизмов на лесовозном автопоезде (собственные разработки)

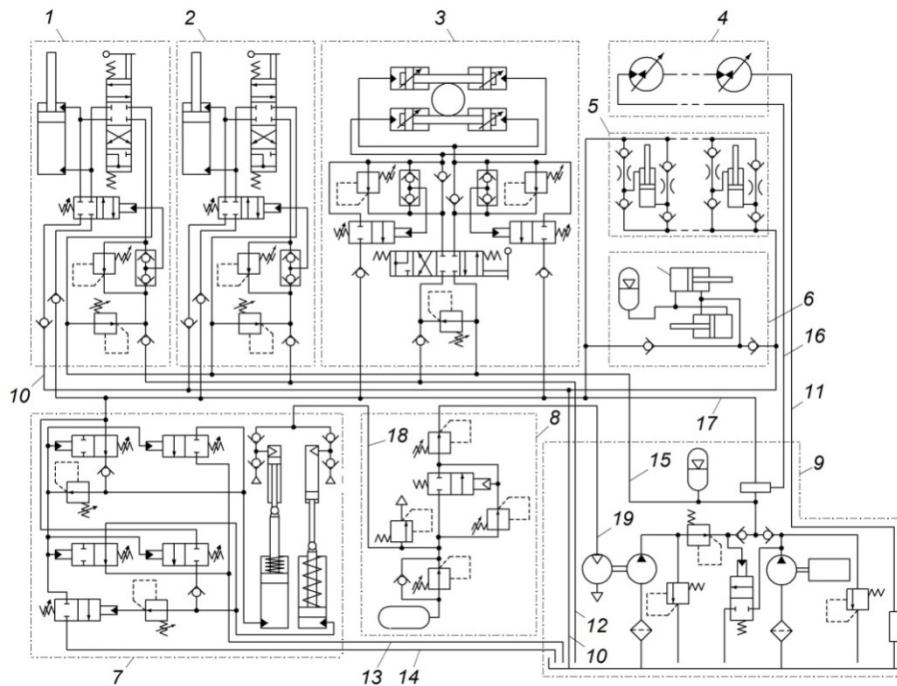
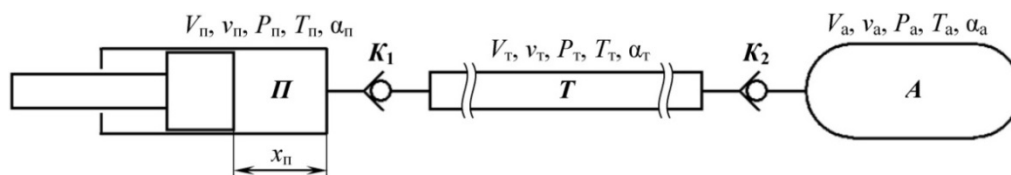


Рис. 2. Схема рекуперативного гидропривода лесовозного тягача с полуприцепом (собственные разработки)



П – пневмоцилиндр; Т – трубопровод сжатого воздуха; А – ресивер; K_1 и K_2 – обратные клапаны

Рис. 3. Основные элементы пневматической энергосберегающей системы (механизма преобразования энергии и пневматического аккумуляторного агрегата) (собственные разработки)

Включение трубопровода T как отдельного элемента необходимо для большей физической адекватности модели: в газовых линиях даже незначительной протяженности могут происходить несколько значимых эффектов (упругое, упруго-вязкое и необратимое растяжение трубопроводов, теплоотдача, потери газа и т. п.), неблагоприятно влияющих на эффективность системы энергосбережения. Трубопровод в модели характеризуется четырьмя параметрами: объемом полости трубопровода V_t , количеством вещества, давлением и температурой воздуха в трубопроводе v_t, P_t, T_t .

Запасение энергии сжатого газа производится в ресивере A , который в модели характеризуется четырьмя параметрами: объемом V_a , а также коли-

чеством вещества, давлением P_a и температурой T_a воздуха.

При функционировании рекуперативного гидропривода лесовозного тягача с полуприцепом происходит движение поршня в пневмоцилиндре, что приводит к перекачиванию воздуха между пневматическими полостями с учетом работы обратных клапанов, изменению состояния воздуха в полостях, теплообмену с окружающей средой.

Материалы и методы

Для оценки эффекта от использования предлагаемого рекуперативного гидропривода на лесовозном тягаче с полуприцепом разработана математическая модель [8-12].

Уравнения изменения состояния газа в элементах пневматической энергосберегающей системы решаются численным методом: методом Эйлера. Поэтому для краткости изложения далее приведены окончательные уравнения численной схемы в конечных разностях.

В начальный момент времени $t = 0$ (в численной схеме этому соответствует номер шага интегрирования по времени $\tau_0 = 0$) давление воздуха в каждой рассматриваемой полости задается равным атмосферному $P_0 = 101\,325$ Па, а температура – равной характерной летней температуре $T_0 = 300$ К:

$$P_{\Pi}^0 = P_0; P_T^0 = P_0; P_A^0 = P_0; \quad (1)$$

$$T_{\Pi}^0 = T_0; T_T^0 = T_0; T_A^0 = T_0. \quad (2)$$

Начальное количество вещества (воздуха) v_k^0 в каждой полости k рассчитывается из уравнения состояния идеального газа

$$v_k^0 = \frac{P_k^0 V_k^0}{RT_k^0}, \quad (3)$$

С началом численного интегрирования на каждом шаге по времени τ_i производится следующая последовательность действий.

1. Задается текущее положение поршня в пневмоцилиндре x_{Π} . Для теоретической оценки эффективности системы пневматической рекуперации целесообразно задать движение поршня по гармоническому закону

$$x_{\Pi}(t) = x_{\Pi 0} + A \sin(2\pi f t), \quad (4)$$

где $x_{\Pi 0}$ – среднее положение поршня (положение в момент времени $t = 0$); A – амплитуда перемещения поршня; f – частота периодического движения поршня. Для более детального моделирования целесообразно использовать приближенные к реальности законы $x_{\Pi}(t)$, для чего могут быть использованы многочисленные разработанные авторами модели лесных машин с детальным представлением механической и гидравлической подсистем.

2. По известному положению поршня $x_{\Pi}(t)$ (в разностной схеме используется обозначение x_{Π}^{τ}) рассчитывается текущий объем полости пневмоцилиндра V_{Π}^{τ}

$$V_{\Pi}^{\tau} = x_{\Pi}^{\tau} \pi \frac{D_{\Pi}^2}{4}, \quad (5)$$

где D_{Π} – диаметр пневмоцилиндра. Объемы трубопровода V_T и ресивера V_A в первом приближении считаются постоянными.

3. Изменение объема газа в пневмоцилиндре вызывает изменение температуры, которое рассчитывается в адиабатическом приближении для воздуха

$$T_{\Pi}^{\tau} = T_{\Pi}^{\tau-1} \left(\frac{V_{\Pi}^{\tau}}{V_{\Pi}^{\tau-1}} \right)^{\frac{7}{5}}, \quad (6)$$

где индексы $\tau-1$ и τ означают предыдущий и текущий шаги интегрирования по времени.

4. В результате теплообмена каждой полости с окружающей средой происходит изменение температуры газа, которое рассчитывается на основе закона Ньютона-Рихмана:

$$T_k^{\tau} = T_k^{\tau-1} - \alpha_k (T_k^{\tau-1} - T_0) \Delta t, \quad (7)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи, зависящий преимущественно от площади контакта полости с окружающей средой и характера теплоизоляции стенок полости; k – индекс полости («П», «Т» или «А»), Δt – шаг интегрирования по времени (в последующих расчетах принимался равным 0,002 с). В данной формуле равенство имеет смысл присваивания той же переменной T_k^{τ} .

5. По текущим значениям объема и температуры рассчитывается текущее давление в полостях на основе уравнения состояния идеального газа:

$$P_k^{\tau} = v_k R \frac{T_k^{\tau}}{V_k^{\tau}}. \quad (8)$$

6. Несоответствие давлений в полостях приводит к перетеканию газа из полости в полость. Для расчета используется следующая формула:

$$\begin{cases} v_i^{\tau} = v_i^{\tau-1} - d_{ij} \sqrt{P_i^{\tau-1} - P_j^{\tau-1}}; \\ v_j^{\tau} = v_j^{\tau-1} + d_{ij} \sqrt{P_i^{\tau-1} - P_j^{\tau-1}}, \end{cases} \quad (9)$$

где d_{ij} – коэффициент дросселирования, размерность которого приведена к отношению количества вещества к давлению. Если полости i и j соединены обратным клапаном, коэффициент дросселирования в прямом направлении равен определенному коэффициенту d_{ij0} и равен нулю в обратном направлении:

$$\begin{cases} d_{ij} = d_{ij0}; \\ d_{ji} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

7. Изменение количества вещества при перетекании воздуха из полости в полость приводит к изменению температуры газа

$$T_k^\tau = T_k^\tau + (T_0 - T_k^\tau) \frac{V_k^\tau - V_k^{\tau-1}}{V_k^{\tau-1}}. \quad (11)$$

Далее перечисленные семь этапов многократно повторяются в процессе компьютерного эксперимента. Изложенный алгоритм моделирования можно представить следующей схемой (рис. 4).

На схеме алгоритма добавлены обозначения: $t_{\text{кз}}$ – длительность компьютерного эксперимента; $[t_{\text{кз}}/\Delta t]$ – номер последнего шага интегрирования; квадратные скобки означают округление до целого числа.

Для исследования модели была разработана компьютерная программа «Программа для моделирования пневматической энергосберегающей системы». Программа составлена на языке Object Pascal в среде программирования Borland Delphi 7.0.

Программа предназначена для моделирования работы пневматической энергосберегающей системы, укрупненно, из пневмоцилиндра, достаточно протяженной газовой линии и ресивера.

Программа воспроизводит процессы перекачивания газа между пневматическими полостями, изменения его состояния, теплообмена с окружающей средой, инициированные движением поршня пневмоцилиндра по заданному закону, в частности, синусоидальному.

Функциональные возможности программы:

- задание в тексте программы параметров элементов пневмосистемы, состояния газа и внешней среды (рис. 5);
- проведение компьютерного эксперимента по многократному движению поршня пневмоцилиндра с постепенным заполнением ресивера сжатым воздухом;
- вывод схематических изображений пневмоцилиндра, газовой линии и ресивера, комплектов графиков зависимости от времени количества вещества, объема, температуры и давления в рассматриваемых пневматических полостях. Программа достаточно универсальна и применима для энергосберегающих пневмосистем различного типа и масштаба.

Основные ограничения программы: рабочее давление воздуха в полостях: от 0,1 до 5,0 МПа; временное разрешение (шаг интегрирования дифферен-

циальных уравнений): $5 \cdot 10^{-6}$ с; длительность компьютерного эксперимента – от 0 до 60 с машинного времени. Программа рассчитана на использование ЭВМ с процессором класса не ниже Pentium 2,6 ГГц, объеме оперативной памяти не менее 2048 Мбайт. Объем исходного текст программы составляет 7 Кбайт.

Результаты и обсуждение

Для оценки эффективности пневматической энергосберегающей системы был проведен компьютерный эксперимент с наиболее типичным набором ее конструктивных и технологических параметров. Диаметр пневматического цилиндра составлял 0,3 м, поршень двигался с амплитудой 0,2 м и частотой 0,2 Гц. Объемы трубопровода и ресивера составляли 0,01 и 0,02 м³. Объем пневмоцилиндра колебался вблизи средней линии около 0,021 м³ (рис. 6, а).

С началом работы пневматической энергосберегающей системы содержание воздуха (количество вещества v_n) в пневмоцилиндре изменяется по практически периодическому закону (рис. 6, б). В трубопроводе же и в ресивере количество вещества постепенно растет по ступенчатому закону (рис. 6, в). Таким образом, происходит постепенное заполнение ресивера для последующего использования.

В процессе работы пневматической энергосберегающей системы давление в пневмоцилиндре $P_n(t)$ изменяется по пульсирующему закону (рис. 7, а), причем амплитуда импульсов увеличивается с течением времени, так как с каждым ходом поршня необходимо все большее давление, чтобы вытолкнуть порцию воздуха в постепенно заполняющиеся трубопровод и ресивер. Благодаря обратным клапанам давление в трубопроводе и ресивере увеличивается ступенчатым образом (рис. 7, а), и указанные давления практически совпадают между собой. После каждого поступления порции воздуха происходит его охлаждение, поэтому давление после ступенчатого скачка несколько снижается (на 3 ... 6 %) в течение промежутка времени до поступления следующей порции воздуха. Интенсивное периодическое сжатие воздуха приводит к существенным колебаниям его температуры (рис. 7, б). Нагрев воздуха является наиболее существенным недостатком пневматической энергосберегающей системы по сравнению с гидравлическими или механическими.

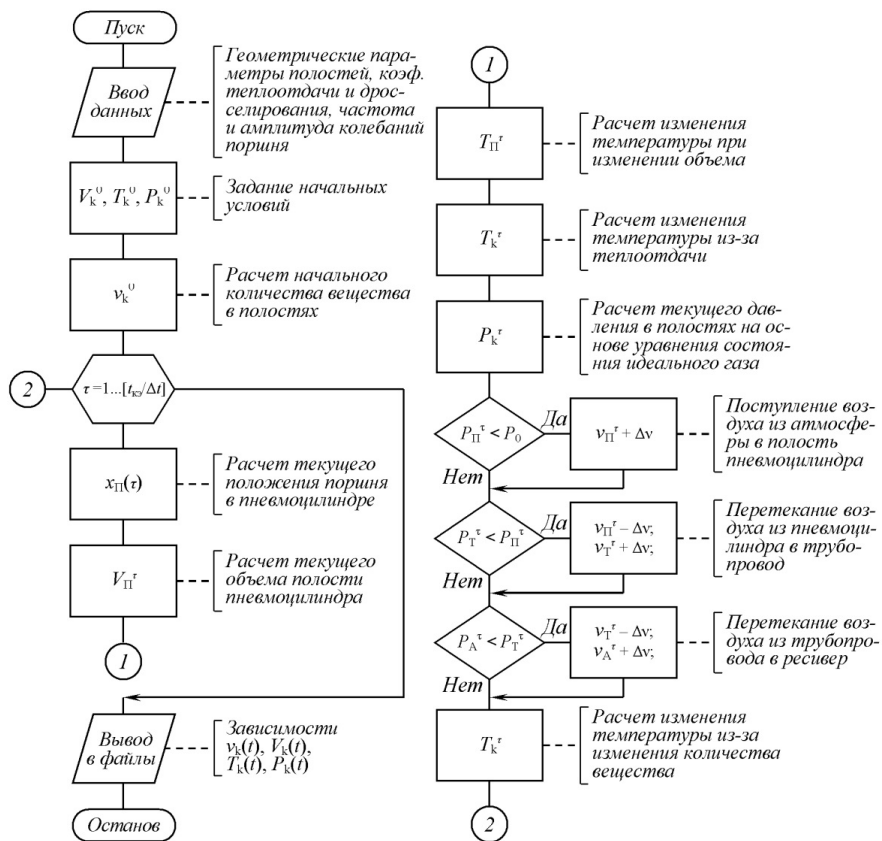


Рис. 4. Схема алгоритма моделирования пневматической энергосберегающей системы (собственные разработки)

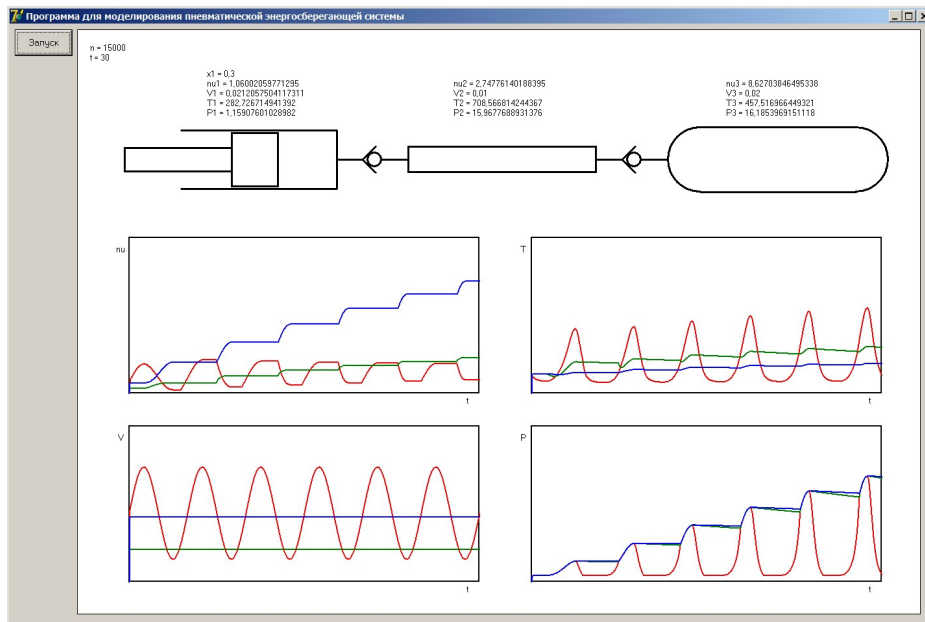
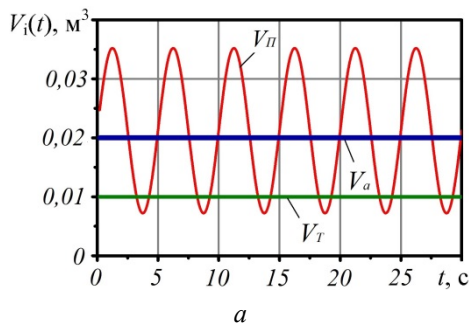
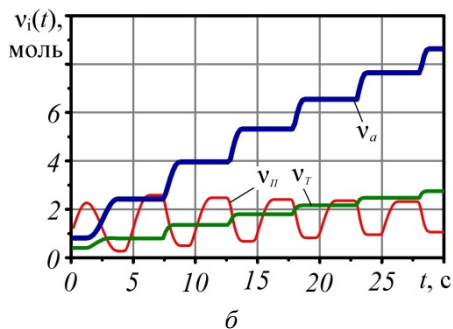


Рис. 5. Вывод на экран результатов моделирования в «Программе для моделирования пневматической энергосберегающей системы» (собственные разработки)



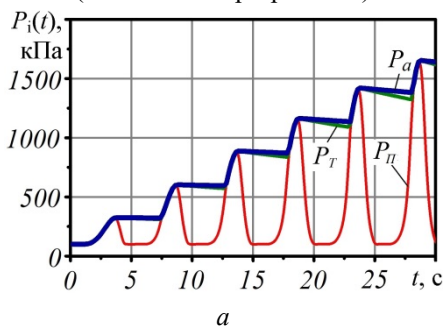
a



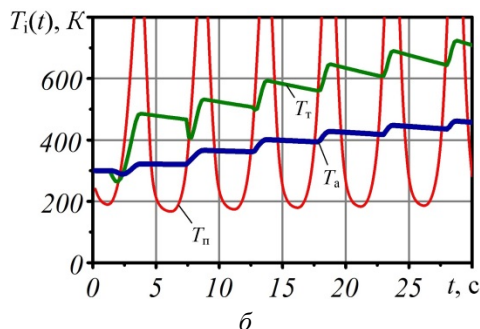
b

P – поршневая полость; T – полость газовой линии; A – полость ресивера

Рис. 6. Зависимость от времени объема V_i рассматриваемых пневматических полостей (a) и количества вещества v_i в них (b) (собственные разработки)



a



b

P – поршневая полость; T – полость газовой линии; A – полость ресивера

Рис. 7. Зависимость от времени давления P_i (a) и температуры T_i (b) воздуха в рассматриваемых пневматических полостях (собственные разработки)

Из-за нагрева воздуха до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ может происходить интенсивный теплообмен с окружающей средой, несмотря на хорошую теплоизоляцию, что ведет к потерям запасаемой энергии и снижению КПД энергосберегающей системы. Кроме того, при создании разрежения в пневмоцилиндре воздух охлаждается до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, что может приводить к сублимации воды из влажного воздуха. В целом, амплитуда колебаний температуры превышает $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, что предъявляет высокие требования к конструкции и материалам пневмоцилиндра. Температура воздуха также является довольно высокой, около $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, что требует теплоизоляции трубопровода для снижения температурных градиентов и изготовления трубопровода и уплотнений из материалов, устойчивых к нагреву. Температура воздуха в ресивере не превышает $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, что позволяет использовать большинство промышленных ресиверов.

Оценка показала, что заполнение типичного ресивера объемом 20 л до характерного давления $1,5\text{ МПа}$ составляет около 28 с . Подсчет тепловых потерь в пневмоцилиндре, трубопроводе и ресивере за это время позволил получить тепловой КПД $\eta = 87,5\%$. Несмотря на то что из-за пневматического принципа работы системы энергосбережения потери на теплообмен с окружающей средой составляют $12,5\%$, сохранение $87,5\%$ энергии является довольно высоким показателем для системы энергосбережения. Кроме того, тепловой КПД может быть повышен за счет большей частоты движения поршня или при использовании большего диаметра пневмоцилиндра.

Для изучения влияния диаметра пневмоцилиндра на эффективность работы пневматической системы энергосбережения проведена серия из восьми компьютерных экспериментов по заполнению ресивера объемом $0,02\text{ м}^3$ до давления $1,5\text{ МПа}$ с различными внутренними диаметрами пневмоцилиндра: от $0,15$ до $0,50\text{ м}$ с шагом $0,05\text{ м}$.

Установлено, что с увеличением диаметра D_p время заполнения ресивера t_3 снижается по закону, близкому к обратно-пропорциональному (рис. 8, a). Количество ходов поршня, которое необходимо совершить для заполнения ресивера, практически пропорционально времени заполнения (рис. 8, б). Тепловой КПД системы энергосбережения растет с увеличением диаметра пневмоцилиндра (рис. 8, в) и

начиная с диаметра 0,35 м выходит на приблизительно постоянное значение. При малом диаметре пневмоцилиндра 0,15 м необходимо 145 с и 30 ходов поршня для заполнения ресивера. При этом тепловой КПД оказывается очень низким, около 49 %, из-за того, что нагретый накачиваемый газ на протяжении длительного времени отдает тепловую энергию в окружающую среду.

При большом диаметре пневмоцилиндра 0,50 м заполнение ресивера происходит всего за 13 с, для чего требуется менее трех ходов поршня. Тепловой КПД при этом очень высок, около 93 %, так как газовые полости практически не успевают за такое короткое время отдать внутреннюю энергию газа во внешнюю среду. Однако из-за большого диаметра пневмоцилиндра создается существенное сопротивление движению элементов основной механической системы, что снизит механический КПД и может затруднять ее работу.

Оптимальным является диаметр пневмоцилиндра 0,25-0,30 м, при котором время заполнения типичного ресивера составляет 28 ... 43 с, необходимо 6 ... 9 ходов поршня, тепловой КПД составляет 80 ... 88 %, и пневмоцилиндр достаточно малого диаметра не оказывает чрезмерно высокого сопротивления основной механической системе, для которой энергию при торможении и демпфировании необходимо рекуперировать. Однако в этом случае тепловой КПД резко снижается до 49 %.

Выводы

1. Разработана математическая модель, позволяющая рассчитать показатели эффективности пневматической энергосберегающей системы рекуперативного гидропривода лесовозного тягача с полуприцепом на основе ее конструктивных и технологических параметров.

2. Разработана компьютерная программа, позволяющая проводить компьютерные эксперименты с моделью пневматической энергосберегающей системы и определять на их основе оптимальные параметры системы.

3. Время заполнения ресивера объемом 20 л до давления 1,5 МПа составляет около 28 с, тепловой КПД составляет 87,5 %.

4. Оптимальным является диаметр пневмоцилиндра в пределах 0,25 ... 0,30 м, при котором время заполнения типичного ресивера составляет 28 ... 43 с при 6...9 ходах поршня, тепловой КПД составляет 80 ... 88 %. При использовании пневмоцилиндра меньшего диаметра он не оказывает высокого сопротивления основной механической системе, но в этом случае тепловой КПД снижается до 49 %.

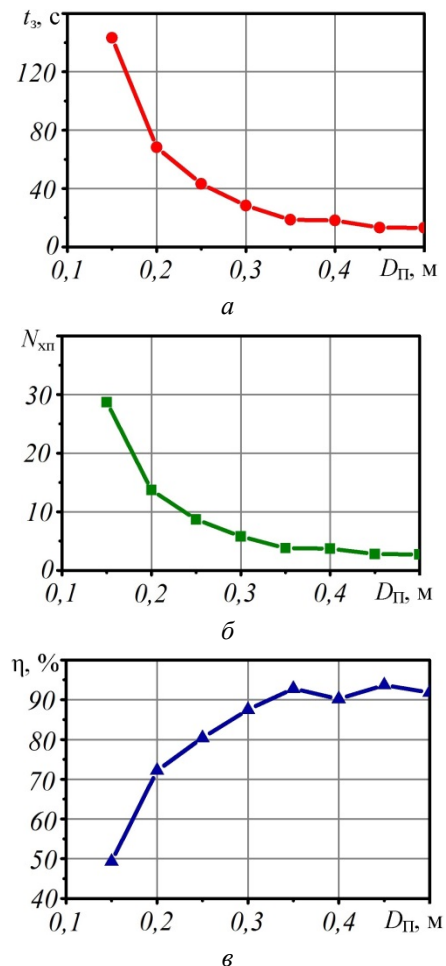


Рис. 8. Влияние диаметра пневмоцилиндра $D_{П}$ на время $t_з$ заполнения ресивера до давления 1,5 МПа (а), количество ходов поршня $N_{хп}$ (б) и тепловой КПД η (в) (собственные разработки)

Библиографический список

1. A review of compressed-air energy storage / Qihyi Yu, Qiancheng Wang, Xin Tan, Guihua Fang, Jianguo Meng // Journal of Renewable and Sustainable Energy. – 2019. – № 11, 042702. – Bibliogr.: 116 titles. – DOI: 10.1063/1.5095969.

2. Review and prospect of compressed air energy storage system / Laijun Chen, Tianwen Zheng, Shengwei Mai [et al.] // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2016. – Volume 4, Issue 4. – P. 529–541. – DOI: 10.1007/340565-016-0240-5.
3. Rivelino Silva Bravo R. Design and analysis of a parallel hydraulic-pneumatic regenerative braking system for heavy-duty hybrid vehicle / R. Rivelino Silva Bravo, V. Juliano De Negri, A. Antonio Martins Oliveira // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 225. – P. 60–77. – DOI 10.1016/j.apenergy.2018.04.102.
4. Lemofouet, S. A hybrid energy storage system based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency paint tracking (MEPT) / S. Lemofouet, A. Rufer // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006. – Volume 53, Issue 4. – P. 1105–1115. – DOI 10.1109/TIE.2006.878323.
5. Posmetev, V. I. Investigation of the energy-saving hydraulic drive of a multifunctional automobile with a subsystem of accumulation of compressed air energy / V. I. Posmetev, V. O. Nikonov, V. V. Posmetev // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOPCIET'2018. – 2018. – № 441. – P. 1–7. – DOI: 10.1088/1757-899X/441/1/012041.
6. Патент № 2695165 Российской Федерации, МПК F15B 1/024, F15B 21/14, F15B 11/0725. Устройство для аккумуляции сжатого воздуха : № 2018102618 : заявл. 23.01.2018 ; опубл. 22.07.2019 / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г.Ф. Морозова. – 9 с.
7. Патент № 2695169 Российской Федерации, МПК F04B 35/008. Устройство для преобразования энергии давления жидкости в энергию сжатого газа : № 2018117611 : заявл. 15.05.2018 ; опубл. 22.07.2019 / В. И. Посметьев, В. О. Никонов, М. В. Драпалюк, В. В. Посметьев ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО ВГЛТУ имени Г. Ф. Морозова. – 6 с.
8. Советов, Б. Я. Моделирование систем : учеб. – 3-е изд., перераб. и доп. / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М. : Высш. шк., 2001. – 343 с. – Библиогр.: с. 340–341. – ISBN 5-06-003860-2.
9. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях : учеб. пособие / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Ленинград : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 288 с. – Библиогр.: с. 284–286. – ISBN 5-283-04480-7.
10. Горский, В. Г. Планирование промышленных экспериментов (модели динамики) : учеб. пособие / В. Г. Горский, Ю. П. Адлер, А. М. Талалай. – Москва : Металлургия, 1978. – 112 с. – Библиогр.: с. 105–110.
11. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений: учеб. пособие / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 279 с.
12. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов: учеб. пособие / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – Ленинград : Колос, 1980. – 168 с.

References

1. Qihyi Yu, Qiancheng Wang, Xin Tan, Guihua Fang, Jianguo Meng (2019). A review of compressed-air energy storage. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, № 11, 042702; doi: 10.1063/1.5095969.
2. Laijun Chen, Tianwen Zheng, Shengwei Mai (et al.) (2016) Review and prospect of compressed air energy storage system. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, Vol. 4, Issue 4, pp. 529-541; doi: 10.1007/340565-016-0240-5.
3. Rivelino Silva Bravo R., Juliano De Negri V., Antonio Martins Oliveira A. (2018) Design and analysis of a parallel hydraulic-pneumatic regenerative braking system for heavy-duty hybrid vehicles. *Applied Energy* 225, Article ID 57201819693, pp. 60-77; doi : 10.1016/j.apenergy.2018.04.102.
4. Lemofouet S., Rufer A. (2006) A hybrid energy storage system based on compressed air and supercapacitors with maximum efficiency paint tracking (MEPT), *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 53, Issue 4, pp. 1105-1115; doi : 10.1109/TIE.2006.878323.
5. Posmetev V.I., Nikonov V.O., Posmetev V.V. (2018) Investigation of the energy-saving hydraulic drive of a multifunctional automobile with a subsystem of accumulation of compressed air energy. *IOP Conference Series*:

Materials Science and Engineering, ISPCJET'2018, № 441 012041, Article ID 57204207263, 7 p.; doi: 10.1088/1757-899X/441/1/012041.

6. Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Posmetyev V.V. *Ustroistvo dlya akkumulirovaniya sjatogo vozduha* [Device for accumulating compressed air]. Patent RF, no. 2695165, 2019.

7. Posmetyev V.I., Nikonov V.O., Drapalyuk M.V., Posmetyev V.V. *Ustroistvo dlya preobrazovaniya energii davleniya zhidkosti v energiyu sjatogo gaza* [Device for converting liquid pressure energy into compressed gas energy]. Patent RF, no. 2695169, 2019.

8. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. *Modelirovanie system* [Modeling systems]. Moscow: High School, 2001. 343 p. (In Russian).

9. Granovskii V.A., Siraya T.N. *Metodi obrabotki eksperimentalnih danih pri izmereniyah* [Methods for processing experimental data in measurements]. L.: Energoatomizdat. Leningr. Otd-nie, 1990. 288 p. (In Russian).

10. Gorskii V.G., Adler Yu.P., Talalai A.M. *Planirovanie promishlennih eksperimentov (modeli dinamiki)* [Planning of industrial experiments (dynamics models)]. M.: Metallurgy, 1978. 112 p. (In Russian).

11. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnikh resheniy* [Planning an experiment when searching for optimal solutions]. M.: Science, 1976. 279 p. (In Russian).

12. Melnikov S.V., Aleshkin V.R., Roshchin P.M. *Planirovanie eksperimenta v issledovaniyah selskohozyaistvennih processov* [Planning an experiment in research on agricultural processes]. L.: Kolos, 1980. 168 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Посметьев Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: posmetyev@mail.ru.

Никонов Вадим Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Посметьев Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: victorvpo@mail.ru.

Зеликов Владимир Анатольевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой организации перевозок и безопасности движения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

Information about authors

Posmetyev Valery Ivanovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Cars, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: posmetyev@mail.ru.

Nikonov Vadim Olegovich – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Cars, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: 8888nike8888@mail.ru.

Posmetyev Viktor Valeryevich – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Associate Professor, Voronezh, Russian Federation; e-mail: victorvpo@mail.ru.

Zelikov Vladimir Anatolyevich – DSc (Engineering), Associate Professor, head of the Department of Organization of Transportation and Traffic Safety, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: zelikov-vrn@mail.ru.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОРЧЕВАТЕЛЯ, ОБОРУДОВАННОГО ШИРОКОПРОФИЛЬНЫМИ ШИНАМИ

доктор технических наук **В.И. Прядкин**

доктор технических наук **И.М. Бартенев**

кандидат физико-математических наук **В.В. Посметьев**

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,
г. Воронеж, Российская Федерация

В статье проведен анализ технических средств для корчевания деревьев. В России наибольшее распространение получили навесные рычажного типа, агрегируемые с различными по тяговому классу колесными и гусеничными тракторами. За рубежом используются узкоспециализированные высокопроизводительные самоходные корчеватели с большой мощностью двигателя, востребованные в различных отраслях – лесном, сельскохозяйственном и нефте-газовом комплексах, дорожном строительстве, при прокладывании высоковольтных линий электропередач и их содержании, а также в других областях народного хозяйства. Проведенный анализ технических средств для корчевания деревьев показал, что в последнее время доминирующей тенденцией является создание роботов-корчевателей, обеспечивающих безопасность выполнения технологического процесса, высокую производительность и уменьшение количества персонала на вырубке. Для реализации инновационных технологий в лесном комплексе разработан самоходный роботизированный корчеватель, оборудованный широкопрофильными шинами низкого давления. Обеспечение выполнения технологического процесса роботом-корчевателем в беспилотном режиме достигается применением системы технического зрения, навигационным оборудованием, автоматизированным управлением технологическим оборудованием, трансмиссией и рулевым управлением. Целью исследования предусматривалась оценка продольной устойчивости роботизированного самоходного корчевателя при вертикальном транспортировании дерева и экологической совместимости его колесного движителя с почвенно-растительным покровом. Проведенными теоретическими исследованиями установлено, что предложенная компоновочная схемы самоходного корчевателя обеспечивает продольную устойчивость при движении с деревом в вертикальном положении без применения балластных противовесов за задним мостом. Также установлено, что колесный движитель корчевателя, оборудованный широкопрофильными шинами низкого давления является экологически чистым при выполнении технологических операций в летне-осенний период.

Ключевые слова: самоходный корчеватель, инновационные технологии, роботизация, динамическая модель, контактное давление, способы корчевания

EVALUATION OF SUSTAINABILITY AND ECOLOGICAL PROPERTIES OF A ROBOTIZED STUMP REMOVER EQUIPPED WITH WIDE-SECTION TYRES

DSc (Engineering) **V.I. Pryadkin**

DSc (Engineering) **I.M. Bartenev**

PhD (Physics and Mathematics) **V.V. Posmetyev**

FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

The article analyzes the technical means for uprooting trees. Tools aggregated with wheel and caterpillar tractors of various traction classes are the most popular ones in Russia. Abroad, self-propelled stump removers with high engine

power and high performance are used, which are in demand in various industries (forestry, agricultural and oil and gas complexes, road construction), when laying high-voltage power lines and their maintenance, as well as in other areas of the national economy. The analysis of technical means for uprooting trees has shown that the dominant trend is creation of stump removers that ensure safety of the process, its high productivity and decrease in the number of personnel on felling. Self-propelled robotic stump remover equipped with wide-profile low-pressure tires has been developed to implement innovative technologies in the forest complex. Ensuring the technological process is carried out by robot-eradicator in unmanned mode. It is achieved by using a technical vision system, navigation equipment, automated control of technological equipment, transmission and steering. The aim of the study was to evaluate the longitudinal stability of a robotic self-propelled stump remover during vertical transportation of a tree and environmental compatibility of its wheeled mover with soil and vegetation cover. Conducted theoretical studies have found that the proposed layout scheme of a self-propelled stump remover provides longitudinal stability when moving with a tree in an upright position without the use of ballast counterweights behind the rear axle. It was also found that the wheel mover of the stump remover equipped with wide-profile low-pressure tires is environmentally friendly when performing technological operations in the summer-autumn period.

Keywords: self-propelled stump remover, innovative technologies, robotics, dynamic model, contact pressure, uprooting methods

Введение

Проведение подготовительных работ при лесовосстановлении на больших территориях после лесных пожаров; осветление придорожных лесополос для повышения пожарной безопасности; расчистка трасс под высоковольтными линиями электропередач, нефте- и газопроводами предусматривает применение высокопроизводительного технологического оборудования по удалению различной растительности. При выполнении этих работ широко используются машинные технологии на базе различных корчевателей [1, 2, 3].

Корчевание деревьев производится различным технологическим оборудованием, которое условно разделяют на два типа [4, 5, 6, 7]. К первому типу относятся навесные корчеватели, устанавливаемые как на передней, так и на задней навеске трактора. Этот тип корчевателей получил наибольшее распространение во всем мире, их применение обосновывается простотой конструкции, малой стоимостью и экономической целесообразностью агрегатирования с серийно выпускаемыми колесными и гусеничными тракторами различной мощности. Мировой промышленностью выпускается разнообразное навесное и прицепное технологическое оборудование для корчевания деревьев. В нашей стране разработаны принципиально новые, инновационные марки прицепных корчевателей КП-2, КПРН-1,0, применяются и ранее разработанные

навесные корчевальные машины КМ-1, МРП-2, ОРВ-1,5, К-2А, ДП-25 и другие.

Ко второму типу относятся самоходные машины, оборудованные различными техническими средствами для корчевания деревьев. За рубежом эти машины получили широкое применение при промышленной раскорчевке насаждений, восстановлении заброшенных территорий, для ухода за лесными участками при валке деревьев; расчистке территорий под линиями электропередачи; в полосах отвода газо- и нефтепроводов, автомобильных и железных дорог; создания противопожарных полос в лесу; уборке поврежденных деревьев после пожаров, ураганов, наводнений; ландшафтных и сельскохозяйственных работ (табл.) [3, 4]. Однако в России этот тип самоходной узкоспециализированной техники широкого распространения не получил, хотя его применение для некоторых видов работ является экономически весьма эффективным (рис. 1).



Фото авторов – автодорога Е-38

Рис. 1. Расчищенная от поросли самоходным мульчером придорожная полоса автомагистрали

В настоящее время на мировом рынке представлены различные виды самоходных корчевателей, измельчителей пней и ямокопателей, изготовленных в автономном варианте, с приводом от собственного электрического, бензинового или дизельного двигателя. Мобильные корчеватели и мульчеры оборудуются как гусеничным, так и колесным движителем. Гусеничным движителем, как правило, оборудуют самоходные лесные машины, обеспечивающие низкие технологические скорости до 10 км/ч, а колесным – когда необходимо обеспечить высокую маневренность, асфальтопригодность и скоростной режим до 40 км/ч. Зарубежными фирмами представлены различные самоходные машины, и в первую очередь это продукция компаний Bandit, Baumalight, Loftness, Vermeer, Gyro-Trac, FMI (США); FERRI, FAE, Orsi, Seppi (Италия); ANWI (Германия); Накмет, Nokamic (Канада) (см. табл.).

К первой группе можно отнести самоходные мульчеры и измельчители пней. Высокопроизводительные мульчеры рассчитаны на работу с двигателями мощностью до 600 л. с., они имеют большой расход топлива и низкие технологические скорости до 10 км/ч. Такие машины весьма распространены, привод ротора в них, как правило, осуществляется от одного или двух гидравлических моторов, подключенных к насосной станции. Самые мощные самоходные мульчеры позволяют в один заход срезать и измельчать деревья диаметром до 40 см, кусты и ветки.

Мировыми тенденциями развития мобильных технических средств для промышленной раскорчевки деревьев являются обеспечение высокой

производительности, повышение безопасности работы технологического оборудования, а также экономических и экологических показателей процесса корчевания.

Промышленная раскорчевка деревьев тяжелыми и высокоэнергонасыщенными самоходными средствами обеспечивает повышение производительности, снижение капиталовложений и затрат на выполнение работ. При этом повышается безопасность работы технологического оборудования за счет исключения вращающихся с большой скоростью элементов конструкции; комфортабельность и упрощение в использовании. Однако применение машин с большой мощностью двигателя, относящихся к тяжелому классу, приводит к переуплотнению почвы, ухудшению её структуры и водного баланса [8, 9, 10, 11]. Поэтому для снижения давления на почву их движители оборудуют либо резиноармированными гусеницами, либо широкопрофильными шинами [9].

Ко второй группе можно отнести самоходные машины для выкопки деревьев, которые являются узкоспециализированной техникой. Так, FZ 110 PLUS самоходная машина была спроектирована для выкопки деревьев из почвы с образованием сферического кома, содержащего корневую систему дерева. Выкопка дерева производится специальным вибрационно-режущим блоком, оборудованным ножом сферического поперечного сечения [11], далее дерево вынимается вертикально вверх другой машиной с челюстным захватом вместе с корневой системой и почвой. Эта машина может выкапывать сферические кома диаметром от 30 до 120 см.

Таблица

Зарубежные самоходные машины для корчевания деревьев

№ п/п	Тип машины	Производитель, страна	Тип движителя	Масса, кг	Мощность двигателя, кВт
1	2	3	4	5	6
1	Мульчер	Bandit США	на гусеничном ходу	16100	245,3
2	Мульчер	TRE EMME MM350B Италия	на колесном ходу	10020	260
3	Мульчер	RT-400 Германия	на гусеничном ходу	20270	295,7
4	Фреза	Vermeer США	на гусеничном ходу	1800	30
5	Фреза	Vermeer США	на колесном ходу	1750	25

1	2	3	4	5	6
6	Выкапыватель	FZ 110 PLUS Италия	на гусеничном ходу	2000	66,2
7	Мульчер	BRON-440 Канада	на гусеничном ходу	16783	251,3
8	Мульчер	AWHI PRINOTH RAPTOR 300R Германия	на гусеничном ходу	26000	470
9	Мульчер	Гуго-Трас США	на гусеничном ходу	10659	350
10	Мульчер	FMI FTX США	на гусеничном ходу	12700	350
11	Мульчер	FERRI TSKF/F 2200 Италия	на гусеничном ходу	16440	176

Источник – сайты производителей самоходных машин для корчевания деревьев

Ямокопатель (пересадочник) деревьев Optimal Opitz 1400 позволяет за одну операцию произвести выкапывание дерева вместе с корневой системой и почвой, а затем произвести выемку дерева вертикально вверх. Пересадочник деревьев Optimal Opitz 1400 полностью адаптирован для агрегатирования с тракторами и погрузчиками отечественного производства. Однако, несмотря на высокую эффективность, это технологическое оборудование имеет низкую годовую загрузку.

Третья группа самоходных машин предназначена для прямого корчевания деревьев за одну технологическую операцию вертикально приложенной силой, дальнейшего транспортирования деревьев и складирования их. Данная технология прямой раскорчевки деревьев обеспечивает повышение производительности, снижение капиталовложений и затрат на выполнение работ. Эти корчеватели позволяют выполнять подготовительные работы при лесовосстановлении, в промышленном садоводстве и осветлении придорожных лесополос, их используют для удаления пней и поросли, валки деревьев. При этом повышается безопасность работ за счет исключения вращающихся с большой скоростью элементов конструкции, комфортабельность и упрощение в использовании.

В последнее время доминирующей тенденцией является создание роботов-корчевателей и машин с дистанционным управлением для корчевания пней, обеспечивающих безопасность выполнения технологического процесса, высокую производительность, уменьшение количества персонала на лесосеке.

Самоходные роботизированные корчеватели и машины с дистанционным управлением предназначены для выполнения технологических процессов в цифровых технологиях лесного комплекса. Внедрение цифровых технологий при корчевании предусматривает наличие электронной карты участка леса либо придорожной лесополосы, на которой зафиксировано каждое дерево, указаны не только его координаты, но и параметры – высота, диаметр ствола, вид и другие. Составление цифровой модели леса производится с использованием мобильного или воздушного сканирования для составления трехмерной модели объектов. Картографирование придорожных лесополос и участков леса обеспечивает прецизионную работу самоходных роботизированных средств лесного комплекса. Применение цифровых технологий в лесном комплексе и дальнейшее развитие телекоммуникационных возможностей обеспечивает существенное повышение эффективности технологических процессов корчевания деревьев самоходными роботами. Однако лесной комплекс России сейчас отстает от других отраслей – промышленности и сельского хозяйства – по темпам цифровизации отрасли.

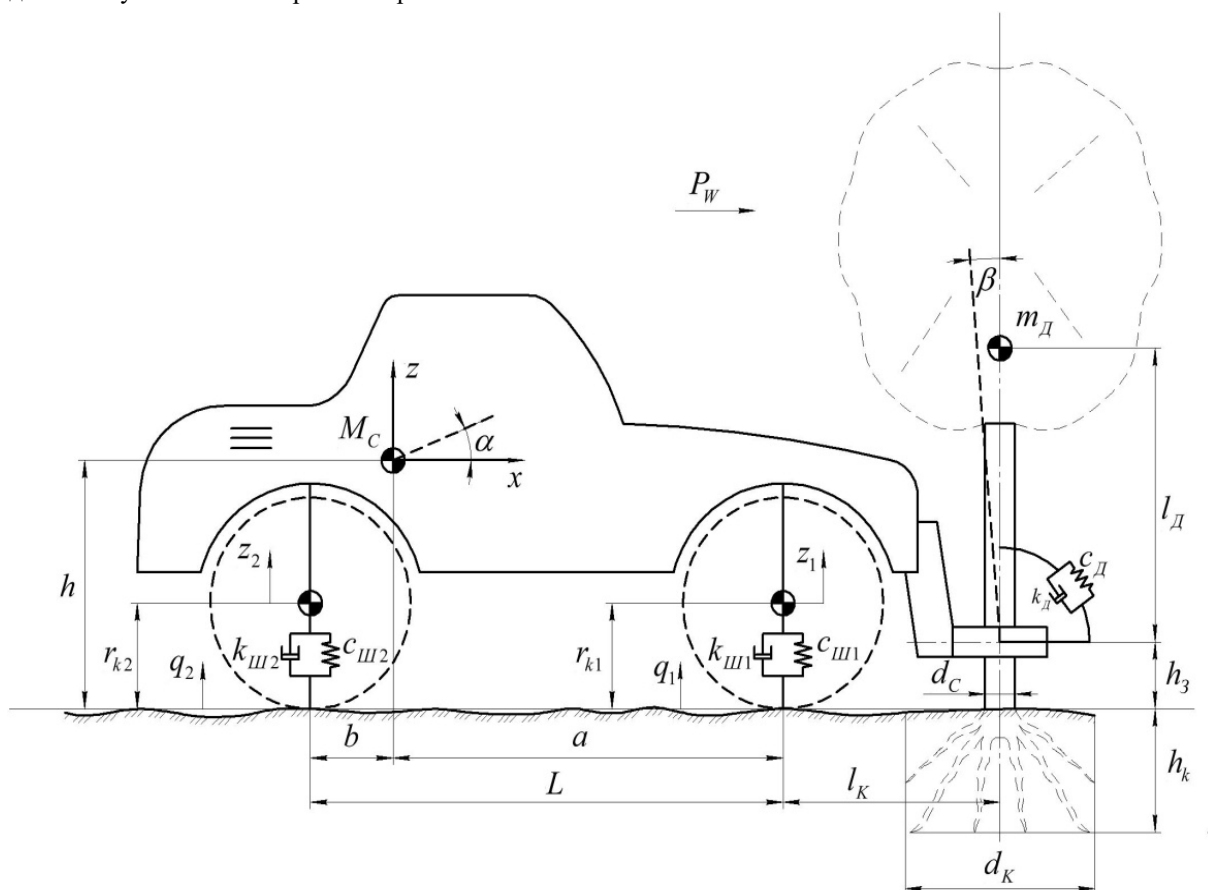
Для реализации цифровых технологий в лесном комплексе разработан самоходный роботизированный корчеватель, оборудованный широкопрофильными шинами низкого давления. Обеспечение выполнения технологического процесса роботом-корчевателем в беспилотном режиме достигается применением системы технического зрения, навигационным оборудованием, автоматизирован-

ным управлением технологическим оборудованием, трансмиссией и рулевым управлением. Однако исследования по комплексной оценке продольной устойчивости самоходного роботизированного корчевателя, непосредственно влияющей на безопасность выполнения технологического процесса и производительность, а также экологической совместимости его колесного движителя с почвой требуют дополнительных исследований.

Целью исследования являлась оценка продольной устойчивости роботизированного са-

моходного корчевателя при вертикальном транспортировании дерева и экологической совместимости его колесного движителя с почвенно-растительным покровом.

Для проведения теоретических исследований разработана расчетная динамическая модель самоходного роботизированного корчевателя [1, 8] (рис. 2).



Разработка авторов

Рис. 2. Динамическая модель самоходного роботизированного корчевателя

Материалы и методы

Система уравнений, описывающая вертикальные и продольно-угловые колебания самоходного корчевателя, имеет вид

$$\begin{cases} M_C \frac{d^2 z_K}{dt^2} = F_1 + F_2 - M_C g - F_D; \\ J_K \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = +F_1 a - F_2 b - F_D (a + l_K) + M_D; \\ m_D \frac{d^2 z_D}{dt^2} = -F_D - m_D g; \\ J_D \frac{d^2 \beta}{dt^2} = -M_D; \end{cases} \quad (1)$$

$$F_1 = -c_{ш1}(z_1 - z_{10}) - k_{ш1} \frac{dz_1}{dt}; \quad (2)$$

$$F_2 = -c_{ш2}(z_2 - z_{20}) - k_{ш2} \frac{dz_2}{dt}; \quad (3)$$

$$M_D = -c_D(\beta - \alpha) - k_D \frac{d(\beta - \alpha)}{dt}, \quad (4)$$

где M_C и m_D – массы корчевателя и дерева; z_K и z_K – вертикальная декартова координата центров тяжести корчевателя и дерева; t – время; F_1 и F_2 – силы реакции, действующие на корпус корчевателя со стороны переднего и заднего мостов; g – ускорение свободного падения; J_K и J_D – моменты инерции корчевателя и дерева относительно их центров тяжести; F_D – сила, действующая со стороны дерева на челюстной захват корчевателя; α – угол отклонения корчевателя от горизонтального положения; β – угол отклонения дерева от вертикального положения; a и b – расстояния в горизонтальном направлении от центра тяжести до переднего и заднего мостов; l_K – расстояние в горизонтальном направлении от переднего моста до точки контакта корчевателя и дерева в челюстном захвате; M_D – момент вращения, оказываемый деревом на корчеватель; $c_{ш1}$, $c_{ш2}$ и $k_{ш1}$, $k_{ш2}$ – коэффициенты жесткости и демпфирования упруго-вязкого взаимодействия корпуса корчевателя с опорной поверхностью в переднем и заднем мосте соответственно; z_1 и z_2 – вертикальная декартова координата осей передних и задних колес; z_{10} и z_{20} – вертикальные декартовы координаты осей передних и задних колес в отсутствии нагрузки; c_D и k_D – коэффициенты жесткости и демпфирования угло-

вого упруго-вязкого взаимодействия корчевателя и дерева.

Решение системы дифференциальных уравнений производилось на ЭВМ методом Рунге-Кутты. В качестве возмущающего воздействия на колебательную систему приняты возмущающее воздействие от вертикально закрепленного челюстным захватом транспортируемого дерева и неровностей опорной поверхности с учетом сглаживающей способности широкопрофильных шин низкого давления. Для удобства моделирования разработана компьютерная программа «Программа для моделирования работы корчевателя» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665869). Моделирование процесса взаимодействия широкопрофильной шины низкого давления с почвой производилось на основе метода конечных элементов [12–21].

Исходные данные для решения системы дифференциальных уравнений определялись расчетным путем, были взяты из чертежа общего вида самоходного корчевателя и определены экспериментально.

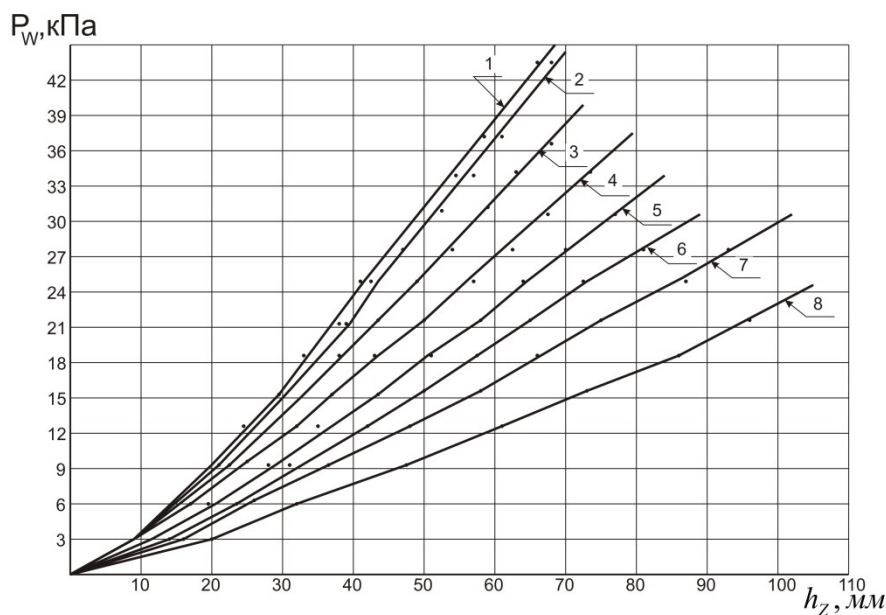
Результаты и обсуждение

Для снижения контактного давления на почву самоходный корчеватель оборудован широкопрофильными шинами низкого давления, жесткость которых определена экспериментально на специальном стенде. Зависимость нормальной деформации от нагрузки при различных давлениях воздуха в шине приведена на рис. 3.

Универсальная характеристика и рекомендуемая область работы в графическом виде представлена на рис. 4. Математической обработкой точек нагрузочного ряда получена универсальная характеристика, связывающая радиальный прогиб шины с нагрузкой и давлением воздуха в виде

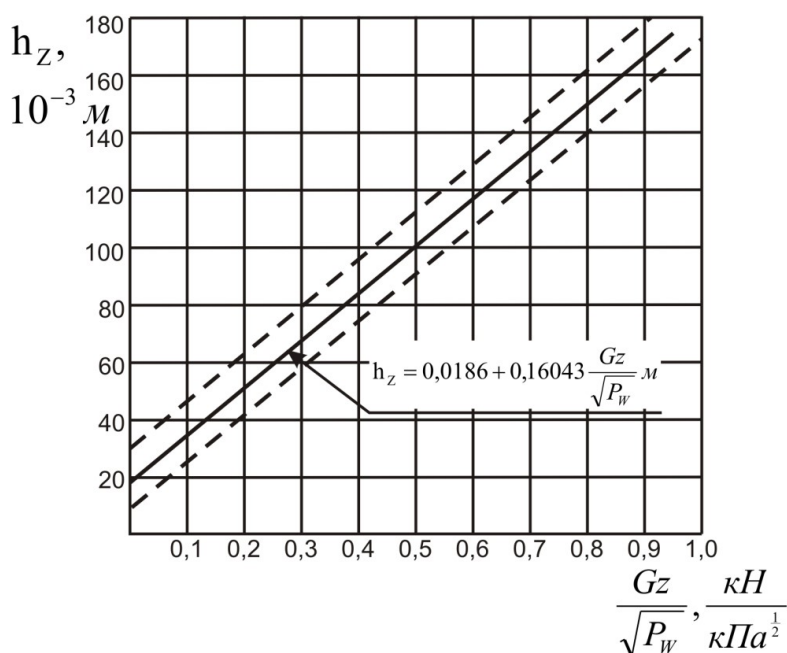
$$h = 5,514 + 25,904 \frac{G_z}{\sqrt{P_w}}, \text{ мм}$$

Компоновка самоходного корчевателя должна обеспечивать продольную устойчивость при движении с деревом, закрепленном в вертикальном положении челюстным захватом, как на подъем, так и под уклон не менее 12°. В статическом положении нагрузка на задний мост корчевателя составляет 60 % от общей его массы, а на передний – 40 %.



Результаты эксперимента авторов

Рис. 3. Нагрузочная характеристика шины 600/50R 22,5: 1 – $P_w = 260$ кПа; 2 – $P_w = 230$ кПа; 3 – $P_w = 200$ кПа; 4 – $P_w = 160$ кПа; 5 – $P_w = 130$ кПа; 6 – $P_w = 100$ кПа; 7 – $P_w = 80$ кПа; 8 – $P_w = 50$ кПа



Результаты вычислений авторов

Рис. 4. Универсальная характеристика шины 600/50R 22,5 мод. DT-46

После выемки из почвы дерева с корневой системой происходит перераспределение нагрузок между мостами корчевателя. Вследствие этого при движении корчевателя с деревом в челюстном захвате под действием реактивного динамического

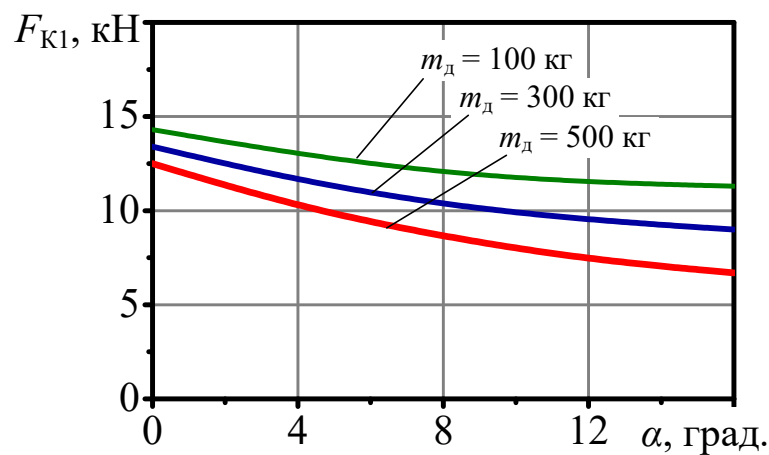
момента от массы дерева нагрузка на передний мост возрастает.

Проведенными теоретическими исследованиями по определению влияния уклона и массы дерева на величину нормальной реакции колес зад-

него моста установлено, что с увеличением массы транспортируемого дерева с 100 кг до 500 кг происходит перераспределение нагрузок между мостами, так при движении под уклон 12° величина нагрузки на задний мост достигает 5,9 кН (рис. 5). Благодаря применению предложенной компоновочной схемы нет необходимости в применении балластных противовесов за задним мостом самоходного корчевателя для обеспечения продольной устойчивости.

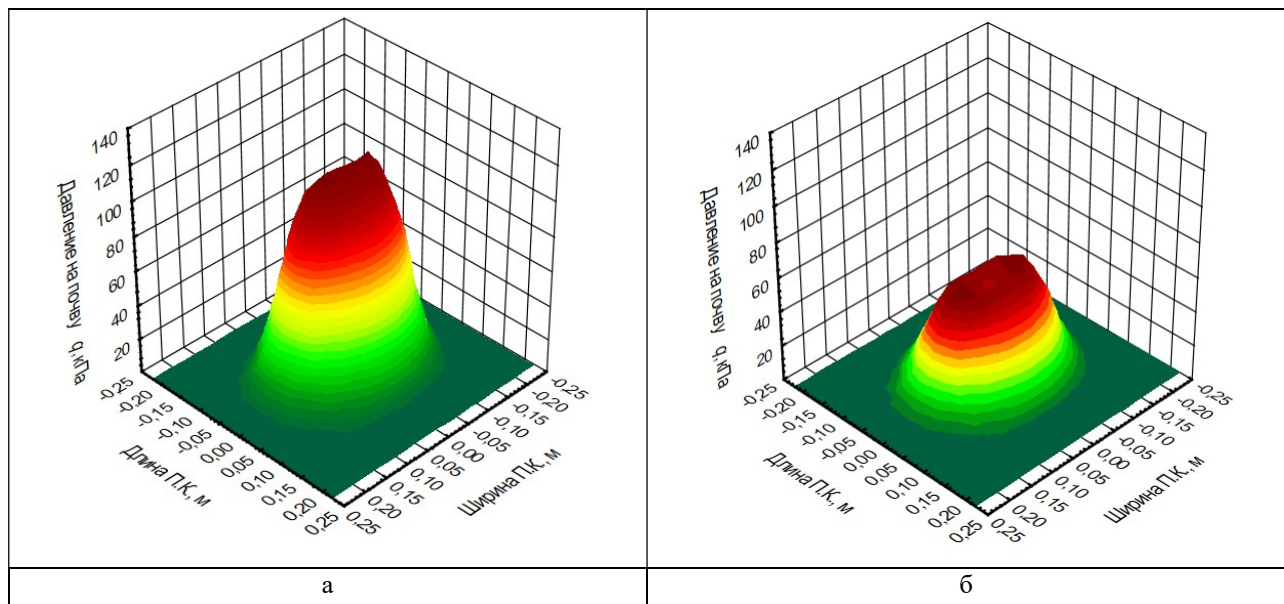
Оценка экологической совместимости колесного движителя с почвой производилась по величине контактного давления (рис. 6).

Анализ эпюр, приведенных на рис. 6, показывает, что до выемки дерева максимальная величина контактного давления шин заднего моста составляет 121 кПа. При движении под уклон 12° с деревом массой 500 кг величина контактного давления шин заднего моста составляет 63,3 кПа. В соответствии с ГОСТ 26955-86 самоходный корчеватель может работать в летне-осенний период с влажностью почвы в слое 0-30 см от 0,7 НВ до 0,9 НВ при давлении 121 кПа.



Результаты вычислений авторов

Рис. 5. Изменение реакции заднего моста в зависимости от массы дерева и продольного угла наклона при движении со скоростью 5 км/ч



Результаты вычислений авторов

Рис. 6. Расчетные эпюры контактных напряжений шины: а – при нагрузке 13,6 кН; б – при нагрузке 5,9 кН

При транспортировании дерева массой 500 кг давление колесного движителя заднего моста снижается и достигает 92,7 кПа. Следовательно, при корчевании садовых деревьев в летне-осенний период колесный движитель самоходного корчевателя, оборудованный широкопрофильными шинами низкого давления, является экологически чистым. Для обеспечения нормативных требований ГОСТ 26955-86 можно рекомендовать установку шин 600/50R22,5 с нормой слойности 8 и с распорным кольцом. Обеспечение режима работы шины с учетом оптимальной деформации может быть достигнуто применением системы регулирования давления воздуха в шинах при движении по почве [22].

После корчевания дерева и его вертикального транспортирования под уклон 12° давление колесного движителя заднего моста достигает 63,3 кПа, при этом не происходит потери управляемости.

Выводы

1. Разработанная математическая модель самоходного корчевателя позволяет оценить продольную устойчивость с учетом его динамической нагруженности и экологическую совместимость колесного движителя с почвой.

2. Предложенная компоновочная схема самоходного корчевателя обеспечивает продольную устойчивость при движении с деревом в вертикальном положении без применения балластных противовесов за задним мостом.

3. Колесный движитель самоходного корчевателя, оборудованный широкопрофильными шинами низкого давления, является экологически чистым, при выполнении технологических операций в летне-осенний период удельное давление на почву не превышает 140 кПа.

Библиографический список

1. Жуков, А. В. Проектирование лесопромышленного оборудования / А. В. Жуков. – Минск : Вышэйш. шк., 1990. – 312 с.
2. Машины и механизмы лесного и лесопаркового хозяйства / А. Ф. Алябьев, В. Н. Винокуров, В. И. Казаков, А. А. Котов, В. Г. Шаталов ; под ред. В. Н. Винокурова. – Москва : ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 468 с.
3. Конструкции и параметры машин для расчистки лесных площадей : монография / И. М. Баргенов, М. В. Драпалюк, П. И. Попиков, Л. Д. Бухтояров. – Москва : Флинта : Наука, 2007. – 208 с.
4. Тенденции развития перспективных технических средств для корчевания деревьев / А. В. Артёмов, А. В. Федянин, С. А. Ермоленко, В. И. Прядкин // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования. – Т. 4. – № 1 (7). – Воронеж, 2017. – С. 343–348.
5. Stump removal to control root disease in Canada and Scandinavia: A synthesis of results from longterm trials / M. R. Cleary, N. Arhipova, D. J. Morrison [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2013. – Vol. 290. – P. 5–14.
6. Athanassiadis, D. Производительность и стоимость уборки сосны и ели с помощью инструмента для подъема пня PallariKH 160 / D. Athanassiadis, O. Lindroos, T. Nordfjell // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2011. – No. 26 (5). – С. 437–445.
7. Criteria and guidance considerations for sustainable tree stump harvesting in British Columbia / S.M. Berch, M. Curran, C. Dymond [et al.] // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2012. – No. 27(8). – P. 709–723.
8. Прядкин, В. И. Проходимость колесных транспортно-технологических агрегатов лесного комплекса / В. И. Прядкин. – Воронеж, 2000. – 232 с.
9. Jansson, K. J. Soil changes after traffic with a tracked and a wheeled forest machine: a case study on a silt loam in Sweden / K. J. Jansson, J. Johansson // Forestry. – 1998. – No. 71 (1). – P. 57–66.

10. Jusoff, K. Effect of tracked and rubber-tyred logging machines on soil physical properties of the Berkelah Forest Reserve, Malaysia / K. Jusoff // *Pertanika*. – 1991. – No. 14(3). – P. 265–276.
11. Impacts of soil compaction and tree stump removal on soil properties and outplanted seedlings in northern Idaho, USA / D. S. Page-Dumroese, A. E. Harvey, M. F. Jurgensen, M. P. Amaranthus // *Canadian Journal of Soil Science*. – 1998. – No. 78(1). – P. 29–34.
12. Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic / O. González Cueto, C. E. Coronel Iglesias, C. A. Recarey Morfa [et al.]. *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2013. – No. 99. – P. 146–152.
13. Experiment validation of distinct element simulation for dynamic wheel-soil interaction / L. R. Khot, V. M. Salokhe, H. P. W. Jayasuriya, H. Nakashima // *Journal of Terramechanics*. – 2007. – No. 44. – P. 9.
14. Discrete element modeling of a Mars Exploration Rover wheel in granular material / M. A. Knuth, J. B. Johnson, M. A. Hopkins, R. J. Sullivan, J. M. Moore // *Journal of Terramechanics*. – 2012. – No. 49. – P. 10.
15. Kuhn, M. R. Contact rolling and deformation in granular media / M. R. Kuhn, K. Bagi // *International journal of solids and structures*. – 2004. – No. 41. – P. 5793–5820.
16. Li, H. Investigation of Tire-Soil Interaction with Analytical and Finite Element Method / H. Li, C. Schindler // *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. – 2013. – No. 41. – P. 293–315.
17. Parametric analysis of lugged wheel performance for a lunar microrover by means of DEM / H. Nakashima, H. Fujii, A. Oida [et al.] // *Journal of Terramechanics*. – 2007. – No. 44. – P. 153–162.
18. Nakashima, H. Algorithm and implementation of soil-tire contact analysis code based on dynamic FE-DE method / H. Nakashima, A. Oida // *Journal of Terramechanics*. – 2004. – No. 41. – P. 127–137.
19. Nakashima, H. Analysis of tire tractive performance on deformable terrain by finite element-discrete element method / H. Nakashima, Y. Takatsu, H. Shinone // *Journal of computational science and technology*. – 2008. – No. 4. – P. 423–434.
20. Nakashima, H. FE-DEM analysis of the effect of tread pattern on the tractive performance of tires operating on sand / H. Nakashima, Y. Takatsu, H. Shinone // *Journal of Mechanical Systems For Transportation and Logistics*. – 2009. – No. 2. – P. 55–65.
21. Shinone, H. Experimental analysis of tread pattern effects on tire tractive performance on sand using an indoor traction measurement system with forced-slip mechanism / H. Shinone, H. Nakashima, Y. Takatsu // *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. – 2010. – No. 3. – P. 61–66.
22. Mohsenimanesh, A. Application of automatic air inflation deflation control system on a manure tanker to prevent excessive soil compaction / A. Mohsenimanesh, C. Laguë // *ASABE Paper Number: 152179891 St. Joseph, Mich.: ASABE, 2015.*

References

1. Zhukov A.V. *Proektirovanie lesopromyshlennogo oborudovaniya* [Design of forestry equipment]. Minsk: Vysh. shkola, 1990. 312 p. (in Russian).
2. Alyabyev A.F., Vinokurov V.N., Kazakov V.I., Kotov A.A., Shatalov V.G. *Mashiny i mekhanizmy lesnogo i lesoparkovogo khozyaystva* [Machines and mechanisms of forestry and forestry management]; ed. by V.N. Vinokurov. M.: MGUL, 2009. 468 p. (in Russian).
3. Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D. *Konstruktsi i parametry mashin dlya raschistki lesnykh ploshchadey: monografiya* [Designs and parameters of machines for clearing forest areas: a monograph]. M.: Flinta: Nauka, 2007. 208 p. (in Russian).
4. Artyomov A.V., Fedyanin A.V., Ermolenko S.A., Pryadkin V.I. *Tendentsii razvitiya perspektivnykh tekhnicheskikh sredstv dlya korchevaniya derev'yev* [Trends in the development of promising technical means for

uprooting trees]. *Alternative energy sources in automobile transport: problems and prospects of rational use*. Vol. 4. No. 1 (7). Voronezh, 2017. P. 343-348 (in Russian).

5. Cleary M.R., Arhipova N., Morrison D.J. (et al.) (2013). Stump removal to control root disease in Canada and Scandinavia: A synthesis of results from longterm trials. *Forest Ecology and Management*, 290, pp. 5-14.

6. Athanassiadis D., Lindroos O., Nordfjell, T. (2011a). Productivity and cost of harvesting pine and spruce using the Pallari KH 160 stump raising tool. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26 (5), p. 437-445.

7. Berch S.M., Curran M., Dymond C. (et al.) (2012) Criteria and guidance considerations for sustainable tree stump harvesting in British Columbia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27 (8), pp. 709-723.

8. Pryadkin V.I. *Prokhodimost' kolesnykh transportno-tekhnologicheskikh agregatov lesnogo kompleksa* [Passability of wheeled transport and technological units of the forest complex]. Voronezh, 2000. 232 p. (in Russian).

9. Jansson K.J., Johansson J. (1998). Soil changes after traffic with a tracked and a wheeled forest machine: a case study on a silt loam in Sweden. *Forestry*, 71 (1), pp. 57-66.

10. Jusoff K. (1991). Effect of tracked and rubber-tyred logging machines on soil physical properties of the Berkelah Forest Reserve, Malaysia. *Pertanika*, 14 (3), pp. 265-276.

11. Page-Dumroese D.S., Harvey A.E., Jurgensen M.F., Amaranthus M.P. (1998). Impacts of soil compaction and tree stump removal on soil properties and outplanted seedlings in northern Idaho, USA. *Canadian Journal of Soil Science*, 78 (1), pp. 29-34.

12. González Cueto, O., Iglesias Coronel C.E., Recarey Morfa C.A. (et al.) (2013) Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic. *Computers and Electronics in Agriculture* 99, pp. 146-152.

13. Khot L.R., Salokhe V.M., Jayasuriya H.P.W., Nakashima H. (2007) Experiment validation of distinct element simulation for dynamic wheel-soil interaction. *Journal of Terramechanics* 44, 9.

14. Knuth M.A., Johnson J.B., Hopkins M.A., Sullivan R.J., Moore J.M. (2012) Discrete element modeling of a Mars Exploration Rover wheel in granular material. *Journal of Terramechanics* 49, 10.

15. Kuhn M.R., Bagi K. (2004) Contact rolling and deformation in granular media. *International journal of solids and structures* 41, 5793-5820.

16. Li H., Schindler C. (2013) Investigation of Tire-Soil Interaction with Analytical and Finite Element Method. *Mechanics Based Design of Structures and Machines* 41, 293-315.

17. Nakashima H., Fujii H., Oida A. (et al.) (2007) Parametric analysis of lugged wheel performance for a lunar microrover by means of DEM. *Journal of Terramechanics* 44, 153-162.

18. Nakashima H., Oida A. (2004) Algorithm and implementation of soil-tire contact analysis code based on dynamic FE-DE method. *Journal of Terramechanics* 41, 127-137.

19. Nakashima H., Takatsu Y., Shinone H. (2008) Analysis of tire tractive performance on deformable terrain by finite element-discrete element method. *Journal of computational science and technology* 4, 423-434.

20. Nakashima H., Takatsu Y., Shinone H. (2009) FE-DEM analysis of the effect of tread pattern on the tractive performance of tires operating on sand. *Journal of Mechanical Systems For Transportation and Logistics* 2, 55-65.

21. Shinone H., Nakashima H., Takatsu Y. (2010) Experimental analysis of tread pattern effects on tire tractive performance on sand using an indoor traction measurement system with forced-slip mechanism. *Engineering in Agriculture, Environment and Food* 3, 61-66.

22. Mohsenimanesh A., Laguë C. (2015) Application of automatic air inflation deflation control system on a manure tanker to prevent excessive soil compaction, ASABE Paper Number: 152179891 St. Joseph, Mich.: ASABE.

Сведения об авторах

Прядкин Владимир Ильич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобилей и сервиса ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: vip16.vgltu@mail.ru.

Бартенев Иван Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru.

Посметьев Виктор Валерьевич – кандидат физико-математических наук, директор ИП Посметьев, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: viktorvpo@mail.ru.

Information about authors

Pryadkin Vladimir Ilyich – DSc (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Cars and Service, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: vip16.vgltu@mail.ru.

Bartenev Ivan Mikhailovich – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: kafedramehaniza@mail.ru.

Posmetyev Victor Valeryevich – PhD (Physics and Mathematics), Director, IE Posmetyev, Voronezh, Russian Federation; e-mail: viktorvpo@mail.ru.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В РОБОТИЗИРОВАННЫХ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ЛЕСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

А.А. Толстых¹

кандидат технических наук **Д.С. Ступников²**

кандидат технических наук **С.В. Малюков²**

кандидат технических наук **А.С. Лукьянов¹**

кандидат технических наук **Ю.С. Лунёв¹**

1 – ФГКОУ ВО «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации»,

г. Воронеж, Российская Федерация

2 – ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»,

г. Воронеж, Российская Федерация

В настоящее время на большинстве крупных предприятий активно используются промышленные роботы и другие автоматизированные решения. Это позволяет в значительной степени повысить производительность и качество выполняемых работ. В данной статье был дан краткий обзор современных промышленных роботов, их принцип работы, основные узлы и системы. Был разработан и протестирован алгоритм обучения с подкреплением. Задача построения алгоритма обучения с подкреплением была разделена на два этапа: моделирование среды и описание и оптимизация функции стоимости. Так как промышленные робототехнические системы работают в реальном мире, модель окружения должна отражать основные физические законы. Поэтому в качестве физической среды для тестирования была выбрана библиотека физического окружения *pyBullet*. После моделирования манипулятора в выбранной физической среде перед ним была поставлена тривиальная задача – касание захватом манипулятора заданного объекта. В качестве агента, взаимодействующего со средой, использовалась искусственная нейронная сеть. Входами служили координаты объекта и существующие углы поворотов шарнирных сочленений робота. Выходами – угол поворота сочленений на данном шаге. Данная сеть обучалась методом обратного распространения ошибки, модификацией *Adam*. Система обучалась около 12 часов. При тестировании устойчивости системы (случайное положение цилиндра) успех достигается в 95 % случаев. В дальнейшем планируется тестирование полученных моделей на стендовых образцах.

Ключевые слова: промышленный робот, нейронная сеть, алгоритм, обучение с подкреплением, автоматизация, робот-манипулятор

APPLICATION OF LEARNING REINFORCEMENT METHOD IN ROBOTIZED AND AUTOMATED FORESTRY SYSTEMS

A.A. Tolstykh¹

PhD (Engineering) D.S. Stupnikov²

PhD (Engineering) S.V. Malyukov²

PhD (Engineering) A.S. Lukyanov¹

PhD (Engineering) Yu.S. Lunev¹

1 – FSBEI HE "Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation",
Voronezh, Russian Federation

2 – FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov",
Voronezh, Russian Federation

Abstract

Currently, most large enterprises are actively using industrial robots and other automated solutions. This allows a significant increase in productivity and quality of work performed. This article gave a brief overview of modern industrial robots, their operating principle, basic components and systems. A reinforcement learning algorithm was developed and tested. The task of constructing a learning algorithm with reinforcement was divided into two stages: modeling the environment and description and optimization of the cost function. Since industrial robotic systems operate in the real world, the environment model should reflect basic physical laws. Therefore, the py-Bullet library of the physical environment was chosen as the physical environment for testing. After modeling the manipulator in the selected physical medium, it was given the trivial task of touching a given object with the capture of the manipulator. An artificial neural network was used as an agent interacting with the environment. The inputs were the coordinates of the object and the existing angles of rotation of the articulated joints of the robot. Outputs - angle of rotation of joints at this step. This network was trained using the back propagation method, Adam modification. The system was trained for about 12 hours. Success is achieved in 95 % of cases when testing the stability of the system (random position of the cylinder). In future, it is planned to test the obtained models on bench samples.

Keywords: industrial robot, neural network, algorithm, reinforcement learning, automation, robot-manipulator

Введение

В настоящее время практически все крупные предприятия любой промышленной сферы стараются использовать множество различных автоматизированных решений. При использовании подобных средств человеческий фактор практически полностью исключается из производственного процесса. В лесной промышленности подобная тенденция тоже прослеживается, начиная от полуавтоматизированных лесозаготовительных комплексов по типу харвестера от John Deere, заканчивая автоматизированными станками с ЧПУ и манипуляторами для погрузки хлыстов и сортимента. Использование такого рода техники позволяет в значительной степени

повысить производительность и качество выполняемых работ, а также сократить количество используемой техники [2].

В данной статье хотелось бы затронуть вопрос современных промышленных роботов, их возможностей, структуры, а также программной составляющей для их управления. Также приведем некоторые исследования в данной области.

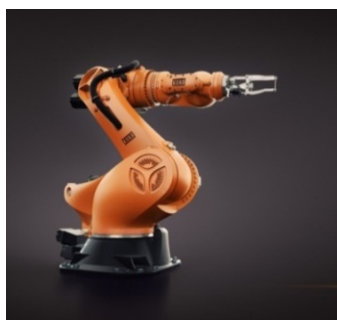
Материал и методы исследования

Зачастую промышленный робот представляется в антропоморфной форме (аналог человеческой руки). Подобная структура является наиболее популярной и неспроста. Это позволяет сделать конструкцию более универсальной и

иметь несколько степеней свободы (обычно от 4 и более).

В промышленной сфере большим спросом пользуются полностью автоматизированные роботы-манипуляторы, которые выполняют определенный спектр поставленных задач при помощи алгоритмов и разного рода датчиков. Такие роботы могут сами принимать решения, но все они будут в рамках прописанных алгоритмом.

Однако специфика и спектр различных применений промышленных роботов подразумевает разработку и создание промышленных роботов с использованием нейронных сетей, способных моделировать свое виртуальное пространство, в котором могут ориентироваться и принимать решения о последующих действиях. Такие роботы могут обучаться сами, по мере поступления опыта [1]. Яркими примерами являются промышленные роботы фирмы KUKA и AMAZON (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Антропоморфные роботы – манипуляторы: а) образец компании KUKA; Источник: компания KUKA. URL: <https://www.kuka.com/>; б) образец компании AMAZON. Источник: Amazon полностью заменит работу человека роботом на промышленных предприятиях. URL: <https://versiya.info/tehnika-i-tehnologii/101175/amp>

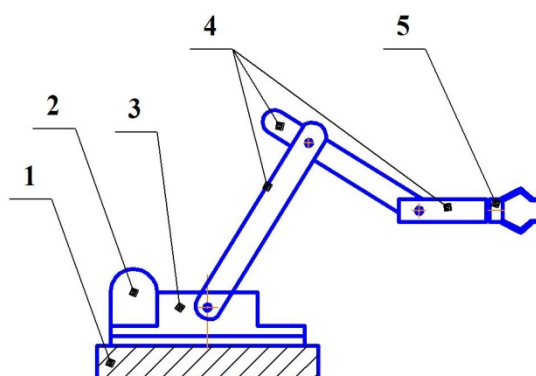


Рис. 2. Функциональная схема робота-манипулятора: 1 – неподвижная опора; 2 – электродвигатель; 3 – опорное вращательное звено; 4 – возвратно-поступательные звенья; 5 – захват

Источник: собственная разработка авторов

Количество степеней свободы, а также рабочая область промышленного робота будет зависеть от взаимного расположения и комбинации звеньев (рис. 3).

В большинстве случаев в исполнительном механизме робота-манипулятора первые три звена осуществляют транспортные функции. Они обеспечивают смещение рабочего органа в необходимое положение. Все остальные сочленения выполняют ориентирующую функцию, направляя рабочий орган согласно поставленной задаче [3].

Ниже представлены четыре категории промышленных роботов, которые делятся в зависимости от вида первых трёх сочленений:

➤ роботы, у которых все три начальных сочленения являются поступательными (они работают в декартовой системе координат);

➤ роботы, у которых среди начальных сочленений два поступательных и одно вращательное (они работают в цилиндрической системе координат);

➤ роботы, у которых среди начальных сочленений одно поступательных и два вращательных (они работают в сферической системе координат);

➤ роботы, у которых все три начальных сочленения являются вращательными (они работают в угловой, или вращательной, системе координат).

Разделение степеней подвижности у некоторых промышленных роботов на переносные и ориентирующие не предусмотрено. В качестве примера можно привести роботов с числом степеней свободы более шести (избыточная кинематика).

Рабочий орган – устройство, которое предназначено для реализации конкретной производственной задачи. Он размещается на последнем звене робота-манипулятора. В качестве рабочего органа могут выступать как универсальные устройства по типу захватов, так и профильные инструменты.

Схват – устройство, захватывающее и удерживающее объект посредством относительного перемещения частей данного устройства. Он является одним из самых универсальных видов захват-

ного устройства. Схват по конструкции напоминает человеческую кисть: захват объектов производится при помощи механических «пальцев» [1, 3].

Электрические, пневматические или гидравлические двигатели применяют в качестве привода. Электрические приводы способствуют выполнению более точных операций. При этом гидравлические приводы используют для более тяжелых работ, где необходимо развивать высокое быстроедействие или большое усилие. В свою очередь, пневматические приводы применяют на малогабаритных роботах для выполнения простых циклических операций.

Основным элементом аппаратной части является силовой преобразователь – драйвер двигателя. Для управления электродвигателями постоянного тока используют некоторое количество схем. Самой функциональной из всех является H-мост. Общая схема H-моста изображена на рис. 4.

Показанная схема содержит четыре ключа. Они включены попарно последовательно. Между парами располагается двигатель (якорная цепь). Два нижних ключа подключаются к отрицательной шине источника питания, два верхних ключа – к положительной шине источника питания. Для включения двигателя необходимо, чтобы были включены два ключа, допустим S1 и S4, в данном случае ток будет протекать от источника питания через ключ S1, далее через якорь двигателя и через ключ S4, а два другие ключа должны быть закрыты. Для того чтобы реверсировать движение тока, в якоре двигателя необходимо закрыть ключи S1 и S4, а ключи S2 и S3 открыть [3].

В наши дни предъявляются все большие требования к универсальности алгоритмов, используемых для управления промышленными робототехническими системами. В настоящее время наиболее перспективным подходом является применение обучения с подкреплением [4, 5]. Рассмотрим подробнее данный подход.

В литературе [4] используются термины «агент» и «среда» – для обозначения робототехнической системы и внешних факторов соответственно. Вся концепция подхода строится на утверждении, что существует функция стоимости [5], зависящая от

предыдущих действий агента и состояния среды, которая может быть рассчитана в каждый момент времени, и ее максимизация влечет за собой выполнение поставленной перед робототехнической системой задачи.

На рис. 5 приведена схема процесса обучения с подкреплением.

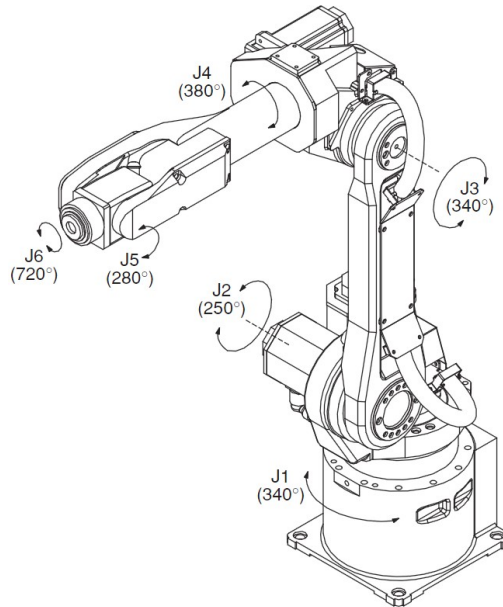


Рис. 3. Схема робота-манипулятора с обозначением степеней свободы [2, 3]

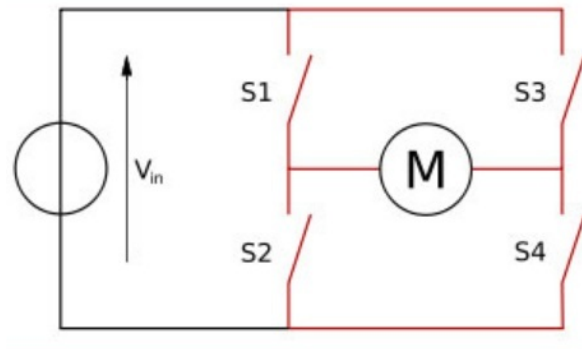


Рис. 4. Общая схема H-моста [2, 3]



Рис. 5. Схема обучения с подкреплением
Источник: собственная разработка авторов

Результаты исследования и их обсуждение

Технически наиболее сложным является математическое описание функции стоимости, в то время как задача её оптимизации может быть решена с помощью численных методов оптимизации. Рассмотрим подробнее механизм определения функции стоимости.

Введем к уже используемым обозначениям переменную V_t , определяющую взвешенную сумму ранее полученных наград к шагу t [4]. Она определяется как

$$V_t = \sum_{i=0}^t \gamma^i R(S_i),$$

где γ – коэффициент, обеспечивающий снижение значения последних действий. Подобная формулировка необходима для увеличения количества действий, приводящих к положительному результату. Данное выражение справедливо для случая, когда действия последовательны, то есть у агента нет выбора. Для случая выбора из K действий на каждом шаге

$$V_t|_{S_1} = \sum_{k=2}^K P(s_k|s_1) (R_k + \gamma V|_{S_k}),$$

где $V_t|_{S_1}$ – ранее полученные награды к шагу t , при текущем состоянии среды S ; $P(s_k|s_1)$ – вероятность перехода среды в состояние S_k при выборе действия k . Заключительным изменением данной формулировки является введение «политики» [6]. Под политикой (π) понимается стратегия принятия решения выбора конкретного действия в текущем состоянии среды

$$V_\pi|_S = \sum_a \pi(a|s) \sum_{s' \in S} \sum_{r \in R} p(s', r|s, a) (r + \gamma V_\pi|_{s'}),$$

где a – все доступные для агента действия; π – текущая политика.

Задача построения алгоритма обучения с подкреплением делится на два этапа: моделирование среды и описание и оптимизация функции стоимости. Так как промышленные робототехнические системы работают в реальном мире, модель окружения должна отражать основные физические законы. Проведя анализ доступных физических окружений –

библиотек, использующих просчет физики для инженерных целей, – были выделены две библиотеки: MuJoCo [7, 8] и pyBullet [9]. Данные библиотеки фундаментально не отличаются между собой – только разными подходами к описанию логики и ценовой политикой. Было принято решение использовать в качестве физического окружения pyBullet ввиду его бесплатной модели распространения. Для реализации среды был смоделирован промышленный робот, соответствующая физическая среда и объекты, на которые робот должен воздействовать (рис. 6). Таким образом, первый этап построения модели обучения с подкреплением можно считать выполненным.

Была выбрана тривиальная задача – касание захватом манипулятора заданного объекта (на рис. 6 зеленый цилиндр). В качестве функции стоимости выступало следующее выражение:

$$R_t = \frac{\sqrt{(C_x - T_x)^2 + (C_y - T_y)^2 + (C_z - T_z)^2}}{t},$$

где C – координаты цели (цилиндра); T – координаты захвата робота; t – текущий шаг. Деление на t обусловлено условием минимизации количества действий робота: чем больше шагов пройдено, тем меньше награда на текущем шаге. Функция стоимости определяется как максимизация награды $V = \max_W (R)$, где W – параметры модели.

В качестве агента, взаимодействующего со средой, использовалась искусственная нейронная сеть [10]. Использовался простейший перцептрон с 2 скрытыми слоями. Входами служили координаты объекта и существующие углы поворотов шарнирных сочленений робота. Выходами – угол поворота сочленений на данном шаге. Архитектура искусственной нейронной сети приведена на рис. 7.

Данная архитектура была выбрана из эмпирических соображений [11], подбор гиперпараметров не производился.

Данная сеть обучалась методом обратного распространения ошибки, модификацией Adam [10]. Система обучалась около 12 часов. При тестировании устойчивости системы (случайное положение цилиндра) успех достигается в 95 % случаев. Следует отметить, что для применения системы требуется 4 операции матричного перемно-

жения, 4 операции матричного сложения и 3 операции поэлементного применения нелинейной функции. Данное количество операций уже учитывает моделируемые физические условия. Увеличение конечной точности системы может быть достигнуто за счет подбора гиперпараметров и увеличения времени обучения.

На рис. 8 приведены графики изменения ошибки обучения в зависимости от эпохи. Под эпохой обучения понимается одно изменение весов ИНС [10].

Из рисунка видно, что после 500 эпох обучения появляется участок с флуктуациями ошибки.

Это связано с тем, что ИНС обучается на случайно сгенерированных примерах, обобщая полученную информацию. После 1500 эпохи целесообразно прекратить обучение, так как достигнута квазиоптимальная конфигурация ИНС.

Выводы

По результатам проведенных теоретических исследований было выявлено, что данный метод показывает высокий процент реализации поставленной задачи (95 %). В дальнейшем планируется тестирование данных моделей на стендовых образцах.

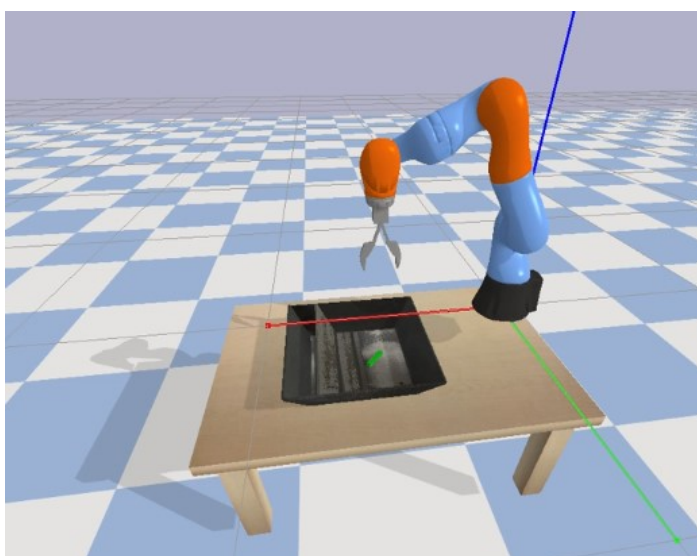


Рис. 6. Рендеринг физического окружения ruBullet для робота-манипулятора
Источник: собственная разработка авторов в рендеринге физического окружения ruBullet



Рис. 7. Архитектура агента, выполненного в виде искусственной нейронной сети
Источник: собственная разработка авторов

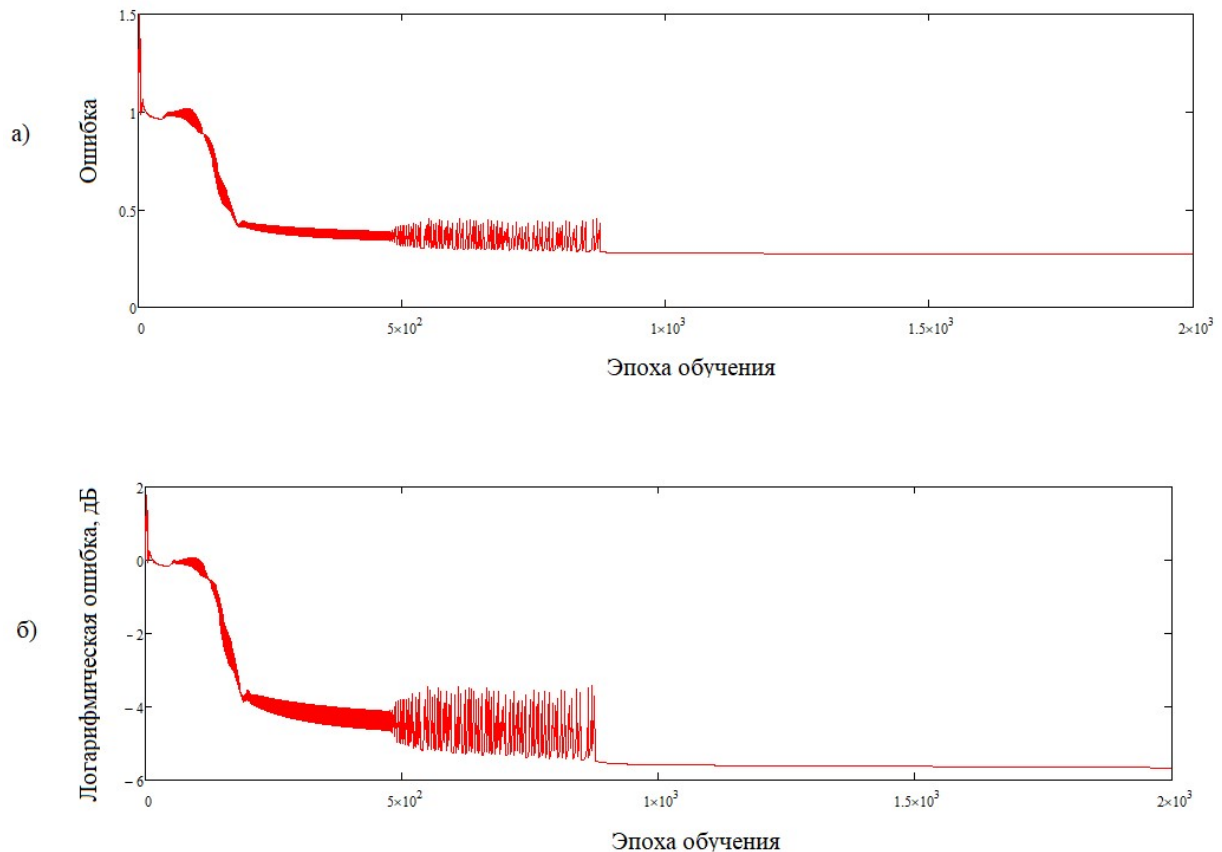


Рис. 8. Графики изменения ошибки обучения в зависимости от эпохи

Источник: собственная разработка авторов

Библиографический список

1. Лекции. Классификации систем координат. – URL: <http://baumanki.net/lectures/> (дата обращения 17.10.2019).
2. Анализ современного состояния применения роботов в промышленности. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения 17.10.2019).
3. Схиртладзе, А. Г. Классификация и структура промышленных роботов / А. Г. Схиртладзе, В. И. Выходец, Н. И. Никифоров. – URL: <http://www.metal-working.ru/> (дата обращения 17.10.2019).
4. Саттон, Р. С. Обучение с подкреплением / Р. С. Саттон, Э. Г. Барто. – Москва : Бином. Лаборатория знаний, 2017. – 399 с.
5. Dueling Network Architectures for Deep Reinforcement Learning / Z. Wang, T. Schaul, M. Hessel [et al.] // CoRR. – abs/1511.06581. – 2016. – P. 1–15.
6. Policy Gradient Methods for Reinforcement Learning with Function Approximation / R. S. Sutton, D. A. McAllester, S. P. Singh, M. Yishay // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2000. – No. 12. – P. 1057–1063.
7. MuJoCo advanced physics simulation. – URL: <http://www.mujoco.org/> (дата обращения: 18.10.2019).
8. Todorov, E. A physics engine for model-based control / E. Todorov, T. Erez, Y. Tassa // IROS. – 2012. – P. 5026–5033. – DOI: 10.1109/IROS.2012.6386109.
9. Bullet Real-Time Physics Simulation. – URL: <https://pybullet.org/wordpress/> (дата обращения: 18.10.2019).
10. Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль. – Москва : «ДМК Пресс», 2017. – 652 с.

11. Толстых, А.А. Выбор архитектуры искусственной нейронной сети на основе сравнения эффективности методов распознавания изображений / А. А. Толстых, А. Н. Голубинский // Вестник Воронежского института МВД России. – 2018. – № 1. – С. 27–37.

References

1. *Leksii. Klassifikatsii sistem koordinat* [Lectures. Classifications of coordinate systems]. Available at: <http://baumanki.net/lectures/> (Accessed 17 November 2019). (In Russian).
2. *Analiz sovremennogo sostojanija primenenija robotov v promyshlennosti* [Analysis of the current state of application of robots in industry]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (Accessed 17 November 2019). (In Russian).
3. Shirladze A.G., Vyhodec V.I., Nikiforov N.I. *Klassifikacija i struktura promyshlennyh robotov* [Classification and structure of industrial robots]. Available at: <http://www.metal-working.ru/> (Accessed 17 November 2019). (In Russian).
4. Sutton R.S., Barto Je.G. *Obuchenie s podkrepleniem* [Training with reinforcement]. Moscow, 2017, 399 p. (In Russian).
5. Wang Z., Schaul T., Hessel M. et al. (2016) Dueling Network Architectures for Deep Reinforcement Learning. *CoRR*, abs/1511.06581, pp. 1-15.
6. Sutton R.S., McAllester D.A., Singh S.P., Yishay M. (2000) Policy Gradient Methods for Reinforcement Learning with Function Approximation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 12, pp. 1057-1063.
7. MuJoCo advanced physics simulation. Available at: <http://www.mujoco.org/> (Accessed 18 November 2019).
8. Todorov E., Erez T., Tassa Y. (2012) A physics engine for model-based control. *IROS*, pp. 5026-5033. DOI: 10.1109/IROS.2012.6386109.
9. Bullet Real-Time Physics Simulation. Available at: <https://pybullet.org/wordpress/> (Accessed 18 November 2019).
10. Gudfellou Ya., Bendzhio I., Kurvill A. *Glubokoe obuchenie* [Deep Learning]. Moscow, 2017, 652 p. (In Russian).
11. Tolstyh A.A., Golubinsky A.N. (2018) *Vybor arhitektury iskusstvennoj nejronnoj seti na osnove sravnenija jeffektiv-nosti metodov raspoznavanija izobrazhenij* [The choice of artificial neural network architecture based on a comparison of the efficiency of image recognition methods]. *Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii* [Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia], no. 1, pp. 27-37 (In Russian).

Сведения об авторах

Толстых Андрей Андреевич – преподаватель кафедры тактико-специальной подготовки Воронежского института МВД России, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: tolstyxh.aa@yandex.ru

Ступников Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, преподаватель кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: Neiti1992@mail.ru.

Малюков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: malyukovsergey@yandex.ru.

Лукьянов Александр Сергеевич – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных систем и технологий Воронежского института МВД России, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: las92@yandex.ru.

Лунёв Юрий Станиславович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматизированных информационных систем Воронежского института МВД России, г. Воронеж, Российская Федерация; e-mail: xalt@mail.ru.

Information about authors

Tolstykh Andrey Andreevich – Lecturer at the Department of Tactical and Special Training, Federal State Public Educational Establishment of Higher Training "Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation", Voronezh, Russian Federation; e-mail: tolstykh.aa@yandex.ru.

Stupnikov Dmitry Sergeevich – PhD (Engineering), Lecturer of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: Neiti1992@mail.ru.

Malyukov Sergey Vladimirovich – PhD (Engineering), Associate Professor of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design, FSBEI HE "Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov", Voronezh, Russian Federation; e-mail: malyukovsergey@yandex.ru.

Lukyanov Aleksandr Sergeevich – PhD (Engineering), Senior Lecturer, Department of Infocommunication Systems and Technologies, Federal State Public Educational Establishment of Higher Training "Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation", Voronezh, Russian Federation; e-mail: las92@yandex.ru.

Lunev Yury Stanislavovich – PhD (Engineering), Senior Lecturer, Department of Automated Information Systems, Federal State Public Educational Establishment of Higher Training "Voronezh Institute of the Ministry of the Interior of the Russian Federation", Voronezh, Russian Federation; e-mail: xalt@mail.ru.

ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Научный журнал

2020 г. Том 10 № 1 (37)

Подписано в печать 20.03.2020. Формат 60×90 1/8. Усл. печ. л. 33,38.

Уч.-изд. л. 55,2. Тираж 1000 экз. Заказ 193

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

РИО ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8

Отпечатано в УОП ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». 394087, г. Воронеж, ул. Докучаева, 10

LESOTEKHNICHESKII ZHURNAL

Scientific journal

2020 Vol. 10 № 1 (37)

Sent for press 20.03.2020. Format 60×90 1/8. Conv. pr. l. 33,38.
Teach. and publ. l. 55,2. Circulation 1000 copies. Order 193

FSBEI HE «Voronezh State University of Forestry and Technologies
named after G.F. Morozov»

EPA of FSBEI HE «VSUFT». 394087, Timiryazeva st., 8, Voronezh
Printed in «VSUFT». 394087, Dokuchaeva st., 10, Voronezh