

# ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 1 ' 2025 Том 29

## Главный редактор

**Санаев Виктор Георгиевич**, д-р техн. наук, профессор, директор Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

## Редакционный совет журнала

**Артамонов Дмитрий Владимирович**, д-р техн. наук, профессор, Пензенский ГУ, Пенза

**Ашраф Дарвиш**, ассоциированный профессор, факультет компьютерных наук, Университет Хелуан, Каир, Египет, Исследовательские лаборатории Machine Intelligence (MIR Labs), США

**Беляев Михаил Юрьевич**, д-р техн. наук, начальник отдела, зам. руководителя НТЦ РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, Москва

**Бемманн Альбрехт**, профессор, Дрезденский технический университет, Институт профессуры для стран Восточной Европы, Германия

**Бессчетнов Владимир Петрович**, д-р биол. наук, профессор, Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия, Нижний Новгород

**Бугаёв Александр Степанович**, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва

**Бурмистрова Ольга Николаевна**, д-р техн. наук, профессор, Ухтинский государственный технический университет

**Говедар Зоран**, член-корреспондент Академии наук и искусств Республики Сербской (АНИРС), профессор, доктор с.-х. наук, Университет г. Бая Лука, Республика Сербская, Босния и Герцеговина

**Деглиз Ксавье**, д-р с.-х. наук, профессор, Академик IAWS, академик Французской академии сельского хозяйства, Нанси, Франция

**Драпалюк Михаил Валентинович**, д-р техн. наук, профессор, ректор ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, Воронеж

**Евдокимов Юрий Михайлович**, канд. хим. наук, профессор, академик Нью-Йоркской академии наук, чл.-корр. РАЕН, член центрального правления Нанотехнологического общества России, Москва

**Залесов Сергей Вениаминович**, д-р с.-х. наук, профессор, УГЛТУ, Екатеринбург

**Запруднов Вячеслав Ильич**, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Иванкин Андрей Николаевич**, д-р хим. наук, профессор, академик МАНВШ, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Кирюхин Дмитрий Павлович**, д-р хим. наук, ИПХФ РАН, Черноголовка

**Классен Николай Владимирович**, канд. физ.-мат. наук, ИФТТ РАН, Черноголовка

**Ковачев Атанас**, д-р архитектуры, профессор, член-корр. Болгарской АН, профессор Международной Академии Архитектуры, Иностраный член Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН), Почетный профессор Московского архитектурного института (Государственной академии), Варненский свободный университет им. «Черноризца Храбра», Варна, Болгария.

**Кожухов Николай Иванович**, д-р экон. наук, профессор, академик РАН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Козлов Александр Ильич**, канд. техн. наук, ученый секретарь Совета ОАО «НПО ИТ», Королёв

**Комаров Евгений Геннадиевич**, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Корольков Анатолий Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Котиев Георгий Олегович**, д-р техн. наук, профессор, кафедра «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Кох Нильс Элерс**, д-р агрономии в области лесной политики, профессор, Президент IUFRO, Центр лесного и ландшафтного планирования университета, Копенгаген, Дания

**Кротт Макс**, профессор, специализация «Лесная политика», Георг-Аугуст-Университет, Геттинген, Германия

**Липаткин Владимир Александрович**, канд. биол. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Лу Хайбао**, д-р, профессор, заместитель директора Национальной ключевой лаборатории науки и технологий по передовым композитам в особых условиях, Харбинский политехнический университет, Китай

**Лукина Наталья Васильевна**, член-корреспондент РАН, профессор, директор ЦЭПЛ РАН, зам. Председателя Научного совета по лесу РАН, Москва

**Макуев Валентин Анатольевич**, д-р техн. наук, доцент, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Малашин Алексей Анатольевич**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Мартынюк Александр Александрович**, академик РАН, д-р с.-х. наук, ФБУ ВНИИЛМ, Москва

**Мелехов Владимир Иванович**, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, САФУ им. М.В. Ломоносова, Архангельск

**Моисеев Александр Николаевич**, ст. науч. сотр., Европейский институт леса, г. Йоэнсуу, Финляндия

**Наквасина Елена Николаевна**, д-р с.-х. наук, профессор, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Высшая школа естественных наук и технологий, Архангельск

**Нимц Петер**, д-р инж. наук, профессор физики древесины, Швейцарская высшая техническая школа Цюриха

**Обливин Александр Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, МАНВШ, заслуженный деятель науки и техники РФ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Павленко Александр Николаевич**, член-корреспондент РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор, Институт теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

**Пастори Золтан**, д-р техн. наук, доцент, директор Инновационного центра Шопронского университета, Венгрия

**Полещук Ольга Митрофановна**, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Полуэктов Николай Павлович**, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Родин Сергей Анатольевич**, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН, ВНИИЛМ, Москва

**Рыкунин Станислав Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Стрекалов Александр Федорович**, канд. техн. наук, АО «Корпорация Тактическое военное вооружение», Королёв

**Теодоронский Владимир Сергеевич**, д-р с.-х. наук, профессор, академик РАЕН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Титов Анатолий Матвеевич**, канд. техн. наук, зам. начальника отделения, ученый секретарь Совета ЦУП ЦНИИМАШ, Королёв

**Тричков Нено Иванов**, профессор, доктор, проректор по научной работе Лесотехнического университета, София, Болгария

**Федотов Геннадий Николаевич**, д-р биол. наук, МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

**Чубинский Анатолий Николаевич**, д-р техн. наук, профессор, СПбГЛТУ, Санкт-Петербург

**Чумаченко Сергей Иванович**, д-р биол. наук, профессор, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

**Шимкович Дмитрий Григорьевич**, д-р техн. наук, профессор, ООО «Кудесник», Москва

**Щепаченко Дмитрий Геннадьевич**, д-р биол. наук, доцент, старший научный сотрудник Международного института прикладного системного анализа (IIASA), Австрия

Ответственный секретарь Расева Елена Александровна

Редактор Л.В. Сивай

Перевод М.А. Карлухиной

Электронная версия Ю.А. Ражской

Учредитель МГТУ им. Н.Э. Баумана

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-68118 от 21.12.2016

Входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Материалы настоящего журнала могут быть перепечатаны и воспроизведены полностью или частично с письменного разрешения издательства

Выходит с 1997 года

Адрес редакции и издательства  
141005, Мытищи-5, Московская обл.,  
1-я Институтская, д. 1  
(498) 687-41-33,  
les-vest@mgul.ac.ru

Дата выхода в свет 14.01.2025

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 23,25 п. л.

Цена свободная

# LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal

No. 1 ' 2025 Vol. 29

## Editor-in-chief

**Sanaev Victor Georgievich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Director of BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

## Editorial council of the journal

**Artamonov Dmitriy Vladimirovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Penza State  
**Ashraf Darwish**, Associate Professor of Computer Science, Faculty of Computer Science, Helwan University, Cairo, Egypt, Machine Intelligence Research Labs (MIR Labs), USA  
**Belyaev Mikhail Yur'evich**, Dr. Sci. (Tech.), Head of Department, Deputy Director of S.P. Korolev RSC «Energia», Moscow  
**Bemman Al'brekht**, Professor, the Dresden technical university, professorate Institute for countries of Eastern Europe, Germany  
**Besschetnov Vladimir Petrovich**, Professor, Dr. Sci. (Biol.), Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod  
**Bugaev Aleksandr Stepanovich**, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow  
**Burmistrova Olga Nikolaevna**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Ukhta State Technical University, Ukhta  
**Chubinskiy Anatoliy Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg  
**Chumachenko Sergey Ivanovich**, Professor, Dr. Sci. (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Deglise Xavier**, Dr. Sci. (Agric.), Academician of the IAWS, Academician of the French Academy of Agriculture, Nancy, France  
**Drapalyuk Mikhail Valentinovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Rector of VSUFT, Voronezh  
**Evdokimov Yuriy Mikhaylovich**, Professor, Ph. D. (Chemical); academician of the New York Academy of Sciences, corr. Academy of Natural Sciences, a member of the Central Board of Nanotechnology Society of Russia, Moscow  
**Fedotov Gennadiy Nikolaevich**, Dr. Sci. (Biol.), Lomonosov Moscow State University, Moscow  
**Govedar Zoran**, Corresponding member of the Academy of Sciences and Arts of the Republika Srpska (ASARS), Professor, Doctor of Forestry. University of Banja Luka, Republic Srpska, Bosnia and Herzegovina  
**Ivankin Andrey Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Chemical), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Kiryukhin Dmitriy Pavlovich**, Dr. Sci. (Chemical), IPCP RAS, Chernogolovka  
**Klassen Nikolay Vladimirovich**, Ph. D. (Phys.-Math.), ISSP RAS, Chernogolovka  
**Kovachev Atanas**, Corresponding Member of the Bulgarian Academy of Sciences, Dr. Sci., Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (RAACN), Honorary Professor of the Moscow Architectural Institute (State Academy), Varna, Bulgaria  
**Kokh Nil's Elers**, Professor, the Dr. of agronomics in the field of forest policy, the President of IUFRO, the Center of forest and landscape planning of university Copenhagen, Denmark  
**Komarov Evgeniy Gennadievich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Korol'kov Anatoliy Vladimirovich**, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Kotiev George Olegovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Kozlov Aleksandr Il'ich**, Ph. D. (Tech.), Scientific Secretary of the Board of «NPO IT», Korolev  
**Kozhukhov Nikolay Ivanovich**, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Econ.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Krott Maks**, Professor of Forest politics specialization, George-August-Universitet, Goettingen

**Lipatkin Vladimir Aleksandrovich**, Professor, Ph. D. (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Lu Haibao**, Dr., Tenure-track Professor, Vice Director of the National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Composites in Special Environments, Harbin Institute of Technology (HIT), China  
**Lukina Natalya Vasilyevna**, Corresponding Member of the RAS, Professor, Director of the Center for Sub-Settlement Research RAS, Deputy Chairperson of the Forest Research Council  
**Makuev Valentin Anatol'evich**, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Malashin Alexey Anatolyevich**, Professor, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Martynuk Aleksandr Aleksandrovich**, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Agric.), VNIILM, Moscow  
**Melekhov Vladimir Ivanovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, NARFU, Arkhangelsk  
**Moiseyev Aleksandr Nikolaevich**, Senior Researcher, European Forest Institute, Joensuu, Finland  
**Nakvasina Elena Nikolaevna**, Professor, Dr. Sci. (Agric.), Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Higher School of Natural Sciences and Technology, Arkhangelsk  
**Niemz Peter**, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c., Prof. for Wood Physics, ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology in Zurich); Eidgenossische Technische Hochschule Zurich)  
**Oblivin Aleksandr Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences and MANVSh, Honored worker of science and equipment of the Russian Federation, BMSTU, Moscow  
**Pasztory, Zoltan**, Dr., Ph.D., Director of Innovation Center, University of Sopron, Sopron, Hungary  
**Pavlenko Aleksandr Nikolaevich**, Corresponding Member of the RAS, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk  
**Poleshchuk Ol'ga Mitrofanovna**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Poluektov Nikolai Pavlovich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Rodin Sergey Anatol'evich**, Professor, the Dr. Sci. (Agric.), ARRISMF, Moscow  
**Rykunin Stanislav Nikolaevich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Shchepashchenko Dmitry Gennadievich**, Associate Professor, Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria  
**Shimkovich Dmitriy Grigor'evich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), OOO «Kudesnik», Moscow  
**Strekalov Aleksandr Fedorovich**, Ph. D. (Tech.), JSC «Tactical Missiles Corporation», Korolev  
**Teodoronskiy Vladimir Sergeevich**, Professor, Dr. Sci. (Agric.), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow  
**Titov Anatoliy Matveevich**, Ph. D. (Tech.), Deputy Chief of Department, Scientific Secretary of the Board of MCC TSNIIIMASH, Korolev  
**Trichkov Neno Ivanov**, professor, Dr., Vice-Rector for Research, Forestry University, Sofia, Bulgaria  
**Zalesov Sergey Veniaminovich**, Professor, Dr. Sci. (Agric.), USFEU, Ekaterinburg  
**Zapudnov Vyacheslav Il'ich**, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Assistant Editor Raseva Elena Aleksandrovna

Editor L.V. Sivay

Translation by M.A. Karpukhina

Electronic version by Yu.A. Ryazhskaya

## Founder BMSTU

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

Certificate on registration ПИ № ФС 77-68118 of 21.12.2016

The journal is included in the list of approved VAK of the Russian Federation for editions for the publication of works of competitors of scientific degrees

Materials of the present magazine can be reprinted and reproduced fully or partly with the written permission of publishing house

It has been published since 1997

Publishing house  
141005, Mytishchi, Moscow Region, Russia  
1st Institutskaya street, 1  
(498) 687-41-33  
les-vest@mgul.ac.ru

It is sent for the press 14.01.2025  
Circulation 600 copies  
Order №  
Volume 23,25 p. p.  
Price free

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

80 лет кафедре «Транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса» .....	5
<b>Баженов Е.Е., Илюшин В.В., Крудышев В.В., Хабибуллина Н.В.</b> Базовое шасси для оперативной доставки оборудования и материалов при ликвидации ландшафтных пожаров .....	16
<b>Бухтояров Л.Д.</b> Имитационное моделирование работы ротора кустореза с шарнирно установленными лезвиями .....	38
<b>Галактионов О.Н., Соколов А.П., Суханов Ю.В., Васильев А.С.</b> Техническое творчество студентов как инструмент подготовки кадров для лесной промышленности .....	50
<b>Горбачев А.В., Коростелев С.А., Ченских С.А., Колотилин В.Е., Кулепов В.Ф.</b> Конструктивные особенности тандемных мостов лесных машин .....	62
<b>Дыгало В.Г., Котиев Г.О., Дыгало Л.В., Бычков Г.А.</b> Разработки в области наземной лесной робототехники. Обзор .....	84
<b>Зорин М.В., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Елисеев П.С., Юдилевич А.М., Клубничкин В.Е.</b> Конечно-разностная схема для расчета прогиба дорожного мата под воздействием движителя лесной машины .....	96
<b>Клубничкин Е.Е.</b> Метод повышения энергоэффективности погрузочно-транспортных машин для сортиментной заготовки древесины .....	112
<b>Левинский В.Н., Уразов С.И., Афонькина В.А.</b> Регрессионный анализ процесса инфракрасной сушки древесины в установке с применением пленочных электронагревателей .....	126
<b>Лысыч М.Н., Малюков С.В., Шавков М.В., Гнусов М.А.</b> Исследование полуавтоматического посадочного механизма для сеянцев с закрытой корневой системой в среде САПР с полноразмерным макетированием средствами 3D-печати .....	144
<b>Марковнина А.И., Беляков В.В., Макаров В.С., Вахидов У.Ш., Ключкин А.А.</b> Оценка взаимодействия транспортного средства с полотном пути в концепции подвижности .....	162
<b>Сиваков В.В., Заикин А.Н., Грядунцов С.С., Никитин В.В.</b> Совершенствование управления сервисным обслуживанием сельскохозяйственной и лесозаготовительной техники .....	172

# CONTENTS

## FOREST ENGINEERING

80 years to the Department of «Transport technological means and timber complex equipment» .....	5
<b>Bazhenov E.E., Ilyushin V.V., Krudyshev V.V., Khabibullina N.V.</b> Carrier vehicle for rapid delivery of equipment and materials for landscape firefighting operations .....	16
<b>Bukhtoyarov L.D.</b> Operation simulation modeling of rotor brush cutter with hinged blades .....	38
<b>Galaktionov O.N., Sokolov A.P., Sukhanov Yu.V., Vasil'ev A.S.</b> Students technical creativity as tool for training forest industry personnel.....	50
<b>Gorbachev A.V., Korostelev S.A., Chenskikh S.A., Kolotilin V.E., Kulepov V.F.</b> Design features of forest machines tandem axels .....	62
<b>Dygalo V.G., Kotiev G.O., Dygalo L.V., Bychkov G.A.</b> Developments of ground forest robotics. Review .....	84
<b>Zorin M.V., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Eliseev P.S., Yudilevich A.M., Klubnichkin V.E.</b> Finite-difference scheme to calculate road matting deflection under forest forwarder .....	96
<b>Klubnichkin E.E.</b> Increasing energy efficiency method for cut-to-length haul-load-dump machines .....	112
<b>Levinskiy V.N., Urazov S.I., Afon'kina V.A.</b> Regression analysis of IR wood drying process in installation using membranous electric heaters .....	126
<b>Lysych M.N., Malyukov S.V., Shavkov M.V., Gnusov M.A.</b> Study of semi-automatic planting mechanism for seedlings with root-balled tree system in CAD with full-size 3D-printing tools .....	144
<b>Markovnina A.I., Belyakov V.V., Makarov V.S., Vakhidov U.Sh., Klyushkin A.A.</b> Estimation of interaction between vehicle and road bed in concept of movement .....	162
<b>Sivakov V.V., Zaikin A.N., Gryadunov S.S., Nikitin V.V.</b> Service maintenance management improvement of agricultural and forestry equipment .....	172

## 80 ЛЕТ КАФЕДРЕ «ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА»

Для развития лесохозяйственного комплекса появилась необходимость механизировать переместительные операции. Так началась разработка специальных лесных машин: трелевочных тракторов, лесовозных автомобилей, железнодорожных локомотивов и соответствующего подвижного состава. Кроме того, этому способствовали специфические особенности перевозимых лесных грузов, чрезвычайно тяжелые и изменчивые условия эксплуатации, не позволяющие использовать в лесу сельскохозяйственные тракторы и другие серийные самоходные машины из других отраслей народного хозяйства, а также применять существующие методики обоснования параметров техники, расчета тягово-сцепных свойств, агрегатов и систем машин.

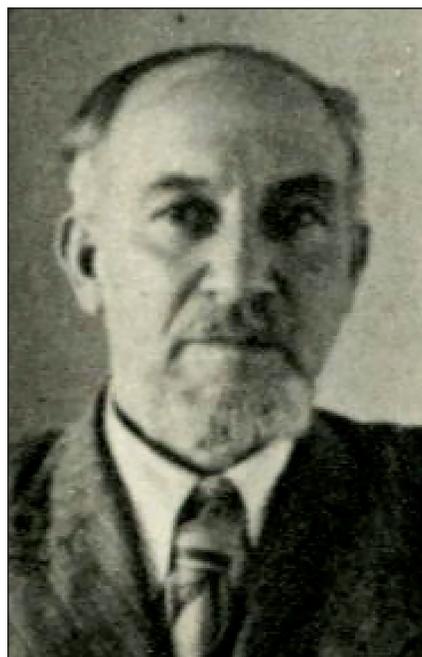
Во многих вузах России еще в дореволюционное время началось формирование научно-педагогических школ лесотранспортного профиля. Этот процесс продолжился и после революции 1917 г., получив наиболее бурное развитие в послевоенный период, когда началась широкомасштабная механизация лесозаготовительного производства.

Формирование научной школы создания лесных колесных и гусеничных машин, подготовка инженеров по данному профилю начались с момента открытия Московского лесотехнического института (МЛТИ) в 1943 г. в поселке Строитель. С 1943 по 1953 гг. под руководством первого заведующего кафедрой тяговых машин профессора Николая Сергеевича Ветчинкина сформировался научно-педагогический коллектив, определивший направления учебно-методической и научно-исследовательской работ.

Как основные были определены следующие направления научной деятельности:

- совершенствование процесса газификации древесного топлива;
- повышение эффективности газогенераторных автомобилей и тепловозов;
- разработка топочных устройств паровозных котлов, проектирование и участие в создании плавающих тракторов-амфибий.

В 1953–1958 гг. кафедрой руководил доцент Н.И. Субоч. Этот период ознаменовался активным переходом от частичной механизации лесозаготовительного производства к машинному



**Н.С. Ветчинкин**  
(1886–1960)

д-р техн. наук, профессор,  
зав. кафедрой тяговых машин МЛТИ (1943–1953)



**Н.И. Субоч**

канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой (1953–1958)



Н.С. Ветчинкин и А.Н. Медведев у плавающего трактора-амфибии ВЛ-1



**М.И. Зайчик**  
(1905–1977)

д-р техн. наук, профессор, лауреат Государственной премии, зав. кафедрой (1958–1977)

способу заготовки древесины, что потребовало подготовки нового поколения высококвалифицированных инженеров-механиков, способ-

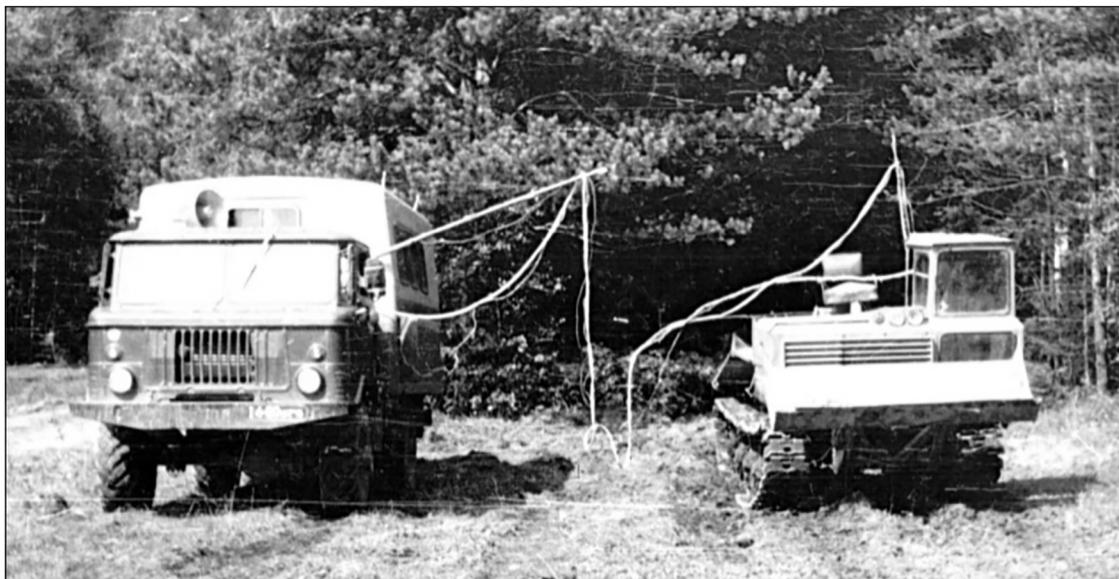
ных разрабатывать и успешно эксплуатировать сложные многооперационные машины.

Успешному решению задачи повышения уровня подготовки инженерных кадров во многом способствовало открытие в МЛТИ в 1954 г. лесомеханического факультета, в состав которого вошла кафедра тяговых машин.

В 1959 г. произошло разделение кафедры — была выделена кафедра технической эксплуатации и ремонта. В период 1958–1977 гг. кафедрой тяговых машин возглавил специалист по колесным и гусеничным машинам, один из основателей танкового факультета МВТУ (ныне МГТУ) им Н.Э. Баумана и его первый декан — лауреат Государственной премии СССР, д-р техн. наук, профессор М.И. Зайчик.

В 1947 г. за создание и внедрение новых трансмиссий тяжелых танков М.И. Зайчик был удостоен звания лауреата Государственной премии СССР. На кафедре трудами М.И. Зайчика были модернизированы учебные классы и лаборатории, машинно-тракторный парк пополнен новейшими автомобилями и лесными колесными и гусеничными тракторами.

Коллектив кафедры пополняется молодыми сотрудниками, закончившими аспирантуру при МЛТИ. Окончательно сформировалась направленность научно-исследовательских (НИР) и опытно-конструкторских (ОКР) работ.



Машинно-тракторный парк кафедры в 1960–1970-е годы



Сотрудники кафедры в 1970-е годы

Ученики профессора М.И. Зайчика работали на многих предприятиях лесопромышленного комплекса России, в отраслевых научно-исследовательских и конструкторских организациях и вузах, готовящих специалистов для лесной промышленности. Кроме того, его ученики трудились в головном научно-исследователь-

ском центре отрасли — Центральном научно-исследовательском и проектно-конструкторском институте механизации и энергетики лесной промышленности (ЦНИИМЭ). Под их руководством и с их участием было выполнено множество научно-исследовательских и конструкторских разработок.



**Я.В. Слодкевич**  
(1932–1999)

канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой (1977–1979)



**И.Ф. Верхов**  
(1928–1998)

канд. техн. наук, профессор, декан факультета автоматизации и комплексной механизации процессов лесозаготовок (ФАЛ) (1979–1980)

Бесчokerные и валочно-трелевочные машины — основное направление механизации лесозаготовительной промышленности 1950–1970-х годов, на котором особенно плодотворно пора-

ботал М.И. Зайчик с учениками. На протяжении длительного времени Специальное конструкторское бюро (СКБ) ЦНИИМЭ возглавляли В.С. Кругов, Е.И. Миронов, И.Г. Беккер, ученики М.И. Зайчика. Была проведена успешная совместная работа кафедры тяговых машин МЛТИ и подразделений ЦНИИМЭ, внесен существенный вклад в развитие колесных и гусеничных машин для лесной промышленности. Практически во всех разработках колесных и гусеничных машин, работающих на лесозаготовках России, приняли участие специалисты ЦНИИМЭ, большинство из которых — представители школы профессора М.И. Зайчика, в частности: Г.А. Махов, В.П. Ермольев, И.С. Ковальков, В.Я. Прилешин, В.А. Маврин, Н.А. Наумов, М.А. Барман, В.В. Лабутин, В.Б. Нальский, Н.Н. Горбачев, Л.И. Егоров и многие другие.

Специалисты ЦНИИМЭ в течение длительного времени после окончания МЛТИ сохранили деловые контакты с кафедрой тяговых машин. М.И. Зайчик придавал большое значение постоянному творческому росту специалистов лесной промышленности. Они совершенствовались квалификацию, обучаясь в аспирантуре под научным руководством М.И. Зайчика, мнение которого пользовалось огромным авторитетом.

В структуре ЦНИИМЭ М.И. Зайчиком была создана лаборатория лесопромышленных тракторов, плодотворно работавшая длительный период времени. В активе этой лаборатории работы над тракторами ТБ-1М, ТЛТ-100, ТТ-4М, Т-157, Т-157Н, К-703, К-703М, которые составляли основу парка тракторов лесозаготовительной отрасли в стране. На протяжении всего времени работы лаборатории, начиная с 1975 г., в ее составе трудились ученики профессора М.И. Зайчика.

Профессор М.И. Зайчик заложил основы научно-педагогической школы по проходимости, маневренности и повышению энергонасыщенности лесозаготовительных машин, подготовил более 20 кандидатов наук по этому направлению.

Под общей редакцией М.И. Зайчика написаны три учебника для лесотехнических вузов: «Лесовозные тракторы и автомобили» (1957); «Тяговые машины и подвижной состав лесовозных дорог» (1967); «Проектирование и расчет специальных лесных машин» (1976). Более ранние книги М.И. Зайчика посвящены конструкции танков.

Начиная с 1977 г. шло дальнейшее совершенствование учебно-методической работы и расширялось участие преподавателей кафедры в выполнении актуальных для лесного комплекса

научно-исследовательских работ. В то время заведовали кафедрой доцент Я.В. Слодкевич, профессор И.Ф. Верхов, доцент В.М. Никифоров.

С 1986 г. кафедре тяговых машин было присвоено новое название — кафедра колесных и гусеничных машин. В 1988 г. ее возглавил ученик М.И. Зайчика д-р техн. наук, профессор В.М. Котиков.

Переход к жидкотопливным двигателям отразился на научной тематике кафедры, основными направлениями которой в тот период стали следующие:

- исследования перспектив использования двигателей с воздушным охлаждением на трелевочных тракторах и тепловозах Управления железной дороги (УЖД);

- совершенствование элементов трансмиссии трелевочных тракторов с дизельными двигателями;

- исследование путей улучшения ходовых свойств лесных машин;

- исследование и разработка новой техники для механизации осмолзаготовительных работ.

Результатом выполнения работ по этим направлениям стало создание первых в СССР экспериментальных образцов трелевочных тракторов и локомотивов УЖД с дизелями воздушного охлаждения, успешно прошедших производственные испытания и внедренных в серийное производство, в частности осмолзаготовительной машины ТПО-МЛТИ, которая после модернизации выпускалась продолжительное время.

Лабораторная база кафедры была заложена в период ее становления и состояла из лабораторных двигателей, учебных классов по изучению материальной части автомобилей и тракторов в стенах МЛТИ и учебно-опытного полигона в Воря-Богородском лесничестве.

По мере морального старения техники экспонаты, учебные стенды и автотракторный парк обновлялись без существенного изменения номенклатуры оборудования.

Значительная реконструкция лаборатории автотракторных двигателей была выполнена в 1989 г., когда в машинном зале создали испытательный бокс, двигатели оснастили электронными измерительными системами ЭВМ для обработки результатов исследования эксплуатационных показателей, установили морозильную камеру для исследования двигателей внутреннего сгорания (ДВС) при низких температурах, грунтовый канал для исследования физических моделей машин, ввели в эксплуатацию тензометрическая лабораторию на базе автомобиля ГАЗ-66.



**В.М. Никифоров**

канд. техн. наук, доцент, декан факультета вечернего обучения МЛТИ (1980–1988)



**В.М. Котиков**

(1940–2008)

д-р. техн. наук, профессор, член-корреспондент Российской академии естественных наук, зав. кафедрой (1988–2008)

Наряду с испытательным боксом в лаборатории двигателей был создан специализированный класс для изучения устройства и исследования элементов топливной аппаратуры, дизелей, укомплектованный новейшим оборудованием.



Открытие учебного центра «Лесомеханик»



Заложенные профессором М.И. Зайчиком направления научной деятельности развивали его ученики — Я.В. Слодкевич, В.М. Котиков, В.С. Извеков, А.В. Ерхов, Л.И. Егоров.

Доцент Я.В. Слодкевич разработал научные основы обоснования технических параметров самоходных лесозаготовительных машин и внес большой вклад в теорию проходимости. В этом направлении Я.В. Слодкевич подготовил пять, а В.М. Котиков три кандидата технических наук.

Продолжением этих работ стало новое научное направление, находящееся в области пересечения техники и биологии — изучение экологических последствий воздействия колесных и гусеничных машин на лесные почвы. Это направление послужило основой для написания докторской диссертации профессором В.М. Котиковым и было в дальнейшем развито в работах аспирантов и докторантов кафедры.

В рамках указанного научного направления доцент Д.В. Акинин проводил исследования по деформации лесных почв при многократных проходах гусеничного трелевочного трактора.

Преподавателями кафедры В.М. Котиковым, В.С. Извековым, В.М. Никифоровым, Я.В. Слодкевичем совместно с Белорусским государственным технологическим университетом, Санкт-Петербургской лесотехнической академией и Петрозаводским государственным университетом были выпущены два учебника — «Лесные машины» (1989) и «Лесотранспортные машины» (1997).

С 1988 г. на кафедре колесных и гусеничных машин работал д-р техн. наук, профессор Л.А. Гоберман — крупный специалист в области лесотранспортных машин. Он внес большой вклад в область исследования динамики

движения и устойчивости лесных и дорожно-строительных машин, подготовив 10 кандидатов и одного доктора технических наук. Л.А. Гоберман написал несколько учебников и монографий, в частности учебник «Прикладная механика колесных машин» (1974), «Основы теории расчета и проектирования строительных и дорожных машин» (1988), а также издал серию учебных пособий по математическому моделированию и технологии научных исследований.

На протяжении многих лет масштабные научные исследования выполнялись кафедрой по заказам технического управления Министерства лесной промышленности СССР и ЦНИИМЭ в соответствии с хоздоговорами. Работы проводились под патронатом лаборатории базовых тракторов, которой долгие годы руководил Л.И. Егоров, канд. техн. наук, ученик М.И. Зайчика. С 2001 по 2016 гг. Л.И. Егоров работал на кафедре.

В начале 2000-х годов сотрудники кафедры В.М. Котиков, Л.И. Егоров и А.В. Ерхов совместно с ЦНИИМЭ и Петрозаводским государственным университетом написали три учебника: «Лесозаготовительные и трелевочные машины» (2004); «Теория и конструкция машин и оборудования лесной отрасли» (2005); «Тракторы и автомобили» (2008).

С приходом на кафедру молодого поколения ученых развитие научной работы получило новый импульс. С 2006 г. Е.Е. Клубничкин совместно с Центром исследования прочности Центрального научно-исследовательского института машиностроения (ЦНИИмаш) проводил исследования повышения долговечности ходовых систем гусеничных трелевочных тракторов.

В 2007 г. на базе кафедры был открыт учебный центр «Лесомеханик» по подготовке специалистов для лесопромышленного комплекса. Инициаторами проекта выступили кафедра колесных и гусеничных машин МГУЛ (МГУЛ — Московский государственный университет леса, в который в 1993 г. был переименован МЛТИ. С 2016 г. МГУЛ преобразован в Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана) и Фонд развития кадровой политики в лесной отрасли при поддержке финской компании Ponsse, являющейся одним из лидеров в области производства колесных лесозаготовительных машин.

С 2008 г. кафедрой заведует профессор В.А. Макуев. В 2010 г. В.А. Макуев защитил докторскую диссертацию на тему «Научно-методологические основы формирования парка лесосечных машин предприятия».

В это время кафедра активно занималась научными исследованиями в области повышения долговечности ходовых систем гусеничных лесозаготовительных машин и оценки нагруженности элементов трансмиссии машин лесного комплекса. Велась активная патентная и публикационная работа, развивалось студенческое научное общество.

В.А. Макуев и сотрудники Брянского государственного инженерно-технологического университета издали два учебных пособия — «Технология и оборудование лесозаготовок» и «Оборудование для трелевки леса» (2014). Е.Е. Клубничкин совместно с Государственным научным центром лесопромышленного комплекса (ФГУП «ГНЦ ЛПК») написал двухтомник «Многооперационные лесные машины». Книги издавались и в смежных областях. А.Ф. Алябьев выпустил монографию «Обоснование технологических комплексов машин для лесовосстановления» (2011).

В.Е. Клубничкин с 2011 г. совместно с ПАО «ПК «Промтрактор» концерна «Тракторные заводы» провел серию исследований по оценке нагруженности элементов трансмиссии лесозаготовительных машин, широко применяя современные прикладные пакеты компьютерных программ.

Молодые ученые кафедры Е.Е. Клубничкин и В.Е. Клубничкин стали лауреатами всероссийского конкурса «Инженер года — 2012».

Большая работа проводилась по совершенствованию учебного процесса. Сотрудники кафедры В.А. Макуев и А.В. Ерхов принимали активное участие в работе Межвузовской учебно-методической комиссии по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», направленность «Машины и



**В.А. Макуев**

д-р. техн. наук, профессор, директор Института подготовки специалистов без отрыва от производства (ИПСОП), член-корреспондент РАЕН, зав. кафедрой (2008–2016)

оборудование лесного комплекса» и руководили работой данной комиссии.

В 2016 г. после объединения Московского государственного университета леса с Московским государственным техническим университетом имени Н.Э. Баумана кафедра колесных и гусеничных машин стала секцией кафедры СМ-10 «Колесные машины» (факультет «Специальное машиностроение»).

В 2018 г. секция кафедры СМ-10 «Колесные машины» и секция кафедры РК-1 «Инженерная графика» (факультет «Робототехника и комплексная автоматизация») были объединены, и кафедра получила новое название: ЛТ-7 «Транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса» (факультет «Лесное хозяйство, лесопромышленные технологии и садово-парковое строительство») Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана. Кафедру возглавил Г.О. Котиев, профессор, д-р техн. наук, заслуженный деятель науки РФ. Начался новый этап в жизни кафедры!

В период 2016–2018 гг. на кафедре было открыто два новых направления подготовки: магистратура направления подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование», направленность «Колесные и гусеничные машины лесного комплекса»; бакалавриат направления подготовки 23.03.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы», направленность «Автомобиле- и тракторостроение».



**Г.О. Котиев**

д-р. техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, зав. кафедрой (с 2016 г. по настоящее время)

На 2023 г. профессорско-преподавательский состав кафедры насчитывал 19 человек, в частности: зав. кафедрой Г.О. Котиев, профессора А.Ф. Алябьев, В.Г. Дыгало, В.А. Макуев, В.С. Макаров, доценты Д.В. Акинин, Л.Д. Бухтояров, И.М. Дмитриева, В.Е. Клубничкин, Е.Е. Клубничкин, А.П. Чувашев, старшие преподаватели И.А. Анিকেев, Г.А. Бычков, К.В. Васильева, ассистенты П.С. Елисеев, И.В. Козлов, Д.Р. Лебедев, Д.А. Левин, Д.И. Рогачев.

За последние пять лет материально-техническая база кафедры ЛТ-7 существенно обновилась и расширилась. Появились новые образцы колесных и гусеничных машин, включая перспективные робототехнические комплексы, стенды и измерительное оборудование. На территории Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана создан полигон кафедры ЛТ-7 для проведения лабораторных работ и научно-исследовательской деятельности.

Лаборатория (зав. лабораторией Д.Н. Рудьков) включает в себя следующие образцы лесной техники: квадроциклы; снегоходы; гусеничный трелевочный трактор ТБ-1М; колесную машину МЗКТ 6×6; гусеничную машину ЗВМ; многоцелевой гусеничный транспортер-тягач легкий бронированный; колесный трактор «Вепрь»; узлы и агрегаты трансмиссий, ходовых систем современных колесных и гусеничных машин; стенды, а также

современные высокоточный измерительный прибор Racelogic и цифровая лаборатория с передовыми технологиями Z-lab для проведения практических работ и научных исследований. Развивается направление в области робототехнических комплексов и беспилотных систем

На кафедре созданы три специализированных компьютерных класса с современным оборудованием и лицензионным программным обеспечением для проектирования и моделирования систем транспортно-технологических машин.

Налажено сотрудничество с профильными предприятиями ведущих российских брендов, в частности: Концерном «Тракторные заводы»; ПАО «КАМАЗ»; «Группа ГАЗ»; АО «Русская механика»; UMG; АО «Мытищинский машиностроительный завод»; АЗ «УРАЛ»; ФГУП НАМИ; АО «Концерн Уралвагонзавод» и др.

Кафедра активно принимала участие в следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах:

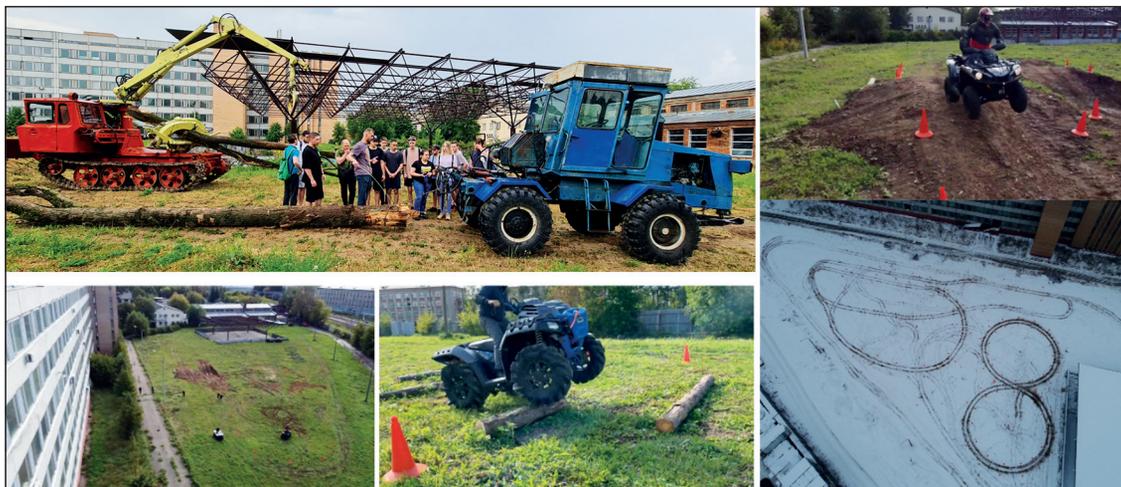
– «Разработка модельного ряда снегоходной мототехники для повышения транспортной доступности населения Арктической зоны РФ» (сроки выполнения 2017–2020 гг.);

– «Создание производства многофункциональных энергоэффективных и экологически безопасных лесных машин путем использования цифровых технологий в лесозаготовительных операциях» (сроки выполнения 2019–2022 гг.).

В рамках проекта была разработана валочно-сучкорезно-раскряжевочная машина (ВСРМ) и погрузочно-транспортная машина (ПТМ). Данный комплекс машин разрабатывался совместно с индустриальным партнером ПАО «КАМАЗ». В 2022 г. машины были представлены в рамках рабочего визита в Республику Татарстан первому заместителю председателя Правительства РФ Министру промышленности и торговли Российской Федерации Денису Мантурову и главе республики Рустаму Минниханову.

– «Создание высокотехнологичного производства многофункционального транспортно-технологического комплекса машин для устойчивого использования и воспроизводства лесных ресурсов Российской Федерации с применением цифровых технологий» (сроки выполнения 2021–2023 гг.);

– Выполнение научно-исследовательских работ по проведению приемочных испытаний погрузочно-транспортной машины на базе гусеничной платформы с электромеханической трансмиссией» (2019–2021 гг.).



Полигон кафедры



Снегоход и квадроциклы с электромеханической трансмиссией



*a*



*b*



*c*



*d*

Комплекс машин, предназначенных для сортиментной заготовки древесины:  
*a* — компьютерная модель ВСПМ; *b* — компьютерная модель ПТМ;  
*c* — опытный образец ВСПМ; *d* — опытный образец ПТМ



Памятная фотография на день кафедры ЛТ-7 (09 сентября 2023 г.)

Преподаватели и студенты кафедры ЛТ-7 постоянно принимают участие и организуют научные мероприятия, конференции и выставки в Мытищинском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана и за его пределами.

Ежегодно во вторую субботу сентября празднуется день кафедры ЛТ-7 «Транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса».

Для кафедры 2023 г. стал юбилейным!

Кафедре исполнилось 80 лет!

9 сентября 2023 г. на территории Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана в лаборатории и на полигоне прошли праздничные мероприятия, в которых приняли участие руководство, студенты и сотрудники, а также преподаватели родственных кафедр — СМ-10 «Колесные машины», СМ-9 «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы», представители НОЦ «КАМАЗ-БАУМАН», ИЦ «Липгарт», НОЦ «Ростсельмаш», НИИ

«Специальное машиностроение», Нижегородского государственного технического университета имени Р.Е. Алексеева, Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова.

Для участников мероприятия была организована экскурсия в лабораторию, представлена историческая справка о кафедре ЛТ-7 в честь ее 80-летнего юбилея, а также продемонстрированы образцы современных колесных и гусеничных машин. Все получили положительные эмоции и хорошие впечатления.

Не останавливаясь на достигнутых результатах, руководство и коллектив кафедры направляет весь интеллектуальный и творческий потенциал на решение важнейших задач в области транспортно-технологических средств и оборудования лесного комплекса. Главные открытия впереди!

С днем рождения, кафедра ЛТ-7!

*Г.О. Котиев, д-р техн. наук, профессор  
В.Е. Клубничкин, канд. техн. наук, доцент  
В.А. Макуев, д-р техн. наук, профессор*

## БАЗОВОЕ ШАССИ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ДОСТАВКИ ОБОРУДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ЛАНДШАФТНЫХ ПОЖАРОВ

Е.Е. Баженов<sup>1✉</sup>, В.В. Илюшин<sup>2</sup>, В.В. Крудышев<sup>1</sup>, Н.В. Хабибуллина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (Уральский институт ГПС МЧС России), Россия, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), Россия, 620100, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37

st194@yandex.ru

На основе анализа существующей процедуры контроля и технологии борьбы с ландшафтными пожарами предложено техническое обеспечение первичного звена предотвращения и ликвидации ландшафтных пожаров. Установлено, что проведенная в нашей стране в начале века реформа лесного хозяйства привела к отсутствию эффективной борьбы с ландшафтными пожарами. Обоснована необходимость изменения структуры первичного звена борьбы с ландшафтными пожарами и оснащение ее специальной многофункциональной техникой. Показано, что одним из основных звеньев в этой работе является создание универсальной технической базы, позволяющей доставлять пожарное технологическое оборудование к месту возникновения чрезвычайной ситуации. В работе предложено концептуальное решение универсального базового шасси и приведен обобщенный подход к расчету несущей системы кузова отдельной секции базового шасси. Показано, что в качестве базового шасси целесообразно использовать сочлененную схему с одним энергетическим модулем и комплекса прицепных активных модулей, несущих специализированное технологическое оборудование пожаротушения.

**Ключевые слова:** ландшафтный пожар, лесной фонд, базовое шасси, сочлененная транспортная система, машина высокой проходимости

**Ссылка для цитирования:** Баженов Е.Е., Илюшин В.В., Крудышев В.В., Хабибуллина Н.В. Базовое шасси для оперативной доставки оборудования и материалов при ликвидации ландшафтных пожаров // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 16–37. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-16-37

Характерной особенностью Российской Федерации является значительное количество территорий, прилегающих к населенным пунктам со слаборазвитыми инфраструктурой, дорожной сетью и связью, удаленных от районных центров. Широкий спектр источников чрезвычайных ситуаций природного, техногенного, биолого-социального и военного характера, а также сложившиеся особенности социально-экономического развития обусловили наличие всего комплекса рисков возникновения аварий и стихийных бедствий.

Одна из проблем современности — исчезновение лесов [1]. Экологические проблемы, губительно сказывающиеся на лесах, можно подразделить на две большие группы: природные и антропогенные. В зависимости от причин возникновения в равной степени к обеим группам относятся лесные пожары. От возникающих возгораний в лесных экосистемах уничтожаются миллионы тонн органических

веществ, что ведет к увеличению популяций дереворазрушающих грибов и вредных насекомых, исчезновению ягод и грибов, и, как следствие, к развитию водной эрозии почв.

Национальный центр управления в кризисных ситуациях МЧС России ежегодно фиксирует ландшафтные пожары во всех федеральных округах. Пожары распространяются на значительных площадях, в связи с чем в некоторых случаях вводится режим чрезвычайной ситуации [2]. Нередки случаи, когда вследствие установления жаркой ветреной погоды процесс горения распространялся на военные объекты и жилую застройку. Такая же опасность существует и в арктических зонах Российской Федерации, где расположены нефте- и газодобывающие предприятия, представляющие собой источники повышенной опасности для возникновения техногенных аварий. Учитывая специфическую природу тундры, ущерб от таких катастроф ведет к невозможности поражению экологии и значительному материальному ущербу.

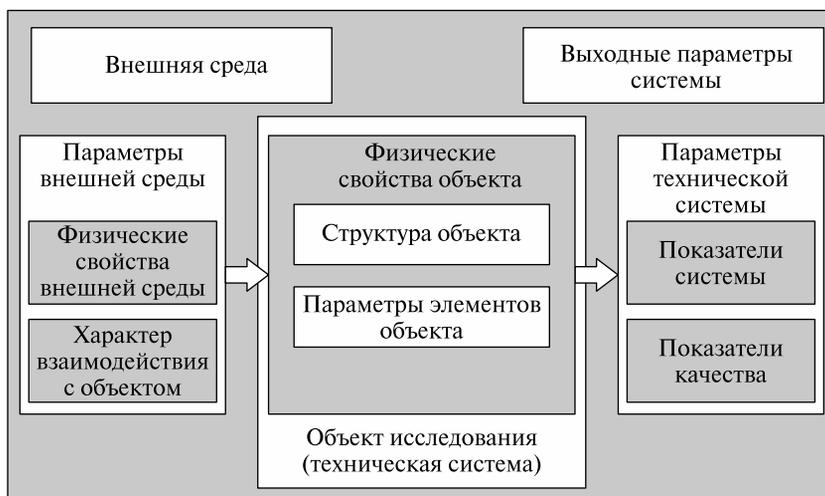


Рис. 1. Схема технической системы и ее связи с внешней средой

Перевод системы борьбы с ландшафтными пожарами на более эффективный уровень позволит обеспечить сохранность биосистемы и уменьшить экономические и людские потери, обусловленные пожарами.

## Цель работы

Цель работы — концептуальное решение технического обеспечения первичного звена предотвращения и ликвидации ландшафтных пожаров.

## Материалы и методы

Обоснование общего компоновочного решения технической системы предусматривает несколько этапов, включающих в себя прежде всего определение назначения и условий, в которых ей предстоит функционировать. Знание условий позволит предусмотреть наиболее экстремальные ситуации, которые могут возникнуть при ее эксплуатации, и обеспечит данными об источниках внешних сил. Схема технической системы представлена на рис. 1.

Рассмотрение и анализ сложных технических систем предусматривает их декомпозицию или рекомпозицию, масштаб которых зависит от решаемых задач. Поставленные задачи наиболее эффективно решаются с помощью методологии системного анализа.

**Ландшафтные пожары.** На протяжении длительного времени площадь, пройденная огнем в лесах, превышает сотни тысяч гектаров, а в особо сложные пожароопасные периоды этот

показатель может исчисляться и в миллионах гектаров. По мнению некоторых специалистов в области метеорологии возникновение чрезвычайной пожарной опасности в лесах центральных районов РФ наблюдается примерно один раз в 20 лет и сопровождается возникновением множественных очагов природных пожаров. Так в 1972 г. смог от горящих торфяников распространился на регион Москвы и ситуация с природными пожарами была признана критической. Причем ни один населенный пункт реально не пострадал от распространения природных пожаров благодаря слаженным действиям Федерального агентства лесного хозяйства, ее лесопожарных подразделений и отрядов гражданской обороны. Кроме того, деятельность лесных хозяйств по проведению превентивных мероприятий и очистке лесных массивов была весьма эффективной и охватывала большую часть всех лесов страны.

Проведенная в начале XXI в. реформа Федерального агентства лесного хозяйства негативно повлияла на эффективность надзора — он резко снизился, как и проведение административно-лесохозяйственных мероприятий в лесном фонде. Как следствие, повысилась пожароопасность. Участились случаи частичного или полного выгорания населенных пунктов. Кроме того, обострилась обстановка с лесными пожарами. Это связано с чередой переподчинений, урезанием централизованных контрольных функций и прав законотворческой инициативы, основные полномочия по управлению лесами были переданы территориальным органам Рослесхоза в федеральных округах. Все это значительно ослабило систему охраны лесов от пожаров, функционировавшую на протяжении

## Число лесных пожаров в Российской Федерации (2006–2022 гг.)

Год	ЦФО	СЗФО	ЮФО	СКФО	ПФО	УФО	СФО	ДФО	Всего
2006	4017	6996	305	74	3673	7273	8577	1609	32 524
2007	3129	1028	382	73	1664	1990	7822	1724	17 812
2008	2984	1283	183	58	2230	8544	8920	2083	26 285
2009	4337	1140	194	43	3771	5653	5851	2256	23 245
2010	7111	2179	170	69	8183	10304	5514	1282	34 812
2011	1288	2389	144	32	891	4411	8750	1838	19 743
2012	276	522	50	23	653	7078	8588	2139	19 329
2013	244	1906	21	10	805	2718	3222	1065	9991
2014	1189	1869	52	11	923	1943	8531	2347	16 865
2015	582	845	115	24	787	1415	3853	4716	12 337
2016	266	870	152	3	718	2541	3627	2848	11 025
2017	108	457	198	17	358	1948	3852	3984	10 922
2018	615	1542	217	4	1039	2079	3103	3526	12 125
2019	716	799	223	27	743	1463	4549	5082	13 602
2020	795	760	382	40	1039	2409	3996	5391	14 812
2021	570	1430	118	6	1954	4661	2807	3566	15 112
2022	740	980	100	5	603	2654	4180	3266	12 528

Примечание. ЦФО — Центральный федеральный округ; СЗФО — Северо-Западный федеральный округ; ЮФО — Южный федеральный округ; СКФО — Северо-Кавказский федеральный округ; ПФО — Приволжский федеральный округ; УФО — Уральский федеральный округ; СФО — Сибирский федеральный округ; ДФО — Дальневосточный федеральный округ.

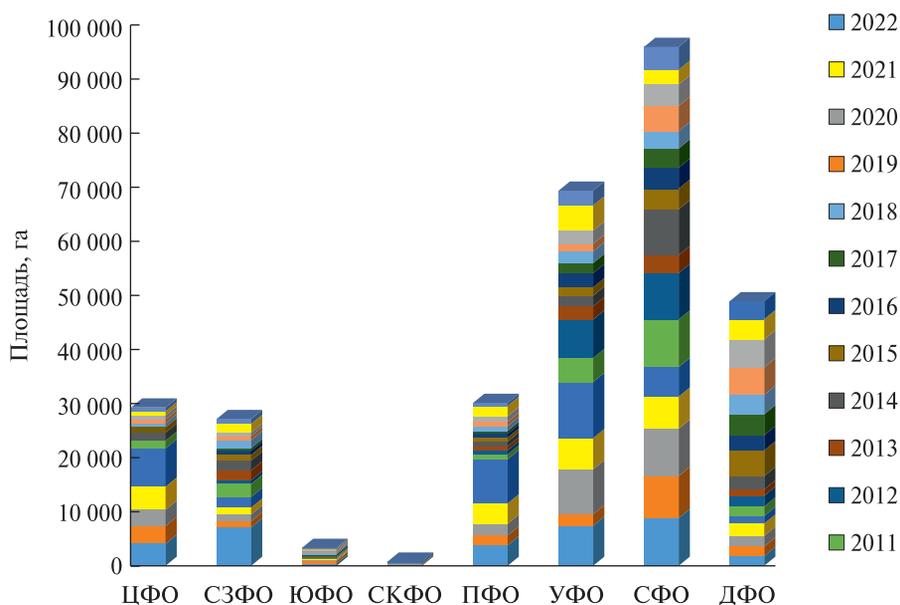


Рис. 2. Распределение лесных пожаров по федеральным округам

нескольких десятилетий, и, как следствие, к снижению эффективности тушения крупных лесных пожаров, особенно на ранней стадии их развития [3].

Случаи переходов ландшафтных пожаров на опасные объекты в значительной степени

можно объяснить недостатками применяемых способов пожаротушения, которые не обеспечивают достижение высоких показателей эффективности. К одним из таких недостатков относится отсутствие на вооружении пожарно-спасательных частей МЧС России образцов

специальной аварийно-спасательной техники на базе шасси высокой проходимости.

Не на пользу лесным отношениям пришлось и принятие Лесного кодекса Российской Федерации в 2006 г. — лесная служба лишилась лесной охраны (на тот момент более 70 тыс. лесников), были ликвидированы лесхозы, в многолесных районах — единая авиационная охрана и самолетный парк, в районах же, где преобладает наземная система наблюдения — пожарно-химические станции. В результате ежедневный облет и обход в пожароопасный период были полностью прекращены. Печальным итогом состоявшихся преобразований стало увеличение природных пожаров. Наиболее сложные ситуации пришлось на 2010 и 2022 годы.

По информации, полученной ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны» (ВНИИПО) МЧС России, были приведены данные (таблица, рис. 2) по числу лесных пожаров на территории Российской Федерации в целом и по федеральным округам за период с 2006 по 2022 гг. [4–8].

Из рис. 2 видно, что Сибирский (СФО) и Уральский федеральные округа (УФО) занимают лидирующие позиции по количеству лесных пожаров.

С 2022 г. Указом Президента Российской Федерации введены целевые показатели сокращения площадей лесных пожаров. Для исполнения Указа была разработана и утверждена методика расчета целевых показателей ежегодного сокращения площади лесных пожаров на землях лесного фонда. В соответствии с методикой, в 2022 г. все субъекты РФ были распределены (градация проходила по площади, пройденной огнем на землях лесного фонда России в 2021 г.) на две группы.

К первой группе были отнесены регионы с показателями более 95 % средней за пять лет площади, пройденной огнем на землях лесного фонда России. В эту группу вошли 12 регионов: Республики Бурятия, Саха-Якутия, Забайкальский, Камчатский, Чукотский, Красноярский, Приморский, Хабаровский края, Амурская, Иркутская, Магаданская области и Еврейская автономная область.

Во вторую группу вошли регионы, в которых отмечено значительное снижение данного показателя. По сравнению с аналогичным периодом 2023 г., Свердловская область наравне с Республикой Карелия и Республикой Башкортостан была отнесена ко второй группе [9].

Приведенные показатели являются, скорее, констатацией фактов и с наступлением очередного пожароопасного сезона картина может

измениться достаточно динамично и будет кардинально отличаться от долгосрочных прогнозов и средних многолетних значений. В подтверждение приведенных соображений можно обратиться к показателям из сводок оперативной обстановки, сложившейся на территории Свердловской области, за период с 24 апреля по 15 мая 2023 г.

В первом полугодии 2023 г. в Свердловской и Курганской областях вводился режим ЧС, фиксировались случаи перехода ландшафтных пожаров на территории населенных пунктов и на военные объекты. Погибли более 20 чел. В поселке Первомайском Режевского городского округа Свердловской области 6 мая 2023 г. загорелись склады с порохом, местные жители получили сообщения об эвакуации и возможности взрыва. В районе был введен режим ЧС и проведена спецоперация «Тайфун». На некоторых участках аварийно-спасательная техника не могла добраться до мест тушения пожаров и источников воды в связи с отсутствием у техники транспортных шасси высокой проходимости.

Отсюда напрашивается вывод о том, что меньше чем за один месяц (при увеличении общего количества пожаров в 3,5 раза) площадь пожаров значительно увеличилась, а именно в 133,3 раза [10].

В соответствии с действующим законодательством РФ в задачи МЧС России не включено тушение природных пожаров. Вместе с тем в случаях, когда природный пожар создает угрозу перехода огня на населенные пункты и объекты экономики, силы и средства ГПС МЧС России в соответствии с закрепленными задачами и полномочиями осуществляют комплекс мероприятий по защите строений от перехода на них огня [11].

При необходимости тушения лесных пожаров на территориях муниципальных образований либо в лесах, находящихся за пределами населенных пунктов, но в границах муниципального образования, привлечение сил и средств ФБУ «Авиалесоохрана» осуществляется на договорной основе за счет средств бюджета муниципального образования и бюджета субъекта Российской Федерации. Министерство природных ресурсов и экологии Свердловской области объединяет лесничества, возглавляют которые лица, ответственные за тушение лесных пожаров в их зоне ответственности, однако лесничества не обеспечены средствами и приспособлениями для тушения лесных пожаров. Единственной доступной им функцией в рамках превентивных мероприятий остается проведение надзорно-профилактических мер.

Важно, что Авиалесоохрана оперативно подчиняется Министерству природных ресурсов

и экологии Российской Федерации в части, касающейся тушения лесных пожаров на землях государственного лесного фонда, и в прямом подчинении у территориального органа Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоза) в федеральном округе.

Ущерб, причиняемый лесными пожарами, достаточно велик, и в первую очередь он сказывается на лесных экосистемах, поэтому с возгораниями очень важно бороться до выполнения полного комплекса превентивных мероприятий, определенных законодательством РФ, причем заблаговременно, до начала пожароопасного периода [12].

По данным Рослесхоза сумма ущерба, нанесенного лесными пожарами в 2021 г. на землях лесного фонда на территории Российской Федерации, составила 8 387,1 млн руб., из них 4 856,6 млн руб. (58 %) приходится на УФО и ДФО [13]. Указанный ущерб включает в себя показатели потерь древесины, гибели молодняка, сгоревшей и поврежденной продукции и эквивалентных им денежных сумм, однако не учитывает расходы на тушение лесных пожаров, на работы по расчистке и восстановлению сгоревшей местности, а также убытки от гибели животных.

Важнейшее значение в профилактике лесных пожаров, изучении их природы и закономерностей протекания имеют работы российских ученых, в частности С.В. Залесова, А.А. Кректунова, И.М. Секерина, А.Х. Гасановой, А.С. Евдокимова, М.А. Казаченко и др. [14–19].

Система обеспечения тушения ландшафтных пожаров на низшем уровне, т. е. на предприятиях добывающих отраслей экономики, предусматривает наличие ограниченного числа технологических элементов для ликвидации очагов возгорания. Так, на лесозаготовительных предприятиях и в лесхозах имеются машины, предназначенные для пожаротушения, в качестве базового шасси которых используются автомобили марок «КамАЗ», «Урал» и бывшие на вооружении войск химической и бактериологической защиты авторазливочные станции (АРС) на базе автомобилей «ЗИЛ-131», переделанные в пожарные автомобили. Все они относятся к автомобилям повышенной проходимости. Они могут передвигаться по дорогам с усовершенствованным покрытием, некоторым грунтовыми дорогам и практически теряют возможность перемещаться по бездорожью с низкой несущей способностью. Очень важное значение при пожаротушении имеет время локализации очага возгорания и начала его тушения. Распространение фронта пламени, особенно при верховых пожарах в лесной зоне,

чрезвычайно высоко. Первичные звенья пожаротушения, во-первых, не могут добраться к месту возгорания, во-вторых, не обладают полным арсеналом средств для ликвидации очага и предотвращения распространения пламени. Это же характерно и в случае низовых пожаров, пожаров на торфяниках, в зонах тундры и лесотундры.

В результате анализа сложившейся в этой области ситуации можно сделать следующие выводы.

1. Ландшафтные пожары вызывают огромные потери как экономического, так и социального характера.

2. Пожароопасную ситуацию усугубили реформы лесохозяйственной отрасли и введение нового Лесного кодекса, которые привели к ликвидации лесхозов и сокращению работников леса на 70 000 чел.

3. Система борьбы с ландшафтными пожарами стала разрозненной и неэффективной.

В целях преодоления таких негативных для лесной отрасли последствий предлагается придерживаться следующих рекомендаций.

1. В сельских и прочих муниципальных образованиях необходимо создавать первичные звенья борьбы с ландшафтными пожарами, оснастить их требуемыми техническими средствами и высокоэффективным транспортом.

2. Для создания работоспособных и эффективных структур по предотвращению и ликвидации последствий ландшафтных пожаров, снижению до минимума их последствий необходимо разработать государственную программу.

При этом немаловажное значение придается современному техническому оснащению всего фронта работ в области пожаротушения.

**Техническое обеспечение подвижного состава первичного звена.** Для ликвидации развившихся пожаров зачастую требуется привлечение большого количества разнообразных ресурсов. Полноценное задействование средств тушения осложняется к тому же труднодоступностью местности и другими факторами, негативно влияющими на ход пожаротушения и эффективность применяемых методов. В связи с этим назрела острая необходимость в создании такого транспортного средства, которое обладало бы следующими свойствами [21]:

– высокой проходимостью (3-я категория пожарных машин, по работе [20]);

– возможностью одновременной перевозки нескольких видов оборудования, предназначенного для пожаротушения;

– высокой эффективностью транспортной операции (большой грузоподъемностью, высокой подвижностью, низким расходом топлива);

– возможностью одновременного использования нескольких видов оборудования в ходе ликвидации возгорания;

– минимальными затратами на содержание оборудования (т. е. техническое обслуживание и ремонт, оплату труда обслуживающего персонала и т. д.).

Таким образом, ликвидация пожаров и иных подобных чрезвычайных ситуаций сталкивается с проблемой оперативной доставки необходимого оборудования и материалов к месту их возникновения.

Проблему следует решать следующими путями:

– изменить структуру и функционал первичного звена;

– создать базовое шасси, обладающее всеми требующимися характеристиками.

На основании анализа технической системы (см. рис. 1) можно прийти к выводу, что существует только две возможности повышения эксплуатационных показателей: параметрически и структурно. Параметрический метод повышения показателей не во всех случаях позволяет добиться требуемого результата. Иногда приходится изменять структуру технической системы [22, 23].

Создание базового шасси должно идти не по традиционной компоновочной схеме, а по пути создания транспортного средства, имеющего многосекционный облик, причем одна секция — энергетическая, т. е. оснащенная силовой установкой, другие — технические, т. е. с оборудованием для различных видов работ (с цистернами, пенными установками, лестницами, бурами для закладки взрывных зарядов и т. п.). Предлагается такое компоновочное решение, как активная сочлененная транспортная система (АСТС). Данная АСТС характеризуется некоторыми преимуществами по сравнению с одиночными транспортными средствами, в частности (рис. 3):

– высокими тягово-сцепными свойствами;

– высокой приспособляемостью к рельефу в продольном направлении;

– равномерным распределением опорных реакций в продольном направлении;

– поворотом машины за счет складывания секций;

– высокими сцепными качествами движителя с опорной поверхностью;

– возможностью преодоления препятствий за счет регулируемого складывания секций в вертикальной и горизонтальной плоскостях;

– высокой степенью устойчивости положения;

– возможностью модульного принципа компоновки машины в зависимости от текущих потребностей.

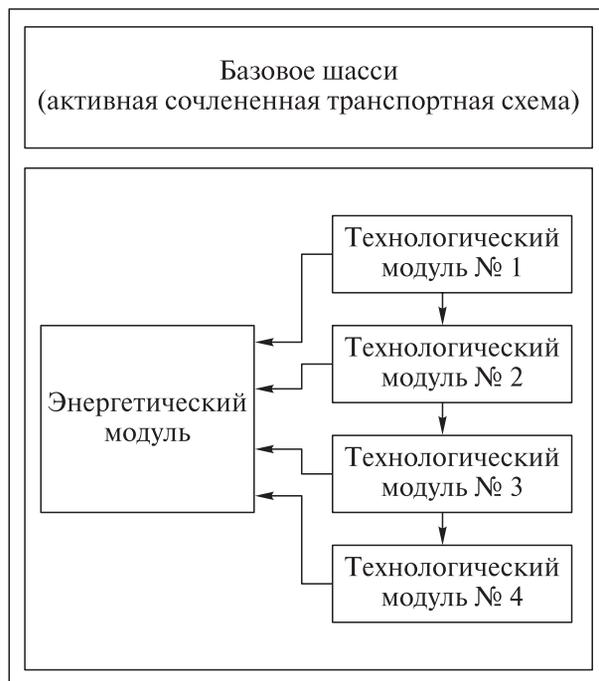


Рис. 3. Модульный принцип синтеза базового шасси

Важной особенностью базового шасси, синтезированного по модульному принципу, является возможность адаптивного управления распределением силового потока между движителями базового шасси [24, 25], т. е. возможность реализовать на движителе каждой секции тяговое усилие, соответствующее характеристикам грунта, на котором она находится, и нагрузке, приходящейся на эту секцию. В результате появляется возможность применения беспилотного проведения работ определенного вида.

**Общая функциональная схема базового шасси машины пожаротушения.** Вся транспортная система разделена на два функциональных блока (рис. 4):

1) источник внешних сил, действующих на всю активную транспортную систему, и движители прицепных секций, которые реализуют силовой поток от источника энергии для преодоления внешних сил;

2) энергетический модуль, в котором располагается источник энергии, и в зависимости от типа трансмиссии — устройство для трансформации энергии при передаче ее к рабочим органам.

Совокупность элементов находится под контролем системы измерения и управления, предназначенной для получения данных о состоянии опорной поверхности и параметрах взаимодействия с ней движителей секций и энергетического модуля [26]. Полученная информация используется для рационального рас-

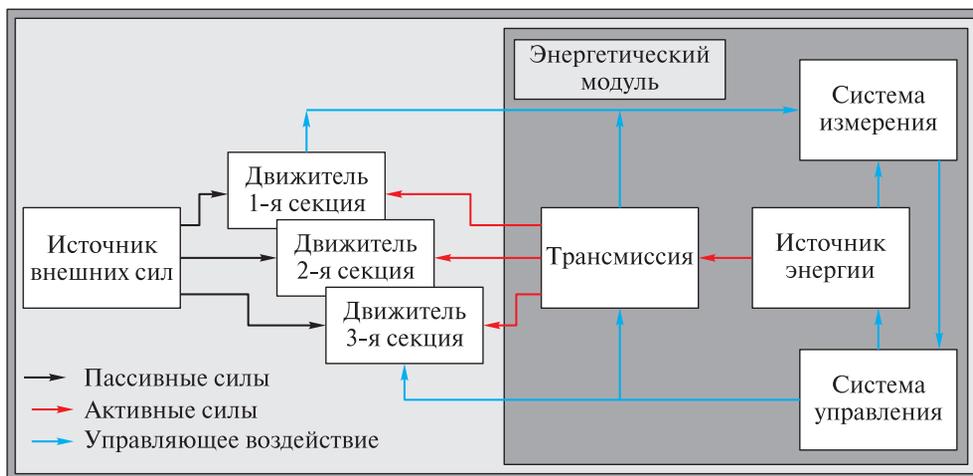


Рис. 4. Функциональная схема базового шасси (активная сочлененная транспортная система)

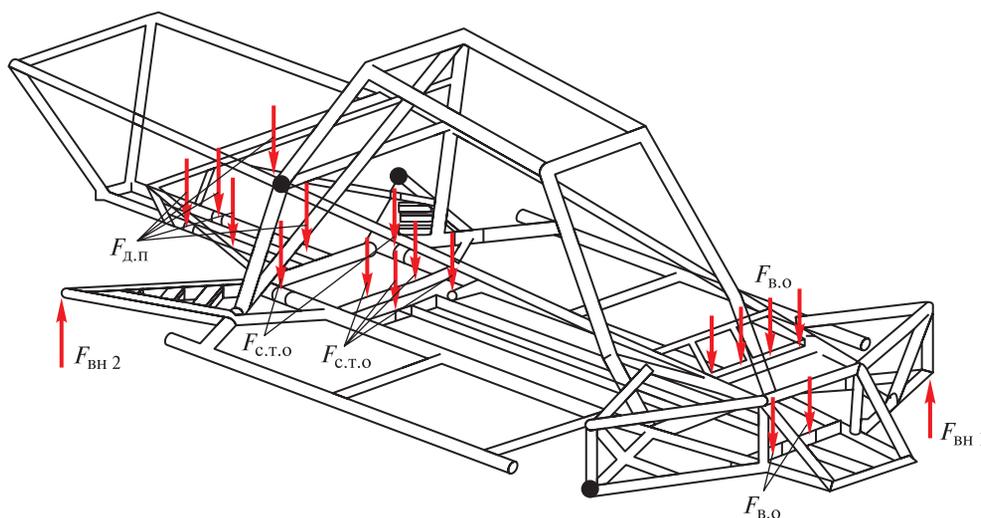


Рис. 5. Пример произвольной несущей системы пространственного типа:  $F_{д.п}$  — масса электродвигателя и привода к ведущим колесам;  $F_{с.т.о}$  — масса специального технологического оборудования;  $F_{в.о}$  — масса вспомогательного технологического оборудования

пределения силового потока между секциями в целях получения максимально возможного тягового усилия активного базового шасси в каждый конкретный момент времени [27].

**Обобщенный подход к расчету несущей системы кузова отдельного модуля машины.** Расчет может проводиться двумя путями:

1) на базе существующих (выпускаемых на отечественных предприятиях) машин высокой проходимости с адаптацией их к специфическим условиям эксплуатации;

2) с учетом новых специализированных разработок.

Принцип расчета несущей системы пространственного типа для базового шасси заключается в определении возможного спектра

и закона внешних сил, действующих на него, с последующим определением напряженно-деформированного состояния его несущей системы [28].

По результатам оценки напряженно-деформированного состояния несущая система может подлежать как локальной доработке (например, при превышении допустимых напряжений в конструкции или при значительных перемещениях ее элементов в определенных зонах, не ведущих к разрушению базового шасси), так и глобальному изменению конструкции вплоть до создания новой.

Представим несущую систему произвольного транспортного средства повышенной проходимости с действующими на нее внешними

силами ( $F_{вн i}$ ), а также массой основных элементов шасси, трансмиссии и специального технологического оборудования (рис. 5).

Аналогичным образом в схему можно ввести рабочие усилия и моменты от оборудования, закрепленного на несущей системе базового шасси.

Результатом расчета несущей системы является такой набор ее геометрических (сечения, длины, пространственного положения) и физических (характеристики материала) параметров, которые обеспечивают требуемые эксплуатационные характеристики машины [29, 31].

В качестве иллюстрации оценки распределения нагрузки по элементам и зонам несущей системы используют диаграммы (рис. 6).

Для оценки эффективности несущей системы используются удельные параметры [30, 31], в частности удельная жесткость

$$C_{уд} = \frac{C_{кр}}{M_{н.к}},$$

где  $C_{уд}$  — удельная жесткость несущей конструкции;

$C_{кр}$  — жесткость на кручение несущей конструкции;

$M_{н.к}$  — масса несущей конструкции.

В качестве энергетического модуля используется машина высокой проходимости, например снегоболотоход «Феникс» [32], а в качестве секций активного базового шасси — кузов этого же снегоболотохода без силового агрегата и с электрическим приводом на ведущие колеса. Для размещения специального технологического оборудования существующую несущую

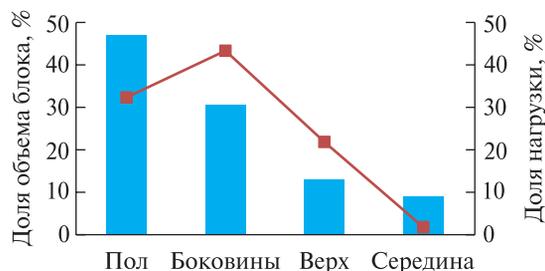


Рис. 6. Распределение нагрузки по зонам несущей системы при кручении

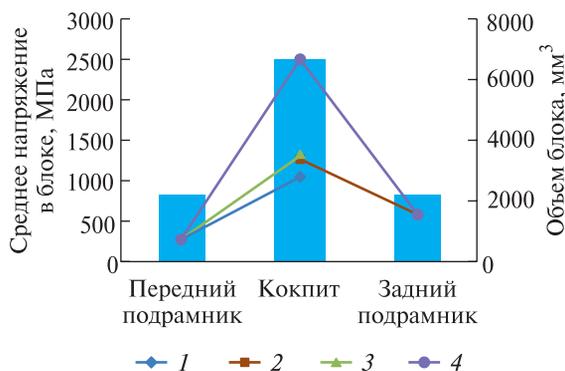


Рис. 7. Распределение нагрузки по элементам несущей системы при кручении: 1 — наезд передними колесами; 2 — наезд задними колесами; 3 — кручение; 4 — диагональ

конструкцию необходимо укрепить [33]. Для этого представим возможные варианты доработки (усиления) несущей системы (рис. 8) и сравним представленные варианты с помощью коэффициента удельной жесткости (рис. 9).

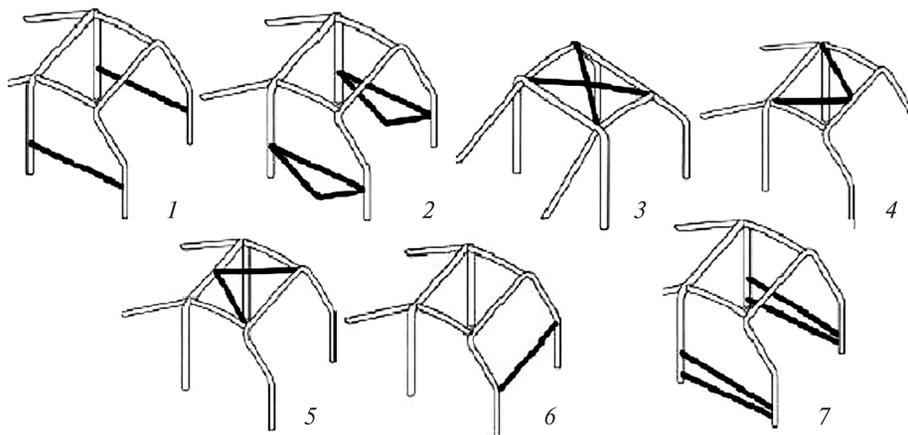


Рис. 8. Варианты усиления несущей системы произвольной машины высокой проходимости: 1 — продольные усилители; 2 — продольные с укосинами; 3 — крестообразные потолочные усилители; 4, 5 — V-образные потолочные усилители; 6 — тыловые поперечные усилители; 7 — продольные комбинированные усилители

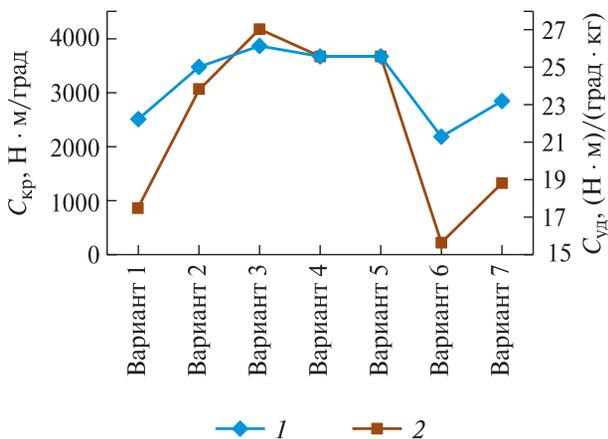


Рис. 9. Сравнение крутильной и удельной жесткости на кручение для возможных конфигураций несущей системы: 1 — крутильная; 2 — удельная

По графику сравнения крутильной и удельной жесткости можно оценить эффективность разных конфигураций несущей системы. Наиболее целесообразно для усиления верхней части кокпита кузова использовать варианты 3, 4 и 5, дающие наилучшие сочетания удельной жесткости и жесткости на кручение несущей конструкции кузова.

## Выводы

1. Анализ протекания ландшафтных пожаров и результатов борьбы с ними на территории России и в отдельных федеральных округах показал, что проведенные в начале 2000-х годов реформы, коснувшиеся лесохозяйственной отрасли, привели к разрушению существовавшей системы лесхозов, сокращению работников, что обусловило усиление пожароопасности.

2. Необходимо разработать государственную программу, согласно которой появится возможность создать работоспособные и эффективные звенья по предотвращению и ликвидации последствий ландшафтных пожаров и снизит до минимума их последствия.

3. Техническое оснащение низовых звеньев должно включать в себя перспективные универсальные транспортные средства (базовые шасси) высокой проходимости для размещения и доставки специфического противопожарного оборудования в труднодоступные участки местности.

4. Перспективное универсальное базовое шасси необходимо выполнить по сочлененной схеме. Машина должна иметь единый энергетический модуль с размещенным на нем источником энергии. Энергетический модуль комплектуется активными секциями-прице-

пами, предназначенными для размещения на них специального оборудования. Необходимое оборудование и количество активных прицепов подбирается в каждом конкретном случае, в зависимости от характера, интенсивности и динамики развития чрезвычайной ситуации.

5. Сочлененная схема базового шасси позволяет обеспечить следующие показатели:

- высокую проходимость;
- одновременную транспортировку нескольких видов оборудования для пожаротушения на активных секциях-прицепах;
- высокую эффективность транспортной операции (большую грузоподъемность, высокую подвижность, низкий расход топлива);
- одновременное использование нескольких видов оборудования для пожаротушения в процессе ликвидации возгорания;
- минимальные затраты на содержание (техническое обслуживание, ремонт, оплату труда обслуживающего персонала, расход топлива при транспортировке к месту возникновения чрезвычайной ситуации).

Таким образом, предлагаемое решение базового шасси позволяет изменить структуру первичного звена и обеспечить оперативную доставку необходимого спасательного оборудования к месту возникновения чрезвычайных ситуаций.

## Список литературы

- [1] Антропогенный фактор и экологические проблемы. URL: <https://helpiks.org/5-36649.html> (дата обращения 20.10.2023).
- [2] Боярова Д.А. Проблемы охраны лесного фонда от пожаров // Актуальные проблемы агропромышленного комплекса: сб. тр. науч.-практ. конф. преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов Новосибирского ГАУ, Новосибирск, 20 октября 2023 года. Новосибирск: Издательский центр Новосибирского государственного аграрного университета «Золотой колос», 2023. С. 113–116.
- [3] Исаев А.С. Лес как национальное достояние России // Век глобализации, 2011. № 1. С. 148–158.
- [4] Пожары и пожарная безопасность в 2010 году: статистический сборник / под ред. В.И. Климкина. М.: Изд-во ВНИИПО, 2011. 140 с.
- [5] Пожары и пожарная безопасность в 2014 году: статистический сборник / под ред. А.В. Матюшина. М.: Изд-во ВНИИПО, 2015. 124 с.
- [6] Пожары и пожарная безопасность в 2015 году: статистический сборник / под ред. А.В. Матюшина. М.: Изд-во ВНИИПО, 2016. 124 с.
- [7] Пожары и пожарная безопасность в 2018 году: статистический сборник / под ред. Д.М. Гордиенко. М.: Изд-во ВНИИПО, 2019. 125 с.
- [8] Пожары и пожарная безопасность в 2022 году: информ.-аналитич. сб. Балашиха: Изд-во ВНИИПО, 2023. 80 с.

- [9] Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: [https://www.mnr.gov.ru/press/news/v\\_2022\\_godu\\_ploshchad\\_lesnykh\\_pozharov\\_v\\_rossii\\_sokrashchena\\_pochti\\_v\\_tri\\_raza\\_do\\_3\\_5\\_milliona\\_gekta/?ysclid=lo5p4nbjuc667483750](https://www.mnr.gov.ru/press/news/v_2022_godu_ploshchad_lesnykh_pozharov_v_rossii_sokrashchena_pochti_v_tri_raza_do_3_5_milliona_gekta/?ysclid=lo5p4nbjuc667483750) (дата обращения 02.11.2023).
- [10] Хабибуллина Н.В., Лазарев И.С., Крудышев В.В. Роль биологической продуктивности естественных темнохвойных насаждений кедра сибирского и ельников на Среднем Урале в оценке ущерба от пожаров. Екатеринбург: Изд-во Уральского института ГПС МЧС России, 2018. 162 с.
- [11] Колесников А.А., Ляшенко С.М. К вопросу совершенствования нормативных правовых актов по реагированию на природные пожары в субъектах Российской Федерации // Приоритетные направления развития системы обеспечения техносферной и пожарной безопасности объектов защиты и территорий: Сб. тр. III Междунар. науч.-практ. конф., Химки, 26–27 мая 2022 года. Химки: Изд-во Академии гражданской защиты МЧС России, 2022. С. 122–127.
- [12] Талалаева Г.В., Логинов А.С. Некоторые особенности лесных пожаров в связи с глобальным потеплением климата // Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной Всемирному дню гражданской обороны в Год 90-летия со дня образования Академии ГПС МЧС России. В 5 ч., Москва, 01 марта 2023 года / сост. В.С. Бутко, М.В. Алешков, С.В. Подкосов, А.Г. Заворотный. Ч. III. Москва: Изд-во Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, 2023. С. 220–226.
- [13] Кректунов А.А., Васьяков Я.Н., Ерицов А.М., Секерин И.М. Охрана населенных пунктов, подверженных угрозе лесных пожаров, органами государственного пожарного надзора ФПС МЧС России // Леса России и хозяйство в них, 2022. № 2(81). С. 11–18. DOI 10.51318/FRET.2022.83.31.002
- [14] Кректунов А.А., Ерицов А.М., Залесов С.В., Секерин И.М. Прогноз развития лесного пожара в зависимости от расстояния до населенного пункта // Международный научно-исследовательский журнал, 2022. № 7–2(121). С. 167–172. DOI 10.23670/IRJ.2022.121.7.069
- [15] Секерин И.М., Годовалов Г.А., Ерицов А.М., Залесов С.В. Специфика распространения и тушения торфяных пожаров в зимний период // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2022. Т. 26. № 5. С. 64–70. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-64-70
- [16] Гасанова А.Х. Противопожарная пропаганда как один из способов обеспечения пожарной безопасности // Инициативы молодых — науке и производству: Сб. статей IV Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых и студентов, Пенза, 30 ноября 2022 года / под ред. А.В. Носова. Пенза: Изд-во Пензенского государственного аграрного университета, 2022. С. 121–125.
- [17] Евдокимов А.С. Органы местного самоуправления и пожарная безопасность: историко-правовой аспект // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., Саратов, 21–22 апреля 2021 года. Саратов: Амирит, 2021. С. 299–303.
- [18] Ивченко О.А., Тютин А.В., Козаченко М.А., Панкин К.Е. Влияние погодных условий на возникновение и развитие лесных пожаров в Саратовской области // Техногенная и природная безопасность: Материалы VI Всерос. науч.-практ. конф. Саратов, 27–28 октября 2021 года. Саратов: Изд-во Центра социальных агроинноваций СГАУ, 2021. С. 295–301.
- [19] ГОСТ Р 58715–2019. Техника пожарная. Специальные пожарные автомобили. Общие технические требования. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2020. С. 20.
- [20] Баженов Е.Е. Сочлененные транспортные и технологические системы. Екатеринбург: Изд-во УГТУ–УПИ, 2009. 174 с.
- [21] Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. Минск: ДизайнПро, 2004. 640 с.
- [22] Баженов Е.Е. Сочлененные транспортные системы: теоретические основы. LAMBERT Academic publishing, 2012. 276 с.
- [23] Богданов К.Л. Тяговый электропривод автомобиля. М.: МАДИ, 2009. 57 с.
- [24] Антонов А.С. Силовые передачи колесных и гусеничных машин. Теория и расчет. М.: Машиностроение, 1976. 209 с.
- [25] Тарасик В.П., Рынкевич С.А. Интеллектуальные системы управления автотранспортными средствами. Минск: Технопринт, 2004. 512 с.
- [26] Тарасик В.П., Рынкевич С.А. Интеллектуальная адаптивная система управления энергетическими режимами автомобиля // Наука — образованию, производству, экономике: Материалы Междунар. науч. конф. / под ред. Б.М. Хрусталева, В.П. Соломахо. Минск: Технопринт, 2003. Т. 1. С. 269–274.
- [27] Вихров А.В. Несущие системы транспортных средств специального назначения. М.: МАДИ, 2015. 111 с.
- [28] Хрунь В.М., Акопян Р.А. Особенности динамики нагружения несущих систем автобусов // Исследование и расчет конструкций и эксплуатационной надежности автобусов. Львов: Изд-во ВКЭИ Автобуспром, 1978. С. 3–20.
- [29] Русанов О.А. Расчетный анализ напряженного состояния и оценка прочности несущих систем тракторов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2009. 347 с.
- [30] Кириллов А.П. Методика оценки напряженно-деформированного состояния и оптимизации деталей кузова легкового автомобиля с целью снижения их массы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1987. С. 16.
- [31] Гладов Г.И., Петренко А.М. Специальные транспортные средства: теория / под ред. Г.И. Гладова. М.: Академкнига, 2006. 215 с.
- [32] Снегоболотоходы «Феникс». URL: <https://вездеход-феникс.рф/> (дата обращения 02.11.2023).
- [33] Ловцов А.Д., Иванов Н.А. Проектирование и расчет рамы легкого колесного вездехода с использованием метода конечных элементов // Вестник ТОГУ: Машиностроение и машиноведение, 2013. № 3 (30). С. 85–90.

## Сведения об авторах

**Баженов Евгений Евгеньевич** <sup>✉</sup> — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных средств, ФГБОУ ВО «Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (Уральский институт ГПС МЧС России), st194@yandex.ru

**Илюшин Владимир Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры технологических машин и технологии машиностроения, ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет» (УГЛТУ), vv\_asp@mail.ru

**Крудышев Владимир Валерьевич** — канд. с.-х. наук, доцент, начальник кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и специальных средств, ФГБОУ ВО «Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (Уральский институт ГПС МЧС России) krudishev@gmail.com

**Хабибуллина Наталия Валерьевна** — канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр. отделения планирования, организации и координации научных исследований научно-исследовательского отдела, ФГБОУ ВО «Уральский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» (Уральский институт ГПС МЧС России), natys9i@mail.ru

Поступила в редакцию 22.11.2023.

Одобрено после рецензирования 13.09.2024.

Принята к публикации 14.11.2024.

# CARRIER VEHICLE FOR RAPID DELIVERY OF EQUIPMENT AND MATERIALS FOR LANDSCAPE FIREFIGHTING OPERATIONS

E.E. Bazhenov<sup>1</sup>✉, V.V. Ilyushin<sup>2</sup>, V.V. Krudyshev<sup>2</sup>, N.V. Khabibullina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ural Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 22, Mira st., 620062, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Ural State Forestry Engineering University, 37, Sibirskiy trakt st., 620062, Yekaterinburg, Russia

st194@yandex.ru

Based on the analysis of the existing control procedure and technology of landscape fire control, the technical support of the primary link of prevention and elimination of landscape fires is proposed. It is established that the forestry reform carried out in our country at the beginning of the century has led to the lack of an effective landscape firefighting. The necessity of changing the structure of the primary link of landscape firefighting and equipping it with special multifunctional equipment has been substantiated. It is shown that one of the main links in this work is the creation of a universal technical base that allows to deliver firefighting equipment to the place of emergency. The paper proposes a conceptual solution of the universal carrier vehicle and provides a generalised approach to the calculation of the system carriers of the body of a separate section of the carrier vehicle. It is shown that as a carrier vehicle it is advisable to use an articulated scheme with one power module and a set of trailed active modules carrying specialised technological firefighting equipment.

**Keywords:** landscape fire, forest fund, carrier vehicle, articulated transport system, high-mobility vehicle

**Suggested citation:** Bazhenov E.E., Ilyushin V.V., Krudyshev V.V., Khabibullina N.V. *Bazovoe shassi dlya operativnoy dostavki oborudovaniya i materialov pri likvidatsii landshaftnykh pozharov* [Carrier vehicle for rapid delivery of equipment and materials for landscape firefighting operations]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 16–37. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-16-37

A characteristic feature of the regions of the Russian Federation is a significant number of territories adjacent to settlements with poorly developed infrastructure, road network and communications, remote from district centers. A wide range of sources of natural, man-made, biological, social and military emergencies, the prevailing features of socio-economic development have caused almost the entire range of risks of accidents and natural disasters.

One of the problems of our time is the disappearance of forests [1]. Environmental problems that have a detrimental effect on forest plantations can be divided into two large groups – natural and anthropogenic. Depending on the causes of occurrence, forest fires equally belong to both groups. Millions of tons of organic substances are destroyed from the resulting fires in forest ecosystems, which leads to an increase in wood-destroying fungi and harmful insects, the disappearance of berries and mushrooms, and as a result of fires, water erosion of the soil occurs.

The National Center for Crisis Management of the Ministry of Emergency Situations of Russia annually records landscape fires in all federal districts. Fires in the regions occur in significant areas [2], and therefore, in some cases, an emergency regime is introduced. There are cases when, due to the establishment of hot windy weather, the spread of fires led to the transition of the flame

to military facilities and settlements. The same danger exists in the Arctic zones of the Russian Federation, where a significant number of oil and gas producing enterprises are located, which are sources of increased risk of man-made accidents. Given the specific nature of the tundra, the damage from such disasters leads to irreparable damage to the environment and significant material damage.

The transfer of the landscape fire control system to a more efficient level will ensure the safety of the biosystem and reduce economic and human losses as a result of fires.

## Purpose of the work

The purpose of the work is a conceptual solution to the technical support of the primary link in the prevention and elimination of landscape fires.

To achieve this goal, it is necessary to solve the following tasks:

- definition of research methodology;
- analysis of the situation with landscape fires in the Russian Federation and federal districts;
- technical support of primary-level rolling stock;
- general functional diagram of the basic chassis of the fire extinguishing machine;
- a generalized approach to the calculation of the load-bearing system of the body of a separate car module.

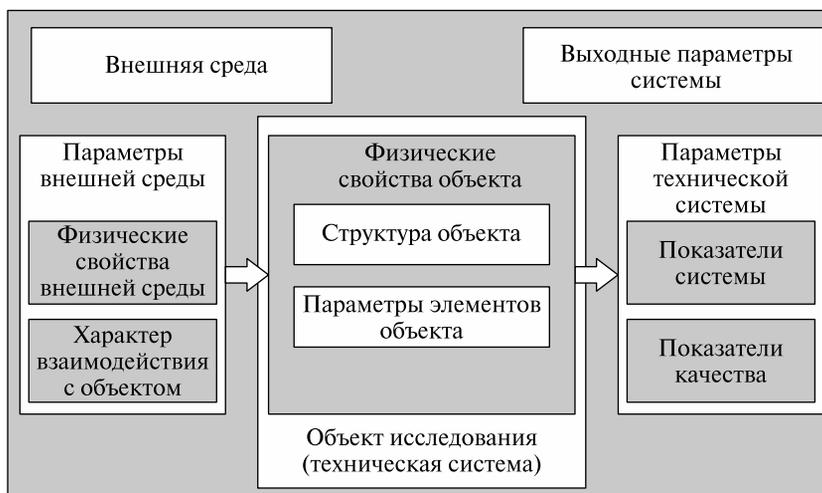


Fig. 1. Diagram of the technical system and its connection with surroundings

## Materials and methods

The justification of the general layout solution of the technical system provides for several stages, including, first of all, the definition of the purpose and conditions in which the system to be created will function. Knowledge of the conditions will allow you to foresee the most extreme operating conditions and obtain data on the sources of external forces during the operation of the system. The scheme of the «base chassis» system is shown in Fig. 1.

Consideration and analysis of complex technical systems involves their decomposition or recomposition, the scale of which depends on the tasks being solved.

The tasks set are most effectively solved using the methodology of system analysis.

**Landscape fires.** For a long time, the area covered by fire in forests exceeds hundreds of thousands of hectares, and in particularly difficult fire-hazardous periods, this indicator can be estimated in millions. According to a number of experts, in the field of meteorology, the occurrence of extreme danger in the forests of the central regions of the Russian Federation is observed approximately once every 20 years and is accompanied by the occurrence of multiple foci of wildfires. So in 1972, smog from burning peat bogs reached the Kremlin, after which the situation with wildfires was recognized as critical. It is noteworthy that that summer, not a single locality was affected by wildfires thanks to the coordinated actions of the Federal Forest Service, its forest fire units and civil defense detachments. It is worth emphasizing that during the period described, the activities of forestry enterprises to

carry out preventive measures and clean up forests were very effective and covered a large percentage of all forest plantations in the country.

The reform of the Federal Forestry Service carried out at the beginning of the XXI century led to a sharp decrease in the effectiveness of supervision and administrative and economic measures in the forest fund. As a result, this led to an increase in fire danger in the forests. As a result, cases of partial or complete burning of settlements from forest fires have become increasingly common throughout the country. This reform led to an aggravation of the situation with forest fires. During it, a series of reassignments took place, as well as the reduction of centralized control functions and the rights of legislative initiative, the main powers for forest management were transferred to the territorial bodies of the Federal Forestry Agency in the federal districts. As a result, there is a significant weakening of the forest fire protection system that has been functioning for several decades, and, as a result, to a decrease in the effectiveness of extinguishing large forest fires, especially at an early stage of their development [3].

Such cases of transitions of landscape fires to dangerous objects of protection can largely be explained by the fact that existing methods of extinguishing fires have disadvantages that do not allow achieving high efficiency indicators. One of such drawbacks can be considered the absence of samples of special emergency rescue equipment based on a high-terrain chassis in service with fire and rescue units.

The adoption of the Forest Code in 2006 was also not in favor of forest relations. As a result, the forest service lost forest protection, at that time it was more than 70 thousand foresters, forestry

**Number of forest fires in the Russian Federation (2006–2022)**

Год/ Year	ЦФО/ CFO	СЗФО/ SZFO	ЮФО/ UFO	СКФО/ SKFO	ПФО/ PFO	УФО/ UralFO	СФО/ SFO	ДФО/ DFO	Всего/ Total
2006	4017	6996	305	74	3673	7273	8577	1609	32524
2007	3129	1028	382	73	1664	1990	7822	1724	17812
2008	2984	1283	183	58	2230	8544	8920	2083	26285
2009	4337	1140	194	43	3771	5653	5851	2256	23245
2010	7111	2179	170	69	8183	10304	5514	1282	34812
2011	1288	2389	144	32	891	4411	8750	1838	19743
2012	276	522	50	23	653	7078	8588	2139	19329
2013	244	1906	21	10	805	2718	3222	1065	9991
2014	1189	1869	52	11	923	1943	8531	2347	16865
2015	582	845	115	24	787	1415	3853	4716	12337
2016	266	870	152	3	718	2541	3627	2848	11025
2017	108	457	198	17	358	1948	3852	3984	10922
2018	615	1542	217	4	1039	2079	3103	3526	12125
2019	716	799	223	27	743	1463	4549	5082	13 602
2020	795	760	382	40	1039	2409	3996	5391	14 812
2021	570	1430	118	6	1954	4661	2807	3566	15 112
2022	740	980	100	5	603	2654	4180	3266	12528

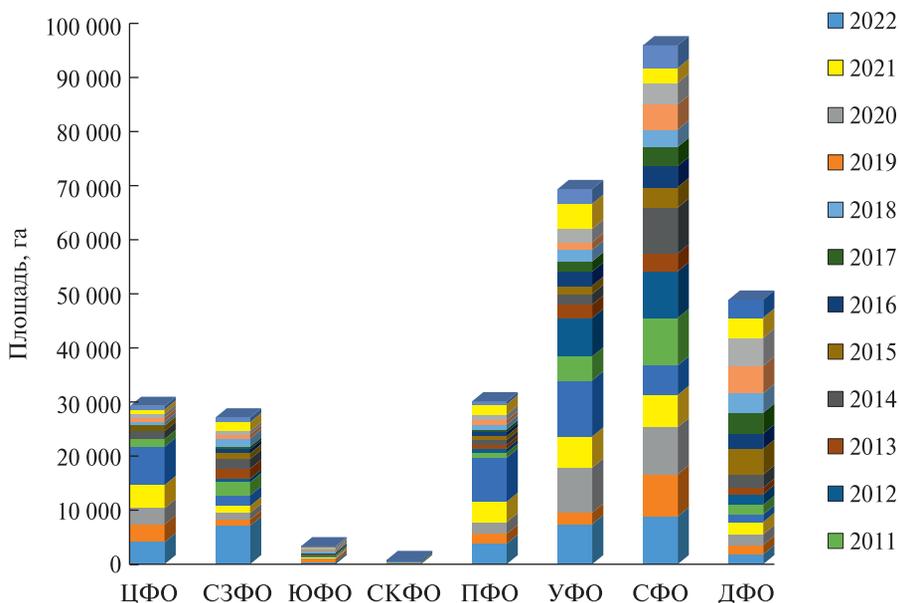


Fig. 2. Distribution of forest fires by Federal Districts

enterprises were liquidated, in multi-forest areas — a single aviation guard and an aircraft fleet, in areas where the ground surveillance system prevails — fire and chemical stations, as a result of which daily overflight and detour during the fire-hazardous period was completely discontinued. The sad result of the transformations that took place was an increase in wildfires, the most difficult situation unfolded in 2010 and in 2022.

According to the data of the Federal State Budgetary Institution VNIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia, the data were given (Table, Fig. 2) by the number of forest fires on the territory of the Russian Federation as a whole and by federal districts [4–8].

The diagram shows that the Siberian and Ural Federal Districts occupy leading positions in the number of forest fires (Fig. 2).

Since 2022, the decree of the President of Russia has introduced targets for reducing the area of forest fires. To implement the decree, a methodology was developed and approved for calculating targets for the annual reduction of the area of forest fires on the lands of the forest fund. In accordance with the methodology, in 2022 all subjects of the Russian Federation were divided into two groups, the gradation took place according to the area covered by fire on the lands of the forest fund of Russia in 2021. The first group included regions with indicators of more than 95 % of the five-year average area covered by fire on the lands of the Russian forest fund. This group includes 12 regions: the Republics of Buryatia, Sakha-Yakutia, Trans-Baikal, Kamchatka, Chukchi, Krasnoyarsk, Primorsky, Khabarovsk Territories, Amur, Irkutsk, Magadan Regions and the Jewish Autonomous Region. The second group includes regions in which there is a significant decrease in this indicator. Compared to the same period last year, the Sverdlovsk Region, along with the Republics of Karelia and Bashkortostan, was assigned to the second group [9]. These indicators are rather just a statement of the facts that have taken place and do not forget that with the onset of the next fire season, the picture can change quite dynamically and radically differ from long-term forecasts and long-term averages. The clarity of the above words is confirmed by indicators from the summaries of the operational situation in the Sverdlovsk region for the period from April 24 to May 15, 2023.

In the first half of 2023, an emergency regime was introduced in the Sverdlovsk and Kurgan regions, cases of transition of landscape fires to the territory of settlements and military facilities were recorded, more than 20 people died. So, on May 06, 2023, warehouses with gunpowder caught fire in the Pervomaisky settlement of the Rejevsky city district of the Sverdlovsk region, local residents received messages about evacuation and the possibility of an explosion. An emergency regime was introduced in the area and a special operation «Typhoon» was carried out. Often, emergency rescue equipment could not reach the places of extinguishing fires and water sources to replenish its reserves. This was the result of the lack of high-traffic transport chassis.

Based on the above data, it can be concluded that in less than a month, with an increase in the total number of fires by 3,5 times, the area of fires increased significantly, namely 133,3 times [10].

In accordance with the current legislation of the Russian Federation, the tasks of the EMERCOM of Russia do not include extinguishing wildfires. At the same time, in cases when a natural fire poses a threat of fire crossing to settlements and economic

facilities, the forces and means of the FPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, in accordance with the assigned tasks and powers, carry out a set of measures to protect buildings from fire crossing [11].

In cases where it is necessary to extinguish forest fires on the territories of municipalities, or in forests located outside settlements, but within the boundaries of the municipality, the involvement of forces and means of aviation forest protection (ALO) is carried out on a contractual basis, at the expense of the budget of the municipality and the budget of the subject of the Russian Federation. At the same time, in the staff of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Sverdlovsk region, there are forestry enterprises whose heads act as managers of extinguishing forest fires in the area of responsibility, however, there are no means and devices for extinguishing forest fires in forestry. The only available function within the framework of preventive measures remains the performance of supervisory and preventive functions.

It is important that the ALO is under the operational subordination of the Ministry of Natural Resources in terms of extinguishing forest fires on the lands of the state forest fund, and in direct subordination to the territorial authority of the Federal Forestry Agency in the Federal District.

The damage caused by forest fires is always very noticeable, and first of all it affects forest ecosystems, therefore it is necessary to fight fires until the full range of preventive measures defined by the legislation of the Russian Federation is carried out, and in advance, before the start of the fire-hazardous period [12].

According to the Federal Forestry Agency, the amount of damage caused by forest fires in 2021 on the lands of the forest fund in the territory of the Russian Federation amounted to 8,387,1 million rubles, of which 4,856,6 million rubles or 58 % are in the Ural and Far Eastern Federal Districts [13]. It is important to emphasize that this damage consists of indicators of the loss of wood, the death of young animals, burnt and damaged products and their equivalent monetary amounts, but does not include the costs incurred for extinguishing forest fires, clearing and restoring the burned area, as well as losses from the death of animals. That's a lot...

The works of Russian scientists play a serious role in the prevention of forest fires, the study of the nature and patterns of their occurrence: S.V. Zalesov, A.A. Krektunov, I.M. Sekerin, A.H. Gasanova, A.S. Evdokimov and other scientists are working in this direction [14–19].

The existing system of ensuring the extinguishing of landscape fires at the lowest level, that is, at enterprises of the extractive industries of the

economy, provides for a limited number of technological elements for the elimination of fires. So, at logging enterprises and forestry enterprises, there are fire extinguishing machines, as the base chassis of which KAMAZ, Ural and vehicles that were in service with chemical and bacteriological protection troops, APC filling stations based on ZIL-131 vehicles converted into fire trucks are used. All of them relate to cross-country vehicles. They can move on roads with improved pavement, some dirt roads and practically lose the ability to move off-road with low load-bearing capacity. Very important when extinguishing a fire is the time of the beginning of the localization of the source of ignition and its extinguishing. The spread of the flame front, especially during riding fires in the forest zone, is extremely high. The primary fire extinguishing units, firstly, cannot get to the place of ignition, and secondly, do not have a full arsenal of means to eliminate the hearth and prevent the spread of flames. The same applies to grassroots fires, fires on peat bogs, in the Arctic tundra and forest tundra zones.

Thus, the analysis of the situation in this area shows the following.

1. Losses from landscape fires are great both economically and socially.

2. The reformation of the Federal Forestry Service and the adoption of the Forest Code led to the liquidation of forestry enterprises and the reduction of forest workers by 70,000 people, which aggravated the fire-hazardous situation.

3. The existing system of combating landscape fires is fragmented and not effective.

4. It is necessary to create primary links in rural settlements and other municipalities to combat landscape fires, equip them with the required technical means and highly efficient transport.

5. A state program is needed that will create workable and effective structures to prevent and eliminate the consequences of landscape fires and minimize their consequences.

**Technical support of primary-level rolling stock.** To eliminate the fires that have developed, it often requires the involvement of a large number of forces and means. The full use of means of extinguishing such fires is often complicated by the inaccessibility of the terrain and other factors that negatively affect the course of extinguishing and the effectiveness of the methods used.

That is, there is an urgent need to create a vehicle that would have the following properties:

- high passability (3rd category of fire trucks according to [20]);
- the ability to simultaneously transport several types of fire extinguishing equipment;
- high efficiency of the transport operation

(large load capacity, high mobility, low fuel consumption);

- the possibility of simultaneous use of several types of fire extinguishing equipment in the process of fire elimination;

- the minimum possible costs for its maintenance (maintenance and repair, payment of maintenance personnel, etc.) [21].

Thus, the elimination of fires and other emergencies faces the problem of prompt delivery of the necessary equipment and materials to the place of their occurrence.

The problem is solved in two ways:

- changing the structure and functionality of the primary link;

- creation of a basic chassis with all the listed properties.

Based on the analysis of the technical system (Fig. 1) there are only two ways to improve operational performance: parametric and structural. The parametric method of increasing indicators does not in all cases allow achieving the desired result. Sometimes it is necessary to change the structure of the technical system [22, 23].

The creation of a basic chassis should follow the path of creating a vehicle that is not made according to the traditional layout scheme, but has a multi-sectional appearance, when one section is made as an energy one, that is, equipped with a power plant, and other sections have equipment for various types of work (tanks, foam installations, ladders, drills for laying explosive charges, etc.). The proposed layout solution is an active articulated transport system (ASTS).

ASTS have advantages over single machines:

- high traction properties;
- high adaptability to relief in the longitudinal direction;
- uniform distribution of support reactions in the longitudinal direction;
- turning the machine by folding sections;
- high chain qualities of the propulsor with a support surface;
- the ability to overcome obstacles due to the adjustable folding of sections in vertical and horizontal planes;
- high degree of stability of the position;
- the possibility of a modular machine layout principle depending on current needs (Fig. 3).

An important feature of the basic chassis, synthesized according to the modular principle, is the possibility of adaptive control of the distribution of the power flow between the propellers of the base chassis [24, 25], that is, to implement a traction force on the propulsor of each section corresponding to the characteristics of the ground on which it is located and the load that falls on this section.

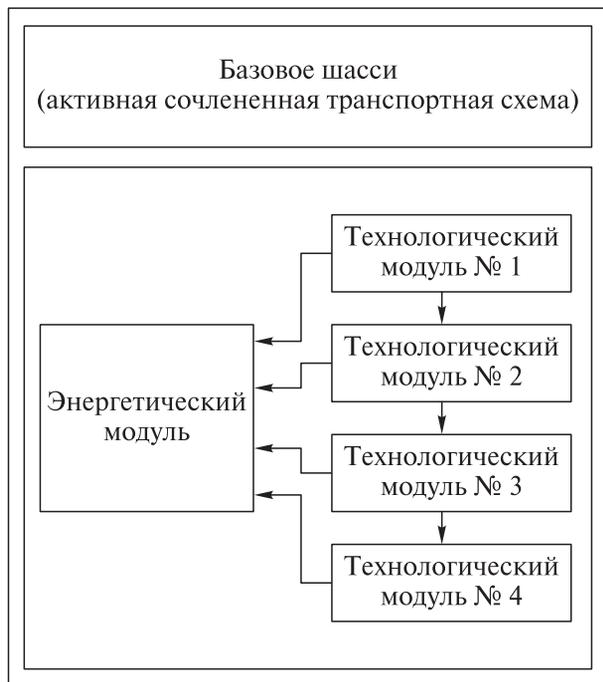


Fig. 3. Modular principle of the carrier vehicle synthesis

As a result, it becomes possible to use unmanned work of a certain type.

**General functional diagram of the basic chassis of the fire extinguishing machine.** Fig. 4 shows the functional diagram of the base chassis. The entire transport system is divided into two functional blocks:

- the source of external forces acting on the entire active transport system, and the movers of the trailer sections, which will realize the power flow from the energy source to overcome external forces;

- an energy module in which an energy source is located and, depending on the type of transmission, a device for transforming energy when transferring it to working bodies.

The whole set of elements is under the control of measurement and control systems (SIU). The SIU is designed to obtain data on the state of the support surface and the parameters of interaction with it of the propellers of the sections and the energy module [26]. The information obtained is used for the rational distribution of the power flow between the sections in order to obtain the maximum possible traction force of the active base chassis at any given time [27].

**A generalized approach to the calculation of the load-bearing system of the body of a separate car module.** Synthesis of the basic chassis can be carried out in two ways:

- the use of existing (manufactured at domestic enterprises) high-throughput machines with their adaptation to specific operating conditions;
- creation of new specialized base chassis.

In any case, the principle of calculating the spatial-type carrier system for the base chassis is to determine the possible spectrum and the law of external forces acting on it, followed by the determination of the stress-strain state of its carrier system (VAT) [28].

According to the results of the VAT assessment, the load-bearing system may be subject to both local modification (for example, if the permissible stresses in the structure are exceeded or significant movements of its elements in certain zones that do not lead to the destruction of the base chassis) and global design changes up to the creation of a new one.

Fig. 5 shows the load-bearing system of an arbitrary cross-country vehicle with external forces

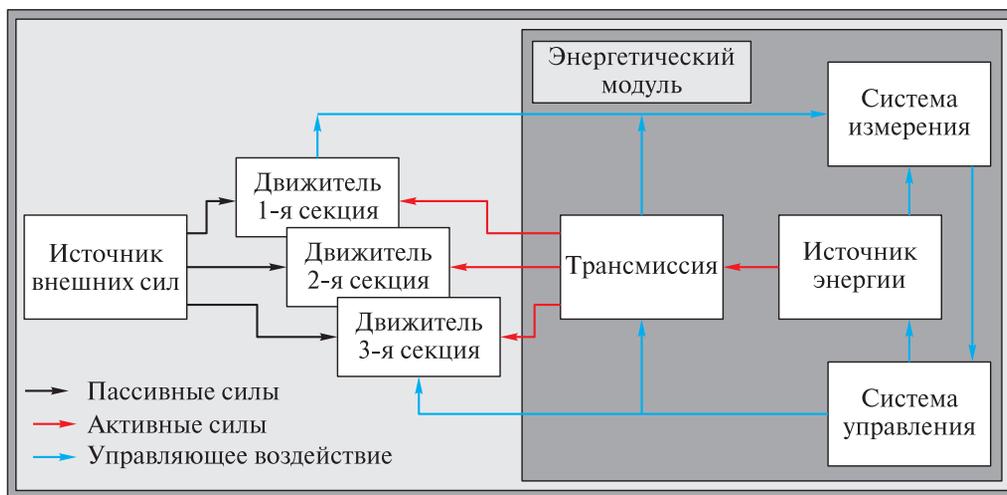
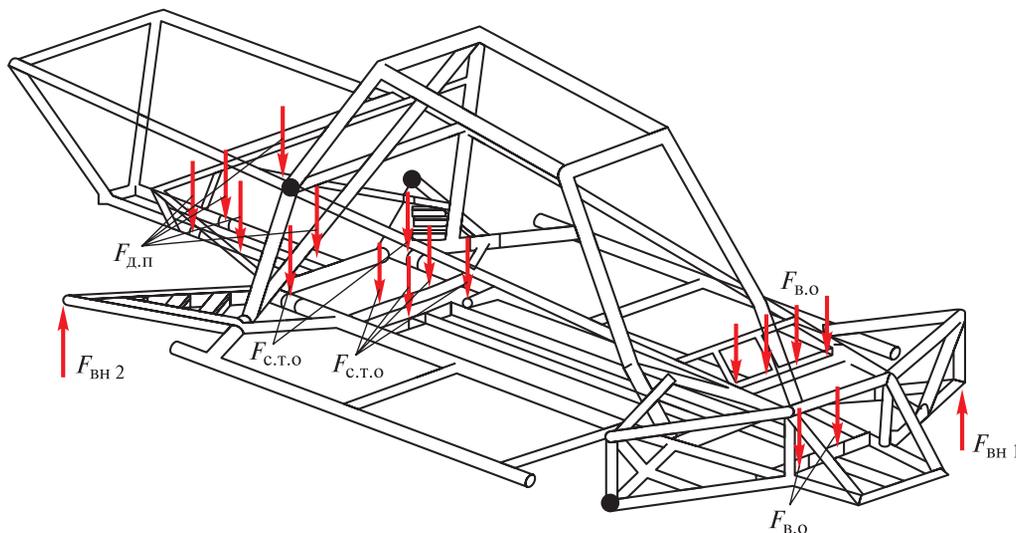


Fig. 4. Functional diagram of the carrier vehicle (active articulated transport system)



**Fig. 5.** An example of an arbitrary spatial type carrier system:  $F_{д.п}$  — weight of the electric motor and drive to the driving wheels;  $F_{с.т.о}$  — weight of special technological equipment;  $F_{в.о}$  — the weight of the auxiliary technological equipment

acting on it ( $F_{внеш}$ ), as well as the weight from the main elements of the chassis, transmission and special technological equipment.

Similarly, working forces and moments from equipment mounted on the carrier system of the base chassis can be introduced into the scheme.

The result of the calculation of the load-bearing system is such a set of geometric (cross section, length, spatial position) and physical (material characteristics) parameters of the load-bearing system that provide the required operational characteristics of the machine [29, 31].

As an illustration of the assessment of the load distribution by elements and zones of the carrier system, diagrams of the form shown in Fig. 6.

To evaluate the efficiency of the carrier system, it is convenient to use specific parameters [30, 31]. In this case, it is advisable to use the specific stiffness

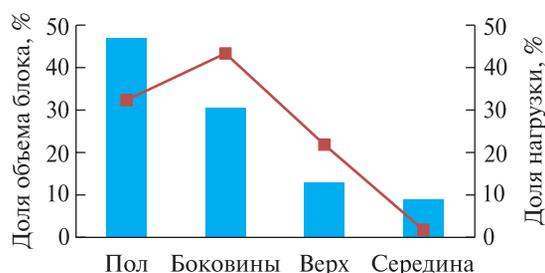
$$C_{уд} = \frac{C_{кр}}{M_{н.к}}$$

where the:  $C_{уд}$  is the specific rigidity of the supporting structure;

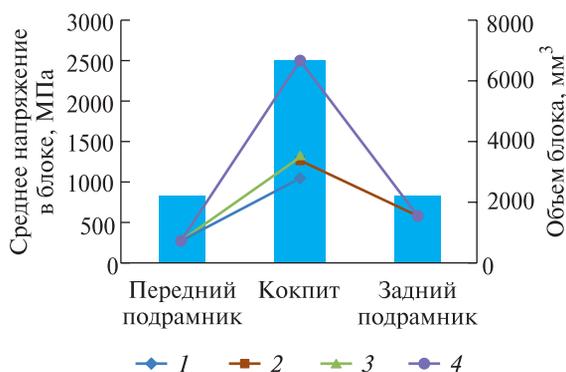
$C_{кр}$  is the torsional rigidity of the supporting structure;

$M_{н.к}$  is the mass of the supporting structure.

As an example for the case when an existing high-terrain vehicle is used as an energy module, for example, the Phoenix [32], and the body of the same snowmobile is used as sections of the active base chassis, but without a power unit and with an electric drive on the driving wheels. To accommodate special technological equipment, the existing load-bearing structure must be strengthened [33].

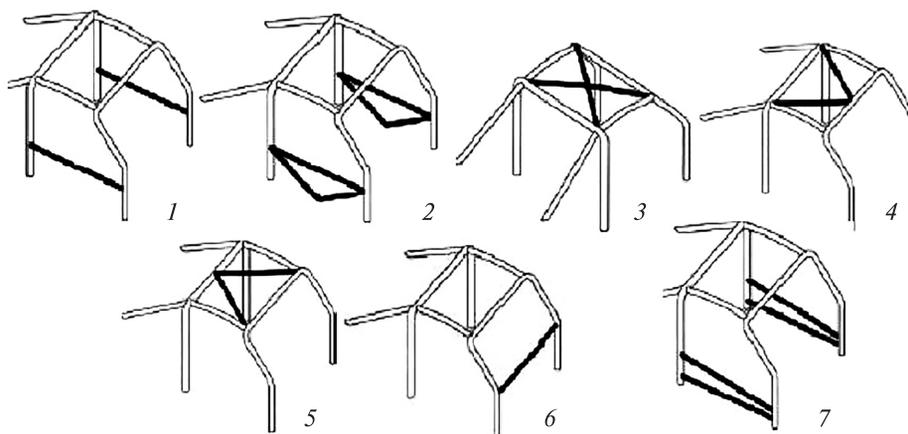


**Fig. 6.** Load distribution over the zones of the vehicle carrier system during torsion

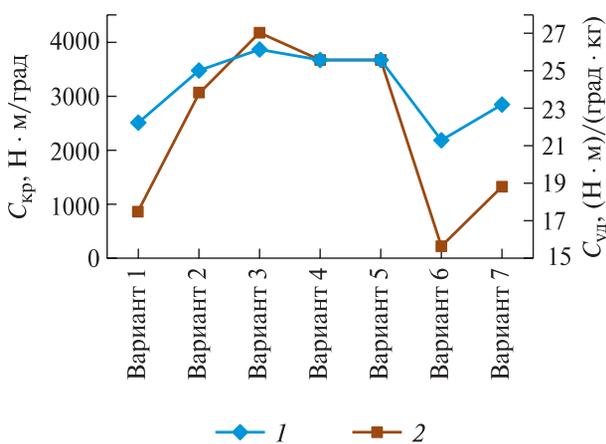


**Fig. 7.** Load distribution on the system carrier elements in torsion: 1 — front wheel collision; 2 — rear wheel collision; 3 — torsion; 4 — diagonal

For such an option, Fig. 8 shows possible options for refining (strengthening) the carrier system, and Fig. 9 compares the options presented using the coefficient of specific stiffness.



**Fig. 8.** Variants of reinforcement of the bearing system of an arbitrary high mobility vehicle: 1 — longitudinal reinforcements; 2 — longitudinal reinforcements with braces; 3 — cross-shaped ceiling reinforcements; 4, 5 — V-shaped ceiling reinforcements; 6 — rear cross reinforcements; 7 — longitudinal combined reinforcements



**Fig. 9.** Comparison of torsional and specific torsional stiffness for possible configurations of the carrier system: 1 — torsional; 2 — specific stiffness

Based on the comparison graph of specific and torsional stiffness, it is possible to evaluate the effectiveness of different configurations of the bearing system. As can be seen from the presented graph, it is most advisable to use options 3, 4 and 5 to strengthen the upper part of the cockpit of the body, which give the best combinations of specific stiffness and torsional rigidity of the curtain structure of the body.

### Conclusions

1. Analysis of the course of landscape fires and the results of combating them on the territory of Russia and in certain federal districts showed

that the reforms of the Federal Forestry Service carried out at the beginning of the two thousandth years led to the destruction of the existing forestry system, the reduction of workers and the increase in fire danger. The existing system of combating landscape fires has been destroyed, and what remains of it is not effective.

2. A state program is needed that will create workable and effective links to prevent and eliminate the consequences of landscape fires and minimize their consequences.

3. The technical equipment of the lower levels should include promising universal vehicles (basic chassis) high passability for the placement and delivery of specific fire-fighting equipment in hard-to-reach areas.

4. A promising universal basic chassis is made according to an articulated scheme. The machine has a single energy module with an energy source placed on it. The power module is equipped with active (non-propulsion driven) trailer sections designed to accommodate special equipment on them. The necessary equipment and the number of active trailers are selected in each specific case, depending on the nature, intensity and dynamics of the emergency situation.

5. The articulated scheme of the base chassis allows you to provide:

- high passability;
- the possibility of simultaneous transportation on active trailer sections of several types of fire extinguishing equipment at the same time;
- high efficiency of the transport operation (large load capacity, high mobility, low fuel consumption);

– the possibility of simultaneous use of several types of fire extinguishing equipment in the process of fire elimination;

– minimum costs for its maintenance (maintenance, repair, payment of maintenance personnel, fuel consumption during transportation to the place of emergency).

## References

- [1] *Antropogennyy faktor i ekologicheskie problemy* [Anthropogenic factor and environmental problems]. Available at: <https://helpiks.org/5-36649.html> (accessed 02.11.2023).
- [2] Boyarova D.A. *Problemy okhrany lesnogo fonda ot pozharov* [Problems of forest fund protection from fires]. Aktual'nye problemy agropromyshlennogo kompleksa: sb. trudov nauchno-prakticheskoy konferentsii преподаvateley, aspirantov, magistrantov i studentov Novosibirskogo GAU [Actual problems of the agro-industrial complex: collection of works of the scientific and practical conference of teachers, graduate students, master's students and students of the Novosibirsk State Agrarian University], Novosibirsk, October 20, 2023. Novosibirsk: Publishing center of the Novosibirsk State Agrarian University «Golden Ear», 2023, pp. 113–116.
- [3] Isaev A.S. *Les kak natsional'noe dostoyanie Rossii* [Forest as a national treasure of Russia]. *Vek globalizatsii* [Century of globalization], 2011, no. 1, pp. 148–158.
- [4] *Pozhary i pozhnaya bezopasnost' v 2010 godu: statisticheskiy sbornik* [Fires and fire safety in 2010: statistical digest]. Ed. V.I. Klimkin. Moscow: VNIPO, 2011, 140 p.
- [5] *Pozhary i pozhnaya bezopasnost' v 2014 godu: statisticheskiy sbornik* [Fires and fire safety in 2014: statistical digest]. Ed. A.V. Matyushin. Moscow: VNIPO, 2015, 124 p.
- [6] *Pozhary i pozhnaya bezopasnost' v 2015 godu: statisticheskiy sbornik* [Fires and fire safety in 2015: statistical digest]. Ed. A.V. Matyushin. Moscow: VNIPO, 2016, 124 p.
- [7] *Pozhary i pozhnaya bezopasnost' v 2018 godu: statisticheskiy sbornik* [Fires and fire safety in 2018: statistical digest]. Ed. D.M. Gordienko. Moscow: VNIPO, 2019, 125 p.
- [8] *Pozhary i pozhnaya bezopasnost' v 2022 godu: inform.-analitich. sb* [Fires and fire safety in 2022: information and analytical digest]. Balashikha: VNIPO EMERCOM of Russia, 2023, 80 p.
- [9] *Ministerstvo prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii* [Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation]. Available at: [https://www.mnr.gov.ru/press/news/v\\_2022\\_godu\\_ploshchad\\_lesnykh\\_pozharov\\_v\\_rossii\\_sokrashchena\\_pochti\\_v\\_tri\\_raza\\_do\\_3\\_5\\_milliona\\_gekta/?ysclid=lo5p4nbjyc667483750](https://www.mnr.gov.ru/press/news/v_2022_godu_ploshchad_lesnykh_pozharov_v_rossii_sokrashchena_pochti_v_tri_raza_do_3_5_milliona_gekta/?ysclid=lo5p4nbjyc667483750) (accessed 02.11.2023).
- [10] Khabibullina N.V., Lazarev I.S., Krudyshev V.V. *Rol' biologicheskoy produktivnosti estestvennykh temnokhvoynnykh nasazhdeniy kedra sibirskogo i el'nikov na Srednem Urale v otsenke ushcherba ot pozharov* [The role of biological productivity of natural dark coniferous stands of Siberian cedar and spruce forests in the Middle Urals in assessing damage from fires]. Ekaterinburg: Ural Institute of the GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2018, 162 p.
- [11] Kolesnikov A.A., Lyashenko S.M. *K voprosu sovershenstvovaniya normativnykh pravovykh aktov po reagirovaniyu na prirodnye pozhary v sub'ektakh Rossiyskoy Federatsii* [On the issue of improving regulatory legal acts on responding to natural fires in the constituent entities of the Russian Federation]. *Prioritetnye napravleniya razvitiya sistemy obespecheniya tekhnosfernoy i pozhnay bezopasnosti ob'ektov zashchity i territoriy: Sbornik trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Priority areas for the development of the system for ensuring technosphere and fire safety of protected facilities and territories: Collection of works of the III International Scientific and Practical Conference], Khimki, May 26–27, 2022. Khimki: Civil Defense Academy of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters named after Lieutenant General D.I. Mikhailik, 2022, pp. 122–127.
- [12] Talalaeva G.V., Loginov A.S. *Nekotorye osobennosti lesnykh pozharov v svyazi s global'nym potepleniem klimata* [Some Features of Forest Fires in Connection with Global Warming]. *Grazhdanskaya oborona na strazhe mira i bezopasnosti: Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Vsemirnomu dnyu grazhdanskoy oborony v God 90-letiya so dnya obrazovaniya Akademii GPS MChS Rossii* [Civil Defense on Guard of Peace and Security: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference Dedicated to the World Civil Defense Day in the Year of the 90th Anniversary of the Foundation of the Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia]. In 5 parts, Moscow, March 01, 2023. Comp. V.S. Butko, M.V. Aleshkov, S.V. Podkosov, A.G. Zavorotny. Part III. Moscow: Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 2023, pp. 220–226.
- [13] Krektunov A.A., Vas'kov Ya.N., Eritsov A.M., Sekerin I.M. *Okhrana naseleennykh punktov, podverzhennykh ugroze lesnykh pozharov, organami gosudarstvennogo pozhnogo nadzora FPS MChS Rossii* [Protection of settlements exposed to the threat of forest fires by the state fire supervision bodies of the Federal Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and their management], 2022, no. 2 (81), pp. 11–18. DOI 10.51318 / FRET.2022.83.31.002
- [14] Krektunov A.A., Eritsov A.M., Zalesov S.V., Sekerin I.M. *Prognoz razvitiya lesnogo pozhara v zavisimosti ot rasstoyaniya do naseleennogo punkta* [Forecast of forest fire development depending on the distance to the settlement]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research J.], 2022, no. 7–2 (121), pp. 167–172. DOI 10.23670 / IRJ.2022.121.7.069

- [15] Secerin I.M., Godovalov G.A., Eritsov A.M., Zalesov S.V. *Spetsifika rasprostraneniya i tusheniya torfyanykh pozharov v zimniy period* [Specifics of peat fires spreading and extinguishing in winter]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 64–70. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-64-70
- [16] Gasanova A.Kh. *Protivopozharnaya propaganda kak odin iz sposobov obespecheniya pozharnoy bezopasnosti* [Fire prevention propaganda as one of the ways to ensure fire safety]. *Initiativy molodykh — nauke i proizvodstvu: Sbornik statey IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh i studentov* [Initiatives of the young — for science and production: Collection of articles of the IV All-Russian scientific and practical conference of young scientists and students], Penza, November 30, 2022. Ed. A.V. Nosov. Penza: Penza State Agrarian University, 2022, pp. 121–125.
- [17] Evdokimov A.S. *Organy mestnogo samoupravleniya i pozharnaya bezopasnost': istoriko-pravovoy aspekt* [Local governments and fire safety: historical and legal aspect]. *Innovatsii v prirodobustroytve i zashchite v chrezvychaynykh situatsiyakh: Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovations in environmental management and protection in emergency situations: Proceedings of the VIII International scientific and practical conference], Saratov, April 21–22, 2021. Saratov: Amirit, 2021, pp. 299–303.
- [18] Ivchenko O.A., Tyutin A.V., Kozachenko M.A., Pankin K.E. *Vliyanie pogodnykh usloviy na vozniknovenie i razvitie lesnykh pozharov v Saratovskoy oblasti* [The Impact of Weather Conditions on the Occurrence and Development of Forest Fires in the Saratov Region]. *Tekhnogennaya i prirodnyaya bezopasnost': mater. VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Technogenic and Natural Safety: Proc. of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference]. Saratov, October 27–28, 2021. Saratov: Center for Social Agroinnovations, SSAU, 2021, pp. 295–301.
- [19] GOST R 58715–2019 *Tekhnika pozharnaya. Spetsial'nye pozharnye avtomobili. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya. Metody ispytaniy* [Fire-fighting equipment. Special fire trucks. General technical requirements. Test methods]. Moscow: Standartinform, 2020, p. 20.
- [20] Bazhenov E.E. *Sochlenennyye transportnyye i tekhnologicheskyye sistemy* [Articulated transport and technological systems]. Yekaterinburg: USTU–UPI, 2009, 174 p.
- [21] Tarasik V.P. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnicheskikh sistem* [Mathematical modeling of technical systems]. Minsk: DesignPro, 2004, 640 p.
- [22] Bazhenov E.E. *Sochlenennyye transportnyye sistemy: teoreticheskie osnovy* [Articulated transport systems: theoretical foundations]. LAMBERT Academic publishing, 2012, 276 p.
- [23] Bogdanov K.L. *Tyagovyy elektroprivod avtomobilya* [Traction electric drive of a car]. Moscow: MADI, 2009, 57 p.
- [24] Antonov A.S. *Silovyye peredachi kolesnykh i gusenichnykh mashin. Teoriya i raschet* [Power transmissions of wheeled and tracked vehicles. Theory and calculation]. Moscow: Mashinostroenie, 1976, 209 p.
- [25] Tarasik V.P., Rynkevich S.A. *Intellektual'nye sistemy upravleniya avtotransportnyimi sredstvami* [Intelligent control systems for motor vehicles]. Minsk: Tekhnoprint, 2004, 512 p.
- [26] Tarasik V.P., Rynkevich S.A. *Intellektual'naya adaptivnaya sistema upravleniya energeticheskimi rezhimami avtomobilya* [Intelligent adaptive control system for vehicle energy modes]. *Nauka — obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Science — for education, production, economy: materials of the international scientific conference]. Ed. B.M. Khrustaleva, V.P. Solomakho. Minsk: Tekhnoprint, 2003, v. 1, pp. 269–274.
- [27] Vikhrov A.V. *Nesushchie sistemy transportnykh sredstv spetsial'nogo naznacheniya* [Load-bearing systems of special-purpose vehicles]. Moscow: MADI, 2015, 111 p.
- [28] Khrun' V.M., Akopyan R.A. *Osobennosti dinamiki nagruzheniya nesushchikh sistem avtobusov* [Features of the loading dynamics of load-bearing systems of buses]. *Issledovanie i raschet konstruktsiy i ekspluatatsionnoy nadezhnosti avtobusov* [Research and calculation of designs and operational reliability of buses]. Lviv: VKEIAvtobusprom, 1978, pp. 3–20.
- [29] Rusanov O.A. *Raschetnyy analiz napryazhennogo sostoyaniya i otsenka prochnosti nesushchikh sistem traktorov* [Calculation analysis of the stress state and strength assessment of load-bearing systems of tractors]. Dis. D-r Sci. (Tech.). Moscow, 2009, 347 p.
- [30] Kirillov A.P. *Metodika otsenki napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i optimizatsii detaley kuzova legkovogo avtomobilya s tsel'yu snizheniya ikh massy* [Methodology for assessing the stress-strain state and optimizing car body parts to reduce their weight]. Author's abstract. Diss. Cand. Sci. (Tech.). Moscow, 1987, p. 16.
- [31] Gladov G.I., Petrenko A.M. *Spetsial'nye transportnyye sredstva: teoriya* [Special vehicles: theory]. Ed. G.I. Gladov. Moscow: ITC «Akademkniga», 2006, 215 p.
- [32] *Snegobolotokhody Feniks* [Phoenix snow and swamp vehicles]. Available at: <https://vesdehod-feniki.ru/> (accessed 02.11.2023).
- [33] Lovtsov A.D., Ivanov N.A. *Proektirovanie i raschet ramy legkogo kolesnogo vezdekhoda s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov* [Design and calculation of the frame of a light wheeled all-terrain vehicle using the finite element method]. *Vestnik TOGU: Mashinostroenie i mashinovedenie* [Bulletin of TOGU: Mechanical Engineering and Mechanical Engineering], 2013, no. 3 (30), pp. 85–90.

## Authors' information

**Bazhenov Evgeniy Evgen'evich** ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, of the Department of Fire, Emergency Rescue Equipment and Special Means of the Ural Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, st194@yandex.ru

**Ilyushin Vladimir Vladimirovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Technological Machines and Engineering Technology, Ural State Forestry University, vv\_asp@mail.ru

**Krudyshev Vladimir Valer'evich** — Cand. Sci. (Agriculture), Senior Researcher of the Department of Planning, Organization and Coordination of Scientific Research of the Research Department of the Ural Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, natys9i@mail.ru

**Khabibullina Nataliya Valer'evna** — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Fire, Emergency Rescue Equipment and Special Means of the Ural Institute of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia, krudishev@gmail.com

Received 22.11.2023.

Approved after review 13.09.2024.

Accepted for publication 14.11.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РОТОРА КУСТОРЕЗА С ШАРНИРНО УСТАНОВЛЕННЫМИ ЛЕЗВИЯМИ

Л.Д. Бухтояров

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

vglta-mlx@yandex.ru

Определена необходимость проведения рубок ухода, приведены современные методы и оборудование для их осуществления. Для повышения продуктивности лесных культур рекомендуется проводить их осветление. Установлено, что наиболее производительным является механизированный способ работ, при котором технологическое оборудование — кусторез, располагается на базе колесных или гусеничных машин. Определено, что при разработке нового оборудования для срезания кустарника необходимо проводить обоснование его параметров. Проанализированы методы разработки новых лесных машин и выявлена необходимость использования автоматизированных средств проектирования, и составления имитационных моделей в современных программных комплексах, которые тесно связаны с конструкторскими программами. В программном комплексе «Универсальный механизм» (УМ) создана имитационная модель работы ротора кустореза. Модель рекомендуется к использованию, при обосновании параметров роторов с шарнирно-сочлененными рабочими органами. Модели звеньев являются параметрическими, что позволяет настроить имитационную модель на разные геометрические размеры без потери связей в шарнирах. В имитационной модели использовано 3D-контактное взаимодействие УМ для ротора и цепи. Изучены фазы разгона, холостого хода и торможения ротора с шарнирно-сочлененным, цепным рабочим органом. Проведен лабораторный эксперимент с ротором кустореза, который подтвердил полученные посредством имитационного моделирования траектории движения цепи. Аналитически рассчитана скорость лезвия на холостом ходу, что подтвердило полученные на имитационной модели результаты. Получены траектории движения звеньев, их скорости и затраты крутящего момента на приводном валу электродвигателя.

**Ключевые слова:** ротор кустореза, имитационное моделирование, универсальный механизм, УМ

**Ссылка для цитирования:** Бухтояров Л.Д. Имитационное моделирование работы ротора кустореза с шарнирно установленными лезвиями // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 38–49. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-38-49

Лесное хозяйство является одной из ключевых отраслей, обеспечивающих успешное развитие экономики. Повышение продуктивности лесных культур за счет рубок ухода — одна из важнейших задач, которую следует решить лесопользователям. Первоочередное значение при этом приобретает степень механизации [1, 2].

К перспективным направлениям ухода за лесными культурами относится использование колесных и гусеничных машин тягового класса до 14 кН, снабженных технологическим оборудованием с активным приводом — кусторезом. Кусторез предназначен для срезания древесной кустарниковой растительности, затеняющей основные культуры, что снижает их продуктивность. Результативность проведения осветлений в значительной мере зависит от правильного выбора и рационального использования технологического оборудования. Следует воз-

держиваться от применения энергонасыщенной техники при работах по расчистке, привлекая простые средства механизации, обеспечивающие хорошее качество осветления и находить баланс между производительностью машин и понесенными затратами [3–10].

Технологические операции по удалению древесно-кустарниковой растительности распространены как в лесном, так и в сельском хозяйстве [11–19]:

- при проведении лесовосстановительных работ для устранения затенения основных культур порослью второстепенных пород;
- расчистки лесных массивов в целях безопасной эксплуатации линий электропередачи и других сетей;
- расчистки кустарников на заросших сельскохозяйственных полях, вдоль мелиоративных каналов в целях обеспечения благоприятных условий функционирования агропромышленного комплекса;
- обрезки ветвей в питомниках и садах.

Выбор способа механизированного удаления древесно-кустарниковой растительности определяет характер и последовательность операций, объем энергозатрат, уровень производительности труда, финансовые издержки и др. Рабочий орган необходимо доставить к предмету труда — ветвям. Для этого используют энергетическую базу (трактор), на которую навешивают раму машины. От энергетической базы к рабочему органу вращение передается механическим (от вала отбора мощности) или гидравлическим (от насосной станции) путем. Рабочий орган может располагаться на неподвижной относительно трактора раме (имеющей возможность только переводиться в транспортное и рабочее положение) и на манипуляторе (имеющей возможность наведения к месту резания). Таким образом, для комплексного подхода разработки новых и модернизации существующих машин, предназначенных для конкретных производственных условий, необходимо выполнить комплекс научных изысканий, в том числе исследования, посвященные ротору кустореза.

Для сопоставления теоретических и лабораторных результатов исследования процесса резания ветвей целесообразно использовать лабораторные установки с цифровой фиксацией параметров [20].

Процесс резания ветвей происходит при высоких скоростях, поэтому для его описания может быть использована теория удара. Параметры роторных машин с шарнирно-закрепленными ножами описывают с помощью дифференциальных уравнений [21–25]. Однако данный подход предназначен для случая, когда система представляет собой двухзвенный математический маятник. При гибком рабочем органе, с тремя звеньями и более, количество степеней свободы значительно увеличивается, поэтому такой ротор представляет собой систему твердых тел, которая обладает большим числом степеней свободы. Решение подобных задач аналитическим способом достаточно затруднительно, по этой причине целесообразно использование численных методов [26–29].

Существует несколько программных комплексов, которые в своей основе используют математический аппарат для описания взаимодействия твердых тел и позволяют разрабатывать имитационные модели технических объектов. Среди них распространены Matlab Simulink и «Универсальный механизм» (ПК УМ 9.1) [30–34]. В связи с современными требованиями к переходу на отечественное программное обеспечение,

в настоящей работе используется программный комплекс «Универсальный механизм 9.1». Он позволяет разрабатывать комплексную имитационную модель, которая включает в себя следующие элементы:

- 3D-модель звеньев механизма, выполненную с помощью средств автоматизированного проектирования, а значит обладающую требуемыми геометрическими и массовыми характеристиками;
- кинематические соединения звеньев с учетом сил трения;
- механические передачи;
- контактное взаимодействие твердых тел.

Все входные параметры имитационной модели задаются в свойствах каждого элемента в соответствии с математическим аппаратом, заложенным в программном комплексе «Универсальный механизм 9.1».

При неподвижном роторе кустореза гибкие рабочие органы под действием силы тяжести свисают вниз, во время разгона занимают радиальное направление, а при торможении возвращаются в исходное положение. На движение ротора с шарнирно закрепленными звеньями влияют их кинематические динамические параметры. Так, если длина рабочего органа будет значительна, то возможен захлест звеньев, удар их друг о друга, что приведет их к быстрому выходу из строя. При недостаточной скорости вращения цепь может не выйти в радиальное положение и будет обладать недостаточной кинетической энергией, что снизит ее способность к резанию. Важным параметром служит масса звеньев, напрямую влияющая на кинетическую энергию и накопленную силу инерции. Рассмотрим процесс работы роторного кустореза с шарнирно установленными лезвиями [35].

## Цель работы

Цель работы — определение кинематических и динамических характеристик ротора кустореза с шарнирно установленными лезвиями путем имитационного моделирования.

## Материалы и методы

Ротор кустореза представляет собой систему твердых тел, приводимых во вращение механически с помощью двигателя. В качестве двигателя может быть использован механический привод от вала отбора мощности трактора, гидравлический или электрический мотор.

В разработанной нами лабораторной установке был использован электрический привод в связи с удобством снятия показаний и простоты подключение к электрической сети. Характеристики используемого привода следующие:

- мощность  $P_{дв} = 0,75$  кВт;
- номинальный крутящий момент  $M_{ном} = 2,54$  Н·м;
- пусковой момент  $M_{пуск} = 6,6$  Н·м;
- максимальная частота вращения  $n_{max} = 3200$  об./мин;
- момент инерции двигателя  $J_{дв} = 0,00637$  кг·м<sup>2</sup>.

Для регулирования оборотов применяли регулятор напряжения GSMIN AK76 50-230В. Пересчет напряжения в обороты проводили по формуле

$$n_{рот} = \frac{U_{рег} n_{max}}{U_{сет}}, \quad (1)$$

где  $n_{рот}$  — обороты на роторе двигателя, об./мин;

$U_{рег}$  — напряжение, подаваемое на двигатель регулятором напряжения, В;

$U_{сет}$  — напряжение сети, на которое рассчитан двигатель,  $U_{сет} = 230$  В.

Для моделирования работы ротора кустореза рассмотрим пять его фаз: I — покой; II — разгон; III — установившееся движение; IV — торможение; V — покой.

Угловую скорость в момент разгона определяем по формуле

$$\omega_{рот} = \frac{M_{ном}}{k} \left( 1 - e^{-\frac{k}{J_{дв}} t} \right), \quad (2)$$

где  $t$  — время, с;

$k$  — крутизна характеристики двигателя,

$$k = M_{ном} / \omega_{уст}$$

Проведем разгон ротора до частоты вращения  $n_{уст} = 1000$  об./мин. В этом случае его угловая скорость будет равна

$$\omega_{уст} = 2\pi n_{уст} / 60 = 104,6 \text{ рад/с.}$$

Разгон до выбранной частоты проводим с помощью регулятора напряжения, установив  $U_{рег} = 72$  В.

Таким образом, входная характеристика работы ротора примет вид, представленный на рис. 1.

Введем следующие допущения.

1. Корпус, соединенный с рамой, имеет только поступательные степени свободы относительно почвы по трем осям  $OX$ ,  $OY$ ,  $OZ$ .

2. Лезвия представим в виде полиэдров со сферами на концах. Каждое звено имеет одно

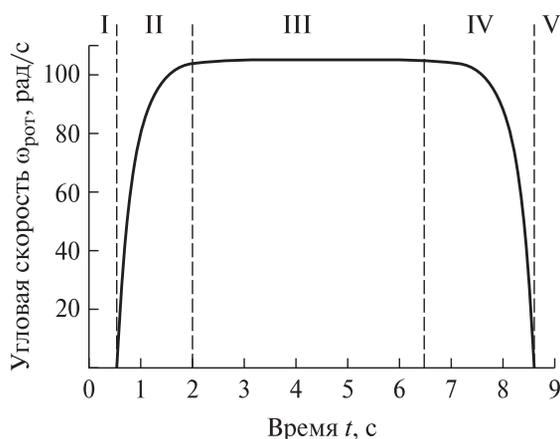


Рис. 1. Угловая скорость ротора в пяти фазах  
Fig. 1. Angular speed of the rotor in five phases

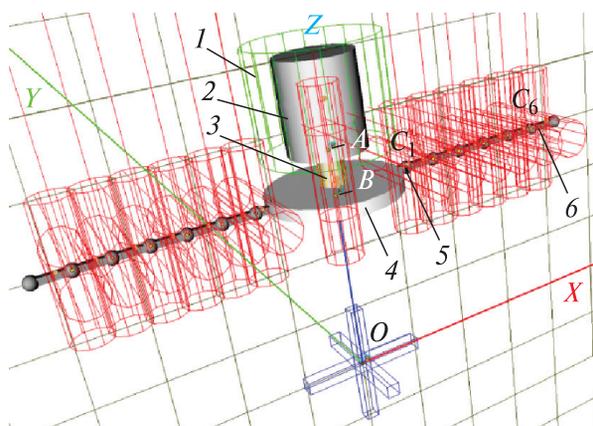


Рис. 2. Компоночно-кинематическая схема ротора кустореза: 1 — корпус двигателя; 2 — ротор двигателя; 3 — фланец; 4 — ротор кустореза; 5 — проушины; 6 — лезвия

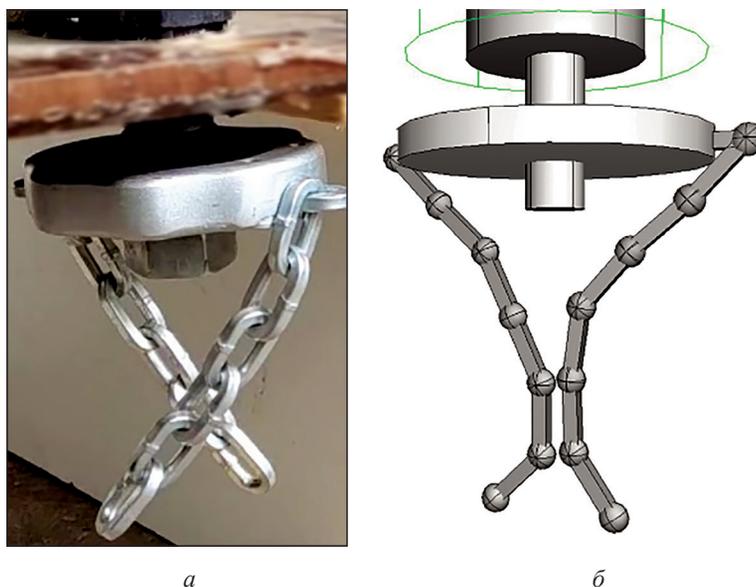
Fig. 2. Layout and kinematic diagram of the brush cutter rotor: 1 — engine housing; 2 — engine rotor; 3 — flange; 4 — brush cutter rotor; 5 — lugs; 6 — blades

относительно другого две вращательные степени свободы вокруг собственных осей  $OZ$ ,  $OX$  с моментом трения  $M_{тр.лез.} = 0,0004$  Н·м. 3D-контакт включен между ротором и звеньями цепи.

3. Если для получения требуемой массы звеньев недостаточно изменения геометрических размеров (в случае упрощения формы звеньев) то корректируем плотность материала до необходимых значений.

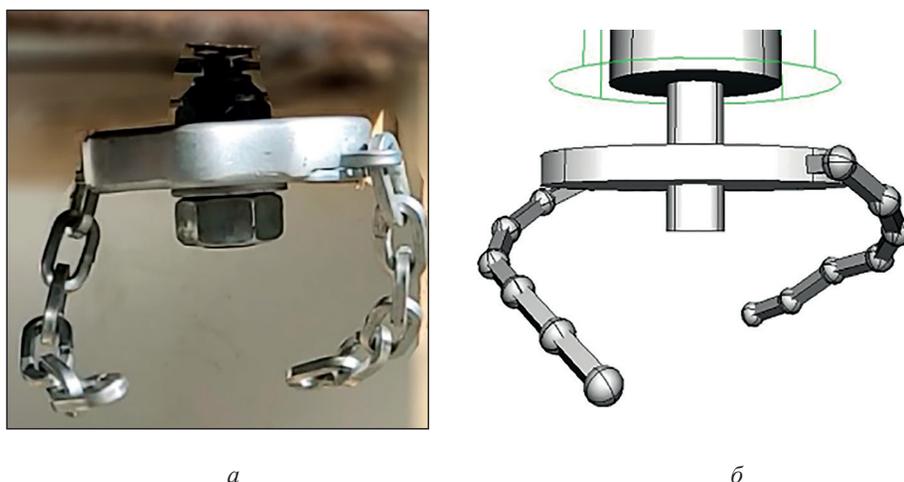
4. Ротор двигателя 2 (см. рис. 2), имеет одну вращательную степень свободы относительно рамы 1 с моментом трения, равным номинальному крутящему моменту  $M_{тр.дв.} = M_{ном}$ .

5. Численный метод интегрирования Park. Параметры 3D-контакта по умолчанию ПК UM 9.1.



**Рис. 3.** Удар цепей друг о друга: *a* — прототип ротора; *б* — результат имитации для модельного времени 0,28 с

**Fig. 3.** Hitting of chains against each other: *a* — prototype of the rotor; *б* — the result of simulation for a model time of 0,28 s



**Рис. 4.** Начало разгона ротора: *a* — прототип ротора; *б* — результат имитации для модельного времени 0,63 с

**Fig. 4.** Start of rotor acceleration: *a* — rotor prototype; *б* — the result of simulation for a model time of 0,63 s

Для моделирования ротора кустореза используем ПК «Универсальный механизм». Компонентно-кинематическая схема ротора представлена на рис. 2. (размер ячеек сетки 0,05 м).

Представим корпус двигателя, жестко соединенный с рамой, как фигуру в виде цилиндра  $l$  радиусом 0,05 м, высотой 0,08 м (см. рис. 2). Поднимем корпус  $l$  относительно начала координат точки  $O$  на высоту резания и укажем три поступательные степени свободы, движение по

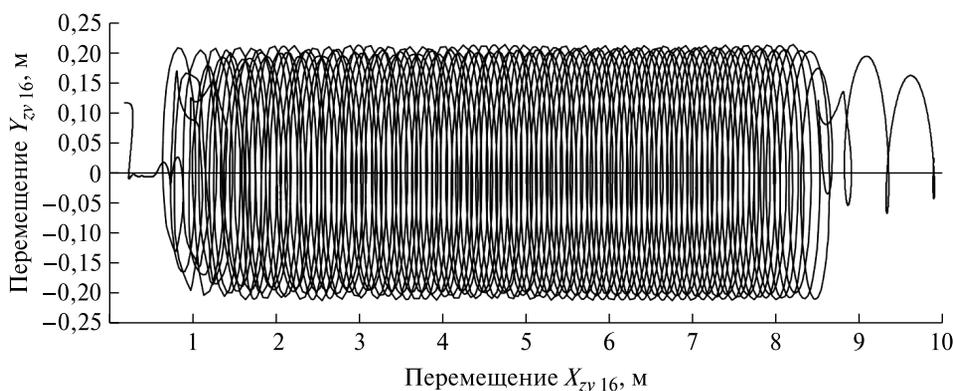
которым зададим как постоянную функцию от времени  $x = V_x t$ ; аналогично и для осей  $OY$ ,  $OZ$ . Представим ротор двигателя фигурой в виде цилиндра  $2$  радиусом 0,03 м и высотой 0,07 м. Зададим ему одну вращательную степень свободы относительно корпуса  $l$ , и добавим момент трения, соответствующий номинальному крутящему моменту  $M_{\text{тр.дв.}} = M_{\text{ном}}$ . Таким образом, если момент сопротивления вращению будет больше момента трения  $M_{\text{тр.дв.}}$ , то передача



**Рис. 5.** Разгон ротора: *a* — прототип ротора; *б* — результат имитации для модельного времени 0,76 с  
**Fig. 5.** Rotor acceleration: *a* — rotor prototype; *b* — the result of simulation for a model time of 0,76 s



**Рис. 6.** Холостой ход ротора: *a* — прототип ротора; *б* — результат имитации для модельного времени 6 с  
**Fig. 6.** Rotor idling: *a* — rotor prototype; *b* — the result of simulation for a model time of 6 s

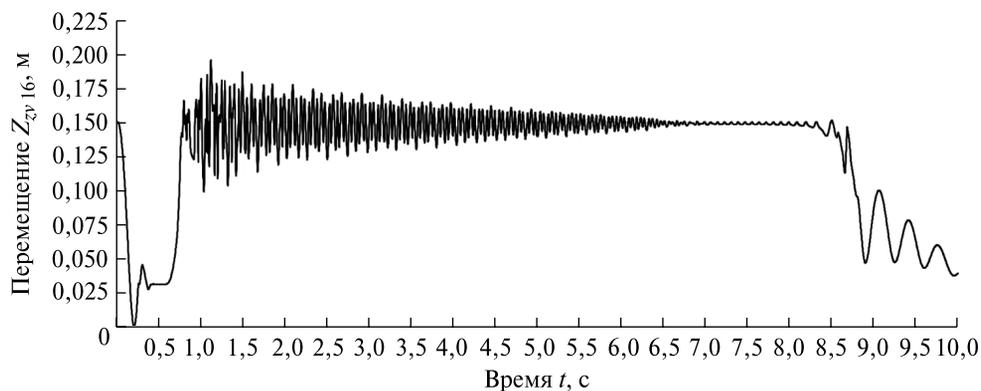


**Рис. 7.** Вид сверху, траектория движения шестого (крайнего) звена цепи в плоскости *XOY*  
**Fig. 7.** Top view, the trajectory of the sixth (ending) chain link in the *XOY* plane

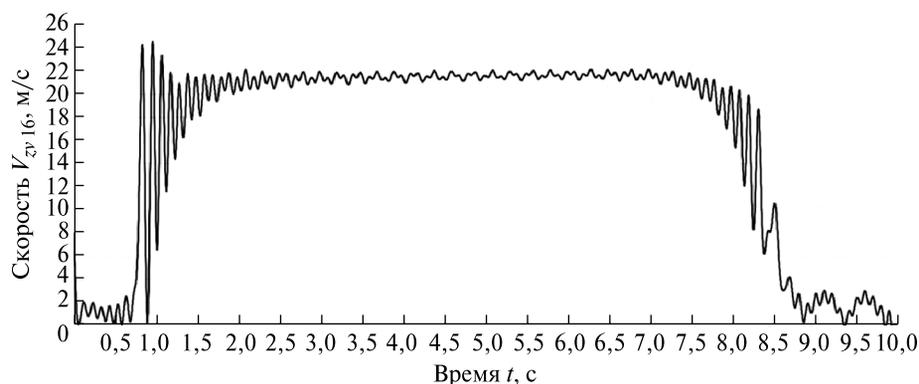
вращения от корпуса на двигатель прекратится. Соединим неподвижно двигатель 2 и фланец 3. Фланец 3 передает вращение от двигателя ротору кустореза 4, ротор представлен фигурой в виде цилиндра  $R_{рот} = 0,0525$  м.

Используем поступательную кинематическую пару, у которой по оси *OZ* сместим систему координат ротора кустореза относительно фланца на 0,015 м, а шарнирную координату (угол) зададим с помощью зависимости угловой скорости от времени (см. рис. 1). Звенья цепи представим

в виде параллелепипеда длиной  $L_{зв} = 0,025$  м, и сторонами равными  $R_{сфер} = 0,005$  м. На концах звеньев расположим сферы радиусом  $R_{сфер}$ . На оси *OX* с обеих сторон ротора кустореза 4 жестко установим проушины крепления 5 (представленные в виде параллелепипеда и одной сферы). Соединим «обобщенным» шарниром  $C_1$  сферу крепления и сферу первого звена лезвия, используем постоянный сдвиг по оси *OX* на величину длины крепления и зададим две вращательные степени свободы относительно



**Рис. 8.** Вид сбоку, траектория движения шестого (крайнего) звена цепи в плоскости  $XOZ$   
**Fig. 8.** Side view, trajectory of the sixth (ending) chain link in the  $XOZ$  plane



**Рис. 9.** Изменение линейной скорости шестого лезвия в процессе имитационного эксперимента  
**Fig. 9.** Change in the linear speed of the sixth blade during the simulation experiment

осей  $OZ$  и  $OY$ . Так как в реальном прототипе между звеньями действуют силы трения, то зададим момент трения  $M_{тр.лз.} = 0,0004 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Аналогично соединяются последующие лезвия (шарниры  $C_1 \dots C_6$ ). Те же действия совершаются с цепью, расположенной симметрично с другой стороны ротора.

Для оценки результатов имитационного моделирования сравним их с полученными данными на лабораторном стенде. Для снятия видео работы стенда был использован режим замедленной съемки камерой Galaxy S20, обеспечивающий скорость съемки 960 кадров/с. Из снятого видео были отобраны отдельные кадры, соответствующие режимам работы ротора кустореза.

## Результаты и обсуждение

Рассмотрим режимы работы ротора кустореза и положение рабочего органа. В момент

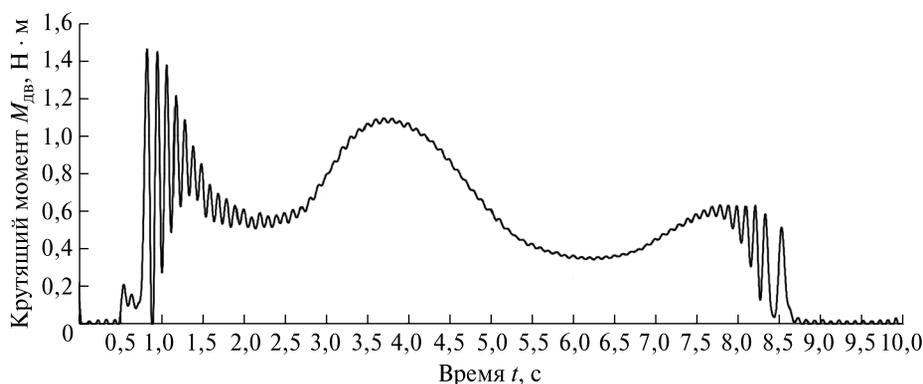
начала разгона или при его окончании цепи могут касаться одна другой (рис. 3).

В момент начала разгона происходит резкое ускорение ротора, и звенья цепи за счет своей инерции и вращения одной относительно другой приобретают положение, представленное на рис. 4.

При разгоне звенья начинают занимать горизонтальное положение (рис. 5).

После разгона наступает фаза холостого хода и звенья под действием силы инерции занимают положение, близкое к горизонтальному, при этом они перемещаются по оси  $OZ$  в пределах нескольких сантиметров (рис. 6–8).

Примем, что поступательная скорость рамы равна  $0,5 \text{ м/с}$ , тогда за  $10 \text{ с}$  рама пройдет  $10 \text{ м}$ . Скорость входящей в поступательную кинематическую пару рама — начало системы координат (почва), поэтому, как только мы укажем значение и запустим процесс на моделирования, рама начнет двигаться поступательно по оси  $OX$ .



**Рис. 10.** Крутящий момент, который преодолевает электродвигатель для вращения ротора

**Fig. 10.** The torque that an electric motor overcomes to rotate the rotor

На основании имитационного эксперимента построим траекторию движения крайнего шестого звена. Для этого сохраним полученные в результате моделирования значения  $X$ ,  $Y$  шестого лезвия и отложим на оси абсцисс координату по  $X$ , а по оси ординат — координату по  $Y$  (см. рис. 6).

Таким образом, видно, что в течение первых 1,5 с происходит разгон, а дальше движение можно считать установившимся, траектория на виде сверху имеет форму циклоиды.

После 8 с угловая скорость снижается (см. рис. 1) и цепи опускаются вниз. Биение цепи, опускание и поднятие наглядно показано на виде сбоку (см. рис. 8).

Для шестого звена цепи найдем, по результатам имитационного эксперимента, скорость в процессе моделирования (рис. 9).

При известной угловой скорости  $\omega_{\text{рот}}$  и расстоянии от оси вращения ротора до оси шестого звена лезвия  $R_6$ , можно найти его линейную скорость по аналитической зависимости  $V_{6\text{зв}} = \omega_{\text{рот}} R_6$ . Из рис. 1 мы знаем угловую скорость на холостом ходу, а из рис. 2 на основании сетки или по параметрам ротора найдем  $R_6$ . По аналитической формуле получим  $V_{6\text{зв}} = 104,6 \cdot 0,202 = 21,18$  м/с, а по результатам эксперимента, для холостого хода (см. рис. 9)  $V_{6\text{зв}} = 21$  м/с.

Найдем по результатам имитационного эксперимента, момент, который создают на валу двигателя силы сопротивления (рис. 10). Видно, что для изученного режима достаточно номинального крутящего момента выбранного двигателя.

## Выводы

1. Разработана имитационная модель в ПК UM 9.1 для моделирования работы ротора с шарнирно установленными лезвиями, отличающаяся

учетом фаз разгона, холостого хода и торможения, а также параметризацией параметров звеньев.

2. Имитационная модель ротора и цепи является параметрической, поэтому может быть оперативно перенастроена на другие размеры, массы, и скорости для моделирования роторов. Разработанная имитационная модель позволяет обосновать конструкции роторов кусторезов, на основании их трехмерных моделей из систем автоматизированного проектирования, что снижает трудоемкость разработки новых кусторезов.

3. Сравнение положения звеньев на фазах работы ротора, полученных путем моделирования и лабораторного эксперимента, показало высокую адекватность модели. Получены числовые значения координат звеньев, их скоростей и момента на валу двигателя на всем процессе моделирования. Их проверка по аналитическим формулам также показала высокую сходимость. Таким образом, цель работы по определению кинематических и динамических характеристик ротора кустореза с шарнирно установленными лезвиями достигнута и модель рекомендуется к использованию.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>*

## Список литературы

- [1] Zhang X., Guan D., Li W., Sun D., Jin C., Yuan F., Wu J. The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: A meta-analysis // *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 429, pp. 36–43. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.06.027

- [2] Kuuluvainen T., Tahvonen O., Aakala T. Even-Aged and Uneven-Aged Forest Management in Boreal Fennoscandia: a review // *AMBIO*, 2012, no. 41(7), pp. 720–737. DOI:10.1007/s13280-012-0289-y
- [3] Бартнев И.М., Драпалюк М.В., Попиков П.И., Бухтояров Л.Д. Конструкции и параметры машин для расчистки лесных площадей. М.: Флинта, Наука, 2007. 208 с.
- [4] Платонов А.А. Платонова М.А. Результаты статистической обработки данных параметров оборудования для очистки линейных инфраструктур // *Современные проблемы математики в прикладных науках: Материалы Всерос. открытой конференции, Воронеж, 15 марта 2022 года*. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, 2022. С. 58–65. DOI: 10.58168/MPMAS2022\_58-65
- [5] Platonova M.A., Platonov A.A., Shchablykin P.N. Practical implementation of the methodology for assessing the density of unwanted growth in the overgrowing of infrastructure facilities // *J. of Agriculture and Environment*, 2022, no. 7(27). DOI: 10.23649/jae.2022.27.7.007
- [6] Платонов А.А. Грабли лесные: назначение, область применения, классификация // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2023. Т. 27. № 6. С. 139–150. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139-150
- [7] Булавинцева А.Д., Мазуркин П.М. Расчет рабочей скорости подачи активного навесного кустореза в зависимости от параметров срезаемого кустарника // *Современные проблемы науки и образования*, 2013. № 5. С. 133–135.
- [8] Glushkov S., Popikov P.I., Malyukov S.V., Chakarov V., Boyadzhiev, D. Study of the work of a self-propelled mulcher in the preparation of forest soils for planting poplar in the conditions of Bulgaria // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, p. 12006. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012006
- [9] Mohite D., Agrawal K., Kumar K., Deb A. Technical Aspects of Multipurpose Weed Cutter or Power Weeder // *IJERSTE*, 2021, v. 10, no 7, p. 33765. DOI: 10.13140/RG.2.2. 11613.33765
- [10] Драпалюк М.В., Бухтояров Л.Д., Куницкая О.А., Прокудина А.В., Григорьева О.И., Отмахов Д.В. Изучение мощностных показателей и качества среза шарнирно-сочлененным и ножевым рабочими органами роторного кустореза // *Системы. Методы. Технологии*, 2023. № 2(58). С. 7–13. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-2-7-13
- [11] Абдразаков Ф.К. Интенсификация технологий и совершенствование технических средств в мелиоративном производстве: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01. Саратов, 2002. 572 с.
- [12] Абдразаков Ф.К., Хальметов А.А. Совершенствование организации и технологии удаления древесно-кустарниковой растительности на оросительных системах с помощью универсального кустореза. Саратов: Изд-во СГАУ им. Н.И. Вавилова, 2013. 124 с.
- [13] Даденко Е.В. Анализ и синтез оптимального процесса срезания кустарника цилиндрической фрезой кустореза-измельчителя: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Ростов-на-Дону, 1983. 21 с.
- [14] Земляной А.А. Разработка и исследование ленточного режущего аппарата машины для контурной обрезки плодовых деревьев: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Мичуринск, 2022. 22 с.
- [15] Куракин В.Н. Обоснование параметров рабочего органа для срезания кустарника: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Л., 1990. С. 174.
- [16] Лушников М.В. Совершенствование технологического процесса и обоснование основных параметров ротационно-консольного кустореза для осветления лесных культур на нераскорчеванных вырубках: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Саратов, 2001. 197 с.
- [17] Мазуркин П.М. Обоснование параметров модульных рабочих органов лесозаготовительных машин на начальных стадиях проектирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Йошкар-Ола, 1995. 403 с.
- [18] Попиков В.П. Обоснование параметров технологического оборудования машины для формирования крон деревьев лесосеменных плантаций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2009. 16 с.
- [19] Завражнов А.А., Ланцев В.Ю., Егоров Д.А., Земляной А.А. Использование электропривода в машинах для 3D контурной обрезки плодовых деревьев // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*, 2012. № 3. С. 220–225.
- [20] Суханов Ю.В., Царев Т.А., Васильев А.С., Ивашнев М.В. Стенд для исследований характеристик процесса резания // *Инженерный вестник Дона*, 2021. № 5(77). С. 121–127.
- [21] Ивашнев М.В. Математический анализ колебательного процесса шарнирно-закрепленного ножа роторного кустореза // *Вузовская наука — региону: Материалы IV Всерос. конф., 21 февраля 2006 г. Вологда: Изд-во ВоГТУ, 2006. Т. 1. С. 41–43.*
- [22] Ивашнев М.В. Математическое описание процесса работы роторного кустореза // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*, 2007. № 181. С. 94–99.
- [23] Ивашнев М.В., Шегельман И.Р., Колесников Г.Н. К вопросу совершенствования узлов роторных кусторезов // *Перспективы науки*, 2014. № 7(58). С. 80–82.
- [24] Ивашнев М.В. Теоретические аспекты создания роторных машин с непрерывным срезанием древесно-кустарниковой растительности // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2014. Т. 2, № 5–3(10–3). С. 127–130. DOI: 10.12737/6942
- [25] Ivashnev M.V., Kalinin R.K., Sukhanov Yu.V., Vasilyev A.S. Protection of Linear Facilities Passing through Forest Territories // *Components of Scientific and Technological Progress*, 2022, no. 9(75), pp. 9–11.
- [26] Драпалюк М.В., Полев В.С. Моделирование рубящих элементов цепного кустореза // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2010. № 6. С. 94–98.
- [27] Бартнев И.М., Малоков С.В. Имитационное моделирование работы кустореза // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2014. Т. 2. № 5–1. С. 192–194.
- [28] Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е. Современное программное обеспечение для проведения исследований по нагрузкам, устойчивости и проходимости машин // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2015. Т. 3. № 5–1(16–1). С. 209–214. DOI: 10.12737/14490
- [29] Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н. Компьютерное моделирование активной подвески транспортного средства с помощью программы SimInTech // *Теория и практика инновационных технологий в АПК:*

- Матер. нац. науч. конф., Воронеж, 19–21 апреля. Ч. I. Воронеж: Изд-во ВГАУ им. Императора Петра I, 2022. С. 24–37.
- [30] Бартенеv И.М., Малоуков С.В. Результаты моделирования работы кустореза, оснащенного упорными-улавливателями порослевин // Тракторы и сельхозмашины, 2014. № 3. С. 9–12.
- [31] Bukhtoyarov L.D., Kunickaya O.I., Urazova A., Perfiliev P., Druzyanova V., Egipko S., Burgonutdinov A., Tikhonov E. Substantiating optimum parameters and efficiency of rotary brush cutters // J. of Applied Engineering Science, 2022, v. 20, pp. 1–10. <https://doi.org/10.5937/jaes0-36513>
- [32] Попиков П.И., Бухтояров Л.Д., Платонов А.А., Вакула Е.Ю. Имитационная модель рабочего процесса манипулятора при удалении нежелательной растительности вместе с корневой системой в лесных насаждениях // Resources and Technology, 2020. Т. 17. № 4. С. 1–14. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5402
- [33] Bukhtoyarov L.D., Drapalyuk M.V., Pridvorova A.V. Simulation of the movement of hedge cutter links in the Simulink application of the Matlab package // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 875, p. 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012004>
- [34] Bukhtoyarov L.D., Maksimenkov A.I., Lysych M.N., Abramov V.V. Movement simulation of flexible working body links in the Unity cross-platform development environment // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., 2020, v. 595, p. 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012014>
- [35] Бартенеv И.М., Попиков П.И., Бухтояров Л.Д. Ротор кустореза. Патент 2238637С1 РФ, МПК А 01 G 23/06, заявитель и патентообладатель ВГЛТА, № 2003103223/12, заявл. 03.02.2003, опубл. 27.10.2004.

## Сведения об авторе

**Бухтояров Леонид Дмитриевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), [vglta-mlx@yandex.ru](mailto:vglta-mlx@yandex.ru)

Поступила в редакцию 16.05.2024.

Одобрено после рецензирования 03.10.2024.

Принята к публикации 14.11.2024.

# OPERATION SIMULATION MODELING OF ROTOR BRUSH CUTTER WITH HINGED BLADES

**L.D. Bukhtoyarov**

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev st., 394087, Voronezh, Russia

vglta-mlx@yandex.ru

The necessity of forest thinning has been determined, and modern methods and equipment for their implementation have been identified. In order to increase the forest crops productivity, it is recommended to thin them. It has been established that the most productive is a mechanized method, in which the technological equipment such as a brush cutter, is located on the basis of wheeled or tracked machines. It has been determined that when developing new equipment for cutting shrubs, it is necessary to justify its parameters. The methods of developing new forest machines have been analyzed and the need for using automated design tools and compiling simulation models in modern software packages that are closely related to design programs has been identified. A simulation model of the brush cutter rotor operation has been created in the Universal Mechanism (UM) software package. The model is recommended for use when justifying the parameters of rotors with articulated working bodies. The links of the brush cutter working body in the simulation model are presented in a simplified form, the blade consists of a parallelepiped and two spheres at the edges, the rotor of the electric motor, the flange and the rotor of the brush cutter working body are in the form of a cylinder. The link models are parametric, which allows the simulation model to be adjusted to different geometric dimensions without losing the connections in the hinges. The simulation model uses 3D-contact interaction UM for the rotor and the chain. The acceleration, idle and braking phases of the rotor with an articulated, chain working element are studied. A laboratory experiment with a brush cutter rotor was conducted, which confirmed the chain motion trajectories obtained by means of simulation modeling. The blade speed at idle was calculated analytically, which confirmed the results obtained on the simulation model. The motion trajectories of the links, their speeds and torque costs on the drive shaft of the electric motor were obtained.

**Keywords:** brush cutter rotor, simulation, universal mechanism, UM

**Suggested citation:** Bukhtoyarov L.D. *Imitacionnoe modelirovanie raboty rotora kustoreza s sharnirno ustanovlennymi lezviyami* [Operation simulation modeling of rotor brush cutter with hinged blades]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 38–49. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-38-49

## References

- [1] Zhang X., Guan D., Li W., Sun D., Jin C., Yuan F., Wu J. The effects of forest thinning on soil carbon stocks and dynamics: A meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 2018, v. 429, pp. 36–43. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.06.027
- [2] Kuuluvainen T., Tahvonon O., Aakala T. Even-Aged and Uneven-Aged Forest Management in Boreal Fennoscandia: a review. *AMBIO*, 2012, no. 41(7), pp. 720–737. DOI:10.1007/s13280-012-0289-y
- [3] Bartenev I.M., Drapalyuk M.V., Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D. *Konstruktivnyye i parametry mashin dlya raschistki lesnykh ploshchadey* [Designs and parameters of machines for clearing forest areas]. Moscow: Flinta, Nauka, 2007, 208 p.
- [4] Platonov A.A., Platonova M.A. *Rezultaty statisticheskoy obrabotki dannykh parametrov oborudovaniya dlya ochistki lineynykh infrastruktur* [Results of statistical processing of data on parameters of equipment for cleaning linear infrastructures]. *Sovremennye problemy matematiki v prikladnykh naukakh: materialy Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii* [Modern problems of mathematics in applied sciences: Materials of the All-Russian open conference], Voronezh, March 15, 2022. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2022, pp. 58–65. DOI: 10.58168/MPMAS2022\_58-65
- [5] Platonova M.A., Platonov A.A., Shcheblykin P.N. Practical implementation of the methodology for assessing the density of unwanted growth in the overgrowing of infrastructure facilities. *J. of Agriculture and Environment*, 2022, no. 7(27). DOI: 10.23649/jae.2022.27.7.007
- [6] Platonov A.A. *Grabli lesnye: naznacheniye, oblast' primeneniya, klassifikatsiya* [Forest rake: purpose, field of application, classification]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 139–150. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-6-139-150
- [7] Bulavintseva A.D., Mazurkin P.M. *Raschet rabochey skorosti podachi aktivnogo navesnogo kustoreza v zavisimosti ot parametrov srezhaemogo kustarnika* [Calculation of the working feed rate of an active mounted brush cutter depending on the parameters of the cut bush]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2013, no. 5, pp. 133–135.
- [8] Glushkov S., Popikov P.I., Malyukov S.V., Chakarov V., Boyadzhiev, D. Study of the work of a self-propelled mulcher in the preparation of forest soils for planting poplar in the conditions of Bulgaria. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, p. 12006. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012006
- [9] Mohite D., Agrawal K., Kumar K., Deb A. Technical Aspects of Multipurpose Weed Cutter or Power Weeder. *IJERSTE*, 2021, v. 10, no 7, p. 33765. DOI: 10.13140/RG.2.2.11613.33765

- [10] Drapalyuk M.V., Bukhtoyarov L.D., Kunitskaya O.A., Prokudina A.V., Grigor'eva O.I., Otmakhov D.V. *Izuchenie moshchnostnykh pokazateley i kachestva sreza sharnirno-sochlenennym i nozhevym rabochimi organami rotornogo kustoreza* [Study of power indicators and cutting quality of articulated and knife working bodies of a rotary brush cutter]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2023, no. 2(58), pp. 7–13. DOI: 10.18324/2077-5415-2023-2-7-13
- [11] Abdrazakov F.K. *Intensifikatsiya tekhnologiy i sovershenstvovanie tekhnicheskikh sredstv v meliorativnom proizvodstve* [Intensification of technologies and improvement of technical means in melioration production]. Dis. D-r Sci. (Tech.) 05.20.01. Saratov, 2002, 572 p.
- [12] Abdrazakov F.K., Khal'metov A.A. *Sovershenstvovanie organizatsii i tekhnologii udaleniya drevesno-kustarnikoy rastitel'nosti na orositel'nykh sistemakh s pomoshch'yu universal'nogo kustoreza* [Improvement of the organization and technology of removing woody and shrubby vegetation in irrigation systems using a universal brush cutter]. Saratov: SSAU named after N.I. Vavilov, 2013, 124 p.
- [13] Dadenko E.V. *Analiz i sintez optimal'nogo protsessa srezaniya kustarnika tsilindricheskoy frezoy kustoreza-izmel'chitelya* [Analysis and synthesis of the optimal process of cutting bushes with a cylindrical cutter of a brush cutter-shredder]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Rostov-on-Don, 1983, 21 p.
- [14] Zemlyanoy A.A. *Razrabotka i issledovanie lentochnoy rezhushchego apparata mashiny dlya konturnoy obrezki plodovykh derev'ev* [Development and study of a belt cutting apparatus of a machine for contour pruning of fruit trees]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.20.01. Michurinsk, 2022, 22 p.
- [15] Kurakin V.N. *Obosnovanie parametrov rabocheho organa dlya srezaniya kustarnika* [Justification of the parameters of the working element for cutting bushes]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Leningrad, 1990, p. 174.
- [16] Lushnikov M.V. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo protsessa i obosnovanie osnovnykh parametrov rotatsionno-konsol'nogo kustoreza dlya osvvetleniya lesnykh kul'tur na neraskorchevannykh vyrubkakh* [Improving the technological process and substantiating the main parameters of a rotary cantilever brush cutter for thinning forest crops in unstumped clearings]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Saratov, 2001, 197 p.
- [17] Mazurkin P.M. *Obosnovanie parametrov modul'nykh rabochikh organov lesozagotovitel'nykh mashin na nachal'nykh stadiyakh proektirovaniya* [Substantiating the parameters of modular working bodies of logging machines at the initial stages of design]. Dis. D-r Sci. (Tech.) 05.21.01. Yoshkar-Ola, 1995, 403 p.
- [18] Popikov V.P. *Obosnovanie parametrov tekhnologicheskogo oborudovaniya mashiny dlya formirovaniya kron derev'ev lesosemennykh plantatsiy* [Substantiating the parameters of the technological equipment of a machine for forming tree crowns in forest seed plantations]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Voronezh, 2009, 16 p.
- [19] Zavrazhnoy A.A., Lantsev V.Yu., Egorov D.A., Zemlyanoy A.A. *Ispol'zovanie elektroprivoda v mashinakh dlya 3D konturnoy obrezki plodovykh derev'ev* [Using an electric drive in machines for 3D contour pruning of fruit trees]. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Michurinsk State Agrarian University], 2012, no. 3, pp. 220–225.
- [20] Sukhanov Yu.V., Tsarev T.A., Vasil'ev A.S., Ivashnev M.V. *Stend dlya issledovaniy kharakteristik protsessa srezaniya* [A stand for studying the characteristics of the cutting process]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2021, no. 5(77), pp. 121–127.
- [21] Ivashnev M.V. *Matematicheskiy analiz kolebatel'nogo protsessa sharnirno-zakreplennogo nozha rotornogo kustoreza* [Mathematical analysis of the oscillatory process of a hinged knife of a rotary brush cutter]. *Vuzovskaya nauka — regionu: Mater. IV Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [University science — to the region: Materials of the IV all-Russian scientific and technical conf.]. Vologda: VoGTU, 2006, v. 1, pp. 41–43.
- [22] Ivashnev M.V. *Matematicheskoe opisaniye protsessa raboty rotornogo kustoreza* [Mathematical description of the operation process of a rotary brush cutter]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the Saint Petersburg Forest Engineering Academy], 2007, no. 181, pp. 94–99.
- [23] Ivashnev M.V., Shegel'man I.R., Kolesnikov G.N. *K voprosu sovershenstvovaniya uzlov rotornykh kustorezov* [On the issue of improving the units of rotary brush cutters]. *Perspektivy nauki* [Prospects of Science], 2014, no. 7(58), pp. 80–82.
- [24] Ivashnev M.V. *Teoreticheskie aspekty sozdaniya rotornykh mashin s nepreryvnyim srezaniem drevesno-kustarnikoy rastitel'nosti* [Theoretical aspects of creating rotary machines with continuous cutting of woody and shrubby vegetation]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2014, v. 2, no. 5–3(10–3), pp. 127–130. DOI: 10.12737/6942
- [25] Ivashnev M.V., Kalinin R.K., Sukhanov Yu.V., Vasilyev A.S. *Protection of Linear Facilities Passing through Forest Territories. Components of Scientific and Technological Progress*, 2022, no. 9(75), pp. 9–11.
- [26] Drapalyuk M.V., Polev V.S. *Modelirovaniye rubyashchikh elementov tsepnogo kustoreza* [Modeling of cutting elements of a chain brush cutter]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2010, no. 6, pp. 94–98.
- [27] Bartenev I.M., Malyukov S.V. *Imitatsionnoye modelirovaniye raboty kustoreza* [Simulation modeling of brush cutter operation]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2014, v. 2, no. 5–1, pp. 192–194.
- [28] Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E. *Sovremennoye programmnnoye obespecheniye dlya provedeniya issledovaniy po nagruzkam, ustoychivosti i prokhodimosti mashin* [Modern software for conducting research on machine loads, stability and cross-country ability]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2015, v. 3, no. 5–1(16–1), pp. 209–214. DOI: 10.12737/14490

- [29] Afonichev D.N., Pilyaev S.N. *Komp'yuternoe modelirovanie aktivnoy podveski transportnogo sredstva s pomoshch'yu programmy SimInTech* [Computer modeling of active vehicle suspension using the SimInTech program]. *Teoriya i praktika innovatsionnykh tekhnologiy v APK: Mater. nats. nauch. konf.* [Theory and practice of innovative technologies in the agro-industrial complex: Materials of the national scientific conference], Voronezh, April 19–21, p. I. Voronezh: VSTU named after Emperor Peter I, 2022, pp. 24–37.
- [30] Bartenev I.M., Malyukov S.V. *Rezul'taty modelirovaniya raboty kustoreza, osnashchennogo uporami-ulavlivatelyami poroslevin* [Results of modeling the operation of a brush cutter equipped with stops-catchers for overgrowth]. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery], 2014, no. 3, pp. 9–12.
- [31] Bukhtoyarov L.D., Kunickaya O.I., Urazova A., Perfiliev P., Druzyanova V., Egipko S., Burgonutdinov A., Tikhonov E. Substantiating optimum parameters and efficiency of rotary brush cutters. *J. of Applied Engineering Science*, 2022, v. 20, pp. 1–10. <https://doi.org/10.5937/jaes0-36513>
- [32] Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D., Platonov A.A., Vakula E.Yu. *Imitatsionnaya model' rabocheho protsessa manipulyatora pri udaleni nezhelatel'noy rastitel'nosti vmeste s kornevoy sistemoy v lesnykh nasazhdeniyakh* [Simulation model of the work process of a manipulator when removing unwanted vegetation along with the root system in forest plantations]. *Resources and Technology* [Resources and Technology], 2020, v. 17, no. 4, pp. 1–14. DOI: 10.15393/j2.art.2020.5402
- [33] Bukhtoyarov L.D., Drapalyuk M.V., Pridvorova A.V. Simulation of the movement of hedge cutter links in the Simulink application of the Matlab package. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, v. 875, p. 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012004>
- [34] Bukhtoyarov L.D., Maksimenkov A.I., Lysych M.N., Abramov V.V. Movement simulation of flexible working body links in the Unity cross-platform development environment. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, v. 595, p. 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/595/1/012014>
- [35] Bartenev I.M., Popikov P.I., Bukhtoyarov L.D. *Rotor kustoreza* [Brush cutter rotor]. Patent 2238637C1 RF, IPC A 01 G 23/06, applicant and patent holder VGLTA, No. 2003103223/12, filed 03.02.2003, published 27.10.2004.

*The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>*

## Author's information

**Bukhtoyarov Leonid Dmitrievich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, [vglta-mlx@yandex.ru](mailto:vglta-mlx@yandex.ru)

Received 16.05.2024.

Approved after review 03.10.2024.

Accepted for publication 14.11.2024.

## ТЕХНИЧЕСКОЕ ТВОРЧЕСТВО СТУДЕНТОВ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ ДЛЯ ЛЕСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

О.Н. Галактионов<sup>✉</sup>, А.П. Соколов, Ю.В. Суханов, А.С. Васильев

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), Россия, 185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, просп. Ленина, д. 33

galakt@petrsu.ru

Кадровое обеспечение лесопромышленного комплекса является актуальной для России задачей, решение которой зависит не только от качества обучения студентов в университетах, но и от их мотивации вести трудовую деятельность в лесной отрасли. Одним из эффективных способов мотивации является повышение интереса студентов к лесным профессиям через их вовлечение в техническое творчество. Целью приведенного исследования является описание опыта применения технического творчества студентов путем решения актуальных проблем предприятий лесопромышленного комплекса в рамках выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР) для повышения мотивированности выпускника к работе в лесной отрасли. Для достижения цели необходимо было решить следующие задачи: на основании анализа материалов учебно-производственной практики выбрать актуальную проблему для предприятия; используя имеющиеся знания и элементы технического творчества предложить пути ее решения; реализовать предложенные идеи в рамках ВКР. Поэтапно описан процесс творческой работы студентов над созданием лабораторной установки для исследования процесса сушки древесины, спроектированной и изготовленной ими в рамках работы над выпускными квалификационными работами. Созданная установка успешно используется в учебной и исследовательской работе студентов, мотивируя их к техническому творчеству по созданию своих проектов. Установка, используется при проведении профориентационных мероприятий для потенциальных абитуриентов как фактический объект творчества студентов вызывает интерес у школьников при проведении мастер-классов. При выполнении работы использовался метод педагогического эксперимента и метод наблюдения. В результате выполнения исследования была показана практическая возможность конструирования студентами лабораторных установок; наблюдение за работой студентов показало рост их интереса к работе над установкой по мере приобретения ею законченного вида; построение действующей установки существенно повысило уверенность выпускников при докладе на защите ВКР по сравнению со студентами выполняющими типовые работы. Выполненные разработки по результатам защиты ВКР были отмечены комиссией как имеющие практическую значимость для предприятий лесопромышленного комплекса. Главным результатом исследования стало трудоустройство участников проекта на предприятия лесопромышленного комплекса.

**Ключевые слова:** подготовка кадров, выпускная квалификационная работа студента, учебная установка, сушка древесины

**Ссылка для цитирования:** Галактионов О.Н., Соколов А.П., Суханов Ю.В., Васильев А.С. Техническое творчество студентов как инструмент подготовки кадров для лесной промышленности // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 50–61.

DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-50-61

Из года в год отмечается возрастающая потребность лесной отрасли в квалифицированном персонале с высшим и средним образованием, о чем свидетельствуют многочисленные публикации на эту тему [1–3]. Сегодня учебные заведения выпускают по лесным направлениям в несколько раз меньше молодых специалистов, чем это необходимо лесной отрасли. При этом значительная часть выпускников не стремится работать по приобретенной в ходе обучения специальности [4].

Лесная отрасль испытывает необходимость в специалистах, которые могли бы оперативно без длительного дополнительного обучения включаться в практическую работу предприятия. Для этого им следует иметь не только теоретические знания, но и навыки применения знаний на практике, опыт работы с имеющимся на лесных предприятиях оборудованием как зачастую морально устаревшим, так и современным инновационным [5].

В работе [6] приводится анализ состояния кадрового обеспечения лесопромышленного комплекса, освещается проблема нехватки специалистов в лесной отрасли. По результатам

исследования авторы сделали вывод о необходимости интенсификации подготовки новых, переподготовки действующих кадров среднего звена и рабочих, о необходимости повышения привлекательности профессий лесного сектора экономики.

Работа [7] посвящена анализу подготовки кадров для лесной отрасли в сфере высшего образования. Автор отмечает, что уровень подготовки научных кадров существенно влияет на развитие предприятий лесопромышленного комплекса и предлагает некоторые меры по решению проблем, связанных с подготовкой кадров в системе высшего образования для лесного хозяйства.

В работе [8] авторы рассматривают проблемы подготовки кадров для лесного комплекса северо-западных и арктических регионов России и отмечают, что одной из приоритетных задач организаций системы высшего образования является подготовка востребованных предприятиями квалифицированных кадров. Ведущее значение в этом направлении отводится опорным университетам.

В работе [9] отмечается, что одна из главных проблем, сдерживающих развитие лесного комплекса, заключается в недостаточном уровне научного и кадрового обеспечения. Для лесопромышленного комплекса актуальными являются вопросы повышения уровня знаний и квалификации работников отрасли. Решение данной проблемы вызывает необходимость модернизации системы профессионального образования.

В работе [10] обосновывается актуальность для предприятий лесного комплекса проблемы подготовки кадров. Для успешного преодоления данной проблемы необходимы вовлечение в процесс обучения преподавателей-практиков, проведение практик на базе реальных производственных процессов. Отмечается, что внедрение инноваций обостряет: «...потребность лесопромышленного комплекса в работниках новых профессий, новых специальностей, реструктуризации объемов существующей профессиональной подготовки, как работников массовых профессий, так и специалистов среднего и высшего звена лесной отрасли» [10].

В работе [11] указано, что выпускнику, планирующему работать в деревообрабатывающей промышленности, следует знать не только физические и механические свойства древесины, но и уметь разрабатывать и создавать высокопроизводительное оборудование, которое управляется современными автоматическими системами управления и микропроцессорами.

В работе [12] приводятся доказательства того, что эффективность системы обучения зависит не только от того, насколько она поддерживается педагогическим составом, но и от того, насколько сильно ее мотивационное сопровождение, а также насколько сильна социализация обучающихся как в учебном, так и в неучебном процессах.

В работе [13] отмечается, что способность к профессиональному общению у студентов инженерных специальностей следует развивать на уровне вузовской подготовки путем создания комплекса соответствующих педагогических условий. Автор на примере педагогического эксперимента по подготовке будущих инженеров к профессиональному общению показывает, какие условия и с какой степенью эффективности способствуют решению данной задачи и на основании его результатов предлагает методические рекомендации по выстраиванию образовательного процесса.

В работе [14] приводятся результаты педагогического эксперимента, направленного на исследование влияния практико-ориентированного подхода при обучении студентов агрономических направлений. Результаты эксперимента показали, что такой подход позволяет подготовить специалиста с уровнем компетенций, соответствующим современным требованиям рынка труда и ожиданиям потенциального работодателя.

Материалы работы [15] отражают поиск оптимального сочетания методов проектного и традиционного обучения и показывают значимую связь между проектным подходом и эффективностью обучения. Творческое участие студентов в выполнении проектов способствует повышению их успеваемости, представляет им дополнительную возможность для расширения кругозора и прививает навыки работы в команде.

В работе [16] отмечено, что привлечение студентов к проектно-исследовательской деятельности способствует интенсификации развития у них навыков сотрудничества внутри трудового коллектива, развивает умение решать реальные производственные задачи. Рационально организованная проектно-исследовательская деятельность способствует развитию у студентов готовности к инновационному поиску, непрерывному обучению, стремлению решать возникающие задачи на основе исследований.

В работе [17] приведены результаты опыта поэтапного вовлечения студентов в техническое творчество, рассмотрено обучение студентов творческому труду как основную составляющую подготовки высококвалифицированных

специалистов в условиях современных стандартов. Кроме того, обращено внимание на необходимость усиления взаимосвязи выпускных квалификационных работ студентов с реальными инновационными разработками и практической деятельностью профильных предприятий.

На наш взгляд, повышение мотивации выпускников Петрозаводского государственного университета к построению своей карьеры на предприятиях лесопромышленного комплекса, может быть достигнуто путем привлечения студентов к проектированию и изготовлению нестандартного лабораторного оборудования с использованием элементов технического творчества.

## Цель работы

Цель работы — анализ опыта применения технического творчества студентов путем решения актуальных проблем предприятий лесопромышленного комплекса в рамках выполнения выпускной квалификационной работы для повышения мотивированности выпускника к работе в лесной отрасли:

Достичь поставленной цели позволило решение следующих задач:

1) сформулировать идею проекта для творческой работы, базирующуюся на анализе материалов учебно-производственной практики пройденной студентом и являющейся актуальной для предприятия лесопромышленного комплекса;

2) изучить имеющиеся возможности лабораторной базы ПетрГУ по реализации проекта, подобрать материалы и методы, позволяющие реализовать проект;

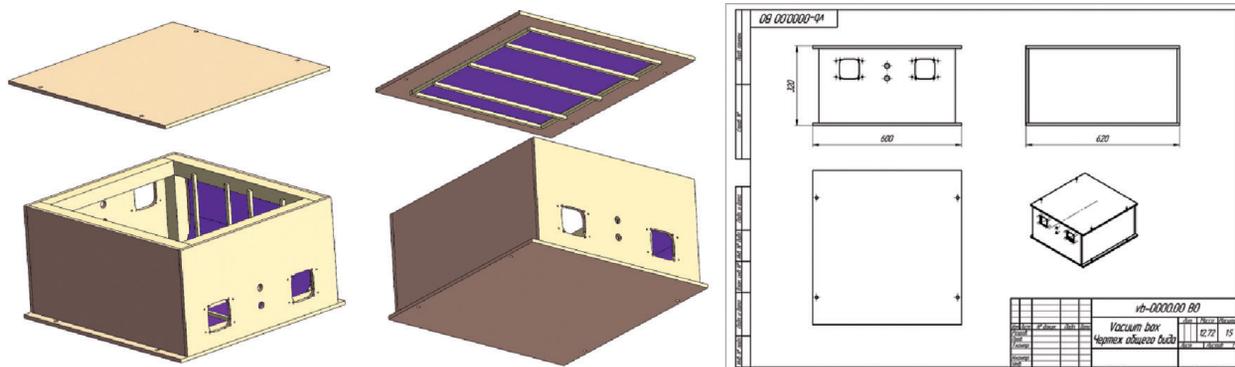
3) разработать и реализовать конструкторские и технологические решения, позволяющие выполнить проект в рамках ВКР.

## Материалы и методы

В качестве основного метода исследования применялся педагогический эксперимент как инструмент проверки эффективности выдвинутой гипотезы о том, что привлечение студентов к проектированию и изготовлению учебного лабораторного оборудования позволяет укрепить теоретические знания, повысить практические компетенции и расширить кругозор. Наблюдение за результатами учебной деятельности студентов, привлеченных к работе над лабораторным оборудованием, использовалось для оценки успешности эксперимента.

В результате санкций и контрсанкций во многих регионах России обострилась проблема переработки балансовых лесоматериалов лиственных пород. Большие объемы березовой древесины из Северо-Западного региона России отправлялись на экспорт в Скандинавские страны, однако в настоящее время поставки приостановились, и большие объемы древесины березы не могут найти своего потребителя [18]. Быстрое решение данной проблемы возможно только при переработке этого сырья на лесопильных предприятиях, что позволит получить продукцию более высоких переделов с высокой добавочной стоимостью, в том числе и клееную древесину [19]. Однако традиционно предприятия северо-западных регионов России ориентируются на массовую распиловку и переработку хвойного сырья, поэтому использование древесины березы требует изменения технологии и приемов работы [20]. Распиловка березы отличается низким выходом заготовок и сложностью обработки. Для получения заготовок древесину необходимо высушить, а древесина березы, в отличие от среднеусыхающих сосны и ели, относится к сильноусыхающим породам [21], подвержена повышенному короблению и трещинообразованию при сушке и, кроме того, требует на 30...40 % большей продолжительности сушки [22]. Сушка — важнейший этап при получении клееной продукции, так как для таких изделий необходимо достигать конечной влажности 10...15 % [23]. С учетом того, что процесс сушки до 30 % увеличивает себестоимость сухих пиломатериалов вследствие их высокой энергоемкости и значительной продолжительности процесса [24], а также по причине большей сложности сушки древесины березы по сравнению с сушкой хвойных пород [25], для глубокой переработки древесины березы и получения качественных заготовок следует этапу сушки уделять повышенное внимание. Отсюда вытекает, что студенты-выпускники должны быть лучше подготовлены, хорошо разбираться в особенностях сушки различных древесных пород.

Для более подробного знакомства студентов лесотехнических направлений обучения с процессами сушки древесины необходимо учебное оборудование, позволяющее проводить лабораторные и исследовательские студенческие работы. Лабораторные сушильные шкафы хорошо подходят для сушки древесины и других материалов, например при реализации прямого метода определения влажности, но недостаточно функциональны с точки зрения проведения лабораторных работ, выполняемых



**Рис. 1.** Конструкция корпуса экспериментального образца установки: *а* — 3D-модель; *б* — чертеж общего вида

**Fig. 1.** Design of the experimental unit housing: *a* — 3D model; *b* — general view drawing

при изучении сушки древесины. Известны зарубежные компактные «столярные» конвективные камеры, но они дорогие и малодоступные для учебных заведений. Существуют комплекты промышленного изготовления, в том числе отечественные, для реализации инфракрасных сушильных камер, однако они обычно рассчитаны на объемы от 1 м<sup>3</sup>, что совершенно избыточно для учебных нужд вследствие больших объемов закладываемого сырья. Другие типы сушильных камер также не подходят для установки в кабинетах учебных заведений. В отсутствие компактного оборудования для исследовательских работ в некоторых учебных заведениях используют промышленное оборудование на предприятиях-партнерах [26, 27], но подобная практика не подходит для проведения студенческих учебных лабораторных работ.

В рамках выпускных квалификационных работ (ВКР) студентами Института лесных, горных и строительных наук Петрозаводского государственного университета П.С. Евшаковым и И.А. Михайловым под руководством преподавателей была разработана и собрана простая компактная учебная установка для изучения процессов сушки древесины, которую можно эксплуатировать в учебных помещениях и задействовать при проведении лабораторных работ студентами младших курсов лесотехнических направлений обучения.

При разработке учебной установки ориентировались на следующие требования:

- возможность собрать экспериментальный образец за период преддипломной практики в лабораториях университета силами студентов;
- минимальная стоимость экспериментального образца;
- электропитание от переменного напряжения 220 В — 50 Гц;

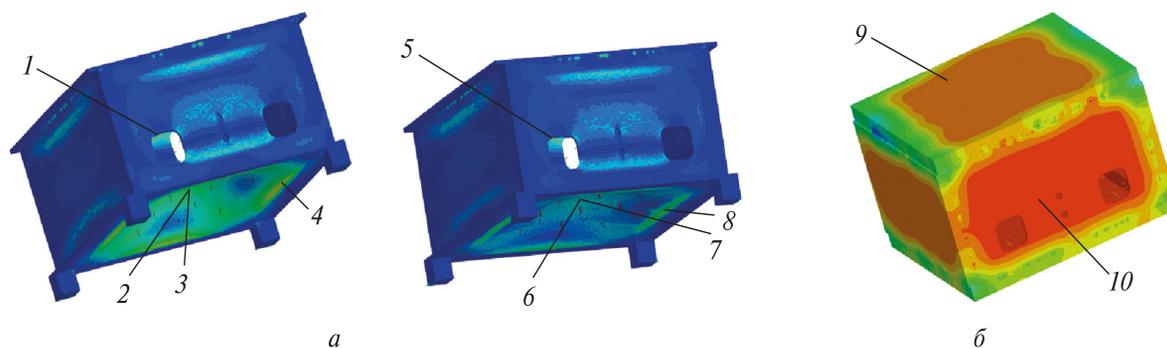
- небольшие массогабаритные характеристики;
- возможность установки экспериментального образца в учебной аудитории;
- подключение к персональному компьютеру для сбора данных с датчиков установки.

Поскольку экспериментальный образец предназначался для проведения в рамках лабораторных работ опытов студентами над заготовками из лиственных и хвойных пород, то было принято решение, что установка должна обеспечить тепловые режимы вплоть до 90 °С, соответствующие мягким и нормальным режимам сушки [28].

В экспериментальном образце учебной установки в качестве нагревательного элемента было принято решение использовать инфракрасный пленочный нагревательный элемент Rexant, включающий в себя две части – для корпуса и крышки корпуса, суммарной мощностью 200 Вт. По данным производителя [29], температура плавления применяемой термопленки составляет не менее 110 °С, что позволяет использовать данное изделие для обеспечения требуемого теплового режима работы — до 90 °С. В качестве основных материалов для постройки корпуса первого экспериментального образца учебной установки были выбраны материалы, имеющиеся в лаборатории университета: хвойная фанера марки ФСФ толщиной 10 мм и брусок хвойный сечением 40×40 мм.

На первом этапе студенты разработали конструкцию экспериментального образца учебной установки с использованием пакета САПР, исходя из требований, предъявляемых к ней, и имеющихся для реализации изделия материалов (рис. 1).

Полученная 3D-модель конструкции корпуса студентами использовалась для предва-



**Рис. 2.** Проверка конструкции на прочность с расчетом эквивалентных напряжений по Мизесу и суммарных линейных перемещений (а) и на температуру на поверхности (б): 1 — 8,672 МПа; 2 — 4,226 мм; 3 — 8,016 МПа; 4 — 20,491 МПа; 5 — 8,672 МПа; 6 — 2,244 мм; 7 — 6,638 МПа; 8 — 15,414 МПа; 9 — 70,425 °С; 10 — 88,145 °С

**Fig. 2.** Strength check of the structure with calculation of equivalent Mises stresses and total linear displacements (a) and surface temperature (b): 1 — 8,672 МПа; 2 — 4,226 мм; 3 — 8,016 МПа; 4 — 20,491 МПа; 5 — 8,672 МПа; 6 — 2,244 мм; 7 — 6,638 МПа; 8 — 15,414 МПа; 9 — 70,425 °С; 10 — 88,145 °С

рительного расчета установки на прочность конечно-элементным анализом с учетом воздействия разряжения в корпусе при подключении водоструйного эжектора, исходя из того, что водоструйный эжектор, изготовленный из водопроводных фитингов, на испытаниях позволил добиться разряжения в 0,05 МПа. Согласно результатам, изложенным в работе [30], остаточное давление 0,05...0,07 МПа существенно увеличивает скорость сушки особенно при удалении из древесины свободной влаги, поэтому в разрабатываемой установке было решено реализовать как опцию такой режим сушки. В результате расчета было принято решение усилить крышку и дно установки ребрами жесткости, для того чтобы снизить напряжения и деформации деталей при работе установки при расчетном разряжении (рис. 2, а). Кроме того, необходимо было выполнить расчет экспериментального образца на теплопотери. В работе [31] приведены данные, указывающие на то, что для промышленных установок потери через ограждения составляют до 21 % суммарного расхода тепла. Расчет теплопотерь через ограждения для разрабатываемой установки был необходим для подбора толщины утеплителя из листового пенополистирола для возможности поддержания внутри камеры установки температуры 90 °С при температуре в помещении 20 °С и суммарной мощности инфракрасного пленочного теплого пола в 200 Вт. Расчеты на теплопотери были выполнены традиционным расчетным методом [32]. Дополнительно, с использованием конечно-элементного анализа, студенты рассчитали максимальные значения температуры на по-

верхности корпуса с утеплителем при температуре рабочей камеры 90 °С (рис. 2, б).

Детали крышки и корпуса установки были выполнены студентами согласно чертежам разработанной конструкции, а далее соединены с использованием саморезов и столярного поливинилацетатного клея, после чего крышка и корпус были на несколько слоев покрыты алкидно-уретановым лаком. Далее корпус и крышка были частично утеплены снаружи листовым пенополистиролом толщиной 30 мм, а также изнутри — фольгированным вспененным полиэтиленом. Частичное утепление продиктовано необходимостью размещения на части боковых стенок фитингов и вентилях и измерительных приборов.

После сборки корпуса экспериментального образца учебной установки студентами был выполнен монтаж инфракрасного пленочного теплового излучателя в корпус и на крышку, сделаны ограждения для размещения опытных образцов древесины. Для наблюдения за процессом сушки в корпус была установлена система датчиков: датчики влажности воздуха и температуры воздуха внутри камеры, датчики температуры образца древесины, датчик температуры снаружи камеры, а для оценки влажности образца древесины был применен кондуктометрический способ, для чего были изготовлены игольчатые двухэлектродные зонды (рис. 3). В качестве датчиков температуры в установке были использованы датчики DS18B20, которые отличаются достаточной точностью и стабильностью [33], причем для датчиков, размещенных в корпусе, был использован вариант датчика в герметичной гильзе. В качестве датчиков влажности и температуры

*a**б*

**Рис. 3.** Внешний вид собранного и подключенного экспериментального образца: *a* — закладка березовых чураков в установку; *б* — готовая к работе установка

**Fig. 3.** Overview of the assembled and connected experimental sample: *a* — putting birch logs into the unit; *б* — ready for operation unit

*a**б**в*

**Рис. 4.** Определение начальной влажности древесины по образцу: *a, б* — этапы получения образца; *в* — результат измерения влажности

**Fig. 4.** Evaluation of the initial moisture content of wood on the sample: *a, б* — stages of obtaining the sample; *в* — the result of moisture measurement

среды в камере были использованы датчики АНТ10, отличающиеся достаточной для учебной установки точностью [34] и доступной ценой, что позволяет при необходимости легко менять данные датчики в установке. Для сбора данных с датчиков используется микроконтроллерная аппаратная платформа Arduino-mini на

базе ATmega168, с которой предварительно обработанные данные передаются на персональный компьютер через USB-TTL конвертер и записываются в текстовый файл на жестком диске каждую секунду.

Для испытания экспериментального образца при проверке количества потребляемой элек-

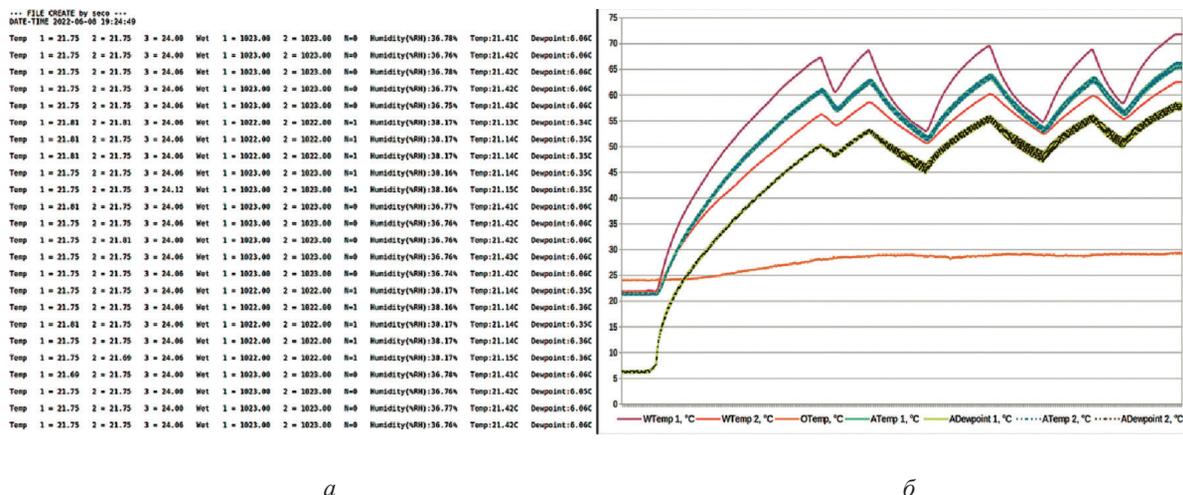


Рис. 5. Пример фрагмента данных с датчиков экспериментальной установки (а) и график температур с датчиков в первые 2 ч работы в одном из режимов сушки (б)  
 Fig. 5. Example of a fragment of data from sensors of the experimental unit (a) and temperature graph from sensors in the first 2 hours of operation in one of the drying modes (b)

троэнергии, требуемой для сушки, использовался индукционный однофазный счетчик типа СО-2, а для контроля разряжения от водоструйного эжектора — вакуумметр типа ВТИ.

При выполнении лабораторной работы начальную и конечную влажность высушиваемой древесины определяют, используя имеющийся в университете прибор Shimadzu МОС-120Н, который прямым весовым методом позволяет определить влажность вещества. Определение влажности прямым весовым методом требует выделить из массива древесины определенный образец, способ взятия данного образца был осуществлен с учетом рекомендаций Руководящих технических материалов ЦНИИМОД [18] — из середины массива древесины выпиливается часть, от которой в дальнейшем отрезаются наружные части для получения образца массой около 15...20 г, который и помещается в прибор МОС-120Н (рис. 4). Аналогичным образом после сушки древесины из центра массива выделялся второй образец, и влажность высушенной древесины определялась на приборе.

В ходе работы экспериментального образца установки данные с датчиков записывались в текстовый файл на жестком диске компьютера, который можно впоследствии открыть и проанализировать студентам при выполнении лабораторной работы, например, с помощью электронных таблиц (рис. 5).

### Результаты и обсуждение

Студенты П.С. Евшаков и И.А. Михайлов, которые в рамках своих ВКР работали над

учебной установкой для изучения процессов сушки древесины, успешно окончили свое обучение в университете, защитив ВКР на оценку «отлично» и продемонстрировав хорошие теоретические знания и уверенные практические навыки.

В настоящее время первый экспериментальный образец учебной установки прошел испытания, доказав свою работоспособность, и позволяет провести лабораторную работу со студентами, в том числе по изучению процесса сушки березовых заготовок. С учетом того, что ранее на кафедре технологии лесного комплекса и ландшафтной архитектуры велись экспериментальные работы по удалению свободной влаги из свежесрубленной древесины механическим способом в центрифуге [35], а также того, что в университете есть инструменты и оборудование для измерения влажности древесины прямыми и косвенными методами, студенты могут на практике плотнее ознакомиться с различным оборудованием для сушки древесины и с методами измерения влажности.

В дальнейшем намечены работы по доработке экспериментального образца учебной установки, в том числе будет реализовано микроконтроллерное управление нагревательными элементами и водопроводными вентилями с электрическим управлением, отвечающими за создание разряжения в камере, для того чтобы не требовался постоянный контроль за установкой и была возможность автоматически реализовывать различные алгоритмы сушки. После исправления всех недочетов первого варианта экспериментального образца плани-

руется, что с привлечением студентов в рамках их ВКР будет разработана вторая конструкция установки из листового полипропилена РР-Н с теплостойкостью до 100 °С, что позволит улучшить эксплуатационные характеристики учебной установки.

Привлечение студентов к разработке и сборке различного учебного оборудования в рамках ВКР позволяет не только получить оборудование для модернизации процесса обучения, но и развивает у студентов-выпускников компетенции связанные со способностью выбирать и использовать методы анализа и реализации технологических процессов деревообработки. Работая над подобными проектами и решая нестандартные задачи, студенты проявляют больший интерес к процессу обучения, получают новые актуальные компетенции, которые были недоступны в рамках базовой программы обучения, например, студенты технологи и механики выпускных курсов плотнее знакомятся с конструкторским программным обеспечением, на деле видят взаимосвязь теории и практики, на практике осваивают азы микроконтроллерного управления, учатся работать с паяльным оборудованием, читать электрические схемы и т. д., что в дальнейшем, безусловно, им пригодится уже на рабочем месте и позволит быстрее включиться в продуктивную трудовую деятельность. При работе над учебным оборудованием рекомендуется создавать малые студенческие коллективы, в том числе, из студентов разных направлений обучения, что позволит студентам более полно использовать свои знания и умения, обмениваться компетенциями, помогать друг другу.

## Выводы

В результате выполнения исследования была показана практическая возможность конструирования студентами лабораторных установок, в том числе, позволяющих использовать их при изучении различных технологических процессов и в профориентационных мероприятиях.

Наблюдение за деятельностью и поведением студентов показало рост их интереса к работе над установкой по мере приобретения ею законченного вида и функционала, следовательно, проект следует разделять на подпроекты с выраженным результатом.

Самостоятельное построение действующей установки существенно повышает уверенность выпускников при докладе на защите ВКР по сравнению со студентами выполняющими типовые работы, так как позволяет глубже погру-

зиться в проблематику работы отрасли и отдельных видов оборудования.

Выполненные разработки по результатам защиты ВКР были отмечены комиссией как имеющие практическую значимость для предприятий лесопромышленного комплекса.

Главным результатом исследования стало трудоустройство участников проекта на предприятиях лесопромышленного комплекса Республики Карелия.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 075-03-2023-128).*

## Список литературы

- [1] Царалунга А.В., Царалунга В.В., Прохорова Н.Л. Проблемы целевой подготовки кадров для лесной отрасли // Евразийский Союз Ученых, 2015. №1–4 (10). С. 100–102.
- [2] Вопросы кадрового обеспечения лесной отрасли обсудили на круглом столе в Совете Федерации // Forestcomplex.ru. 15.10.2020. URL: <https://forestcomplex.ru/forestry/voprosy-kadrovogo-obespecheniya/> (дата обращения 20.04.2023)
- [3] В Карелии наблюдается острый дефицит кадров для работы в лесной отрасли // СТОЛИЦА на Onego.ru. 30.07.2018. URL: <https://stolicaonego.ru/news/v-karelii-nabljudetsja-ostrij-defitsit-kadrov-dlja-raboty-v-lesnoj-otrasli/> (дата обращения 20.04.2023).
- [4] Сумченко А.В., Зиновьева И.С. Кадровое обеспечение лесопромышленного комплекса // Современные наукоемкие технологии. 2013. № 10–2. С. 298–298.
- [5] Лесная отрасль столкнулась с дефицитом кадров // Российская газета — Экономика Центрального округа: № 271(8622). 30.11.2021. URL: <https://rg.ru/2021/11/30/reg-cfo/lesnaia-otrasl-stolknulas-s-deficitom-kadrov.html> (дата обращения 20.04.2023).
- [6] Киселева А.А., Гладких Я.Н. Приоритетные направления привлечения кадров в лесопромышленный комплекс // Науковедение, 2014. № 5 (24). С. 101. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_23039471\\_84551522.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_23039471_84551522.pdf) (дата обращения 06.12.2023).
- [7] Ислакаева Г.Р. Проблемы подготовки кадров в сфере высшего образования для лесного хозяйства России // Вестник БИСТ (Башкирского института социальных технологий), 2015. № 4 (29). С. 104–108.
- [8] Питухин Е.А., Зятева О.А., Соколов В.Е., Пономарев В.А. Подготовка кадров для лесного комплекса северо-западных и арктических регионов России // Перспективы науки и образования, 2023. № 5 (65). С. 780–793. DOI: 10.32744/pse.2023.5.45
- [9] Резникова О.С., Полищук В.В. Профессии будущего на рынке труда в рамках решения биотехнологических внедрений в лесную промышленность // Век качества, 2021. № 2. С. 145–157.

- [10] Алехина Е.И. Значение качества подготовки кадров для предприятий лесной отрасли // *The Scientific Heritage*, 2019. №40–4 (40). С. 3–4
- [11] Лукашевич В.М., Суханов Ю.В., Фомичев Я.В., Играков Е.А., Фортальнов С.А. Техническое творчество как важный элемент подготовки будущих кадров для лесной отрасли // *Лесное хозяйство. Материалы 86-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотр. и аспирантов (с междунар. участием). Отв. за издание И.В. Войтов. Минск: Изд-во Белорусского государственного технологического университета, 2022. С. 148–150.*
- [12] Кожевников М.В., Коняева Е.А., Лапчинская И.В., Савченков А.В. Система выявления и развития одаренных детей в условиях общеобразовательной школы // *Педагогический журнал*, 2021. Т. 11. № 4–1. С. 265–274.
- [13] Шагеева Ф.Т. Развитие в исследовательском университете способности к профессиональному общению у будущих инженеров // *Управление устойчивым развитием*, 2020. № 4 (29). С. 111–117.
- [14] Долгополова А.Ф., Жукова В.А., Гавриленко Е.Н. Роль практико-ориентированного подхода в современной дидактике вуза // *Современное образование*, 2018. № 4. С. 150–159.
- [15] Alamri M.M. Using Blended Project-Based Learning for Students' Behavioral Intention to Use and Academic Achievement in Higher Education // *Educ. Sci.*, 2021, no. 11, p. 207.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci11050207>
- [16] Ибрагимов Г.И. Проектно-исследовательское обучение как технология развития методологической культуры магистрантов // *Образование и саморазвитие*, 2021. Т. 16. № 3. С. 310–321.
- [17] Воителева Л. С. Техническое творчество студентов как средство формирования профессиональных компетенций будущих специалистов связи // *Инновационное развитие профессионального образования*, 2017. № 1. С. 32–34.
- [18] Экспорт лесных грузов в прошлом году упал практически вдвое // *РЖД-Партнер*, 16 января 2023 г. URL: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/reviews/eksport-lesnykh-gruzov-v-proshlom-godu-upal-prakticheski-vdvoe/> (дата обращения: 20.04.2023).
- [19] Чернышев О.Н., Чернышев Д.О., Красов А.Н. Особенности производства клееного щита для производства мебели // *Проблемы науки*, 2019. № 4 (40). С. 36–39.
- [20] Копейкин А.М. Проблемы рационального использования мягколиственного сырья в производстве пилопродукции // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2002. № 2. С. 66–71.
- [21] Михайличенко А.Л., Садовничий Ф.П. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: Высшая школа, 1974. 223 с.
- [22] Богданов Е.С., Козлов В.А., Пейч Н.Н. Справочник по сушке древесины. М.: Лесная пром-сть, 1981. 192 с.
- [23] Корниенко В.А., Орлов А.А. К вопросу переработки низкокачественных пиломатериалов на клееную продукцию с заданными потребительскими свойствами // *Актуальные проблемы лесного комплекса*, 2016. № 45. С. 31–34.
- [24] Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Галаяветдинов Н.Р., Валиев Ф.Г. Разработка энергосберегающей технологии сушки древесины в жидкостях // *Известия вузов. Проблемы энергетики*, 2008. № 11–12. С. 159–163.
- [25] Данилов Ю.П., Бушуев М.С., Курчиков А.В. Закономерности вакуумной сушки березовых и сосновых брусьев // *Актуальные проблемы лесного комплекса*, 2007. № 20. С. 95–96.
- [26] Чернышев А.Н., Ефимова Т.В. Физико-механические показатели и режимы сушки древесины липы без искусственного увлажнения // *Лесотехнический журнал*, 2014. № 4 (16). С. 140–146.
- [27] Курьянова Т.К., Платонов А.Д., Киселева А.В. Энерго- и ресурсосберегающая сушка древесины // *Лесотехнический журнал*, 2014. № 3 (15). С. 199–205.
- [28] Руководящие технические материалы по камерной сушке древесины. Утверждено 25 июня 1984 г. Архангельск: Изд-во ЦНИИМОД, 1985. 69 с.
- [29] Теплый пол пленочный инфракрасный ОПТИМА / ULTRA // Паспорт и руководство пользователя. Rexant. 26 марта 2021. URL: <https://www.sds-group.ru/data/file/instructions/51-0501-7.pdf> (дата обращения: 20.04.2023).
- [30] Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Сафин Р.Г. Высокоинтенсивный процесс сушки древесины // *Актуальные проблемы лесного комплекса*, 2004. № 8. С. 257–259.
- [31] Бабич Д.П., Снопков В.Б. Расход тепловой энергии при сушке пиломатериалов в конвективных сушильных камерах периодического действия // *Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность*, 2012. № 2. С. 154–157.
- [32] Евшаков П.С., Суханов Ю.В., Васильев А.С. Энергосберегающая столярная сушильная камера // *Ресурсосберегающие технологии, материалы и конструкции*. Петрозаводск: Петропресс, 2022. С. 31–34.
- [33] Сучкова Л.И., Хуссейн Ш., Якунин М.А., Якунин А.Г. Исследование долговременной стабильности параметров термодатчиков DS18B20 // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*, 2015. № 1 (35). С. 42–46.
- [34] Liutyi O. Test 5 v10b NaCl solution draft // [liutyi.info](https://wiki.liutyi.info/display/ARDUINO/Test+5+v10b+NaCl+solution+draft). 2021-08-24. URL: <https://wiki.liutyi.info/display/ARDUINO/Test+5+v10b+NaCl+solution+draft> (дата обращения: 20.04.2023).
- [35] Vasilev A.S. On processing wood in the centrifugal force field // *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*, 2021, t. 11, v. 2, no. XXIII, pp. 287–290.

## Сведения об авторах

**Галактионов Олег Николаевич** — д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой технологии и организации лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), galakt@petsru.ru

**Соколов Антон Павлович** — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой транспортных и технологических машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), a\_sokolov@petsru.ru

**Суханов Юрий Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и организации лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), yv\_sukhanov@petsru.ru

**Васильев Алексей Сергеевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и организации лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), alvas@petsru.ru

Поступила в редакцию 17.05.2024.

Одобрено после рецензирования 11.09.2024.

Принята к публикации 14.11.2024.

## STUDENTS TECHNICAL CREATIVITY AS TOOL FOR TRAINING FOREST INDUSTRY PERSONNEL

**O.N. Galaktionov, A.P. Sokolov, Yu.V. Sukhanov, A.S. Vasil'ev**

Petrozavodsk State University, 33, av. Lenin Street, 185910, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

galakt@petsru.ru

Personnel staffing of the timber industry is a topical issue for our country. The solution of this problem depends not only on the quality of students' education at universities, but also on their motivation to work in the forestry sector. One of the effective ways of motivation is to increase the students' interest in forestry professions through their education. Students' interest in forestry professions through their involvement in technical creativity. The aim of this study is to describe the experience of application technical creativity of students by solving topical problems of the forestry complex enterprises in the framework of the graduate qualification work (GQW) to increase the motivation of graduates to work in the forest industry. To achieve the goal, it was necessary to do the following tasks: on the basis of the educational and industrial training to choose the topical issues for the enterprise; in accordance with the available knowledge and elements of technical creativity to propose ways of its solution; to implement the proposed ideas within the framework of the GQW. The article describes step-by-step process of creative work of students on creation of the laboratory installation for research of wood drying process, designed and manufactured by them within the framework of work on final qualification works. The installation is used when conducting career guidance activities for potential entrants as an actual object of creativity of students arouses the interest of schoolchildren when conducting career guidance activities. The method of pedagogical experiment and the method of observation were used in carrying out the work. As a result of the research was the practical possibility of designing laboratory installations by students; the observation of students' work showed the growth of their interest to work on the installation as it acquires a finished form; the construction of an operating installation significantly increased the confidence of graduates when reporting on the work in progress compared to students performing standard works. The developments made by the results of the research were noted by the commission as having practical significance for the enterprises of the timber industry complex. The main result of the research was the employment of the project participants at the enterprises of the timber industry complex.

**Keywords:** personnel training, students qualifying work, educational laboratory machine, wood drying equipment

**Suggested citation:** Galaktionov O.N., Sokolov A.P., Sukhanov Yu.V., Vasil'ev A.S. *Tekhnicheskoe tvorchestvo studentov kak instrument podgotovki kadrov dlya lesnoy promyshlennosti* [Students technical creativity as tool for training forest industry personnel]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 50–61. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-50-61

## References

- [1] Tsaralunga A.V., Tsaralunga V.V., Prokhorova N.L. *Problemy tselevoy podgotovki kadrov dlya lesnoy otrasli* [Problems of targeted training of personnel for the forestry industry]. *Evrasiyskiy Soyuz Uchenykh* [Eurasian Union of Scientists], 2015, no. 1–4 (10), pp. 100–102.

- [2] *Voprosy kadrovogo obespecheniya lesnoy otrasli obsudili na kruglom stole v Sovete Federatsii* [Issues of personnel provision for the forestry industry were discussed at a round table in the Federation Council]. *Forestcomplex.ru*, 15.10.2020. Available at: <https://forestcomplex.ru/forestry/voprosy-kadrovogo-obespecheniya/> (accessed 20.04.2023)
- [3] *V Karelii nablyudaetsya ostryy defitsit kadrov dlya raboty v lesnoy otrasli* [In Karelia, there is an acute shortage of personnel to work in the forestry industry]. *STOLITSA na Onego.ru* [STOLITSA on Onego.ru]. 30.07.2018. Available at: <https://stolicaonego.ru/news/v-karelii-nabljudatsja-ostryj-defitsit-kadrov-dlja-raboty-v-lesnoj-otrasli/> (accessed 20.04.2023).
- [4] Sumchenko A.V., Zinov'eva I.S. *Kadrovoe obespechenie lesopromyshlennogo kompleksa* [Personnel provision of the forestry complex]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies], 2013, no. 10–2, pp. 298–298.
- [5] *Lesnaya otrasl' stolknulas's defitsitom kadrov* [The forestry industry is faced with a personnel shortage]. *Rossiyskaya gazeta — Ekonomika Tsentral'nogo okruga* [Rossiyskaya Gazeta — Economy of the Central District], no. 271 (8622), 30.11.2021. Available at: <https://rg.ru/2021/11/30/reg-cfo/lesnaia-otrasl-stolknulas-s-deficitom-kadrov.html> (accessed 20.04.2023).
- [6] Kiseleva A.A., Gladkikh Ya.N. *Prioritetnye napravleniya privlecheniya kadrov v lesopromyshlennyy kompleks* [Priority areas for attracting personnel to the forestry complex]. *Naukovedenie*, 2014, no. 5 (24), p. 101. Available at: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_23039471\\_84551522.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_23039471_84551522.pdf) (accessed 06.12.2023).
- [7] Islakaeva G.R. *Problemy podgotovki kadrov v sfere vysshego obrazovaniya dlya lesnogo khozyaystva Rossii* [Problems of training personnel in the field of higher education for forestry in Russia]. *Vestnik BIST (Bashkirskogo instituta sotsial'nykh tekhnologii)* [Bulletin of BIST (Bashkir Institute of Social Technologies)], 2015, no. 4 (29), pp. 104–108.
- [8] Pitukhin E.A., Zyateva O.A., Sokolov V.E., Ponomarev V.A. *Podgotovka kadrov dlya lesnogo kompleksa severo-zapadnykh i arkticheskikh regionov Rossii* [Training of personnel for the forestry complex of the northwestern and arctic regions of Russia]. *Perspektivy nauki i obrazovaniya* [Prospects of Science and Education], 2023, no. 5 (65), pp. 780–793. DOI: 10.32744/pse.2023.5.45
- [9] Reznikova O.S., Polishchuk V.V. *Professii budushchego na rynke truda v ramkakh resheniya biotekhnologicheskikh vnedreniy v lesnuyu promyshlennost'* [Professions of the future in the labor market within the framework of the solution of biotechnological implementations in the forestry industry]. *Vek kachestva* [The Century of Quality], 2021, no. 2, pp. 145–157.
- [10] Alekhina E.I. *Znachenie kachestva podgotovki kadrov dlya predpriyatiy lesnoy otrasli* [The Importance of the Quality of Personnel Training for Enterprises of the Forestry Industry]. *The Scientific Heritage*, 2019, no. 40–4 (40), pp. 3–4.
- [11] Lukashovich V.M., Sukhanov Yu.V., Fomichev Ya.V., Igrakov E.A., Fortal'nov S.A. *Tekhnicheskoe tvorchestvo kak vazhnyy element podgotovki budushchikh kadrov dlya lesnoy otrasli* [Technical creativity as an important element in training future personnel for the forestry industry]. *Lesnoe khozyaystvo. Materialy 86-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Forestry. Proceedings of the 86th scientific and technical conference of faculty, researchers and graduate students (with international participation). Responsible for the publication I.V. Voitov]. Minsk: Belarusian State Technological University, 2022, pp. 148–150.
- [12] Kozhevnikov M.V., Konyaeva E.A., Lapchinskaya I.V., Savchenkov A.V. *Sistema vyyavleniya i razvitiya odarenykh detey v usloviyakh obshcheobrazovatel'noy shkoly* [The system of identifying and developing gifted children in a comprehensive school]. *Pedagogicheskii zhurnal* [Pedagogical J.], 2021, v. 11, no. 4–1, pp. 265–274.
- [13] Shageeva F.T. *Razvitie v issledovatel'skom universitete sposobnosti k professional'nomu obshcheniyu u budushchikh inzhenerov* [Developing the Professional Communication Abilities of Future Engineers at a Research University]. *Upravlenie ustoychivym razvitiem* [Sustainable Development Management], 2020, no. 4 (29), pp. 111–117.
- [14] Dolgopolova A.F., Zhukova V.A., Gavrilenko E.N. *Rol' praktiko-orientirovannogo podkhoda v sovremennoy didaktike VUZa* [The Role of a Practice-Oriented Approach in Modern University Didactics]. *Sovremennoe obrazovanie* [Modern Education], 2018, no. 4, pp. 150–159.
- [15] Alamri M.M. Using Blended Project-Based Learning for Students' Behavioral Intention to Use and Academic Achievement in Higher Education. *Educ. Sci.*, 2021, no. 11, p. 207. DOI: <https://doi.org/10.3390/educsci11050207>
- [16] Ibragimov G.I. *Proektno-issledovatel'skoe obuchenie kak tekhnologiya razvitiya metodologicheskoy kul'tury magistrantov* [Project-based research learning as a technology for developing the methodological culture of master's students]. *Obrazovanie i samorazvitie* [Education and self-development], 2021, v. 16, no. 3, pp. 310–321.
- [17] Voiteleva L.S. *Tekhnicheskoe tvorchestvo studentov kak sredstvo formirovaniya professional'nykh kompetentsiy budushchikh spetsialistov svyazi* [Technical creativity of students as a means of forming professional competencies of future communications specialists]. *Innovatsionnoe razvitie professional'nogo obrazovaniya* [Innovative development of professional education], 2017, no. 1, pp. 32–34.
- [18] *Eksport lesnykh gruzov v proshlom godu upal prakticheski vdvoe* [Last year, timber exports fell by almost half]. *RZD-Partner*, January 16, 2023. Available at: <https://www.rzd-partner.ru/zhd-transport/reviews/eksport-lesnykh-gruzov-v-proshlom-godu-upal-prakticheski-vdvoe/> (accessed 20.04.2023).
- [19] Chernyshev O.N., Chernyshev D.O., Krasov A.N. *Osobennosti proizvodstva kleenogo shchita dlya proizvodstva mebeli* [Features of the production of glued laminated boards for furniture production]. *Problemy nauki*, 2019, no. 4 (40), pp. 36–39.
- [20] Kopeykin A.M. *Problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya myagkolistvennogo syr'ya v proizvodstve piloproduktcii* [Problems of rational use of softwood raw materials in the production of sawn timber]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2002, no. 2, pp. 66–71.
- [21] Mikhaylichenko A.JI., Sadovnichiy F.P. *Drevesinovedenie i lesnoe tovarovedenie* [Wood Science and Forest Merchandising]. Moscow: Vysshaya shkola, 1974, 223 p.
- [22] Bogdanov E.S., Kozlov V.A., Peych N.N. *Spravochnik po sushke drevesiny* [Handbook of Wood Drying]. Moscow: Lesnaya prom-st, 1981, 192 p.
- [23] Kornienko V.A., Orlov A.A. *K voprosu pererabotki nizkokachestvennykh pilomaterialov na kleenuyu produktsiyu s zadannymi potrebitel'skimi svoystvami* [On the Issue of Processing Low-Quality Lumber into Glued Products with Specified Consumer Properties]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual Problems of the Forest Complex], 2016, no. 45, pp. 31–34.

- [24] Safin R.R., Khasanshin R.R., Galyavetdinov N.R., Valiev F.G. *Razrabotka energosberegayushchey tekhnologii sushki drevesiny v zhidkostyakh* [Development of Energy-Saving Technology for Drying Wood in Liquids]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [News of Universities. Problems of Energy], 2008, no. 11–12, pp. 159–163.
- [24] Safin R.R., Khasanshin R.R., Galyavetdinov N.R., Valiev F.G. *Razrabotka energosberegayushchey tekhnologii sushki drevesiny v zhidkostyakh* [Development of energy-saving technology for drying wood in liquids]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [News of universities. Problems of energy], 2008, no. 11–12, pp. 159–163.
- [25] Danilov Yu.P., Bushuev M.S., Kurchikov A.V. *Zakonomernosti vakuumnoy sushki berezovykh i sosnovykh brus'ev* [Regularities of vacuum drying of birch and pine beams]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2007, no. 20, pp. 95–96.
- [26] Chernyshev A.N., Efimova T.V. *Fiziko-mekhanicheskie pokazateli i rezhimy sushki drevesiny lipy bez iskusstvennogo uvlazhneniya* [Physicommechanical indicators and drying modes of linden wood without artificial moisture]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry J.], 2014, no. 4 (16), pp. 140–146.
- [27] Kur'yanova T.K., Platonov A.D., Kiseleva A.V. *Energo- i resursosberegayushchaya sushka drevesiny* [Energy- and resource-saving drying of wood]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry J.], 2014, no. 3 (15), pp. 199–205.
- [28] *Rukovodyashchie tekhnicheskie materialy po kamernoy sushke drevesiny* [Technical guidelines for chamber drying of wood]. Approved on June 25, 1984. Arkhangelsk: TsNIIMOD, 1985, 69 p.
- [29] *Teplyy pol plenochnyy infrakrasnyy OPTIMA / ULTRA* [OPTIMA / ULTRA film infrared underfloor heating. Passport and user manual]. Rexant. March 26, 2021. Available at: <https://www.sds-group.ru/data/file/instructions/51-0501-7.pdf> (accessed 20.04.2023).
- [30] Safin R.R., Khasanshin R.R., Safin R.G. *Vysokointensivnyy protsess sushki drevesiny* [High-intensity wood drying process]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2004, no. 8, pp. 257–259.
- [31] Babich D.P., Snopkov V.B. *Raskhod teplovooy energii pri sushke pilomaterialov v konvektivnykh sushil'nykh kamerakh periodicheskogo deystviya* [Thermal energy consumption during drying of sawn timber in periodic convective drying chambers]. *Trudy BGТУ. № 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Proceedings of BSTU. no. 2. Forestry and woodworking industry], 2012, no. 2, pp. 154–157.
- [32] Evshakov P.S., Sukhanov Yu.V., Vasil'ev A.S. *Energosberegayushchaya stolyarnaya sushil'naya kamera* [Energy-saving carpentry drying chamber]. *Resursosberegayushchie tekhnologii, materialy i konstruktсии* [Resource-saving technologies, materials and designs]. Petrozavodsk: Publishing house Petropress, 2022, pp. 31–34.
- [33] Suchkova L.I., Khusseyin Sh., Yakunin M.A., Yakunin A.G. *Issledovanie dolgovremennoy stabil'nosti parametrov termodatchikov DS18B20* [Study of long-term stability of parameters of DS18B20 temperature sensors]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2015, no. 1 (35), pp. 42–46.
- [34] Liutyi O. Test 5 v10b NaCl solution draft. [liutyi.info](https://wiki.liutyi.info/display/ARDUINO/Test+5+v10b+NaCl+solution+draft). 2021-08-24. Available at: <https://wiki.liutyi.info/display/ARDUINO/Test+5+v10b+NaCl+solution+draft> (accessed 20.04.2023).
- [35] Vasilev A.S. On processing wood in the centrifugal force field. *AD ALTA: Journal of Interdisciplinary Research*, 2021, t. 11, v. 2, no. XXIII, pp. 287–290.

*The work was performed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-03-2023-128).*

## Authors' information

**Galaktionov Oleg Nikolaevich**  — Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Technology and organization of the forest complex of Petrozavodsk State University, [galakt@petsru.ru](mailto:galakt@petsru.ru)

**Sokolov Anton Pavlovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Transport and technological machines and equipment of Petrozavodsk State University, [a\\_sokolov@petsru.ru](mailto:a_sokolov@petsru.ru)

**Sukhanov Yuriy Vladimirovich** — Cand. Sci. (Tech.), Department of technology and organization of the forestry complex of Petrozavodsk State University, [yv\\_sukhanov@petsru.ru](mailto:yv_sukhanov@petsru.ru)

**Vasil'ev Aleksey Sergeevich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Technology and organization of the forestry complex, Petrozavodsk State University, [alvas@petsru.ru](mailto:alvas@petsru.ru)

Received 17.05.2024.

Approved after review 11.09.2024.

Accepted for publication 14.11.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
 The authors declare that there is no conflict of interest

## КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТАНДЕМНЫХ МОСТОВ ЛЕСНЫХ МАШИН

А.В. Горбачев<sup>1</sup>✉, С.А. Коростелев<sup>1</sup>, С.А. Ченских<sup>1</sup>,  
В.Е. Колотилин<sup>2</sup>, В.Ф. Кулепов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова» (АлтГТУ), Россия, 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева» (НГТУ), Россия, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

aleks\_gorb@mail.ru

Представлен анализ конструктивных особенностей тандемных мостов лесных машин. Приведена классификация лесных машин в зависимости от их назначения и характеристик. Рассмотрены конструкции тандемных мостов с цепным и шестеренчатым приводом и с приводом Робсона. Сделаны выводы о применимости каждого из них при проектировании и производстве лесных машин разных классов. Выявлены достоинства и недостатки рассматриваемых конструктивных схем тандемных мостов. Определены направления совершенствования конструкции тандемных мостов.

**Ключевые слова:** тандемный мост, балансир тандемного моста, лесная машина, цепной привод, шестеренчатый привод, привод Робсона

**Ссылка для цитирования:** Горбачев А.В., Коростелев С.А., Ченских С.А., Колотилин В.Е., Кулепов В.Ф. Конструктивные особенности тандемных мостов лесных машин // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 62–83. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-62-83

Россия является мировым лидером по запасам древесины (около 23 %). Леса России занимают 1118,4 млн га, что составляет 69 % всей территории [1].

Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» определил задачу сохранения лесов, в том числе на основе их воспроизводства на всех участках, вырубленных и погибших лесных насаждений.

Фонд лесовосстановления в Российской Федерации, по данным Росстата, составляет 29,46 млн га. Работы по ежегодному лесовосстановлению проводятся на площади около 850 тыс. га., в том числе по искусственному лесовосстановлению — на площади около 180 тыс. га, а рубки ухода — на площади около 500 тыс. га [1, 2].

Для повышения эффективности устойчивого использования и воспроизводства лесных ресурсов Российской Федерации требуется многофункциональный транспортно-технологический комплекс машин, обеспечивающий высокую механизацию лесохозяйственных мероприятий. В настоящее время при их про-

ведении преобладает колесная техника, в частности валочно-сучкорезно-раскряжевные машины (харвестеры) и сортиментоподборщики (форвардеры).

По сравнению с трелевочными машинами с гусеничным движителем колесные машины обладают следующими преимуществами:

- значительно уменьшают разрушение почвы благодаря перевозке леса полностью погруженным способом;
- способны преодолевать сложный рельеф, что позволяет выполнять транспортировку древесины из труднодоступных участков леса;
- обеспечивают эффективную работу независимо от габаритов лесоматериалов;
- характеризуются высокой эффективностью сбора и транспортировки лесосечного мусора;
- обладают широким диапазоном скорости и лучшей маневренностью;
- способны доставлять груз по дорогам общего пользования, что значительно снижает затраты на логистику;
- обладают меньшей металлоемкостью и, как следствие, меньшей стоимостью производства.

подавляющее большинство современных колесных лесных машин имеют двухзвенную конструкцию с шарнирно-сочлененной рамой



**Рис. 1.** Погрузочно-транспортные машины: *а* — колесная схема 4×4 (Амкодор-2641); *б* — колесная схема 6×6 (Амкодор-2661-01); *в* — колесная схема 8×8 (Амкодор-2682-01); *г* — двухзвенная компоновочная схема (Беларус МПТ 461.1)

**Fig. 1.** Load-haul-dump machines: *a* — 4×4 wheeled scheme (Amkodor-2641); *б* — 6×6 wheeled scheme (Amkodor-2661-01); *в* — 8×8 wheeled scheme (Amkodor-2682-01); *г* — two-link layout (Belarus MPT 461.1)

и колесную схему 4×4, 6×6 и 8×8. Также встречаются сортиментоподборщики, выполненные по прицепному варианту, у которых в качестве энергетического модуля выступает сельскохозяйственный колесный трактор, а технологический модуль, содержащий манипулятор и погрузочную платформу, выполнен в виде прицепа (рис. 1).

В конструкции ходовой части колесных лесозаготовительных и лесохозяйственных машин широко применяются мосты тандемного типа, обладающие высокой несущей способностью, что позволяет существенно повысить их технико-экономические показатели.

Конструктивные особенности тандемных мостов в совокупности с двухзвенной несущей системой лесных машин обеспечивают необходимый дорожный просвет при движении по сложному рельефу и постоянный контакт ведущих колес с опорной поверхностью, что позволяет обеспечить высокое тяговое усилие. Обтекаемая форма балансира тандемного моста обеспечивает меньшее сопротивление при движении машины по заболоченной местности.

К одному из основных недостатков конструкции тандемного моста относится появ-

ление реактивного момента на балансирах, что приводит к перераспределению нормальных реакций под колесами балансира и изменению максимальной касательной силы тяги по условию сцепления с почвой, а также вызывает циркуляцию паразитной мощности.

## Цель работы

Цель работы — анализ особенностей конструкций тандемных мостов, применяемых при создании лесохозяйственных и лесозаготовительных машин разных классов.

## Материалы и методы

Анализ конструкций тандемных мостов лесных машин проведен на основании обзора специальной литературы, представленной в свободных источниках информации, доступных данных на сайтах производителей лесных машин и инструкций по эксплуатации лесных машин, а также в результате исследования патентной базы и научной литературы по соответствующей тематике.

Т а б л и ц а 1

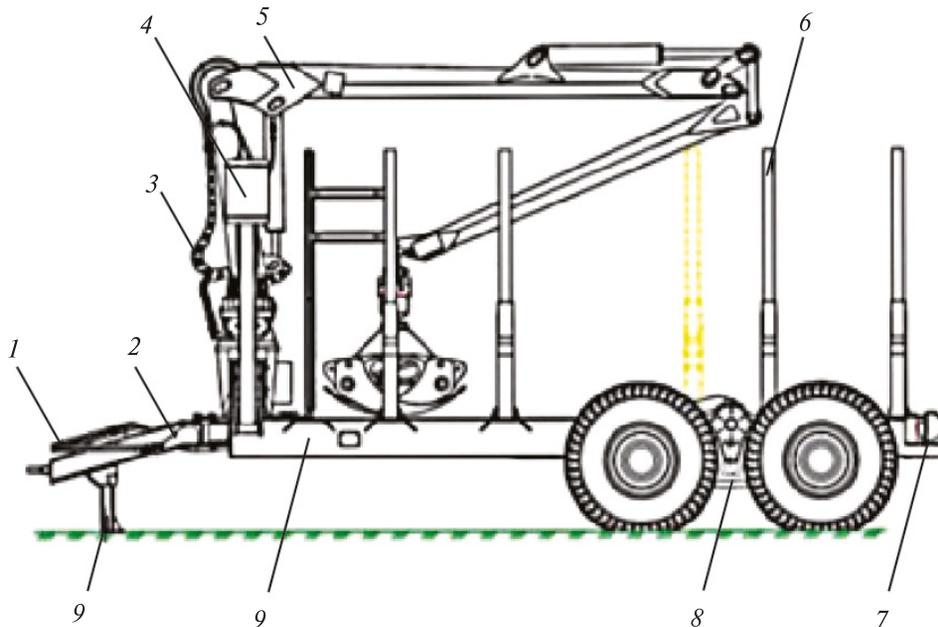
**Классификация колесных харвестерных машин**  
**Classification of wheeled harvester machines**

Класс машин	Назначение	Масса, кг	Мощность, кВт	Максимальный диаметр спиливаемого дерева, см
Легкий	Для прореживания	До 13 000	До 130	До 450
Средний	Для выборочных и сплошных рубок	13 000...16 000	110...150	До 600
Тяжелый	Для сплошных рубок	Свыше 16 000	Свыше 150	До 800

Т а б л и ц а 2

**Классификация форвардеров**  
**Classification of forwarders**

Класс	Назначение	Мощность, кВт	Грузоподъемность, т	Масса, т	Колесная формула
Легкие	Для прореживания	До 110	До 12	До 12	4×4; 6×6; 8×8
Средние	Для выборочных и сплошных рубок	От 110 до 150	От 12 до 15	От 12 до 16	6×6; 8×8
Тяжелые	Для сплошных рубок	Свыше 150	Свыше 15	Свыше 16	8×8; 10×10



**Рис. 2.** Полуприцеп многофункциональный ПМ-10: 1 — гидросистема дышла; 2 — гидроруляемое дышло; 3 — гидросистема манипулятора; 4 — аутригеры гидро-манипулятора; 5 — манипулятор с грейферным захватом; 6 — коники; 7 — электрооборудование полуприцепа; 8 — фрикционный ролик; 9 — рама; 10 — опора

**Fig. 2.** Multifunctional semi-trailer PM-10: 1 — hydraulic system of drawbar; 2 — hydraulically controlled drawbar; 3 — hydraulic system of manipulator; 4 — hydromanipulator outriggers; 5 — manipulator with grapple; 6 — cones; 7 — electrical equipment of the semi-trailer; 8 — friction roller; 9 — frame; 10 — support

**Классификация лесных машин.** В последнее время в Российской Федерации механизированный вариант заготовки древесины с использованием ручного труда уступает место машинной заготовке по так называемой скандинавской технологии, предусматривающей выполнение большей части технологических операций непосредственно на месте [3–7].

Применение скандинавской технологии предусматривает использование машинных комплексов, состоящих, как правило, из двух колесных машин — харвестера (валочно-сучкорезно-раскряжевочной машины) и форвардера (сортиментоподборщика) для трелевки получаемых сортиментов на погрузочный пункт.

Также скандинавский вариант трелевки древесины форвардером в полностью погруженном положении широко применяется и при механизированном варианте заготовки древесины.

Отсюда напрашивается вывод о том, что в настоящее время в России трелевочные операции выполняются преимущественно форвардерами, имеющими колесный движитель [8–14].

В соответствии с техническими характеристиками колесные лесозаготовительные и лесотранспортные машины условно можно подразделить на три класса. Так, в работе «Технология и машины лесосечных работ» [15] д-р техн. наук В.И. Пятакин предлагает классифицировать колесные харвестеры следующим образом (табл. 1).

К наиболее многочисленному по количеству представленных моделей относится средний класс, составляющий примерно 40 % общего количества колесных лесосечных машин, предназначенных для выполнения выборочных и сплошных рубок лесоматериала со средним объемом ствола. Большинство машин этого класса имеют повышенную устойчивость и маневренность и могут работать в насаждениях, расположенных на участках с различной сложностью рельефа.

Харвестеры легкого класса массой до 13 т, предназначенные для проведения практически всех видов рубок ухода, составляют примерно 32 % общей численности машин такого типа. Они обладают хорошей габаритной проходимостью и повышенной маневренностью в условиях густых насаждений.

На долю харвестеров тяжелого класса, предназначенных для использования в крупных древостоях при крупномасштабных заготовках леса, приходится 28 % общей численности лесосечных машин [16–21].

Форвардеры обычно работают совместно с харвестерами, составляя лесозаготовительный машинный комплекс, в связи с чем в зависимости

от технических характеристик так же как и харвестеры подразделяются на три класса — легкий, средний и тяжелый (табл. 2).

Модели форвардеров (46 %) относятся преимущественно к классу средних. Эти универсальные машины используются как при рубках ухода, так и при рубках спелого леса. Тяговое усилие форвардеров среднего класса достигает 130...180 кН.

Класс легких машин составляет 36 % относительно всех форвардеров. В основном это модели, предназначенные для проведения всех видов рубок ухода, которые можно использовать и при сплошных малообъемных рубках древостоев с небольшим объемом стволов. Грузоподъемность форвардеров этого класса составляет 9...12 т, максимальное тяговое усилие — 120...150 кН.

К классу тяжелых относятся 18 % моделей форвардеров. Это машины большой грузоподъемности, применяемые при сплошных рубках крупномерного леса. При минимальном количестве рейсов они в полном объеме выполняют производственную программу по вывозке древесины с лесосеки. Грузоподъемность таких машин составляет от 16 до 21 т, максимальное тяговое усилие — 180...230 кН.

Наряду с форвардерами при проведении рубок скандинавским способом широко применяются прицепные погрузочно-транспортные машины, созданные на базе колесных сельскохозяйственных тракторов и, как правило, двухосного прицепа, оснащенного гидроманипулятором (рис. 2).

Существующие в настоящее время прицепные погрузочно-транспортные машины по конструктивным особенностям можно классифицировать следующим образом:

- по наличию гидросистем:
  - автономная;
  - общая;
- по наличию гидроуправляемого дышла:
  - с гидроуправлением;
  - без гидроуправления;
- по наличию аутригеров:
  - с аутригерами;
  - без аутригеров;
- по месту установки гидроманипулятора:
  - на платформе прицепа;
  - на раме трактора;
- по наличию привода осей прицепа:
  - без привода;
  - с активным приводом.

Наряду с перечисленными типами лесных машин в настоящее время при проведении работ, связанных с малообъемными рубками ухода, работами по осветлению, а также с



*a*



*б*



*в*

**Рис. 3.** Малогабаритные лесные машины: *a* — форвардер на базе мини-трактора и прицепа; *б* — пешеходно-управляемая мини-машина; *в* — форвардер на базе мотовездехода и прицепа  
**Fig. 3.** Small-sized forestry machines: *a* — forwarder based on a mini-tractor and trailer; *б* — pedestrian-controlled mini-machine; *в* — forwarder based on a motorbike and trailer



**Рис. 4.** Мини-форвардер Alstor 821  
**Fig. 4.** Alstor 821 mini forwarder

работами в труднодоступных участках лесного массива при соблюдении экологических лесоводственных требований применяют колесные малогабаритные лесные машины следующих типов:

- колесные лесные машины на базе мини-трактора и прицепа;
- колесные лесные машины на базе мотовездеходов и прицепа;
- пешеходно-управляемые мини-машины.

Малогабаритные форвардерные машины, состоящие из мини-трактора и прицепа, соединенных шарнирно управляемым устройством, производят компании Vimek AB и Alstor AB (рис. 3) [22].

В конструкции ходовой части всех указанных выше лесосечных и лесотранспортных машин с колесными формулами 6×6 и 8×8, а также прицепных погрузочно-транспортных машин и малогабаритных колесных лесных машин широкое применение нашли балансиры (тандемные) мосты. Такая общность конструкции ходовой части лесных машин, относящихся к разным типам и классам, продиктована стремлением обеспечить максимальные тяговые показатели колесных движителей, при этом обеспечивая минимальное разрушительное воздействие на почву. Применяемые на лесных машинах разных классов тандемные мосты похожи по своей концепции, однако имеют существенные конструктивные отличия, в зависимости от массы машины, ее мощности и назначения. Несмотря на широкое применение тандемных мостов при производстве существующих и проектировании перспективных конструкций лесных машин, на сегодняшний день нет единой методики выбора конструктивных параметров тандемных мостов, которые были бы разработаны с учетом технических характеристик машин и условий эксплуатации.

**Конструкции тандемных мостов.** Помимо общих требований, связанных с обеспечением необходимой силы тяги, плавности хода, минимального сопротивления движению, высокой проходимости, устойчивости и требуемой скорости движения машины, а также надежности и удобства эксплуатации, к колесным движителям лесных машин предъявляются требования, заключающиеся в обеспечении минимального уплотнения почвы при многократных движениях по лесосеке. С учетом данного требования лесные машины, как правило, имеют многоосную компоновку ходовой части с применением ведущих мостов балансирующего типа, что в совокупности с двухзвенной несущей системой позволяет обеспечить постоянный контакт колес с опорной поверхностью и, как следствие, более



Рис. 5. Балансир тандемного моста

Fig. 5. Tandem axle balancer

равномерное распределение массы машины по опорной поверхности.

Согласно работе [3], классификацию существующих балансирующих мостов можно представить следующим образом:

по типу привода колес:

- цепной привод;
- шестеренчатый привод;
- привод «Робсона»;

по наличию эксцентриситета:

- с эксцентриситетом;
- без эксцентриситета.

В зависимости от расстояния от вертикальной плоскости, проходящей через ось вращения балансира, до плоскости, проходящей через ось вращения колеса:

- симметричный;
- не симметричный;

**Тандемные мосты с цепным приводом.** Несмотря на достоинства цепных передач, позволяющие обеспечить большие межосевые расстояния, отсутствие проскальзывания, допускающие неточное расположение валов, а также простоту конструкции и доступность реализации тандемного моста с цепным приводом, данное решение нашло применение при производстве примерно 10 % лесных машин [23, 24]. Это связано с ограничением передаваемой мощности до 100 кВт и окружной скорости цепи до  $\leq 35$  м/с, а также с конструктивными особенностями цепной передачи, вызывающими неравномерность угловой скорости привода ввиду звенчатости цепи, и необходимостью периодической регулировки натяжения и смазывания цепи. Такой тип привода нашел применение лишь в конструкции ходовой части малогабаритных лесных машин, наиболее яркими представителями которых являются машины компании Alstor (рис. 4).

Балансир тандемного моста представляет собой полую стальную конструкцию в виде дву-

плеча рычага. Внутри балансира установлено две цепные передачи, каждая из которых приводит свое колесо (рис. 5). Как правило, тандемные мосты с цепным приводом являются симметричными, т. е. расстояние от вертикальной плоскости, проходящей через ось балансира, до вертикальных плоскостей, проходящих через оси первого и второго по ходу движения колеса равны, опорно-поворотный узел выполнен в виде консольной втулки, закрепленной на корпусе балансира. Отличительной особенностью тандемных мостов с цепным приводом по сравнению с шестеренчатыми тандемными мостами является меньшая неподдрессоренная масса, однако в процессе работы лесной машины в приводных цепях могут возникать пиковые значения растягивающих усилий, близких к максимально допустимым.

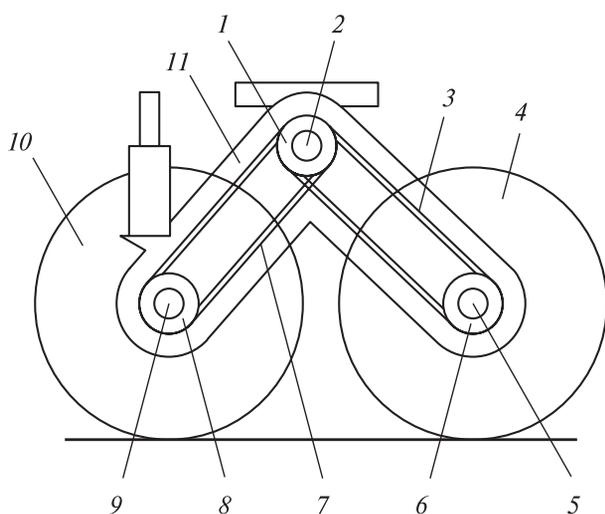


Рис. 6. Симметричная тандемная тележка с цепным приводом

Fig. 6. Symmetrical chain-driven tandem carriage

Проблему можно решить применением колесных редукторов (патент RU114292U1) [25]. Вид предлагаемой конструкции тандемного моста представлен на рис. 6.

Рассматриваемая балансирующая тележка включает в себя балансиры 11, в каждом из которых размещен входной вал 2, связанный с главной передачей, и два выходных вала 5 и 9 для привода колес 4, 10. Выходные валы связаны с входным валом 2 цепными передачами 3, 7 через звездочки 1, 6, 8. Цепь регулируется подпружиненным механизмом натяжения (на рис. 6 не показан).

Эксцентриситет в данной конструкции обеспечивает большой дорожный просвет, что увеличивает проходимость транспортного средства.

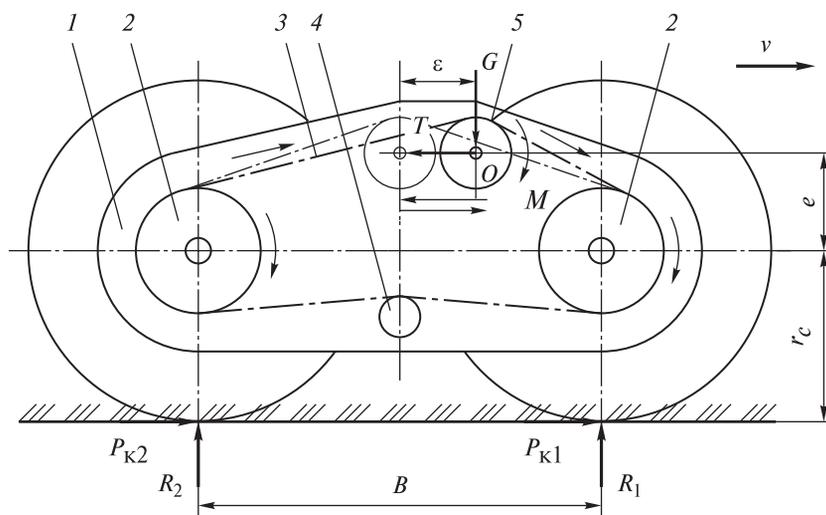
К недостаткам рассмотренной конструкции тандемного моста относится перераспределение вертикальных реакций опор от реактивного момента, действующего на корпус балансира, и, как следствие, снижение максимального тягового усилия на ведущих колесах, ухудшение проходимости и появление циркуляции паразитной мощности в механизмах привода колес. Анализ существующих конструкций тандемных мостов с цепным приводом, а также патентной базы по соответствующей теме показал, что частично компенсировать перераспределение нормальных реакций под колесами машины позволит использование несимметричных тандемных мостов. Один из возможных вариантов несимметричного тандемного моста с цепным приводом (патент RU2749429) [26] представлен на рис. 7.

Рассматриваемая балансирующая тележка включает в себя корпус 1 балансира, который содержит цепной привод с центральной ведущей звездочкой 5 и звездочками ведущих колес 2, при этом все звездочки соединены единой приводной цепью 3. Центральная ведущая звездочка 5 выполнена с возможностью перемещения относительно балансира в сторону переднего, менее нагруженного, колеса по горизонтали. Натяжение цепи обеспечивается регулировочной звездочкой 4.

За счет подвижной ведущей звездочки совместно с точкой подвеса балансира возможно бесступенчатое изменение смещения оси подвеса балансира, т. е. обеспечение равенства вертикальных реакций на передние и задние ведущие колеса при любых режимах работы.

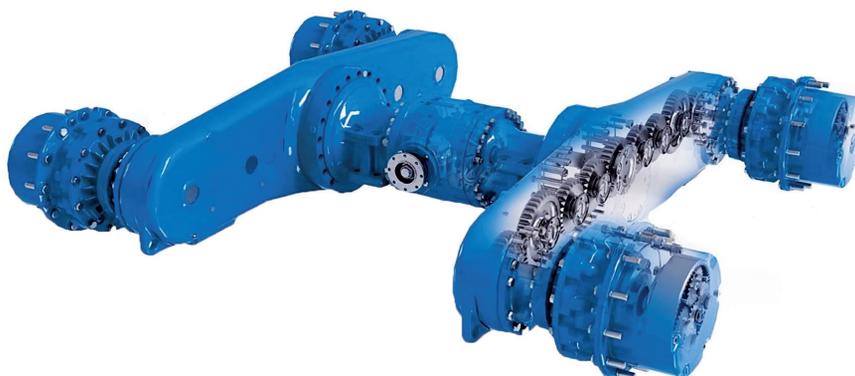
Такое решение позволит исключить влияние циркуляции паразитной мощности, однако приведет к существенному усложнению конструкции тандемного моста.

**Тандемные тележки с шестеренчатым приводом.** В отличие от рассмотренных выше цепных передач зубчатые передачи обладают большей нагрузочной способностью и надежностью, имеют высокий КПД, способны работать при окружных скоростях до 1275 м/с и обеспечивать высокие значения передаточных чисел. При этом относительно просты в обслуживании и обеспечивают малые нагрузки на валы и опоры. В связи с чем, несмотря на высокие требования к точности изготовления, а также значительную металлоемкость и, как следствие, большую массу при увеличении межосевых расстояний, нашли широкое применение при проектировании и производстве более 70 % тандемных мостов лесных машин, относящихся как к легкому, так к среднему и тяжелому классам [8].

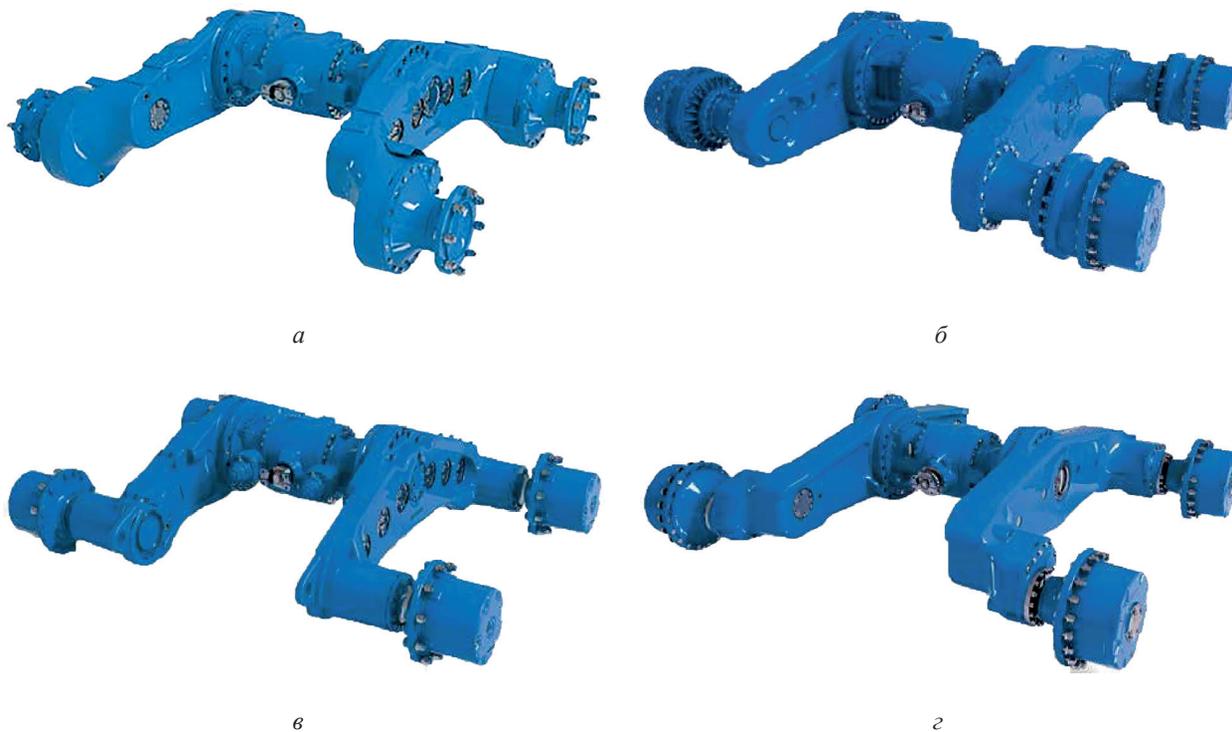


**Рис. 7.** Несимметричная тандемная тележка с цепным приводом: 1 — корпус балансирующего привода; 2 — звездочки ведущих колес; 3 — приводная цепь; 4 — натяжная (регулирующая) звездочка цепного привода балансира; 5 — центральная ведущая звездочка цепного привода балансира;  $G$  — вертикальная нагрузка на шарнир балансира;  $P_{к1}, P_{к2}$  — окружные силы ведущих колес;  $R_1, R_2$  — вертикальные реакции опорной поверхности на ведущие колеса;  $T$  — горизонтальная нагрузка в шарнире балансира;  $M$  — крутящий момент подводимый к центральной ведущей звездочке цепного привода балансира;  $O$  — ось подвеса балансира;  $e$  — эксцентриситет балансира (расстояние между осью подвеса балансира  $O$  и осью ведущих колес);  $B$  — расстояние между центрами ведущих колес балансира;  $\epsilon$  — смещения оси подвески балансира;  $r_c$  — силовой радиус колеса

**Fig. 7.** Unbalanced tandem carriage with chain drive: 1 — balancer drive housing; 2 — sprockets of driving wheels; 3 — drive chain; 4 — tensioning (adjusting) sprocket of the balancer chain drive; 5 — central driving sprocket of the balancer chain drive;  $G$  — vertical load on the balancer joint;  $P_{к1}, P_{к2}$  — circumferential forces of driving wheels;  $R_1, R_2$  — vertical reactions of the supporting surface on driving wheels;  $T$  — horizontal load in the balancer joint;  $M$  — torque applied to the central driving sprocket of the balancer chain drive;  $O$  — balancer suspension axis;  $e$  — balancer eccentricity (distance between the balancer suspension axis  $O$  and the axis of the driving wheels);  $B$  — distance between the centres of the driving wheels of the balancer;  $\epsilon$  — displacements of the balancer suspension axis;  $r_c$  - power radius of the wheel

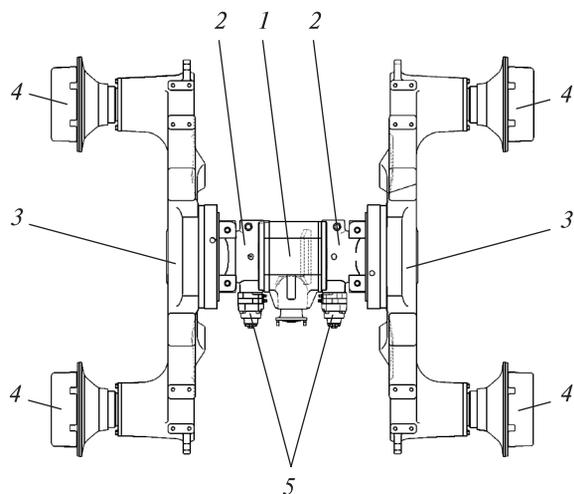


**Рис. 8.** Балансирная тележка фирмы NAF AG  
**Fig. 8.** Balancing carriage made by NAF AG



**Рис. 9.** Семейство tandemных мостов NAF AG: *a* — порталные tandemные мосты; *б* — планетарные tandemные мосты; *в* — планетарные tandemные мосты с возвышением; *г* — планетарные порталные tandemные мосты

**Fig. 9.** NAF AG family of tandem axles: *a* — portal tandem axles; *б* — planetary tandem axles; *в* — planetary tandem axles with elevation; *г* — planetary portal tandem axles



**Рис. 10.** Задний tandemный мост АМК-03 АМКОДОР 2661-01: 1 — картер центральной передачи и межколесного дифференциала; 2 — балка; 3 — корпус балансира; 4 — картер планетарного редуктора; 5 — пружинный энергоаккумулятор

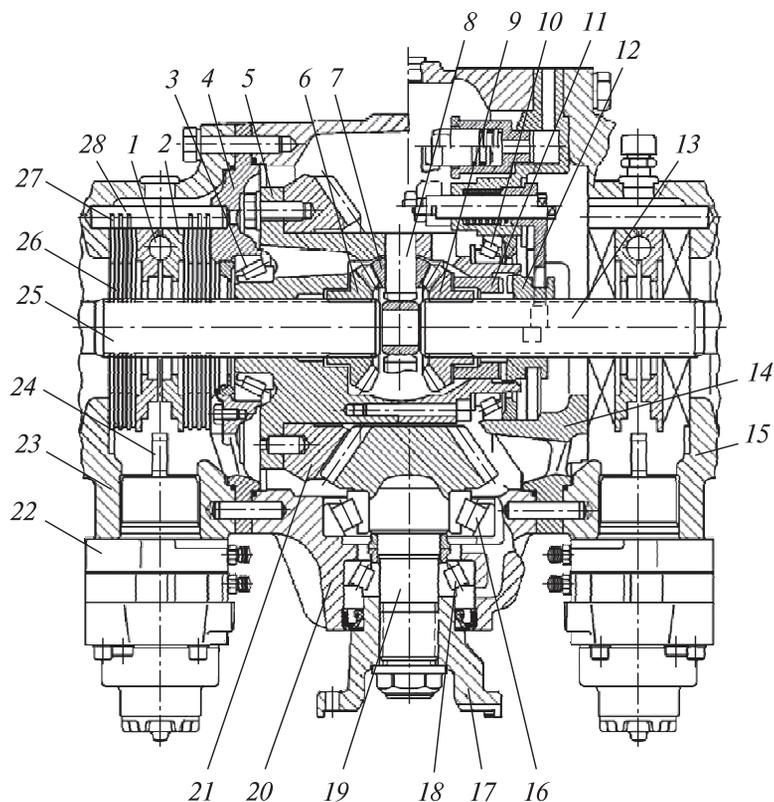
**Fig. 10.** Rear tandem axle АМК-03 АМКОДОР 2661-01: 1 — crankcase of centre gear and inter wheel differential; 2 — cross bar; 3 — balancer housing; 4 — crankcase of planetary reducer; 5 — spring energy accumulator

В настоящее время мировым лидером в производстве tandemных мостов с шестеренчатым приводом колес является немецкая компания NAF AG, которая продвигает модульную конструкцию tandemных мостов (рис. 8).

К особенностям таких tandemных мостов относятся следующие:

- увеличенный эксцентриситет для обеспечения необходимого клиренса;
- увеличенный угол качания балансира для улучшения проходимости;
- наличие блокировки дифференциала;
- наличие в центральном корпусе моста системы постоянной балансировки tandemа — PBBS, запатентованной фирмой NAF AG;
- наличие в центральном корпусе моста тормозных механизмов, работающих в масле;
- изготовленные методом литья корпусные детали tandemного моста, в том числе балансиры.

Модульный принцип, заложенный в конструкцию tandemных мостов компании NAF AG, позволяет, имея фиксированный набор серийно производимых компонентов, получить широкую линейку ведущих мостов с различными характеристиками (рис. 9). Кроме того, модульная конструкция значительно



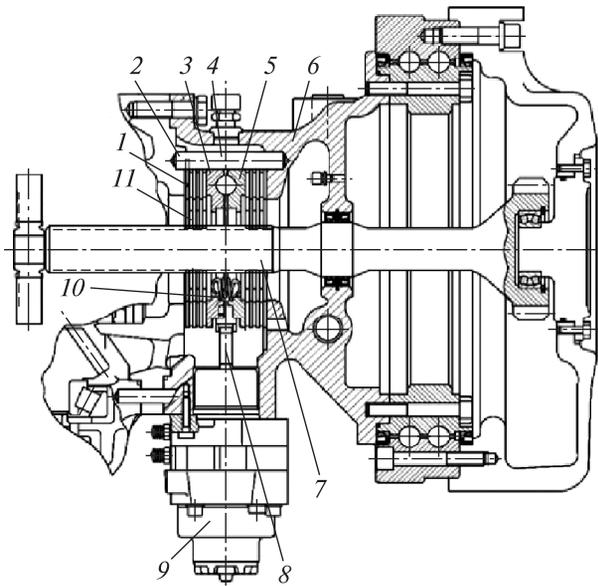
**Рис. 11.** Центральная передача тандемного моста АМК-03: 1 — шарик; 2 — нажимной диск; 3, 10, 16, 18 — подшипниковая опора; 4, 14 — крышка картера центральной передачи; 5 — корпус межколесного дифференциала; 6, 7 — сателлит; 8 — крестовина сателлита; 9 — зубчатое колесо полуоси; 11 — зубчатая муфта; 12 — муфта блокировки; 13, 25 — полуось; 15, 23 — балка тандемного моста; 17 — фланец центральной передачи; 19 — ведущий вал-шестерня центральной передачи; 20 — картер центральной передачи; 21 — ведомое колесо центральной передачи; 22 — пружинный энергоаккумулятор; 24 — клиновидный шток; 26 — подвижный тормозной диск; 27 — неподвижный тормозной диск; 28 — палец тормозного механизма

**Fig. 11.** Centre gear of AMK-03 tandem axle: 1 — ball; 2 — pressure plate; 3, 10, 16, 18 — bearing support; 4, 14 — cover of the central gear cage; 5 — inter wheel differential housing; 6, 7 — satellite; 8 — satellite cross; 9 — gear wheel of the semi-axle; 11 — gear clutch; 12 — locking clutch; 13, 25 — semi-axle; 15, 23 — beam of the tandem axle; 17 — flange of the central gear; 19 — driving shaft-pinion of the central gear; 20 — crankcase of the central gear; 21 — idler wheel of the central gear; 22 — spring energy accumulator; 24 — wedge-shaped rod; 26 — movable brake disc; 27 — fixed brake disc; 28 — pin of the brake mechanism

упрощает ремонт и техническое обслуживание, сокращая общее время простоя машины, позволяет проводить модернизацию отдельных элементов ведущего моста, не меняя конструкцию в целом [27, 28].

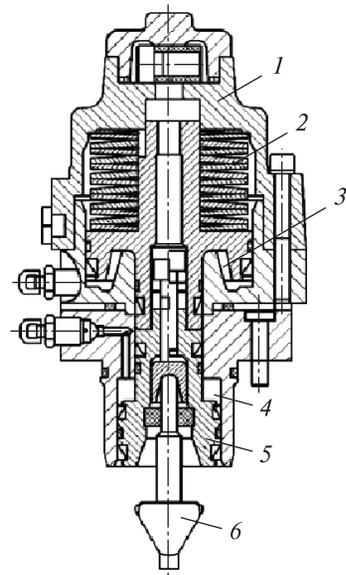
Рассмотрим планетарный тандемный мост с возвышением NAF АМК-03, используемый на форвардере АМКОДОР 2661-01 (рис. 10). К особенностям его конструкции относятся

следующие: механизм блокировки межколесного дифференциала с одинарной конической центральной передачей; комбинированная конечная передача, состоящая из рядовой цилиндрической зубчатой передачи (далее «гитара») и одинарного планетарного редуктора 4; многодисковый тормозной механизм, с пружинным энергоаккумулятором 5, работающий в масле.



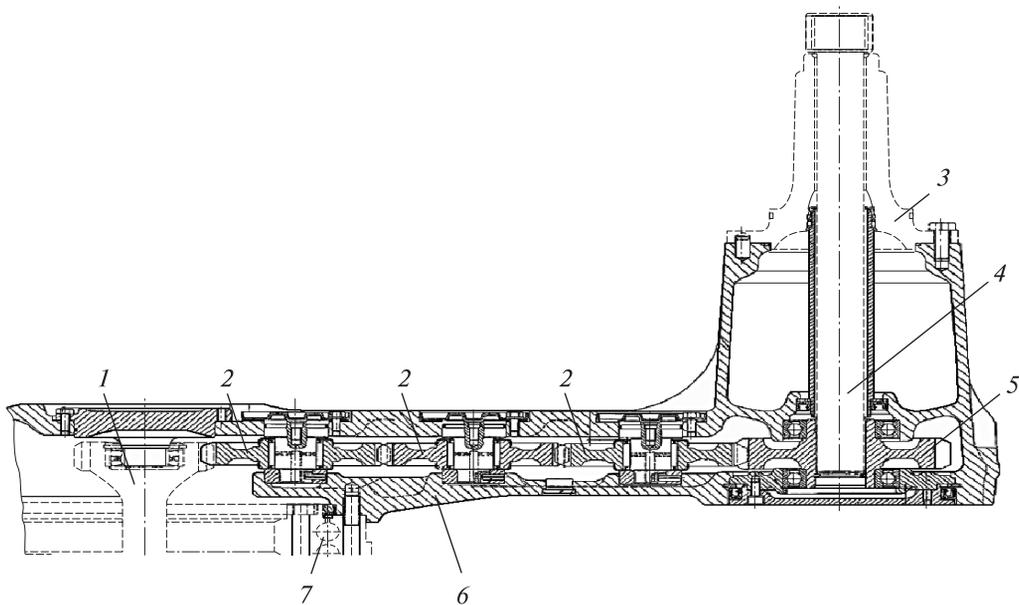
**Рис. 12.** Тормозной механизм tandemного моста АМК-03: 1, 11 — фрикционные диски; 2 — палец тормозного механизма; 3, 5 — нажимные диски; 4 — шарик; 6 — балка; 7 — полуось центральной передачи; 8 — клиновидный шток; 9 — пружинный энергоаккумулятор; 10 — возвратная пружина

**Fig. 12.** Braking mechanism of tandem axle АМК-03: 1, 11 — friction discs; 2 — brake mechanism pin; 3, 5 — pressure discs; 4 — ball; 6 — beam; 7 — central gear axle; 8 — wedge-shaped rod; 9 — spring energy accumulator; 10 — return spring



**Рис. 13.** Пружинный энергоаккумулятор: 1 — корпус пружинного энергоаккумулятора; 2 — пакет мембранных пружин; 3 — полость выключения тормозного механизма; 4 — полость включения тормозного механизма; 5 — рабочий поршень; 6 — клиновидный шток

**Fig. 13.** Spring brake: 1 — spring brake body; 2 — diaphragm spring package; 3 — brake mechanism switching-off cavity; 4 — brake mechanism switching-on cavity; 5 — working piston; 6 — wedge-shaped rod



**Рис. 14.** «Гитара» tandemного моста АМК-03: 1 — полуось центральной передачи; 2 — паразитные зубчатые колеса «гитары»; 3 — цапфа; 4 — выходной вал «гитары»; 5 — ведомое зубчатое колесо гитары; 6 — картер «гитары»; 7 — шарнирное сочленение

**Fig. 14.** «Guitar» of the tandem axle АМК-03: 1 — half axle of the central transmission; 2 — parasitic gear wheels of the «guitar»; 3 — trunnion; 4 — output shaft of the «guitar»; 5 — idler gear wheel of the guitar; 6 — crankcase of the «guitar»; 7 — articulated joint

Центральная передача с межколесным дифференциалом тандемного моста NAF AMK-03 установлена внутри картера центральной передачи 1 соединенного с корпусом балансира 3 посредством балок 2 (см. рис. 10). Центральная передача заднего моста AMK-03 (рис. 11) содержит ведущий вал-шестерню центральной передачи 19, установленную на подшипниковых опорах 16, 18 в картере центральной передачи 20 и находящуюся в зацеплении с ведомым колесом центральной передачи 21, жестко соединенным с помощью болтов с корпусом межколесного дифференциала 5, смонтированным в крышках картера центральной передачи 4, 14 на подшипниковых опорах 3 и 10. Межколесный дифференциал моста AMK-03 симметричный конический с механизмом принудительной блокировки зубчатой муфтой с гидравлическим приводом [29, 30].

Многодисковый тормозной механизм (рис. 12), установленный в балках 2, соединяющих картер центральной передачи моста AMK-03 с корпусом балансира (см. рис. 10) работает в масле.

Тормозной механизм приводится в действие пружиной 2, расположенной в корпусе 1 энергоаккумулятора (рис. 13), его разблокировка осуществляется под действием гидравлического давления в полости выключения тормозного механизма 3. При отсутствии давления в гидравлической системе тормоза остаются включенными. Клиновидный шток привода тормозного механизма 8, двигаясь под действием пружинного энергоаккумулятора 9, вращает нажимные диски 3 и 5 в противоположные стороны, при этом шарики 4 выкатываются из наклонных лунок и раздвигают нажимные диски 3, 5 в осевом направлении, сжимая пакет фрикционных дисков 1 и 11. Половина фрикционных дисков связана с полуосью центральной передачи 7 с помощью шлицевого соединения, а вторая половина зафиксирована от поворота внутри балки 6 тандемного моста с помощью четырех цилиндрических пальцев 2. При возвращении клиновидного штока в исходное положение нажимные диски 3 и 5 стягиваются пружиной, освобождая фрикционные диски (см. рис 12).

Комбинированная конечная передача тандемного моста AMK-03 состоит из рядовой цилиндрической зубчатой передачи («гитары») (рис. 14) и одинарного планетарного колесного редуктора (рис. 15).

Изготовленный методом литья картер «гитары» 6 (см. рис. 15) установлен на балке с использованием двухрядного подшипника тандема 7. Полуось центральной передачи 1, выполненная заодно с ведущей шестерней

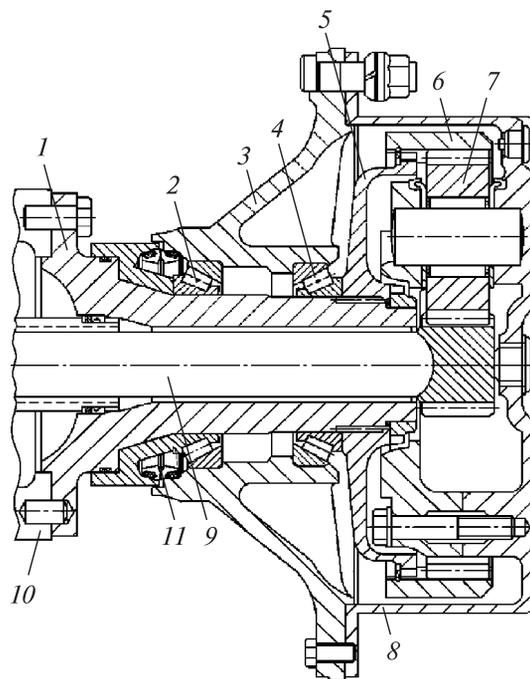


Рис. 15. Планетарный редуктор конечной передачи моста AMK-03: 1 — цапфа; 2, 4 — ступичные подшипниковые опоры; 3 — картер планетарного редуктора; 5 — шлицевая втулка; 6 — эпициклическое колесо; 7 — спутник; 8 — водило; 9 — выходной вал гитары; 10 — картер гитары; 11 — уплотнение конечной передачи

Fig. 15. Planetary reducer of final gear of AMK-03 axel: 1 — trunnion; 2, 4 — hub bearing supports; 3 — planetary reducer crankcase; 5 — splined bushing; 6 — epicyclic wheel; 7 — satellite; 8 — spider; 9 — guitar output shaft; 10 — guitar crankcase; 11 — final gear seal

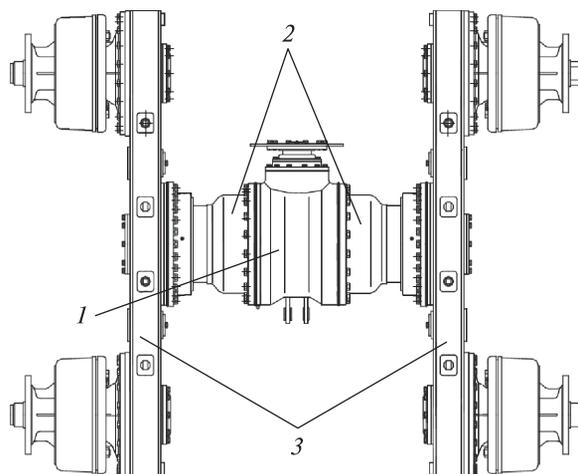
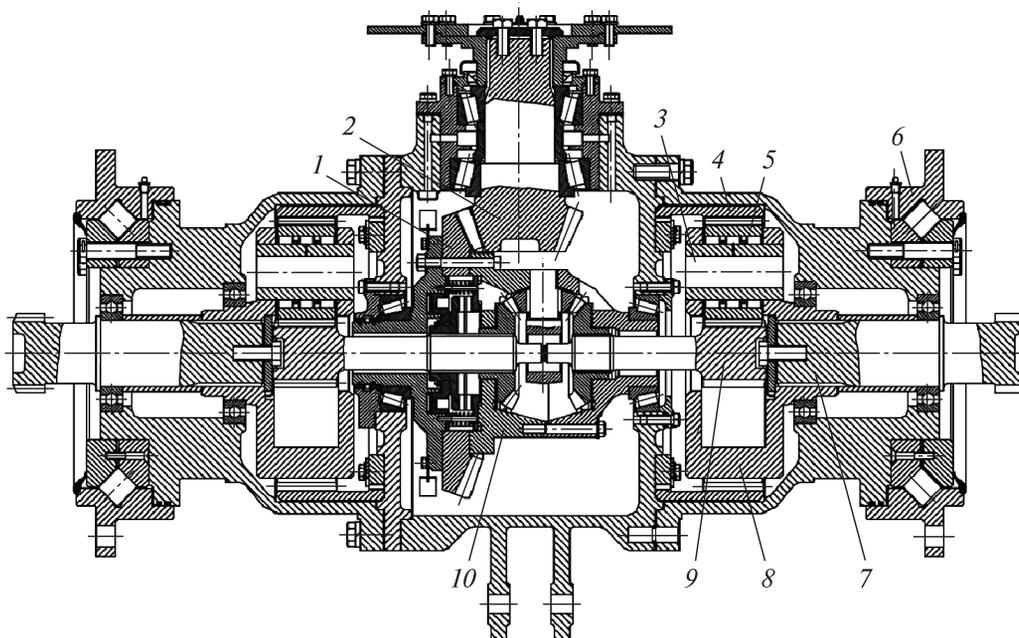


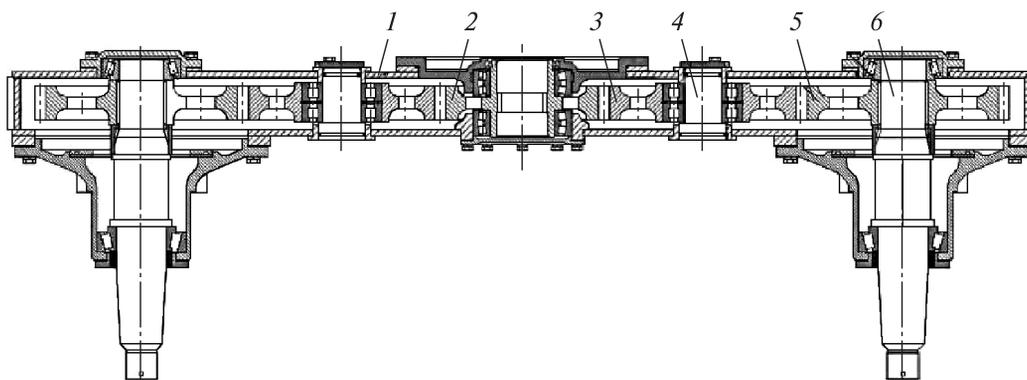
Рис. 16. Тандемная тележка МТЗ МЛ-131: 1 — редуктор; 2 — рукава; 3 — балансиры

Fig. 16. Tandem carrier MTZ ML-131: 1 — reducer; 2 — arms; 3 — balancers



**Рис. 17.** Редуктор заднего моста лесной машины МТЗ МЛ-131: 1 — ведомая шестерня; 2 — ведущая шестерня; 3 — ось сателлита; 4 — коронная шестерня; 5 — сателлит; 6 — фланец; 7 — полуось; 8 — водило; 9 — вал-шестерня; 10 — корпус дифференциала

**Fig. 17.** Rear axel reducer of MTZ ML-131 forest machine: 1 — driven gear; 2 — driving gear; 3 — satellite axle; 4 — crown gear; 5 — satellite; 6 — flange; 7 — semi-axle; 8 — driver; 9 — pinion shaft; 10 — differential housing

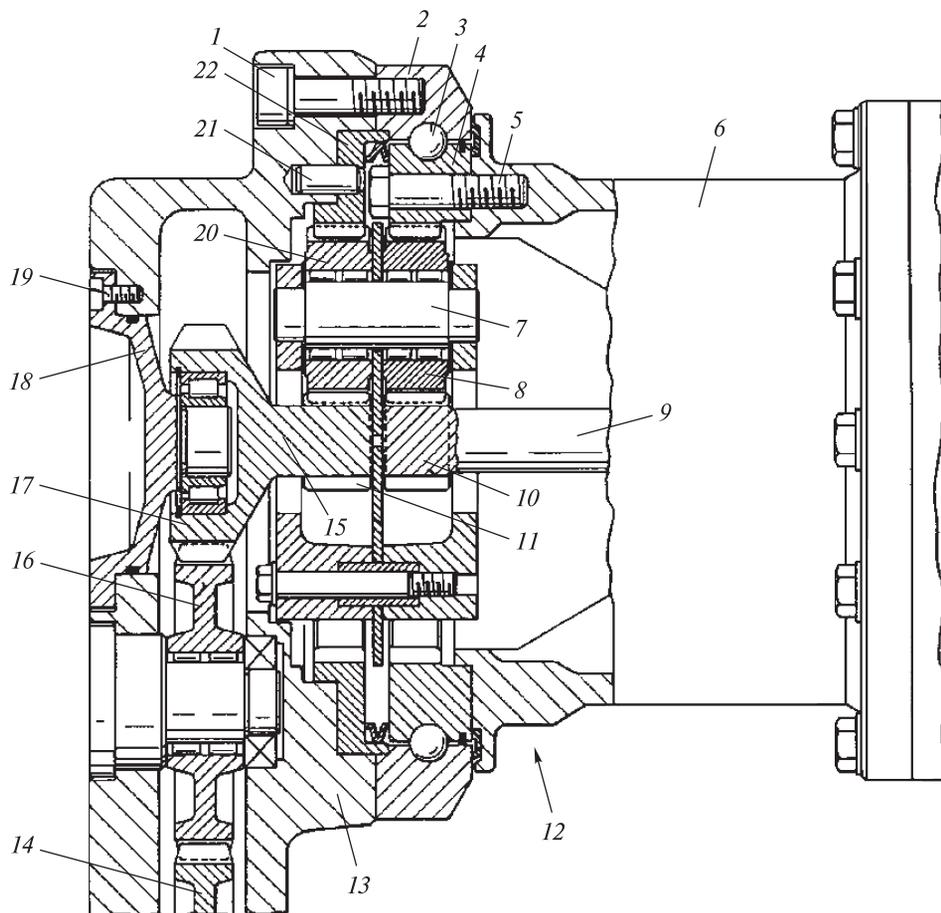


**Рис. 18.** «Гитара» заднего моста МЛ-131: 1 — корпус «гитары»; 2 — ведущая шестерня; 3 — промежуточная шестерня; 4 — ось; 5 — шестерня ведомая; 6 — вал

**Fig. 18.** «Guitar» rear axel ML-131: 1 — housing «guitar»; 2 — drive pinion; 3 — intermediate pinion; 4 — axle; 5 — pinion driven; 6 — shaft

«гитары», входит в зацепление с паразитными зубчатыми колесами «гитары» 2 передающими крутящий момент на ведомые колеса «гитары» 5 установленные на шлицах выходного вала «гитары» 4. Цапфа 3 служит опорой для картера колесного планетарного редуктора и передает нагрузки от колес машины на балансир и далее через подшипник тандема и балку на раму машины, выходные валы «гитары» 4 в данной конструкции разгружены [31, 32].

Задний ведущий мост МТЗ МЛ-131, выполненный в виде планетарной тандемной тележки (рис. 16) состоит из центрального редуктора 1, рукавов 2 и двух балансиров 3 [33–35]. Основное отличие данного тандемного моста от конструкции АМК-03 заключается в технологии изготовления балансиров 3 методом сварки, а также в отсутствии тормозных механизмов в корпусе моста и установке балансиров на рукавах 2 центральной части моста 1



**Рис. 19.** Система постоянной балансировки тандема: 1, 5, 19 — винт; 2 — наружная обойма подшипника тандема; 3 — шарик; 4 — коронная шестерня первой планетарной передачи; 6 — корпус тандемного моста; 7 — ось сателлитов; 8 — первая планетарная передача; 9 — вал приводной; 10 — солнечная шестерня первой планетарной передачи; 11 — солнечная шестерня второй планетарной передачи; 12 — солнечная шестерня второй планетарной передачи; 13 — планетарная передача; 14 — корпус балансира; 15, 16 — зубчатые колеса гитары тандемного моста; 17 — ведущая шестерня гитары тандемного моста; 18 — крышка; 20 — вторая планетарная передача; 21 — штифт; 22 — коронная шестерня второй планетарной передачи

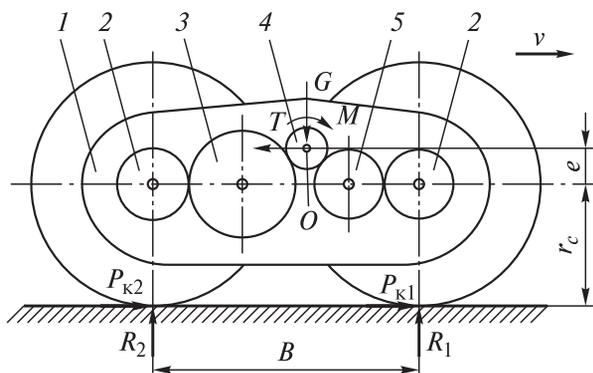
**Fig. 19.** Tandem permanent balancing system: 1, 5, 19 — screw; 2 — tandem bearing outer cage; 3 — ball; 4 — crown gear of the first planetary gear; 6 — tandem axle housing; 7 — satellite axel; 8 — first planetary gear; 9 — drive shaft; 10 — sun gear of the first planetary gear; 11 — sun gear of the second planetary gear; 12 — sun gear of the second planetary gear; 13 — planetary gear; 14 — balancer housing; 15, 16 — gear wheels of the tandem axel guitar; 17 — driving gear of the tandem axel guitar; 18 — cover; 20 — second planetary gear; 21 — pin; 22 — crown gear of the second planetary gear

посредством роликовых опорно-поворотных подшипников.

Рукав тандемного моста МТЗ МЛ-131 (рис. 17) включает в себя планетарную передачу, солнечная шестерня которой выполнена в виде вала-шестерни 9 и является ведущей. Коронная шестерня 4 связана с корпусом рукава и представляет собой неподвижное звено планетарной передачи. Водило 8 — это ведомое звено, установленное на шлицах полуоси 7, передаю-

щей крутящий момент на ведущую шестерню «гитары» 2 (рис. 18).

Корпус балансира моста МЛ-131 (см. рис. 18) имеет сварную конструкцию и установлен на фланце опорно-поворотного подшипника 6 (см. рис. 17), что позволяет ему качаться вокруг оси моста и обеспечивает необходимую артикуляцию подвески при движении машины по сложному рельефу. «Гитара» тандемного моста МЛ-131 состоит из передачи рядного



**Рис. 20.** Балансир несимметричной тележки с шестеренчатым приводом: 1 — корпус балансирующего привода; 2 — ведомые шестерни колес; 3, 5 — промежуточные шестерни; 4 — ведущая центральная шестерня; G — вертикальная нагрузка на шарнир балансира;  $P_{к1}$ ,  $P_{к2}$  — окружные силы ведущих колес;  $R_1$ ,  $R_2$  — вертикальные реакции опорной поверхности на ведущие колеса; T — горизонтальная нагрузка в шарнире балансира; M — крутящий момент подводимый к центральной ведущей звездочке цепного привода балансира; O — ось подвеса балансира; e — эксцентриситет балансира (расстояние между осью подвеса балансира O и осью ведущих колес); B — расстояние между центрами ведущих колес балансира;  $r_c$  — силовой радиус колеса

**Fig. 20.** Balancer of asymmetrical carriage with pinion drive: 1 — body of the balancer drive; 2 — idler pinions of wheels; 3, 5 — intermediate pinions; 4 — driving central pinion; G — vertical load on the balancer joint;  $P_{к1}$ ,  $P_{к2}$  — circumferential forces of the driving wheels;  $R_1$ ,  $R_2$  — vertical reactions of the supporting surface on the driving wheels; T — horizontal load in the balancer joint; M — torque applied to the central driving sprocket of the balancer chain drive; O — balancer suspension axis; e — balancer eccentricity (distance between the balancer suspension axis O and the axis of the driving wheels); B — distance between the centres of the driving wheels of the balancer;  $r_c$  — power radius of the wheel



**Рис. 21.** Активный привод Робсона  
**Fig. 21.** Robson active drive

типа, включающей в себя три шестерни, одна из которых является паразитным звеном (см. рис. 18).

В связи с тем что зубчатые колеса и шестерни «гитары» не испытывают осевых усилий, наибольшее распространение при производстве tandemных мостов для машин разных классов получили цилиндрические прямозубые передачи.

Рассмотренные конструкции tandemных мостов АМК-03 и МЛ-131, являются симметричными и не имеют устройств балансировки тандема, в связи с чем под действием реактивного момента в процессе движения машины происходит перераспределение нормальных реакций между передним и задним колесами балансира и, как следствие, возникает явление циркуляции паразитной мощности.

Для решения данной проблемы компания NAF AG применяет в своих tandemных мостах систему постоянной балансировки тандема PBBS. Устройство и принцип работы данной системы описан в патенте EP 0 520 389 B1 (рис. 19) [36].

Данная система состоит из двух планетарных передач, сателлиты 8 и 20 которых имеют общую ось 7 и водило. Солнечная шестерня 10 первой относительно главной планетарной передачи выполнена заодно с полуосью 9, а коронная шестерня 4 посредством болтового соединения 5 жестко зафиксирована на корпусе моста 6. Солнечная шестерня второй планетарной передачи 11 выполнена заодно с ведущей шестерней «гитары» tandemного моста 12, коронная шестерня 21 жестко зафиксирована на корпусе балансира 14.

В процессе движения машины приводное усилие от ведущего вала 9 через солнечную шестерню 10 и сателлит 8 через общую ось 7 передается на сателлит 20 второй планетарной передачи и далее через солнечную шестерню 11 на ведущую шестерню «гитары» 17.

Данная конструкция позволяет компенсировать часть возникающего реактивного момента путем передачи его на корпус балансира и, как следствие, уменьшить эффект перераспределения нормальных реакций под передним и задним колесом балансира, однако не исключает влияние реактивного момента полностью.

Еще один вариант решения проблемы перераспределения нормальных реакций под колесами балансира предложен в патенте RU2727224C1 [37], в котором описана конструкция несимметричной балансирующей тележки с шестеренчатым приводом (рис. 20).

Привод работает следующим образом. Ведущая центральная шестерня 4, взаимодействуя с промежуточными шестернями 3 и 5, одна из



Рис. 22. Форвардер Vimek 610 на базе мини-трактора и прицепа  
 Fig. 22. Vimek 610 forwarder based on mini-tractor and trailer



*a*



*b*

Рис. 23. Активный привод Робсона: *a* — ролик соосный шарниру балансира; *b* — ролик с изменяемым положением оси

Fig. 23. Robson active drive: *a* — roller coaxial to the balancer joint; *b* — roller with variable axis position

которых (3) имеет больший диаметр в отличие от другой (5), передает вращение ведомым шестерням 2 колес.

При таком варианте конструкции обеспечивается равная угловая скорость ведущих колес балансирной тележки, а также за счет исполнения промежуточной шестерни переднего колеса меньшего размера, чем заднего и смещения оси подвеса балансира происходит выравнивание нормальных реакций  $R_1$  и  $R_2$ . Однако учитывая, что координаты центральной ведущей шестерни фиксированы, эффективность данной конструкции ограничена и не позволяет полностью решить проблему перераспределения нормальных реакций.

**Тандемные тележки с приводом Робсона.** Привод Робсона обеспечивает передачу крутящего момента к ведущим колесам посредством цилиндрического фрикционного или зубчатого ролика. В производстве лесных машин применяется активный привод Робсона, при котором ролик находится в постоянном зубчатом зацеплении с протектором колес, передавая крутящий момент от двигателя сразу на оба колеса балансира (рис. 21).

Несмотря на простую конструкцию привода колес по сравнению с цепным или шестеренчатым вариантом, привод Робсона нашел применение не более чем в 5 % балансирных тележек лесных машин [3].



Рис. 24. Форвардер «Тром-20 УЭС»

Fig. 24. Forwarder «Trom-20 UES»

К недостаткам данного привода, существенно ограничивающим его применение, относятся проскальзывание ролика при возрастании крутящего момента и, как следствие, меньший ресурс протектора колес, а также ограниченная величина максимальной касательной силы тяги. Повышенное сопротивление в зацеплении ролика с колесом приводит к значительному нагреву ролика при длительном движении машины, а также увеличению расхода топлива. Особенности зацепления ролика и колеса также ограничивают максимальную скорость движения машины, она составляет не более 25 км/ч.

Однако несмотря на перечисленные недостатки, привод Робсона достаточно успешно применяется при проектировании и производстве малогабаритных лесных машин на базе мини-трактора и прицепа (рис. 22), на базе мотовездехода и прицепа, а также пешеходно-управляемых мини-машин.

Конструктивно тандемный мост с роликовым приводом представляет собой шарнирно закрепленный на раме машины двуплечий рычаг, выполненный в виде балки замкнутого сечения. Форма и габаритные размеры балансира в данном случае определяются массой, габаритами и назначением машины. Ролик может быть установлен соосно с шарниром балансира (рис. 23, а), параллельно оси балансира, либо, как показано на рис. 23, б, иметь оси с изменяемым положением, что позволяет вводить приводной ролик в зацепление с колесами в случае необходимости и отключать привод

колес тандемного моста при движении машины по дорогам общего пользования.

Привод Робсона также применяется на лесных машинах, условно относящихся к легкому классу, наиболее ярким примером которых может служить форвардер «Тром-20 УЭС» на шинах низкого давления грузоподъемностью 10 т (рис. 24). Данная машина является болотоходной и предназначена для работы на грунтах со слабой несущей способностью. Конструкция данной машины уникальна и защищена патентом. Форвардер имеет две погрузочные платформы и может одновременно вывозить сортимент длиной 4 и 6 м. Такое решение позволило конструкторам создать машину, имеющую равномерное распределение веса по осям как в пустом, так и в груженом состоянии, что в совокупности с шинами низкого давления, обеспечивающими большую площадь контакта с опорной поверхностью и как следствие, малое давление на грунт — не более 300 г/см<sup>2</sup>, способствует высокой проходимости машины по опорным основаниям с малой несущей способностью.

## Выводы

Анализ конструкций тандемных мостов лесных машин показал, что наиболее распространен вариант симметричного тандемного моста с шестеренчатым приводом колес. Данная конструкция используется при производстве

подавляющего большинства лесных машин, относящихся как к легкому так к среднему и тяжелому классам. Благодаря применению модульной компоновки тандемного моста, а также использованию различных технологий изготовления отдельных конструктивных элементов (модулей) производитель получает широкую линейку мостов с различными техническими характеристиками.

Наиболее предпочтительной является модульная конструкция симметричного тандемного моста с литыми корпусами балансиров, обеспечивающими требуемый эксцентриситет (возвышение) для увеличения площади погружки форвардера, и компенсации разности в размерах колес машин колесной формулы 6×6. Также в состав тандемного моста могут быть включены порталные редукторы для обеспечения необходимого дорожного просвета и планетарные конечные передачи. Важным элементом конструкции тандемного моста является система балансировки тандема, позволяющая компенсировать действие реактивного момента и минимизировать перераспределение нормальных реакций под колесами балансира.

При проектировании и производстве лесных машин малого класса, а также специальных лесных машин, обладающих специфическими потребительскими качествами, применение тандемных мостов с шестеренчатым приводом приводит к необоснованному усложнению конструкции, а также увеличению металлоемкости и массы. В связи с этим применяются цепной привод колес балансира и привод Робсона.

*Исследование выполнено в АлтГТУ им. И.И. Ползунова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения №075-11-2021-039 от 25 июня 2021 г.*

## Список литературы

- [1] Состояние лесных ресурсов в России // Бюллетень Ассоциации «ЛЕСТЕХ» №15, 2024 г. URL: <https://alestech.ru/bulletin/article/171> (дата обращения 28.10.2024 г.).
- [2] Лесное хозяйство России: обзор на начало 2017 года // ПроДерево, Лесное хозяйство, 23.04.2018. URL: <https://proderevo.net/industries/forestry/lesnoe-khozyajstvo-rossii-obzor-na-nachalo-2017-goda.html> (дата обращения 28.10.2024 г.).
- [3] Александров В.А. Механизация лесосечных работ в России. СПб.: Изд-во СПбЛТА, 2000. 286 с.
- [4] Можяев Д.В., Илошкин С.Н. Механизация лесозаготовок за рубежом. М.: Лесная пром-сть, 1988. 296 с.
- [5] Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии / под ред. И.В. Григорьева. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. 192 с.
- [6] Матвейко А.П. Технология и оборудование лесозаготовительного производства. Минск: Техноперспектива, 2006. 447 с.
- [7] Большаков Б.М., Андрушин М.И., Дороничева Е.В. Развитие технологий и машин при рубках ухода за лесом в Финляндии и Швеции // Лесохозяйственная информация, 2019. № 2. С. 111–128.
- [8] Просужих А.А. Повышение производительности колесных форвардеров обоснованием их параметров и режимов работы: дис. ... канд. тех. наук: 05.21.01. Ухта, 2020. 158 с.
- [9] Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Шишов Е.В. Разработка перспективной ходовой системы для колесных машин лесопромышленного комплекса // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2014. Т. 2. № 3–2 (8–2). С. 249–252.
- [10] Лисняк А.А., Кухар И.В. К вопросу компоновки лесных тракторов // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки. Всерос. науч.-практ. конф. (с междунар. участием): Сборник статей студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 19–20 мая 2016 года. Т. 1. Красноярск: Изд-во СибГТУ, 2016. С. 157–159.
- [11] Козьмин С.Ф. Исследование компоновки лесных колесных тракторов с шарнирной рамой конструкции ЛТА. Лесные тракторы МТЗ-82Л и Т-150КЛ с колесной формулой 6×6 и их модификации. СПб.: Изд-во СПбГЛТА, 2011. 96 с.
- [12] Козьмин С.Ф. Исследование компоновки лесных колесных тракторов с шарнирной рамой конструкции ЛТА. Лесные тракторы Т-25АЛ и Т-40АЛ с колесной формулой 4×4 и их модификации. СПб.: Изд-во СПбГЛТА, 2010. 100 с.
- [13] Григорьев И.В., Чураков А.А., Никифорова А.И., Цыгаров М.В. Перспективная колесная база для лесных машин // Леса России в XXI веке, Санкт-Петербург, 08–10 октября 2014 г. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, 2014. С. 32–38.
- [14] Анисимов Г.М., Кочнев А.М. Лесотранспортные машины. СПб.: Лань, 2021. 448 с.
- [15] Пятакин В.И. Технология и машины лесосечных работ. СПб.: Изд-во СПбГЛТУ, 2012. 362 с.
- [16] Федоренчик А.С., Турлай И.В. Харвестеры. Минск: Изд-во БГТУ, 2002. 172 с.
- [17] Герасимов Ю.Ю., Сюнев В.С. Лесосечные машины для рубок ухода: компьютерная система принятия решений. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 1998. 236 с.
- [18] Котиков В.М., Еремеев Н.С., Ерхов А.В. Лесозаготовительные и трелевочные машины. М.: Лесная пром-сть, 2004. 336 с.
- [19] Кочегаров В.Г., Бит Ю.А., Меньшиков В.Н. Технология и машины лесосечных работ. М.: Лесная пром-ть, 1990. 392 с.
- [20] Редькин А.К., Никишов В.Д., Смехов С.Н. Технология и оборудование лесозаготовок. М: МГУЛ, 2010. 181 с.
- [21] Сюнев В.С., Селиверстов А.А., Герасимов Ю.Ю., Соколов А.П. Лесосечные машины в фокусе биоэнергетики: конструкции, проектирование, расчет. Йёнссу: НИИ леса Финляндии METLA, 2011. 143 с.

- [22] Instruction Manual Alstor 8×8 for models 822 and 834. Alstor AB, 48 p.
- [23] Сивков Е.Н. Обоснование параметров колесного трелевочного трактора с целью снижения циркуляции мощности в трансмиссии: дис. ... канд. тех. наук. 05.21.01. Санкт-Петербург, 2014. 173 с.
- [24] Гудков В.В., Сокол П.А., Ляпич Е.Н. Колесные движители. Балансирные приводы. Воронеж: Изд-во Воронежского ЦНТИ – филиала ФГБУ «РЕА» Минэнерго России, 2015. 182 с.
- [25] Деревягин А.М. Балансирная ходовая тележка для транспортного средства. Патент № 114292 РФ, МПК В60К 17/36 (2006.01), № 2011151456/11, 7 с.
- [26] Жулай В.А., Тюнин В.Л., Щиенко А.Н., Кожакин Е.В. Несимметричный регулируемый балансирный привод ведущих колес наземных транспортно-технологических машин. Патент № 2749429 РФ, МПК В60К 17/34 (2006.01), В60К 17/36 (2006.01), № 2020135540, 6 с.
- [27] ТанDEMные мосты для работы ваших машин в тяжелых условиях // NAF Neunkirchener Achsenfabrik AG. URL: <https://ru.nafaxles.com/wp-content/uploads/2021/12/bogieaxle-product-brochure-nafaxles-ru-2019.pdf> (дата обращения 28.10.2024 г.).
- [28] Бобровник А.И., Волуевич А.С., Попченко П.А., Швец А.Н. Особенности эксплуатации лесных машин с тандемным мостом // Наука — производству. Минск: Изд-во Белорусского национального технического университета, 2017. С. 81–85.
- [29] Герасимович А.К., Герман А.А., Гуменников Л.Л., Вашкевич Г.М., Кондратчик Л.В., Меляшкевич А.И., Самущенко Л.А. Форвардеры Амкодор 2661, Амкодор 2661-01. Руководство по эксплуатации 2661.00.00.000РЭ. Минск: Изд-во ОАО «Амкодор», 2008. 224 с.
- [30] Вашкевич Г.М., Герасимович А.К., Герман А.А., Гуменников Л.Л., Меляшкевич А.И., Самущенко Л.А. Харвестер Амкодор 2551. Руководство по эксплуатации 2551.00.00.000РЭ. Минск: Изд-во ОАО «Амкодор», 2013. 225 с.
- [31] John Deere 770D, 1070D, 1270D, 1470D Forestry Equipment. URL: <https://www.deere.com/assets/pdfs/common/products/wheeled-harvesters/wheeled-harvesters-d-series-dka1070wh.pdf> (дата обращения 16.11.2023).
- [32] Руководство по эксплуатации харвестер 1270D OMF069318, 2005. 320 с.
- [33] Жуков А.В., Клоков Д.В., Лой В.Н. Погрузочно-транспортная машина МЛ-131 // Труды БГТУ. Сер. 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2008. № 8. С. 82–88.
- [34] Машина лесная погрузочно-транспортная «Беларус» МЛ-131. Руководство по эксплуатации МЛ131-0000010 РЭ. М.: ОАО «МТЗ», 2009. 233 с.
- [35] Машина лесная погрузочно-транспортная «Беларус» МЛПТ-344. Руководство по эксплуатации 344-0000010 Р. М.: ОАО «МТЗ», 2009. 197 с.
- [36] Patent № EP 0 520 389 B1 Europäische Patentschrift, В60К 17/36, В60К 1 7/32. Antriebsvorrichtung für Tandemachsen : № 92110596.1 : Anmeldetag 24.06.1992: Veröffentlichungstag der Anmeldung 30.12.1992 / Erfinder: Auer, Ernst, Dipl.-Ing. W-8000 München 60 (DE): Patentinhaber: Neunkirchner Maschinenund Achsenfabrik GmbH & Co. KG D-81245 München (DE)
- [37] Жулай В.А., Тюнин В.Л., Феденев А.А., Андрухов Д.И. Несимметричный балансирный привод ведущих колес наземных транспортно-технологических машин. Патент № 2727224 РФ, заявл. 21.10.2019. 5 с.

## Сведения об авторах

**Горбачев Александр Владимирович** <sup>✉</sup> — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова» (АлтГТУ), [aleks\\_gorb@mail.ru](mailto:aleks_gorb@mail.ru)

**Коростелев Сергей Анатольевич** — д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова» (АлтГТУ), [korsan73@mail.ru](mailto:korsan73@mail.ru)

**Ченских Сергей Анатольевич** — аспирант, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова» (АлтГТУ), [csa-74@yandex.ru](mailto:csa-74@yandex.ru)

**Колотилин Владимир Евгеньевич** — канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева» (НГТУ)

**Кулепов Виктор Федорович** — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексева» (НГТУ), [kulepov@dpinntu.ru](mailto:kulepov@dpinntu.ru)

Поступила в редакцию 11.05.2024.

Одобрено после рецензирования 06.11.2024.

Принята к публикации 27.11.2024.

## DESIGN FEATURES OF FOREST MACHINES TANDEM AXELS

A.V. Gorbachev<sup>1✉</sup>, S.A. Korostelev<sup>1</sup>, S.A. Chenskih<sup>1</sup>,  
A.V. Kolyako<sup>2</sup>, V.F. Kulepov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Altai State Technical University, named after I.I. Polzunov, 46, Lenina av., 656038, Barnaul, Siberian Federal District, Altai Territory, Russia

<sup>2</sup>BMSTU, 5, building 1, 2nd Baumanskaya st., 105005, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Nizhny Novgorod State Technical University, n. a. R.E. Alekseev, 24, Minina st., 603155, Nizhny Novgorod, Russia

aleks\_gorb@mail.ru

The design features analysis of tandem axels of forest machines is carried out. The classification of forest machines is given depending on their purpose and characteristics. The designs of tandem axels with chain and gear drive, as well as with a Robson drive, are considered, conclusions are drawn about the applicability of each of them in the design and production of forest machines of different classes. The advantages and disadvantages of the considered structural schemes of tandem axels are revealed. The directions of improving the design of tandem axels are determined.

**Keywords:** tandem axel, tandem axel balancer, forest machine, chain drive, gear drive, Robson drive

**Suggested citation:** Gorbachev A.V., Korostelev S.A., Chenskih S.A., Kolotilin V.E., Kulepov V.F. *Konstruktivnye osobennosti tandemnykh mostov lesnykh mashin* [Design features of forest machines tandem axels]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 62–83.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-62-83

## Reference

- [1] *Sostoyanie lesnykh resursov v Rossii* [The state of forest resources in Russia]. Byulleten' Assotsiatsii «LESTEKH» [Bulletin of the LESTECH Association], no. 15, 2024. Available at: <https://alestech.ru/bulletin/article/171> (accessed 28.10.2024).
- [2] *Lesnoe khozyaystvo Rossii: obzor na nachalo 2017 goda* [Forestry in Russia: an overview at the beginning of 2017]. ProDerevo, Forestry, 23.04.2018. Available at: <https://proderevo.net/industries/forestry/lesnoe-khozyajstvo-rossii-obzor-na-nachalo-2017-goda.html> (accessed 28.10.2024).
- [3] Aleksandrov V.A. *Mekhanizatsiya lesosechnykh rabot v Rossii* [Mechanization of logging operations in Russia]. St. Petersburg: SPbLTA, 2000, 286 p.
- [4] Mozhaev D.V., Ilyushkin S.N. *Mekhanizatsiya lesozagotovok za rubezhom* [Mechanization of logging abroad]. Moscow: Lesnaya prom-st [Forestry industry], 1988, 296 p.
- [5] *Mashinnaya zagotovka drevesiny po skandinavskoy tekhnologii* [Machine harvesting of wood using Scandinavian technology]. Ed. I.V. Grigoriev. St. Petersburg: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedeniy [Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions], 2019, 192 p.
- [6] Matveyko A.P. *Tekhnologiya i oborudovanie lesozagotovitel'nogo proizvodstva* [Technology and equipment for logging production]. Minsk: Tekhnoperspektiva, 2006, 447 p.
- [7] Bol'shakov B.M., Andryushin M.I., Doronicheva E.V. *Razvitie tekhnologiy i mashin pri rubkakh ukhoda za lesom v Finlyandii i Shvetsii* [Development of technologies and machines for forest thinning in Finland and Sweden]. Lesokhozyaystvennaya informatsiya [Forestry information], 2019, no. 2, pp. 111–128.
- [8] Prosuzhikh A.A. *Povyshenie proizvoditel'nosti kolesnykh forvarderov obosnovaniem ikh parametrov i rezhimov raboty* [Increasing the productivity of wheeled forwarders by substantiating their parameters and operating modes]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Ukhta, 2020, 158 p.
- [9] Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Shishov E.V. *Razrabotka perspektivnoy khodovoy sistemy dlya kolesnykh mashin lesopromyshlennogo kompleksa* [Development of a promising chassis system for wheeled machines of the forestry complex]. Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy KhKhI veka: teoriya i praktika [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2014, v. 2, no. 3–2 (8–2), pp. 249–252.
- [10] Lisnyak A.A., Kukhar I.V. *K voprosu komponovki lesnykh traktorov* [On the issue of the layout of forestry tractors]. Molodye uchenye v reshenii aktual'nykh problem nauki. Vseros. nauch.-prakt. konf. (s mezhd.uchastiem). sbornik statey studentov, aspirantov i molodykh uchenykh [Young scientists in solving current problems of science. All-Russian scientific and practical conf. (with international participation). collection of articles by students, graduate students and young scientists], Krasnoyarsk, May 19–20, 2016. T. 1. Krasnoyarsk: SibGTU, 2016, pp. 157–159.
- [11] Koz'min S.F. *Issledovanie komponovki lesnykh kolesnykh traktorov s sharnirnoy ramoy konstruktssii LTA. Lesnye traktory MTZ-82L i T-150KL s kolesnoy formuloy 6×6 i ikh modifikatsii* [Study of the layout of forest wheeled tractors with an articulated frame of the LTA design. Forestry tractors MTZ-82L and T-150KL with a 6×6 wheel arrangement and their modifications]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2011, 96 p.
- [12] Koz'min S.F. *Issledovanie komponovki lesnykh kolesnykh traktorov s sharnirnoy ramoy konstruktssii LTA. Lesnye traktory T-25AL i T-40AL s kolesnoy formuloy 4×4 i ikh modifikatsii* [Study of the layout of forest wheeled tractors with an articulated frame of the LTA design. Forestry tractors T-25AL and T-40AL with a 4×4 wheel arrangement and their modifications]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2010, 100 p.

- [13] Grigor'ev I.V., Churakov A.A., Nikiforova A.I., Tsygarov M.V. *Perspektivnaya kolesnaya baza dlya lesnykh mashin* [Promising wheelbase for forestry machines]. Lesa Rossii v XXI veke [Forests of Russia in the 21st century], St. Petersburg, October 08–10, 2014. St. Petersburg: S.M. Kirov. St. Petersburg State Forest Engineering University, 2014, pp. 32–38.
- [14] Anisimov G.M., Kochnev A.M. *Lesotransportnye mashiny* [Forestry transport machines]. St. Petersburg: Lan', 2021, 448 p.
- [15] Patyakin V.I. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and Machinery for Logging Works]. St. Petersburg: SPbGLTU, 2012, 362 p.
- [16] Fedorenchik A.S., Turlay I.V. *Kharvestery* [Harvesters]. Minsk: BSTU, 2002, 172 p.
- [17] Gerasimov Yu.Yu., Syuney V.S. *Lesosechnye mashiny dlya rubok ukhoda: komp'yuternaya sistema prinyatiya resheniy* [Logging machines for thinning: computer decision-making system]. Petrozavodsk: Publishing house of PetrSU, 1998, 236 p.
- [18] Kotikov V.M., Eremeev N.S., Erkhov A.V. *Lesozagotovitel'nye i trelevochnye mashiny* [Logging and Skidding Machines]. Moscow: Lesnaya Prom-st, 2004, 336 p.
- [19] Kochegarov V.G., Bit Yu.A., Men'shikov V.N. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and Machinery for Logging Works]. Moscow: Lesnaya Prom-t, 1990, 392 p.
- [20] Red'kin A.K., Nikishov V.D., Smekhov S.N. *Tekhnologiya i oborudovanie lesozagotovok* [Technology and Equipment for Logging]. Moscow: Moscow State University of Forestry, 2010, 181 p.
- [21] Syuney V.S., Seliverstov A.A., Gerasimov Yu.Yu., Sokolov A.P. *Lesosechnye mashiny v fokuse bioenergetiki: konstruksii, proektirovanie, raschet* [Logging machines in the focus of bioenergy: designs, engineering, calculation]. Joensuu: Finnish Forest Research Institute METLA, 2011, 143 p.
- [22] Instruction Manual Alstor 8×8 for models 822 and 834. Alstor AB, 48 p.
- [23] Sivkov E.N. *Obosnovanie parametrov kolesnogo trelevochnogo traktora s tsel'yu snizheniya tsirkulyatsii moshchnosti v transmissii* [Justification of the parameters of a wheeled skidder in order to reduce power circulation in the transmission]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. St. Petersburg, 2014, 173 p.
- [24] Gudkov V.V., Sokol P.A., Lyapich E.N. *Kolesnye dvizhiteli. Balansirnye privody* [Wheel propellers. Balance drives]. Voronezh: Voronezhskiy TsNTI — filial FGBU «REA» Minenergo Rossii [Voronezh Scientific and Technical Information Center — branch of the Federal State Budgetary Institution «REA» of the Ministry of Energy of Russia], 2015, 182 p.
- [25] Derevyagin A.M. *Balansirnaya khodovaya telezhka dlya transportnogo sredstva* [Balance beam undercarriage for a vehicle]. Patent No. 114292 RF, IPC B60K 17/36 (2006.01), No. 2011151456/11, 7 p.
- [26] Zhulay V.A., Tyunin V.L., Shchienko A.N., Kozhakin E.V. *Nesimmetrichnyy reguliruemyy balansirnyy privod vedushchikh koles nazemnykh transportno-tehnologicheskikh mashin* [Asymmetrical adjustable balance beam drive of driving wheels of ground transport and technological machines]. Patent No. 2749429 RF, IPC B60K 17/34 (2006.01), B60K 17/36 (2006.01), No. 2020135540, 6 p.
- [27] *Tandemnye mosty dlya raboty vashikh mashin v tyazhelykh usloviyakh* [Tandem axles for the operation of your machines in difficult conditions] NAF Neunkirchener Achsenfabrik AG. Available at: <https://ru.nafaxles.com/wp-content/uploads/2021/12/bogieaxle-product-brochure-nafaxles-ru-2019.pdf> (accessed 28.10.2024).
- [28] Bobrovnik A.I., Voluevich A.S., Popchenko P.A., Shvets A.N. *Osobennosti ekspluatatsii lesnykh mashin s tandemnym mostom* [Features of operation of forestry machines with a tandem axle]. Nauka – proizvodstvu [Science – production]. Minsk: Belarusian National Technical University, 2017, pp. 81–85.
- [29] Gerasimovich A.K., German A.A., Gumennikov L.L., Vashkevich G.M., Kondratchik L.V., Melyashkevich A.I., Samushchenko L.A. *Forvardery Amkodor 2661, Amkodor 2661-01. Rukovodstvo po ekspluatatsii 2661.00.00.000RE* [Forwarders Amkodor 2661, Amkodor 2661-01. Operation Manual 2661.00.00.000RE]. Minsk: OJSC Amkodor, 2008, 224 p.
- [30] Vashkevich G.M., Gerasimovich A.K., German A.A., Gumennikov L.L., Melyashkevich A.I., Samushchenko L.A. *Kharvester Amkodor 2551. Rukovodstvo po ekspluatatsii 2551.00.00.000RE* [Harvester Amkodor 2551. Operation Manual 2551.00.00.000RE]. Minsk: JSC Amkodor, 2013, 225 p.
- [31] John Deere 770D, 1070D, 1270D, 1470D Forestry Equipment. Available at: <https://www.deere.com/assets/pdfs/common/products/wheeled-harvesters/wheeled-harvesters-d-series-dka1070wh.pdf> (accessed 16.11.2023).
- [32] *Rukovodstvo po ekspluatatsii kharvester 1270D OMF069318* [Operation manual for harvester 1270D OMF069318], 2005, 320 p.
- [33] Zhukov A.V., Klokov D.V., Loy V.N. *Pogruzochno-transportnaya mashina ML-131* [Loading and transport machine ML-131]. Trudy BGTU. Ser. 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost' [Proceedings of BSTU. Series 2. Forestry and woodworking industry], 2008, no. 8, pp. 82–88.
- [34] *Mashina lesnaya pogruzochno-transportnaya «Belarus» ML-131. Rukovodstvo po ekspluatatsii ML131-0000010 RE* [Forestry loading and transport machine «Belarus» ML-131. Operation manual ML131-0000010 RE]. Moscow: OJSC «MTZ», 2009, 233 p.
- [35] *Mashina lesnaya pogruzochno-transportnaya «Belarus» MLPT-344. Rukovodstvo po ekspluatatsii 344-0000010 R* [Forestry loading and transport machine «Belarus» MLPT-344. Operating manual 344-0000010 R. M: OJSC «MTZ»], 2009, 197 p.
- [36] Patent No. EP 0 520 389 B1 Europäische Patentschrift, B60K 17/36, B60K 1 7/32. Antriebsvorrichtung für Tandemachsen: No. 92110596.1 : Anmeldetag 06/24/1992: Veröffentlichungstag der Anmeldung 12/30/1992 / Erfinder: Auer, Ernst, Dipl.-Ing. W-8000 München 60 (DE): Patentinhaber: Neunkirchner Maschinenund Achsenfabrik GmbH & Co. KG D-81245 Munich (DE)

- [37] Zhulay V.A., Tyunin V.L., Fedenev A.A., Andrukhov D.I. *Nesimmetrichnyy balansirnyy privod vedushchikh koles nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin* [Asymmetrical balance beam drive of driving wheels of ground transport and technological machines]. Patent no. 2727224 RF, declared. 21.10.2019, 5 p.

*The research was carried out at I.I. Polzunov AltSTU with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under Agreement No. 075-11-2021-039 dated 25 June 2021.*

## Authors' information

**Gorbachev Aleksander Vladimirovich**  — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Altai State Technical University, named after I.I. Polzunov, [aleks\\_gorb@mail.ru](mailto:aleks_gorb@mail.ru)

**Korostelev Sergey Anatol'evich** — Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Altai State Technical University, named after I.I. Polzunov, [korsan73@mail.ru](mailto:korsan73@mail.ru)

**Chenskih Sergey Anatol'evich** — pg., Altai State Technical University, named after I.I. Polzunov, [csa-74@yandex.ru](mailto:csa-74@yandex.ru)

**Kolotilin Vladimir Evgenievich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev

**Kulepov Viktor Fedorovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University, named after R.E. Alekseev, [kulepov@dpinntu.ru](mailto:kulepov@dpinntu.ru)

Received 11.05.2024.

Approved after review 06.11.2024.

Accepted for publication 27.11.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest

## РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ НАЗЕМНОЙ ЛЕСНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ. ОБЗОР

В.Г. Дыгало✉, Г.О. Котиев, Л.В. Дыгало, Г.А. Бычков

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

dygalovg@bmstu.ru

Исследованы разработки роботизированных систем для работы в сложных условиях лесной среды. Уделено внимание специфическим характеристикам леса, таким как переменные температуры, влажности и сложный рельеф, создающие трудности для эффективного функционирования роботов. Рассмотрены проблемы: отсутствие сетевой инфраструктуры для связи, сложные условия почвы и уязвимость систем перед стихийными бедствиями. Выявлена необходимость специализированных решений, адаптированных к условиям леса, в том числе использование надежных систем передвижения по неровной поверхности, мощных источников энергии для длительной работы и современных технологий связи, позволяющих поддерживать связь в условиях ограниченной видимости. Проанализированы различные направления применения робототехнических систем в лесном хозяйстве от мониторинга состояния окружающей среды и тушения лесных пожаров до проведения инвентаризационных операций и выполнения задач по посадке и заготовке леса. Приведены примеры существующих решений, таких как роботы-амфибии и специализированные машины для тушения пожаров, подчеркивающие потенциал технологий в исключении человеческого фактора и повышении безопасности в лесном хозяйстве. Несмотря на существующие сложности, потенциальные выгоды от применения роботизированных систем в лесах значительны. Они могут не только улучшить управление лесными ресурсами, но и способствовать охране окружающей среды, снижая негативное воздействие на экосистемы.

**Ключевые слова:** колесный, гусеничный, робот, лесные робототехнические системы, концепция «Лес 4.0»

**Ссылка для цитирования:** Дыгало В.Г., Котиев Г.О., Дыгало Л.В., Бычков Г.А. Разработки в области наземной лесной робототехники. Обзор // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 84–95. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-84-95

Лесная среда — это часть повседневной жизни многих людей во всем мире. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), леса занимают около 4,06 млрд га, что эквивалентно 31 % площади суши земного шара. Глобальный процесс урбанизации трансформирует средства производства и труда не только работников лесного хозяйства, биологов и экологов.

Актуальной проблемой, является отсутствие контроля, мониторинга и сохранения лесных регионов. Для преодоления проблем и улучшения выполнения различных задач в области лесного хозяйства в мире разрабатывается концепция «Лес 4.0».

Основная цель концепции «Лес 4.0» — создание программно-аппаратных комплексов, позволяющих легко накапливать и стандартизировать данные, полученные из различных

источников, с помощью технологии и методов Big Data, машинного обучения, искусственного интеллекта и пр.

Концепция «Лес 4.0» аналогична концепции «Умный город». Она предполагает использование роботизированных систем и электронных устройств при решении задач лесного хозяйства, в частности мониторинга окружающей среды, предотвращения пожаров, инвентаризации, посадки, обрезки и заготовки.

Одним из ключевых преимуществ концепции «Лес 4.0» является автоматизация и улучшение эффективности процессов лесного хозяйства. Роботизированные системы позволяют проводить мониторинг окружающей среды в режиме реального времени, детектировать и предотвращать пожары, а также оптимизировать процессы посадки, обрезки и заготовки деревьев.

Использование технологий Big Data, машинного обучения и искусственного интеллекта дает возможность собирать, анализировать и

стандартизировать крупные объемы данных о состоянии лесных регионов. Это помогает улучшить планирование и оптимизировать принятие решений в области лесного хозяйства, облегчает прогнозирование возможных проблем и их последствия.

Кроме того, концепция «Лес 4.0» способствует повышению эффективности использования ресурсов и снижению негативного воздействия на окружающую среду. С ее помощью можно рационально использовать средства на обработку, транспортировку и заготовку древесины, минимизировать негативные последствия лесозаготовительных работ для биоразнообразия и экосистем.

Внедрение концепции «Лес 4.0» обеспечивает инновационное развитие лесной отрасли. Новые технологии и методы способствуют созданию новых рабочих мест, привлечению инвестиций и повышению конкурентоспособности отечественного лесного сектора в мировом масштабе.

Таким образом, концепция «Лес 4.0» имеет огромный потенциал для улучшения управления и использования лесных ресурсов, решения существующих проблем в области лесного хозяйства, обуславливая эффективное сохранение и потребление лесных ресурсов в интересах будущих поколений.

## Цель работы

Цель работы — аргументация применения концепции «Лес 4.0» и технологий Big Data, машинного обучения и искусственного интеллекта в лесном хозяйстве на основании обзора разработок в области наземных лесных робототехнических систем.

## Результаты и обсуждение

Лесная среда в отличие от аграрной характеризуется колебаниями температуры и влажности воздуха, крутизной склонов, наличием водных объектов и т. п. Это затрудняет создание надежных образцов робототехники, которые бы эффективно функционировали в таких условиях.

Кроме того, в лесной среде отсутствует сетевая инфраструктура связи. Древесная растительность препятствует распространению удаленной связи роботов с системами мониторинга и управления, что ограничивает возможности удаленного контроля и усложняет процедуру связи.

Важную преграду для работы лесных роботов составляют лесные почвы. Они имеют неоднородную структуру и содержат много мелких камней, веток и др. Это может вызвать скольжение робота и создать сложности для его передвижения. Для того чтобы решить данную проблему, следует использовать специальные механизмы передвижения, способные справиться с неровностями и препятствиями по пути.

Дополнительной трудностью при разработке лесных роботов является их уязвимость перед стихийными бедствиями, в частности ураганами. В отличие от сельскохозяйственных роботов, которые могут найти укрытие в случае неблагоприятных погодных условий, лесные роботы должны оставаться в рабочем состоянии даже после возникновения бури. Для этого их оснащают специальными системами связи и передвижения, обеспечивающими их работоспособность и в условиях непогоды.

Несмотря на все трудности, разработка роботов для работ в лесной среде имеет большой потенциал. Роботов можно использовать для мониторинга окружающей среды, управления лесными ресурсами, и для выполнения охраны и эксплуатации лесов. Успешную реализацию таких роботов могут обеспечить учет особенностей лесной среды и разработка специализированных объектов, предназначенных для преодоления имеющихся сложностей. Важно учитывать такие особенности лесной среды, как колебания температуры и влажности воздуха, наличие разнообразных препятствий и возможное развитие неблагоприятных погодных условий, в частности сильный ветер, ливни и др. Роботы должны автономно работать достаточно длительный период времени. Для этого их следует оснастить мощными и надежными батареями либо другими источниками энергии и обеспечить эффективными системами управления энергопотреблением.

Кроме того, лесные роботы должны иметь специализированные системы передвижения, которые позволят им эффективно перемещаться по неровной и непредсказуемой поверхности, преодолевать такие препятствия, как камни, корни деревьев и низкорослая растительность, а также крутые склоны и даже скалы.

Для обеспечения надежной связи с удаленными системами мониторинга и управления роботы необходимо оборудовать специальными системами связи, которые могут работать в условиях ограниченной видимости и сильной помехоустойчивости, например специальными антеннами, сетями ретрансляции сигналов и другими технологиями.



Рис. 1. Робот-амфибия — Chico Mendes  
Fig. 1. Amphibious robot — Chico Mendes

Важно учитывать, что лесная среда наряду с перечисленным выше может быть опасной для роботов из-за наличия диких животных, вредителей и других потенциальных угроз, поэтому роботы должны иметь системы безопасности, благодаря которым смогут избежать опасных ситуаций и защитить себя в случае необходимости.

Для разработки роботов, приспособленных к таким условиям, важно учитывать весь комплекс сложностей. Прежде всего, у них должны быть специальные колеса или гусеницы, которые смогут преодолевать неровности рельефа и разнообразные препятствия как на лесных тропинках, так и по бездорожью. Положительно оценивается использование датчиков и камер для обнаружения и преодоления препятствий, систем навигации, обеспечивающих эффективное перемещение по лесу.

Надежную связь с удаленными системами мониторинга и управления могут гарантировать специальные антенны, например направленные или антенны с высокой усилительной способностью. Кроме того, имеют значение технологии ретрансляции сигналов или беспроводные сети между роботами в целях наличия непрерывной связи между ними.

Для обеспечения безопасности роботов в лесной среде следует использовать датчики движения или тепловые датчики в целях обнаружения диких животных, других потенциальных угроз, а также системы аварийной остановки или защиты, чтобы предотвратить повреждение или потерю робота в случае опасности.

В целом разработка роботов для их применения в лесной среде должна строиться на

современных технологиях и инновациях для повышения их эффективности и надежности при выполнении задач в сложных условиях лесного окружения.

В настоящее время все большую популярность приобретает применение роботов при управлении лесными ресурсами. Рассмотрим подробнее лесохозяйственные направления, нуждающиеся в расширении применения робототехники.

**Охрана окружающей среды и мониторинг** составляют важный аспект управления лесным хозяйством. С помощью роботов решаются задачи по мониторингу лесов, контролю уровня загрязнения воздуха и водных объектов, обнаружению и предотвращению незаконных рубок деревьев. Благодаря точности и надежности роботы способны эффективно выполнять свою работу, что позволяет сохранить природу и биоразнообразие лесных экосистем.

**Тушение лесных пожаров** является неотъемлемой частью лесного хозяйства. Пожары представляют собой опасную угрозу лесным ресурсам. Задействование роботов при тушении пожаров ускоряет этот процесс, поскольку они оснащены датчиками и системами искусственного интеллекта, позволяющими им быстро обнаруживать возгорания и быстро реагировать на них. Роботы могут подавать сигналы тревоги, ограничивать распространение огня, снижая риск для людей, выполняющих эту опасную работу.

**Инвентаризационные операции** составляют неотъемлемую часть лесного хозяйства. Роботы могут с легкостью их выполнять, сканируя лесные участки и собирая информацию о состоянии деревьев, их размерах и возрасте. Благодаря использованию роботов, процесс инвентаризации становится более точным и эффективным, что позволяет улучшить планирование и принятие решений в лесном хозяйстве.

**Посадка, обрезка и заготовка леса** должны осуществляться с помощью роботов, поскольку они способны выполнять эти задачи с высокими точностью и скоростью, что значительно повышает производительность и сокращает затраты на рабочую силу.

Рассмотрим некоторые робототехнические системы, применяющиеся в лесном хозяйстве.

Пример робототехники для охраны и мониторинга окружающей среды в лесу — Chico Mendes — робот-амфибия с колесными ногами и активной реконфигурацией, способен ходить по газопроводам, земле, воде, болотам и песку (рис. 1) [1]. Робот оснащен роботизированной рукой с датчиками качества воды и газа, красной, зеленой и синей (RGB) камерами и



**Рис. 2.** Роботизированная платформа с БПЛА — THeMIS Observe KX-4 LE (Long Endurance)

**Fig. 2.** Robotic platform with UAV — THeMIS Observe KX-4 LE (Long Endurance)

поддержкой отбора проб, расположенной на конечном приводе, для мониторинга возможных утечек газа и загрязнения вод. Экологический гибридный робот (EHR) Chico Mendes предназначен для работы во внутренних районах бассейна р. Амазонки и представляет собой дистанционно управляемое транспортное средство, разработанное для выполнения миссий по мониторингу для бразильской нефтяной компании Petrobras S.A. между столицей штата Амазонас городом Манаус и муниципалитетом Коари на расстоянии около 400 км газопровода вдоль леса.

Есть примеры применения в лесном хозяйстве шагающих роботов, которые используются для проведения мероприятий по мониторингу окружающей среды. Этот тип робототехнической системы передвижения отличается быстрой адаптацией к склону местности, распространен по причине неструктурированности и труднодоступности лесной среды.

Для мониторинга широко применяются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). В настоящее время появляются технологии применения спарок, когда БПЛА размещаются на наземных мобильных шасси для расширения функциональных возможностей и увеличения дальности работы робототехнической системы (рис. 2).

В отличие от мониторинга, тушение лесных пожаров требует прямого вмешательства (традиционно с помощью пожарных машин и самолетов) в лесную среду в целях минимизации наносимого пожаром ущерба не только фауне и флоре, но и популяциям, проживающим в ней. Роботизированные приложения ускоряют тушение лесных пожаров, могут обеспечить безопасность и эффективно распылять воду или замедлители.

К конструкции пожарных роботов предъявляется комплекс требований, предусматрива-



**Рис. 3.** Пожарный робот Lockheed Martin

**Fig. 3.** Lockheed Martin firefighting robot



**Рис. 4.** Роботизированная платформа военного назначения — THeMIS Combat Milrem Robotics

**Fig. 4.** Military robotic platform — THeMIS Combat Milrem Robotics

ющих наличие у них устойчивости к высоким температурам и концентрациям газов и пыли в воздухе, высокой грузоподъемности и системы передвижения, предназначенной для транспортировки большого объема грузов по пересеченной местности.

В области инвентаризации лесных ресурсов также используются робототехнические системы. Например, автономный робот Forest Inventory and Analysis (FIA), разработанный Орегонским университетом, собирает данные о деревьях, их высоте, диаметре стволов и общем состоянии, что помогает управляющим принимать решения.



**Рис. 5.** Роботизированная платформа для тушения пожаров — Multiscope Rescue with Hydra

**Fig. 5.** Robotic platform for firefighting — Multiscope Rescue with Hydra



**Рис. 7.** Роботизированная платформа для тушения остатков очагов пожара — Multiscope Rescue Post-fire

**Fig. 7.** Robotic platform for extinguishing fire residues — Multiscope Rescue Post-fire



**Рис. 6.** Роботизированная платформа с дополнительными шлангами для тушения пожаров — Multiscope Rescue Hose Cartridge

**Fig. 6.** Robotic platform with additional hoses for firefighting — Multiscope Rescue Hose Cartridge

Для посадки, обрезки и заготовки леса разработаны отдельные робототехнические системы, например робот Planterbot. Он сконструирован учеными Швеции. Робот автоматически осуществляет посадку саженцев непосредственно в землю, оснащен датчиками и камерами, определяющими оптимальное место для посадки и обеспечивающими правильное ориентирование в лесной среде.

Концепция «Лес 4.0» открывает новые возможности для применения робототехнических систем в лесном хозяйстве. Она позволяет создать инновационные технологии и разработать методы, основанные на современных достиже-

ниях в области информационных технологий, машинного обучения и искусственного интеллекта, улучшает управление и обеспечивает охрану лесных ресурсов.

Конструктивно в данной сфере применения использовались гусеничные машины, но появились примеры и колесных роботов — (6WD), разработанных производителем военной продукции Lockheed Martin [2] (рис. 3), который адаптирован для выполнения операций по тушению пожаров. Этим роботом можно управлять с помощью пульта дистанционного управления, RGB и инфракрасных камер.

Довольно широка практика адаптации военных роботов для лесного сектора. Например, в работе [3] представлено несколько версий роботов не только для пожаротушения, но и для содействия в транспортировке шлангов в труднодоступных средах. При этом система передвижения и управления стандартизована, изменяется только модульное навесное оборудование (рис. 4).

Платформа Multiscope оснащена модульным генератором пены и/или воды с расходом 3000 л/мин. (рис. 5). Платформа Multiscope Rescue with Hydra используется при тушении пожаров. За ним проводят четыре линии водяных шлангов под давлением в целях обеспечения достаточного количества воды и/или пены для тушения. Для этого используется Multiscope Rescue Hose Cartridge (рис. 6).

Одной из сложных и трудоемких задач является прокладка пожарных шлангов для доставки воды, которые недоступны для основных



Рис. 8. Сеялка Multiscope Forester Planter  
Fig. 8. Multiscope Forester Planter



Рис. 9. Кусторез Multiscope Forester Brushcutter  
Fig. 9. Multiscope Forester Brushcutter

пожарных машин или слишком опасны для пожарных. Роботизированная платформа с дополнительными шлангами для тушения пожаров Multiscope Rescue Hose Cartridge добирается до проблемной зоны значительно быстрее, чем пожарная команда, что обеспечивает быстрое начало процесса тушения.

Беспилотная система используется для послепожарного тушения ландшафтных или лесных пожаров. Система оснащена модульным баком для воды или пенотушения и роботизированной рукой. Кроме того, она оснащена тепловизионными камерами, дающими возможность находить горячие точки (непогашенные участки), которые можно потушить прямо на месте (рис. 7).

Для разработки технологий, положительно влияющих на окружающую среду, разрабатываются «плантаторы» деревьев. Они имеют систему, которая прокалывает землю, укладывает саженец с помощью системы сжатого воздуха и, наконец, закрывает отверстие, утрамбовывая в автоматическом режиме почву вокруг саженца.

Сеялка Multiscope Forester (Multiscope Forester Planter) является коммерческим роботом-сеялкой с полезной нагрузкой вместимостью 380 саженцев (рис. 8). Благодаря модульной конструкции имеет две системы управления: телеуправление и навигацию по путевым точкам. Построенный на той же системе передвижения, что и сеялка Multiscope Forester, кусторез Multiscope Forester (Multiscope Forester Brushcutter) имеет щеточный режущий и гидравлический силовой инструменты (рис. 9). Благодаря модульной структуре роботов задачи могут выполняться во время лесохозяйственных работ.

Сеялка Multiscope Forester оснащена модульным контейнером с полезной нагрузкой



Рис. 10. Беспилотное наземное транспортное средство UGV  
Fig. 10. Unmanned Ground Vehicle UGV

вместимостью 380 саженцев. Скорость посадки составляет около 5...6,5 ч на 1 га, в зависимости от вида саженца и рельефа местности.

Роботизированный кусторез Forester включает в себя платформу Multiscope, оснащенную гидравлическим силовым агрегатом (максимальное давление 250 Па; расход масла 70 л/мин), щеточно-режущим инструментом ( $d < 10$  см) и необходимыми датчиками.

Таким образом, модульные решения широко применяются в разных сферах экономической деятельности человека.

Беспилотное наземное транспортное средство (UGV) — это роботизированное транспортное средство, позволяющее исследователям продолжать тестировать и отлаживать свою сенсорную систему для достижения

двух целей проекта автоматизированной заготовки: автономной навигации и инвентаризации лесов в режиме реального времени (рис. 10). Что касается последнего, то транспортное средство UGV в конечном итоге будет отправлено в лес в разведывательных целях для передачи данных о породах деревьев, объеме древесины и другой информации о лесной инвентаризации прежде чем отправлять более крупные машины. В качестве примера можно привести разработку Clearpath Robotics [4].

Для анализа лесной биомассы используется сочетание различных технологий. Для картирования стволов при инвентаризации лесов широко применяются технологии LiDAR.

Навигация ведется с помощью Глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) с использованием различных сочетаний алгоритмов. При этом исследователи получают иногда противоположные результаты, поскольку на точность влияет огромное количество факторов, в частности различная густота леса может привести к искажению точности.

Субарктические и арктические условия накладывают свою специфику. В среде со снегом и льдом вследствие большого момента инерции даже после завершения маневра робот может продолжать движение. Угловое смещение является основной характеристикой, которая мешает системам одометрии и позиционирования. Таким образом, при выполнении инвентаризационных операций в средах со льдом и снегом необходимо оценить кинематическую модель, которая наилучшим образом адаптируется к выбранному типу местности.

## Выводы

В рамках исследований, связанных с разработкой робототехнических систем для лесного хозяйства, можно сделать следующие выводы:

- в лесной отрасли более 30 % роботов используют гусеничный движитель, примерно 25 % — БПЛА, 22 % — 4WD, 11 % — шагающие, по 3 % — 6WD и перемещающиеся по проводам между деревьев;

- около 10 % роботов оснащены многофункциональной рукой-манипулятором;

- для посадки, обрезки и заготовки используются около 20 % роботов; для охраны окружающей среды и мониторинга лесов — около 25 % роботов; инвентаризационные операции составляют примерно 35 %, а для тушения пожаров — 20 %;

- 80 % роботов находятся на стадии исследований, а 20 % являются коммерческими решениями.

Для повышения точности и эффективности роботизированных приложений в лесу необходимо улучшить две основные области: «интеллектуальный» лес на основе современных технологий и навигационные системы.

Разработка робототехнических комплексов для работы в лесной среде имеет большое значение для государственного сектора, поскольку способствует сохранению фауны и флоры, а также для частного сектора, предоставляя возможность получения дохода. Роботизированные системы выполняют важные функции, такие как мониторинг состояния лесного покрова, обнаружение и предотвращение лесных пожаров, проведение инвентаризации лесных ресурсов, посадка и обрезка деревьев, а также заготовка древесины.

Современные технологии позволяют создать «интеллектуальный» лес, основанный на сборе и анализе данных с датчиков, установленных в различных участках леса. Такая система может контролировать влажность почвы, уровень загрязнения воздуха, показатели роста деревьев, наличие вредителей и другие параметры, что позволяет персонализировать уход за лесом и оперативно реагировать на изменения в окружающей среде.

Важной составляющей улучшения роботизированных приложений для работы в лесу являются навигационные системы, обеспечивающие точное определение местоположения робота в лесной среде. Точная навигация позволяет роботам эффективно перемещаться между деревьями и выполнять поставленные задачи без преград. Разработка навигационных систем на основе современных технологий может способствовать повышению точности и надежности работы робототехнических комплексов в лесной среде.

Таким образом, развитие «интеллектуального» леса и улучшение навигационных систем способствуют повышению эффективности работы робототехнических комплексов в лесной среде. Это позволяет сохранять окружающую среду, обеспечивать безопасность в лесных районах и повышать производительность в сфере лесного хозяйства.

## Список литературы

- [1] O robô ambiental híbrido «Chico Mendes» da Petrobrás // Diário do Pré-Sal. URL: <https://diariodopresal.wordpress.com/2011/05/04/o-robo-ambiental-hibrido-chico-mendes-da-petrobras/> (дата обращения 15.05.2023).

- [2] Posts tagged 'Lockheed Martin SMSS' // UNMANNED SYSTEMS: Notes from AUVSI's 2014 Conference and Trade Show. URL: <https://4gwar.wordpress.com/tag/lockheed-martin-smss/> (дата обращения 15.05.2023).
- [3] Enhancing combat effectiveness through advanced robotics. URL: <https://milremrobotics.com/> (дата обращения 15.05.2023).
- [4] Boldly go where no robot has gone before. URL: <https://clearpathrobotics.com/> (дата обращения 15.05.2023).
- [5] Мобильные роботы, их типы, возможности и применение. URL: <https://top3dshop.ru/blog/mobile-robots-types-and-applications.html> (дата обращения 15.05.2023).
- [6] Kristensen S, Horstmann S., Klandt J., Lohner F., Stopp A. Human-friendly interaction for learning and cooperation // Proceedings of the 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, May 21–26, 2001 Coex Seoul, Korea: IEEE, 2001, pp. 2590–2595.
- [7] Ulas C., Temeltas H. Multi-Layered Normal Distribution Transform for Fast and Long Range Matching // J. of Intelligent & Robotic Systems, 2013, v. 71 (1), pp. 85–108.
- [8] Nister D., Naroditsky O., Bergen J. Visual odometry for ground vehicle applications // J. of Field Robotics, 2006, v. 23 (1), pp. 3–20.
- [9] Семенков А.П. Система управления приводами мобильного робота // Студенческая научная весна. Сб. тезисов докл. Всерос. студенческой конф., посвященной 170-летию В.Г. Шухова, Москва, 01–30 апреля 2023 года. М.: Научная библиотека, 2023. С. 433–434.
- [10] Дыгало В.Г., Семенков А.П. Концепция системы управления малой гусеничной машиной // Ежегодная национальная научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам научно-исследовательских работ за 2020 г.: сб. тезисов докл. Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2021. С. 101–102.
- [11] Дыгало В.Г., Порватов М.Н. Концепция реализации модулей малой гусеничной машины для отработки и адаптации алгоритма управления движением // Ежегодная нац. науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по итогам науч.-исслед. работ за 2020 г., Мытищи, 1–3 февраля 2021 г. Сб. тезисов докл. Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2021. С. 85–87.
- [12] Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Бухтояров Л.Д. Исследование кинематики и динамики движителя гусеничной лесозаготовительной машины // Лесотехнический журнал, 2014. Т. 4. № 4 (16). С. 179–190.
- [13] Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляев А.М., Папунин А.В., Беляков В.В. Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течение зимнего периода // Тр. НГТУ им П.Е. Алексеева, 2013. № 2 (99). С. 155–160.
- [14] Jennings N., Paratin P., Jonson M. Using Intelligent Agents to Manage Business Processes // The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology: Proceedings of the First Int. Conf. London (UK), 1996, pp. 345–376.
- [15] Can We Make Our Robots Less Biased Than We Are? URL: <https://www.nytimes.com/2020/11/22/science/artificial-intelligence-robots-racism-police.html?searchResultPosition=3> (дата обращения 15.05.2023).
- [16] Wong J.Y. Development of high-mobility tracked vehicles for over snow operations // J. of Terramechanics, 2009, 46(4), pp. 141–155.
- [17] Оплетаев А.С., Жигулин Е.В., Залесов С.В. Опыт многоротационного выращивания контейнерного посадочного материала для искусственного лесовосстановления в теплицах с регулируемым микроклиматом // Хвойные бореальной зоны, 2023. Т. 41. № 2. С. 152–157.
- [18] Трегубов О.В., Лактионов А.П., Мизин Ю.А., Комарова О.В., Похваленко В.А. Опыт создания лесных культур с закрытой корневой системой в зарубежных странах // Астраханский вестник экологического образования, 2022. № 4 (70). С. 179–189.
- [19] Трегубов О.В., Лактионов А.П., Мизин Ю.А., Комарова О.В., Пилипенко В.Н., Похваленко В.А. Опыт создания лесных культур с закрытой корневой системой в степной и лесостепной зонах юга Российской Федерации // Астраханский вестник экологического образования, 2022. № 5 (70). С. 203–211. DOI 10.36698/2304-5957-2022-5-203-211
- [20] Habineza E., Ali M., Reza N., Chung S.-O. Vegetable transplanters and kinematic analysis of major mechanisms Onion transplanter View project // Korean J. Agric. Sci., 2023, v. 50(1), pp. 113–129. DOI: 10.7744/kjoas.20230007
- [21] Karayel D., Çanakci M., Topakci M., Aktaş A., Aytem H., Kriauciuniene Z. Technical evaluation of transplanters' performance for potted seedlings // Turkish J. Agric. For., 2023, v. 47, no. 1, pp. 116–123. DOI: 10.55730/1300-011X.3068
- [22] Khadatkar A., Mathur S.M., Gaikwad B.B. Automation in transplanting: A smart way of vegetable cultivation // Current Science. Indian Academy of Sciences, 2018, v. 115, no. 10, pp. 1884–1892. DOI: 10.18520/cs/v115/i10/1884-1892
- [23] Tylek P., Szewczyk G., Kormanek M., Walczyk J., Sowa J. M., Pietrzykowski M., Woś B., Kielbasa P., Juliszewski T., Tadeusiewicz R., Adamczyk F., Danielak M., Wojciechowski J., Szczepaniak J., Szychta M., Szulc, T. Design of a Planting Module for an Automatic Device for Forest Regeneration // Croat. J. For. Eng., 2023, v. 44, no. 1, pp. 203–215. DOI: 10.5552/crojfe.2023.1722
- [24] Бартнев И.И., Гаврин Д.С. Конструктивные особенности посадочных машин // Лесотехнический журнал, 2019. Т. 9. № 2. С. 147–155. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/16
- [25] Hwang S.J., Park J.H., Lee J.Y., Shim S.B., Nam J.S. Optimization of Main Link Lengths of Transplanting Device of Semi-Automatic Vegetable Transplanter // Agron., 2020, v. 10, pp. 1938.
- [26] Markumningsih S., Hwang S.-J., Kim J.-H., Jang M.-K., Shin C.-S., Nam J. Comparison of Consumed Power and Safety of Two Types of Semi-Automatic Vegetable Transplanter: Cam and Four-Bar Link // Agriculture. MDPI AG, 2023, v. 13, no. 3, p. 588. DOI: 10.3390/agriculture13030588
- [27] Chowdhury M., Ali M., Habineza E., Reza M.N., Kabir M.S.N., Lim S.-J., Choi I.-S., Chung S.-O. Analysis of

- Rollover Characteristics of a 12 kW Automatic Onion Transplanter to Reduce Stability Hazards // *Agriculture*. MDPI AG, 2023, v. 13, no. 3, p. 652. DOI: 10.3390/agriculture13030652
- [28] Zhou M., Shan Y., Xue X., Yin D. Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings // *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2020, v. 13, no. 4, pp. 85–92. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201304.5404
- [29] Sun K., Ge R., Li T., Wang J. Design and Analysis of Vegetable Transplanter Based on Five-bar Mechanism Design and Analysis of Vegetable Transplanter Based on Five-bar Mechanism // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2019, v. 692, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012029
- [30] Yu Y., Liu J., Ye B., Yu G., Jin X., Sun L., Tong J. Design and Experimental Research on Seedling Pick-Up Mechanism of Planetary Gear Train with Combined Non-circular Gear Transmission // *Chinese J. Mech. Eng.* Springer Singapore, 2019, v. 32, no. 1. DOI: 10.1186/s10033-019-0357-3
- [31] Shao Y., Liu Y., Xuan G., Hu Z., Han X., Wang Y., Chen B., Wang W. Design and Test of Multifunctional Vegetable Transplanting Machine // *IFAC-PapersOnLine*. Elsevier Ltd, 2019, v. 52, no. 30, pp. 92–97. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.503
- [32] Reza M.N., Islam M.N., Chowdhury M., Ali M., Islam S., Kiraga S., Lim S.J., Choi I.S., Chung S.O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter // *Machines*. MDPI, 2021, v. 9, no. 9. DOI: 10.3390/machines9090183
- [33] Iqbal M.Z., Islam M.N., Ali M., Kabir M.S.N., Park T., Kang T.G., Park K.S., Chung S.O. Kinematic analysis of a hopper-type dibbling mechanism for a 2.6 kW two-row pepper transplanter // *J. Mech. Sci. Technol. Korean Society of Mechanical Engineers*, 2021, v. 35, no. 6, pp. 2605–2614. DOI: 10.1007/s12206-021-0531-2
- [34] Iqbal M.Z., Islam M.N., Chowdhury M., Islam S., Park T., Kim Y.J., Chung S.O. Working speed analysis of the gear-driven dibbling mechanism of a 2.6 kw walking-type automatic pepper transplanter // *Machines*, 2021, v. 9, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.3390/machines9010006
- [35] Zeng F., Li X., Bai H., Cui J., Liu X., Zhang Y. Experimental Research and Analysis of Soil Disturbance Behavior during the Hole Drilling Process of a Hanging-Cup Transplanter by DEM // *Processes*, 2023, v. 11, no. 2, pp. 1–18. DOI: 10.3390/pr11020600
- [36] Yang Q., Zhang R., Jia C., Li Z., Zhu M., Addy M. Study of dynamic hole-forming performance of a cup-hanging planter on a high-speed seedling transplanter // *Front. Mech. Eng.*, 2022, v. 8, no. August, pp. 1–16. DOI: 10.3389/fmech.2022.896881
- [37] Bai H., Li X., Zeng F., Cui J., Zhang Y. Study on the Impact Damage Characteristics of Transplanting Seedlings Based on Pressure Distribution Measurement System // *Horticulturae*, 2022, v. 8, no. 11. DOI: 10.3390/horticulturae8111080
- [38] Cui J., Li X., Zeng F., Bai H., Zhang Y. Parameter Calibration and Optimization of a Discrete Element Model of Plug Seedling Pots Based on a Collision Impact Force // *Appl. Sci.*, 2023, v. 13, no. 10. DOI: 10.3390/app13106278
- [39] Lysych M., Bukhtoyarov L., Druchinin D. Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs // *Inventions*, 2021, v. 8, no. 83. DOI: 10.3390/inventions6040083

## Сведения об авторах

**Дыгало Владислав Геннадиевич** <sup>✉</sup> — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Мытищинский филиал), [dugalovg@bmstu.ru](mailto:dugalovg@bmstu.ru)

**Котиев Георгий Олегович** — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Мытищинский филиал)

**Дыгало Людмила Викторовна** — инженер, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Мытищинский филиал)

**Бычков Георгий Александрович** — ст. преподаватель, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Мытищинский филиал)

Поступила в редакцию 18.03.2024.

Одобрено после рецензирования 08.10.2024.

Принята к публикации 14.11.2024.

## DEVELOPMENTS OF GROUND FOREST ROBOTICS. REVIEW

V.G. Dygalo✉, G.O. Kotiev, L.V. Dygalo, G.A. Bychkov

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

dygalovg@bmstu.ru

A topical issue nowadays is the lack of control, monitoring and conservation of forest regions. To solve the issues and improve the implementation of various tasks in the field of forestry in the world, the concept of «Forest 4.0» is being developed. This concept includes the widespread use of robotic systems in the forestry industry. This article is devoted to an overview of developments in the field of ground-based forestry robotic systems. Attention is paid to robotic solutions with wheeled and tracked types of propulsion. Walking, wire-walking and unmanned aerial vehicles (UAV) are outside the scope of this article. Examples of solutions for environmental protection and monitoring, forest fire fighting, inventory operations and planting, pruning and logging are considered. As a result, it can be noted that in order to improve the accuracy and execution time of several forest robotic applications for environmental conservation, monitoring, forest fire fighting, inventory, planting, pruning and harvesting, two main areas need improvement: IoT-based smart forest and navigation systems.

**Keywords:** wheeled, tracked, robot, forest robotic systems, Forest 4.0

**Suggested citation:** Dygalo V.G., Kotiev G.O., Dygalo L.V., Bychkov G.A. *Razrabotki v oblasti nazemnoy lesnoy robototekhniki. Obzor* [Developments of ground forest robotics. Review]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 84–95. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-84-95

### References

- [1] O robô ambiental híbrido «Chico Mendes» da Petrobrás. Diário do Pré-Sal. Available at: <https://diariodopresal.wordpress.com/2011/05/04/o-robo-ambiental-hibrido-chico-mendes-da-petrobras/> (accessed 15.05.2023).
- [2] Posts tagged 'Lockheed Martin SMSS'. UNMANNED SYSTEMS: Notes from AUVSI's 2014 Conference and Trade Show. Available at: <https://4gwar.wordpress.com/tag/lockheed-martin-smss/> (accessed 15.05.2023).
- [3] Enhancing combat effectiveness through advanced robotics. Available at: <https://milremrobotics.com/> (accessed 15.05.2023).
- [4] Boldly go where no robot has gone before. Available at: <https://clearpathrobotics.com/> (accessed 15.05.2023).
- [5] *Mobil'nye roboty, ikh tipy, vozmozhnosti i primeneniye* [Mobile robots, their types, capabilities and applications]. Available at: <https://top3dshop.ru/blog/mobile-robots-types-and-applications.html> (accessed 15.05.2023).
- [6] Kristensen S, Horstmann S., Klandt J., Lohner F., Stopp A. Human-friendly interaction for learning and cooperation. Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 21–26, 2001 Coex Seoul, Korea. IEEE, 2001, pp. 2590–2595.
- [7] Ulas C., Temeltas H. Multi-Layered Normal Distribution Transform for Fast and Long Range Matching. *J. of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, v. 71 (1), pp. 85–108.
- [8] Nister D., Naroditsky O., Bergen J. Visual odometry for ground vehicle applications. *J. of Field Robotics*, 2006, v. 23 (1), pp. 3–20.
- [9] Semenov A.P. *Sistema upravleniya privodami mobil'nogo robota* [Mobile robot drive control system]. *Studencheskaya nauchnaya vesna. Sbornik tezisev dokladov Vserossiyskoy studencheskoy konferentsii, posvyashchennoy 170-letiyu V.G. Shukhova* [Student scientific spring. Collection of abstracts of reports of the All-Russian student conference dedicated to the 170th anniversary of V.G. Shukhov], Moscow, April 01–30, 2023. Moscow: Publishing house «Scientific library», 2023, pp. 433–434.
- [10] Dygalo V.G., Semenov A.P. *Kontseptsiya sistemy upravleniya maloy gusenichnoy mashinoy* [Concept of a control system for a small tracked vehicle]. *Ezhegodnaya natsional'naya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov i studentov Mytishchinskogo filiala MG TU im. N.E. Baumana po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2020 g.: sb. tezisev dokladov* [Annual national scientific and technical conference of the faculty, graduate students and students of the Mytishchi branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman Moscow State Technical University based on the results of research work for 2020: collection of abstracts of reports]. Krasnoyarsk: KrasSAU, 2021, pp. 101–102.
- [11] Dygalo V.G., Porvatov M.N. *Kontseptsiya realizatsii moduley maloy gusenichnoy mashiny dlya otrabotki i adaptatsii algoritma upravleniya dvizheniem* [The concept of implementing modules of a small tracked vehicle for testing and adapting the motion control algorithm]. *Ezhegodnaya natsional'naya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya professorsko-prepodavatel'skogo sostava, aspirantov i studentov Mytishchinskogo filiala MG TU im. N.E. Baumana po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot za 2020 g. Sbornik tezisev dokladov* [Annual national scientific and technical conference of the faculty, graduate students and students of the Mytishchi branch of Bauman Moscow State Technical University based on the results of research work for 2020. Collection of abstracts of reports]. Krasnoyarsk: KrasSAU, 2021, pp. 85–87.
- [12] Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Bukhtoyarov L.D. *Issledovanie kinematiki i dinamiki dvizhitelya gusenichnoy lesozagotovitel'noy mashiny* [Study of kinematics and dynamics of the drive unit of a tracked logging machine]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry journal], 2014, v. 4, no. 4 (16), pp. 179–190.

- [13] Makarov V.S., Zezyulin D.V., Belyaev A.M., Papunin A.V., Belyakov V.V. *Formirovanie snezhnogo pokrova v zavisimosti ot landshafta mestnosti i otsenka podvizhnosti transportno-tekhnologicheskikh mashin v techenii zimnego perioda* [Formation of snow cover depending on the terrain and assessment of the mobility of transport and technological machines during the winter period]. Trudy NGTU im R.E. Alekseeva [Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev], 2013, no. 2 (99), pp. 155–160.
- [14] Jennings N., Paratin P., Jonson M. Using Intelligent Agents to Manage Business Processes. The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology: Proceedings of the First Intern. Conference. London (UK), 1996, pp. 345–376.
- [15] Can We Make Our Robots Less Biased Than We Are? Available at: <https://www.nytimes.com/2020/11/22/science/artificial-intelligence-robots-racism-police.html?searchResultPosition=3> (accessed 15.05.2023).
- [16] Wong J.Y. Development of high-mobility tracked vehicles for over snow operations. J. of Terramechanics, 2009, 46(4), pp. 141–155.
- [17] Opletaev A.S., Zhigulin E.V., Zalesov S.V. *Opyt mnogorotatsionnogo vyrashchivaniya konteynernogo posadochnogo materiala dlya iskusstvennogo lesovosstanovleniya v teplitsakh s reguliruemym mikroklimatom* [Experience of multi-rotation cultivation of container planting material for artificial reforestation in greenhouses with controlled microclimate]. Khvoynye boreal'noy zony [Conifers of the boreal zone], 2023, v. 41, no. 2, pp. 152–157.
- [18] Tregubov O.V., Laktionov A.P., Mizin Yu.A., Komarova O.V., Pokhvalenko V.A. *Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur s zakrytoy kornevoy sistemoy v zarubezhnykh stranakh* [Experience of creating forest crops with a closed root system in foreign countries]. Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya [Astrakhan Bulletin of Environmental Education], 2022, no. 4 (70), pp. 179–189.
- [19] Tregubov O.V., Laktionov A.P., Mizin Yu.A., Komarova O.V., Pilipenko V.N., Pokhvalenko V.A. *Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur s zakrytoy kornevoy sistemoy v stepnoy i lesostepnoy zonakh yuga Rossiyskoy Federatsii* [Experience of creating forest crops with a closed root system in the steppe and forest-steppe zones of the south of the Russian Federation]. Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya [Astrakhan Bulletin of Environmental Education], 2022, no. 5 (70), pp. 203–211. DOI 10.36698/2304-5957-2022-5-203-211
- [20] Habineza E., Ali M., Reza N., Chung S.-O. Vegetable transplanters and kinematic analysis of major mechanisms Onion transplanter View project. Korean J. Agric. Sci., 2023, v. 50(1), pp. 113–129. DOI: 10.7744/kjoas.20230007
- [21] Karayel D., Çanakci M., Topakci M., Aktaş A., Aytem H., Kriauciuniene Z. Technical evaluation of transplanters' performance for potted seedlings. Turkish J. Agric. For., 2023, v. 47, no. 1, pp. 116–123. DOI: 10.55730/1300-011X.3068
- [22] Khadatkar A., Mathur S.M., Gaikwad B.B. Automation in transplanting: A smart way of vegetable cultivation. Current Science. Indian Academy of Sciences, 2018, v. 115, no. 10, pp. 1884–1892. DOI: 10.18520/cs/v115/i10/1884-1892
- [23] Tylek P., Szewczyk G., Kormanek M., Walczyk J., Sowa J. M., Pietrzykowski M., Woś B., Kiełbasa P., Juliszewski T., Tadeusiewicz R., Adamczyk F., Danielak M., Wojciechowski J., Szczepaniak J., Szychta M., Szulc, T. Design of a Planting Module for an Automatic Device for Forest Regeneration. Croat. J. For. Eng., 2023, v. 44, no. 1, pp. 203–215. DOI: 10.5552/crojfe.2023.1722
- [25] Hwang S.J., Park J.H., Lee J.Y., Shim S.B., Nam J.S. Optimization of Main Link Lengths of Transplanting Device of Semi-Automatic Vegetable Transplanter. Agron., 2020, v. 10, pp. 1938.
- [26] Markunningsih S., Hwang S.-J., Kim J.-H., Jang M.-K., Shin C.-S., Nam J. Comparison of Consumed Power and Safety of Two Types of Semi-Automatic Vegetable Transplanter: Cam and Four-Bar Link. Agriculture. MDPI AG, 2023, v. 13, no. 3, p. 588. DOI: 10.3390/agriculture13030588
- [27] Chowdhury M., Ali M., Habineza E., Reza M.N., Kabir M.S.N., Lim S.-J., Choi I.-S., Chung S.-O. Analysis of Rollover Characteristics of a 12 kW Automatic Onion Transplanter to Reduce Stability Hazards. Agriculture. MDPI AG, 2023, v. 13, no. 3, p. 652. DOI: 10.3390/agriculture13030652
- [28] Zhou M., Shan Y., Xue X., Yin D. Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings. Int. J. Agric. Biol. Eng., 2020, v. 13, no. 4, pp. 85–92. DOI: 10.25165/ijabe.20201304.5404
- [29] Sun K., Ge R., Li T., Wang J. Design and Analysis of Vegetable Transplanter Based on Five-bar Mechanism Design and Analysis of Vegetable Transplanter Based on Five-bar Mechanism. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., 2019, v. 692, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012029
- [30] Yu Y., Liu J., Ye B., Yu G., Jin X., Sun L., Tong J. Design and Experimental Research on Seedling Pick-Up Mechanism of Planetary Gear Train with Combined Non-circular Gear Transmission. Chinese J. Mech. Eng. Springer Singapore, 2019, v. 32, no. 1. DOI: 10.1186/s10033-019-0357-3
- [31] Shao Y., Liu Y., Xuan G., Hu Z., Han X., Wang Y., Chen B., Wang W. Design and Test of Multifunctional Vegetable Transplanting Machine. IFAC-PapersOnLine. Elsevier Ltd, 2019, v. 52, no. 30, pp. 92–97. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.503
- [32] Reza M.N., Islam M.N., Chowdhury M., Ali M., Islam S., Kiraga S., Lim S.J., Choi I.S., Chung S.O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter. Machines. MDPI, 2021, v. 9, no. 9. DOI: 10.3390/machines9090183
- [33] Iqbal M.Z., Islam M.N., Ali M., Kabir M.S.N., Park T., Kang T.G., Park K.S., Chung S.O. Kinematic analysis of a hopper-type dibbling mechanism for a 2.6 kW two-row pepper transplanter. J. Mech. Sci. Technol. Korean Society of Mechanical Engineers, 2021, v. 35, no. 6, pp. 2605–2614. DOI: 10.1007/s12206-021-0531-2
- [34] Iqbal M.Z., Islam M.N., Chowdhury M., Islam S., Park T., Kim Y.J., Chung S.O. Working speed analysis of the gear-driven dibbling mechanism of a 2.6 kw walking-type automatic pepper transplanter. Machines, 2021, v. 9, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.3390/machines9010006

- [35] Zeng F., Li X., Bai H., Cui J., Liu X., Zhang Y. Experimental Research and Analysis of Soil Disturbance Behavior during the Hole Drilling Process of a Hanging-Cup Transplanter by DEM. *Processes*, 2023, v. 11, no. 2, pp. 1–18. DOI: 10.3390/pr11020600
- [36] Yang Q., Zhang R., Jia C., Li Z., Zhu M., Addy M. Study of dynamic hole-forming performance of a cup-hanging planter on a high-speed seedling transplanter. *Front. Mech. Eng.*, 2022, v. 8, no. August, pp. 1–16. DOI: 10.3389/fmech.2022.896881
- [37] Bai H., Li X., Zeng F., Cui J., Zhang Y. Study on the Impact Damage Characteristics of Transplanting Seedlings Based on Pressure Distribution Measurement System. *Horticulturae*, 2022, v. 8, no. 11. DOI: 10.3390/horticulturae8111080
- [38] Cui J., Li X., Zeng F., Bai H., Zhang Y. Parameter Calibration and Optimization of a Discrete Element Model of Plug Seedling Pots Based on a Collision Impact Force. *Appl. Sci.*, 2023, v. 13, no. 10. DOI: 10.3390/app13106278
- [39] Lysych M., Bukhtoyarov L., Druchinin D. Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs. *Inventions*, 2021, v. 8, no. 83. DOI: 10.3390/inventions6040083

## Authors' information

**Dygalov Vladislav Gennadievich**  — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), dygalovg@bmstu.ru

**Kotiev Georgiy Olegovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forestry Complex, BMSTU (Mytishchi branch)

**Dygalov Lyudmila Viktorovna** — Engineer of the BMSTU (Mytishchi branch)

**Bychkov Georgiy Aleksandrovich** — Senior Lecturer of the BMSTU (Mytishchi branch)

Received 18.03.2024.

Approved after review 08.10.2024.

Accepted for publication 14.11.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest

## КОНЕЧНО-РАЗНОСТНАЯ СХЕМА ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОГИБА ДОРОЖНОГО МАТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ДВИЖИТЕЛЯ ЛЕСНОЙ МАШИНЫ

М.В. Зорин<sup>1</sup>, Е.Г. Хитров<sup>2</sup>✉, О.А. Куницкая<sup>3</sup>,  
П.С. Елисеев<sup>4</sup>, А.М. Юдилевич<sup>5</sup>, В.Е. Клубничкин<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», Россия, 677007, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, Сергеляхское шоссе, 3-й километр, д. 3

<sup>4</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

<sup>5</sup>ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», Россия, 665709, Иркутская область, г. Братск, ул. Макаренко, д. 40

yegorkhitrov@gmail.com

Рассмотрена математическая модель взаимодействия колесного штампа-двигателя с двухслойной опорной поверхностью, состоящей из синтетического дорожного мата и подстилающего лесного почвогрунта. Предложена модель деформируемой плиты, размещенной на податливом (винклеровском) основании. Предложена конечно-разностная схема, предполагающая произвольное распределение нагрузки по узлам сетки, для решения дифференциального уравнения прогиба плиты (и осадки основания), а также несколько вариантов закрепления граничных узлов. Разработана программа на языке Python для реализации предложенной модели. С использованием данной программы проведен вычислительный эксперимент. Отклонение расчетных данных от частного случая точного решения не превысило 5 %. Обработка расчетных данных позволила получить уравнение, удобное при оценке глубины колеи на композитном основании, образующейся под воздействием двигателя.

**Ключевые слова:** временные лесные дороги, укрепление трелевочных волоков, сборно-разборные дорожные покрытия, лесозаготовки, трелевка, сухопутный транспорт леса

**Ссылка для цитирования:** Зорин М.В., Хитров Е.Г., Куницкая О.А., Елисеев П.С., Юдилевич А.М., Клубничкин В.Е. Конечно-разностная схема для расчета прогиба дорожного мата под воздействием двигателя лесной машины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 96–111.

DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-96-111

Одной из основных проблем современного лесного комплекса Российской Федерации является слаборазвитая дорожная сеть на землях лесного фонда. По этой причине резко снижена эффективность лесохозяйственных мероприятий, повышена трудоемкость предупреждения и тушения лесных пожаров, дорожает продукция отрасли [1–7]. Специфика лесной дорожной сети заключается в том, что большая часть дорог и технологических коридоров используется относительно небольшой срок, что позволяет обустраивать их по упрощенной технологии, в частности сборно-разборными дорожными покрытиями [8–12].

### Цель работы

Цель работы — изучение характера связи механических свойств синтетического материала и толщины дорожных матов с прочностью получаемого композитного основания (лесной грунт + дорожный мат), находящегося под воздействием колесного двигателя-штампа.

### Объекты и методы исследования

Оценкой прочности служит глубина колеи, образующейся под воздействием двигателя, поскольку известно, что при образовании колеи глубже 20 см возникают критические последствия для лесной экосистемы и, кроме того, вероятно потеря машиной опорной проходимости [13–17].

С точки зрения механики возникает задача моделирования работы деформируемой плиты, расположенной на податливом грунтовом основании; условия закрепления плиты по краям различны и определяются физической картиной процесса [18–21].

В качестве основного уравнения, связывающего деформацию мата под нормальным воздействием движителя, примем дифференциальное уравнение прогиба плиты, лежащей на винклеровском основании.

Для выполнения расчетов необходима оценка коэффициента постели грунта по его механическим свойствам. Для этого проведены расчеты переменных параметров лесного грунта и нормального давления движителя в качестве входных данных, решено известное нелинейное уравнение осадки штампа-движителя, аппроксимированы результаты расчета. В итоге получена оценка коэффициента постели грунта, который по физическому смыслу моделирует соотношение давления движителя и осадки грунта в заданном диапазоне давления с учетом модуля общей деформации лесного грунта.

Кроме того, известно, что уравнение в частных производных для прогиба плиты имеет аналитическое решение лишь в некоторых случаях при определенном закреплении плиты, круговой и эллиптической эпюрах давления. При сложном характере закрепления плиты, размещенной на винклеровском основании, и иных эпюрах давления, характерных для движителей лесных машин, точного решения не получено [22–25]. По этой причине используем численные методы, позволяющие оценить прогиб на основе разностных схем аппроксимации частных производных в уравнении деформации плиты.

## Результаты и обсуждение

По определению, коэффициент постели грунта  $k$  в уравнении измеряется в Паскалях на метр — Па/м, и описывает линейную связь нормального давления на грунт и его осадки. Для оценки коэффициента используем широко известное уравнение глубины колеи, образующейся под воздействием штампа-движителя

$$h = \frac{KJpb}{(p_s - p)\sqrt{1 - pJK}} \arctg\left(\frac{H - h}{ab\sqrt{1 - pJK}}\right), \quad (1)$$

где  $K$  — жесткость грунта (выражение принимается с учетом реологической модели лесного грунта);

$J$  — геометрический параметр штампа, зависящий от соотношения его сторон;

$p$  — нормальное давление штампа на грунт;

$a$  — коэффициент, учитывающий соотношение ширины штампа и глубины распространения деформаций;

$b$  — ширина штампа;

$p_s$  — несущая способность грунта с учетом глубины распространения деформаций;

$H$  — толщина деформируемого слоя грунта;

$h$  — осадка (глубина колеи).

Выражения для параметров, входящих в уравнение (1), также широко известны. Несущая способность определяется по формуле

$$p_{s,0} = p_{s,0}\alpha_z, \quad (2)$$

в которой множитель  $p_{s,0}$  отражает влияние сцепных, фрикционных свойств лесного грунта и геометрии штампа:

$$p_{s,0} = 0,5J_1N_1\gamma b + N_1\gamma h + J_3N_3C, \quad (3)$$

$$S = \operatorname{tg} \frac{\pi - 2\varphi}{4}, \quad N_1 = \frac{1 - S^4}{S^5}, \quad (4)$$

$$N_2 = \frac{1}{S^2}, \quad N_3 = 2\frac{1 + S^2}{S^3},$$

где  $J_1, J_2, S, N_1, N_2, N_3$  — вспомогательные обозначения;

$\gamma, C, \varphi$  — соответственно удельный вес, удельное сцепление и угол внутреннего трения лесного грунта

$$J_1 = \frac{l}{l + 0,4b}, \quad J_3 = \frac{l + b}{l + 0,5b}, \quad (5),$$

где  $l$  — длина штампа.

Множитель  $\alpha_z$  в формуле (2) учитывает влияние глубины распространения деформаций на несущую способность:

$$\alpha_z = 1 + \frac{0,5H_p h}{(H - h - 0,25H_p)H}; \quad (6)$$

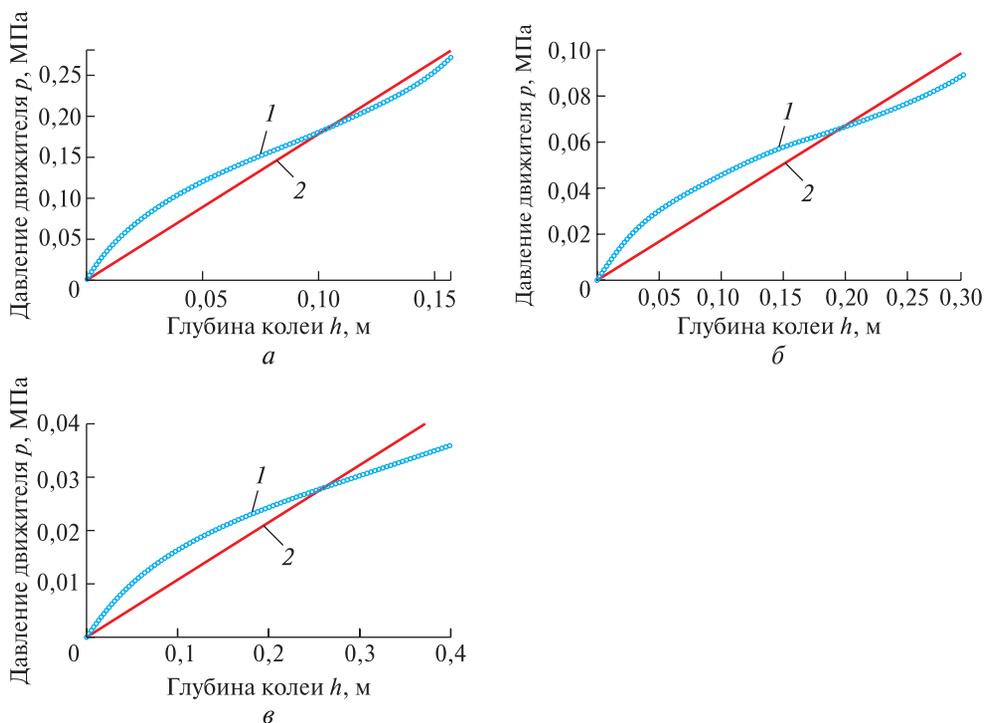
$$H_p = \frac{\sqrt{2}}{2} b \operatorname{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp\left(\frac{\pi + 3\varphi}{4} \operatorname{tg} \frac{3\varphi}{4}\right). \quad (7)$$

Физико-механические свойства лесного грунта можно выразить через модуль общей деформации по формулам

$$K = \frac{1}{E}, \quad C = \frac{10,774}{10^3} E^{0,7737}, \quad \varphi = 13,669 E^{0,7737}; \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{8,4008}{10^3} E^{0,1168}, \quad H = 0,4714 E^{-0,479}.$$

Параметры  $J, a$  в уравнении (2), определяются по формулам



**Рис. 1.** Результаты расчета давления движителя в зависимости от глубины колеи: а — лесной грунт I категории ( $E = 3,0$  МПа); б — лесной грунт II категории ( $E = 1,0$  МПа); в — лесной грунт III категории ( $E = 0,4$  МПа); 1 — расчетные данные; 2 — линейная аппроксимация

**Fig. 1.** Calculation results of propulsion pressure depending on track depth: а — forest soil of category I ( $E = 3,0$  МПа); б — forest soil of category II ( $E = 1,0$  МПа); в — forest soil category III ( $E = 0,4$  МПа); 1 — calculated data; 2 — linear approximation

$$J = \frac{0,03 + \frac{l}{b}}{0,6 + 0,43 \frac{l}{b}}, \quad a = 0,64 \left( 1 + \frac{b}{H} \right). \quad (9)$$

Проведены расчеты значения давления  $p$ , приводящего к образованию колеи глубиной  $h$ , для трех категорий лесного грунта. В расчетах принято, что  $b = 0,7$  м,  $l > b$  (рис. 1). Для трех рассмотренных случаев к удовлетворительным результатам (табл. 1) приводит аппроксимация расчетных данных линейной функцией

$$p = kh. \quad (10)$$

Сопоставим полученные значения коэффициента постели грунта  $k$  и модуля деформации  $E$  (рис. 2).

Окончательно получим квадратичную зависимость  $k(E)$

$$k = 0,1252E^2 + 0,219E. \quad (11)$$

Получена оценка коэффициента постели лесного грунта в зависимости от его модуля общей деформации. Ранее такая оценка непосредственно для лесного грунта не выполнялась.

В качестве модели синтетического мата, размещенного на лесном грунте, используем модель плиты. Воздействие движителя смоделируем нагрузкой, распределенной по площади плиты.

Уравнение прогиба  $w(x,y)$  плиты, лежащей на деформируемом (винклеровском) основании, представляет собой дифференциальное уравнение 4-го порядка в частных производных

$$\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial y^4} + \frac{k}{d} w(x,y) = \frac{q(x,y)}{d}, \quad (12)$$

где  $d$  — цилиндрическая жесткость плиты (параметр плиты);

$w(x,y)$  — функция прогиба плиты;

$q(x,y)$  — функция распределения нагрузки (давления движителя) по поверхности плиты.

Коэффициент  $k$  определяется в зависимости от модуля деформации лесного грунта  $E$  формулой (11).

Цилиндрическую жесткость плиты  $D$  можно найти из уравнения

$$D = \frac{E_0 H_0^3}{12(1 - \mu_0^2)}, \quad (13)$$

где  $E_0$  — модуль упругости материала плиты;  
 $H_0$  — толщина плиты;  
 $\mu_0$  — коэффициент Пуассона плиты.

В зависимости от условий закрепления плиты задаются граничные условия. Например, для края, где плита жестко закреплена (заделка), следует положить два граничных условия при геометрическом параметре  $a$ , соответствующем схеме закрепления (рис. 3)

$$\begin{cases} w(x, y)|_{x=a} = 0 \\ \frac{\partial w(x, y)}{\partial x}|_{x=a} = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} w(x, y)|_{y=a} = 0 \\ \frac{\partial w(x, y)}{\partial y}|_{y=a} = 0 \end{cases}, \quad (14)$$

где  $a$  принимается одним из значений в наборе  $\{0; W; L\}$ , здесь  $W$  — ширина плиты (соответствует размеру мата в направлении, перпендикулярном трассе),  $L$  — длина плиты (соответствует размеру мата в продольном направлении);

– для шарнирного закрепления

$$\begin{cases} w(x, y)|_{x=a} = 0 \\ \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2}|_{x=a} = 0 \end{cases}, \quad \begin{cases} w(x, y)|_{y=a} = 0 \\ \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2}|_{y=a} = 0 \end{cases}, \quad (15)$$

– для условий свободного провисания края

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2}|_{x=a} = 0, \\ \frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial y^3} + (2 - \mu_0) \frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial y \partial x^2}|_{x=a} = 0 \end{cases}, \quad (16)$$

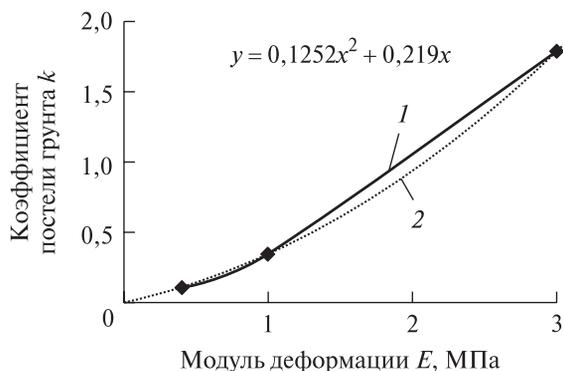
$$\begin{cases} \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} + \mu_0 \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2}|_{y=a} = 0, \\ \frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial x^3} + (2 - \mu_0) \frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial x \partial y^2}|_{y=a} = 0. \end{cases}$$

Применительно к решаемой задаче моделирования воздействия движителя на синтетический мат, размещенный на лесном грунте, такие условия в чистом виде едва ли возможны. Тем не менее с некоторыми допущениями прием, что условия шарнирного закрепления (15) выполняются по краям плиты вдоль трассы движения при наличии направляющих лаг, а в местах стыковки двух матов край условно

Т а б л и ц а 1

**Результаты линейной аппроксимации давления по глубине колеи**  
**Results of Linear Approximation of Pressure by Track Depth**

Категория грунта	Модуль деформации $E$ , МПа	Коэффициент постели грунта $k$ , МПа/м	Коэффициент аппроксимации $R^2$
I	3,0	1,784	0,8010
II	1,0	0,344	0,8768
III	0,4	0,108	0,9686



**Рис 2.** Коэффициент постели грунта в зависимости от модуля общей деформации лесного грунта

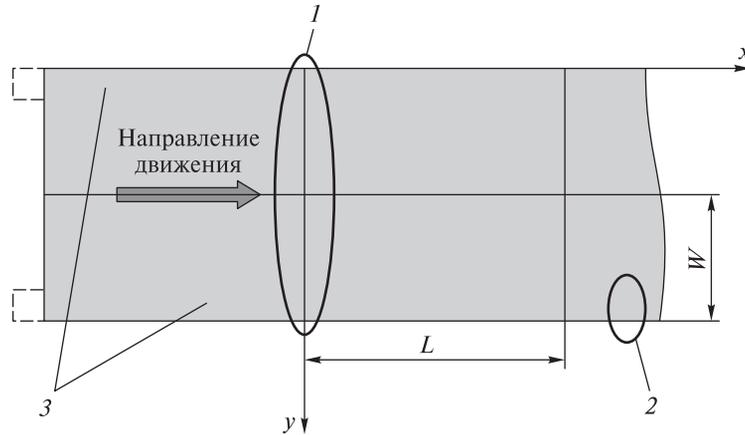
**Fig. 2.** Bedding coefficient depending on the modulus of the general deformation of the forest soil

свободно провисает. Логику такого допущения можно объяснить физической картиной процесса: направляющие лаги препятствуют нормальному перемещению плиты в месте крепления, но едва ли препятствуют повороту мата в перпендикулярном направлении. При этом в местах стыковки нет существенных препятствий для прогиба матов.

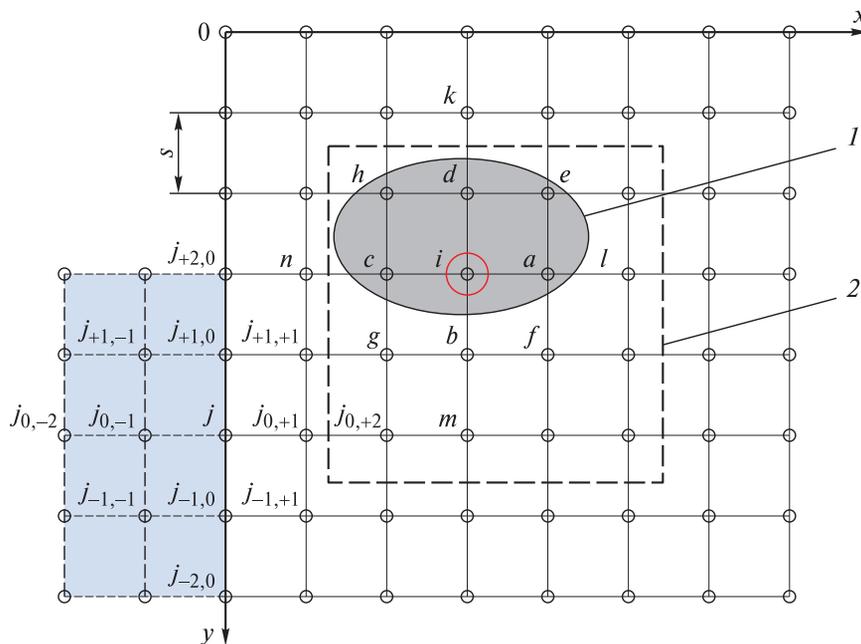
Для получения решения уравнения (12) используем метод конечных разностей. Непрерывная область, ограниченная длиной и шириной деформируемой плиты, заменяется конечномерной сеткой с равномерным шагом  $s$  (см. рис. 4).

Частные производные по уравнению (12) заменяются конечно-разностными аппроксимациями на сетке с заданным шагом  $s$ :

$$\frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^4} \approx \frac{w(x - 2s, y) - 4w(x - s, y) + 6w(x, y) - 4w(x + s, y) + w(x + 2s, y)}{s^4}; \quad (17)$$



**Рис. 3.** Схема к определению граничных условий для решения задачи:  $1$  — участок стыковки соседних матов;  $2$  — участок стыковки соседних лаг;  $3$  — направляющие лаги  
**Fig. 3.** Scheme for determining the boundary conditions for solving the problem:  $1$  — the docking area of adjacent mats;  $2$  — the docking area of adjacent logs;  $3$  — guide logs



**Рис. 4.** Составление конечно-разностной схемы для решения уравнения прогиба плиты:  $i$  — узел, для которого составляется разностное уравнение на данном шаге;  $1$  — эпюра давления;  $2$  — область, в которой находятся внутренние узлы стеки, вне этой области — узлы, разностные уравнения в которых определяются граничными условиями, и фиктивные узлы  
**Fig. 4.** Drawing up a finite-difference scheme for solving the slab deflection equation:  $i$  — is the node for which the difference equation is compiled at this step;  $1$  — is the pressure diagram;  $2$  — the area in which the internal nodes of the stack are located, outside this area — the nodes, the difference equations in which are determined by the boundary conditions and fictitious nodes

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial y^4} &\approx \\ &\approx \frac{w(x, y - 2s) - 4w(x, y - s) + 6w(x, y) - 4w(x, y + s) + w(x, y + 2s)}{s^4}; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} &\approx \\ &\approx \frac{w(x - s, y - s) - 2w(x, y - s) + w(x + s, y - s)}{s^4} + \\ &+ \frac{-2w(x - s, y) + 4w(x, y) - 2w(x + s, y)}{s^4} + \\ &+ \frac{w(x - s, y + s) - 2w(x, y + s) + w(x + s, y + s)}{s^4}. \end{aligned} \quad (19)$$

Выражения для частных производных, входящих в граничные условия (14) – (16), задаются следующими формулами:

– для первых частных производных

$$\begin{aligned} \frac{\partial w(x, y)}{\partial x} &\approx \frac{w(x + s, y) - w(x - s, y)}{2s}, \\ \frac{\partial w(x, y)}{\partial y} &\approx \frac{w(x, y + s) - w(x, y - s)}{2s}; \end{aligned} \quad (20)$$

– для вторых частных производных

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} &\approx \frac{w(x + s, y) - 2w(x, y) + w(x - s, y)}{s^2}, \\ \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2} &\approx \frac{w(x, y + s) - 2w(x, y) + w(x, y - s)}{s^2}; \end{aligned} \quad (21)$$

– для частных производных третьего порядка

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial x^3} &\approx \\ &\approx \frac{w(x - 2s, y) - 2w(x - s, y)}{2s^3} + \\ &+ \frac{2w(x + s, y) - w(x + 2s, y)}{2s^3}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial y^3} &\approx \\ &\approx \frac{w(x, y - 2s) - 2w(x, y - s)}{2s^3} + \\ &+ \frac{2w(x, y + s) - w(x, y + 2s)}{2s^3}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial y \partial x^2} &\approx \\ &\approx \frac{w(x + s, y + s) - 2w(x, y + s)}{2s^3} + \\ &+ \frac{w(x - s, y + s) - w(x + s, y - s)}{2s^3} - \\ &- \frac{2w(x, y - s) + w(x - s, y - s)}{2s^3}; \\ \frac{\partial^3 w(x, y)}{\partial x \partial y^2} &\approx \\ &\approx \frac{w(x + s, y + s) - 2w(x + s, y)}{2s^3} + \\ &+ \frac{w(x + s, y - s) - w(x - s, y + s)}{2s^3} - \\ &- \frac{2w(x - s, y) + w(x - s, y - s)}{2s^3}. \end{aligned} \quad (22)$$

Схема, поясняющая порядок составления разностных уравнений, представлена на рис. 4. Таким образом, вместо исходного уравнения (12) в каждом внутреннем узле сетки (на рис. 4 обозначены точками), запишем уравнение относительно неизвестных значений  $w$

$$\begin{aligned} &\frac{w(x - 2s, y) + w(x + 2s, y)}{s^4} + \\ &+ \frac{w(x, y - 2s) + w(x, y + 2s)}{s^4} - \\ &- 2 \frac{w(x - s, y - s) + w(x + s, y - s)}{s^4} + \\ &+ - 2 \frac{w(x + s, y + s) + w(x - s, y + s)}{s^4} - \\ &- 8 \frac{w(x - s, y) + w(x + s, y) + w(x, y - s) + w(x, y + s)}{s^4}. \end{aligned} \quad (23)$$

Например, для узла  $i$ , отмеченного окружностью на рис. 4, можно записать в обозначениях схемы, приведенной на рисунке, следующее выражение

$$\begin{aligned} &\frac{w_k + w_l + w_m + w_n}{s^4} + \\ &+ 2 \frac{w_e + w_f + w_g + w_h}{s^4} - \\ &- 8 \frac{w_a + w_b + w_c + w_d}{s^4} + \\ &+ 20 \frac{w_i}{s^4} + \frac{k}{D} w_i = \frac{q_i}{D}. \end{aligned} \quad (24)$$

Число узлов по оси  $x$  обозначим  $m$ , по оси  $y$  —  $n$ . Тогда в решении задачи будет фигурировать  $mn$  значений  $w$ . Для внутренних узлов составим  $(m - 4)(n - 4)$  уравнений. Оставшиеся уравнения, необходимые для корректного решения задачи, получим на основе условий закрепления плиты.

Аппроксимации для узлов  $j$  принимаем в соответствии с граничными условиями, например — для заделки

$$w_j = 0, \frac{w_{j,j-1} - w_{j,j+1}}{2s} = 0, \tag{25}$$

— для шарнирного закрепления

$$w_j = 0, \frac{w_{j,j-1} - 2w_j + w_{j,j+1}}{s^2} = 0, \tag{26}$$

— для условий свободного провисания

$$\begin{aligned} & \frac{w_{j-1,j} - 2w_j + w_{j+1,j}}{s^2} + \\ & + \mu_0 \frac{w_{j,j-1} - 2w_j + w_{j,j+1}}{s^2} = 0; \tag{27} \\ & \frac{w_{j-2,j} - 2w_{j-1,j} + 2w_{j+1,j} - w_{j+2,j}}{2s^3} + (2 - \mu_0) \times \\ & \times \frac{w_{j+1,j+1} - 2w_{j,j+1} + w_{j-1,j+1} - w_{j+1,j-1} + 2w_{j,j-1} - w_{j-1,j-1}}{2s^3} = 0. \end{aligned}$$

При этом оценки прогиба в фиктивных узлах могут задаваться различными способами; при достаточно малом шаге сетки можем положить  $w_{j-1}, w_{j-2} \approx 0$ .

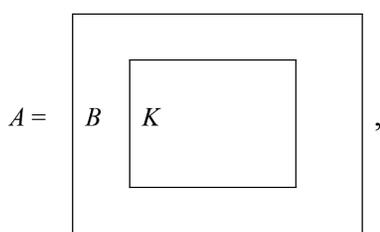
Таким образом, на основе конечно-разностной схемы приходим к системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных  $w_i$ . В матричном виде система имеет вид

$$Aw = b, \tag{28}$$

где  $A$  — матрица системы линейных алгебраических уравнений с числом элементов  $(n \times m)^2$ ;

- $w$  — вектор решений (оценки прогиба плиты в узлах конечно-разностной сетки);
- $b$  — вектор правых частей (задается в зависимости распределения внешней нагрузки).

Матрица  $A$  имеет специальную структуру



где «ядро»  $K$  формируется следующим образом:

$$K = \begin{matrix} D & S & I & 0 & \dots & 0 & 0 \\ S & D & S & I & \dots & 0 & 0 \\ I & S & D & S & \dots & 0 & 0 \\ 0 & I & S & D & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & D & S \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & S & D \end{matrix},$$

где блоки  $D, S, I$  имеют размер  $(n - 4) \times (m - 4)$  и задаются в виде матриц:

$$D = \begin{matrix} 20 + \frac{k}{d} & -8 & 1 & \dots & 0 \\ -8 & 20 + \frac{k}{d} & -8 & \dots & 0 \\ 1 & -8 & 20 + \frac{k}{d} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 20 + \frac{k}{d} \end{matrix};$$

$$S = \begin{matrix} -8 & 2 & 0 & \dots & 0 \\ 2 & -8 & 2 & \dots & 0 \\ 0 & 2 & -8 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -8 \end{matrix}; \quad I = \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{matrix}.$$

Коэффициенты в «контуре»  $B$  матрицы  $A$ , находящиеся в двух первых и последних строках, в двух первых и последних столбцах, как было отмечено, определяются граничными условиями.

Решение полученной системы линейных алгебраических уравнений относительно прогиба плиты  $w_i$  проведем численно с учетом симметрии матрицы  $A$ . Для реализации решения разработана программа с использованием среды IDE PyCharm Community (рис. 5). При этом входными параметрами являются следующие: модуль деформации лесного грунта, длина и ширина плиты, число узлов сетки по длине и по ширине плиты, толщина плиты, модуль упругости и коэффициент Пуассона ее материала, условия закрепления по краям плиты, внешняя нагрузка в выбранных узлах сетки. К выходным параметрам относят: оценку прогиба плиты и осадки грунта в узлах сетки, оценку напряжений в узлах сетки.

Перед проведением вычислительного эксперимента программа была протестирована

на корректность. Для этого результат расчета (рис. 6) при точечной нагрузке вблизи центра на сетке с 14×14 внутренними узлами при условии жесткой заделки по контуру сравнили с точным решением, известным для такого случая. Отклонение расчетных данных от частного случая точного решения не превысило 5 %. Схожий результат получен и некоторыми другими авторами при иллюстрации разностного решения дифференциального уравнения прогиба плиты, в связи с чем был сделан вывод о корректности работы программы в плане составления разностных уравнений для приближенного решения задач.

Далее была выполнена серия расчетов, основные результаты которых приведены в табл. 2. Расчеты выполнены для дорожных матов 2000×4000 мм, нагрузка задана во внутренних узлах сетки в окрестности центра мата. Расчеты проведены для сетки 144×144 узла, условия закрепления: левый край закреплен шарнирно, для остальных краев приняты условия свободного провисания. Коэффициент постели почвогрунта рассчитан по формуле (6). Параметры синтетического материала:  $E_0 = 1,2$  ГПа,  $\mu = 0,3$ .

Табличные данные проиллюстрированы для лесного почвогрунта III категории (слабонесущий) и II категории (средней прочности) на рис. 7.

Графики на рис. 8 иллюстрируют процентное снижение глубины колеи, образующейся на «композитном» волокне, укрепленном синтетическим матом.

Обработка расчетных данных позволила получить уравнение, применимое для оценки глубины колеи, образующейся под воздействием движителя, на волокне, укрепленном синтетическим матом

$$h = \left( 0,463 - 8,23H_0 + 41,6H_0^2 \right) \frac{P}{p_s}, \quad (29)$$

где  $p$  — среднее давление движителя, МПа;  
 $p_s \approx 0,1E$  несущая способность грунта, МПа;  
 $H_0$  — толщина синтетического мата, м.

Результаты расчета по формуле (29) для двух типов лесного почвогрунта проиллюстрированы на рис. 9.

Также для практики полезно оценить требуемую толщину дорожного мата, обеспечивающего соблюдение условия экологичности с учетом соотношения среднего давления движителя и несущей способности лесного почвогрунта. Для этого уравнение (29) решается при фиксированном значении глубины колеи  $h = 0,2$  м относительно толщины синтетического мата  $H_0$ . Результаты расчетов, для удобства выраженные в миллиметрах, приведены на рис. 10.

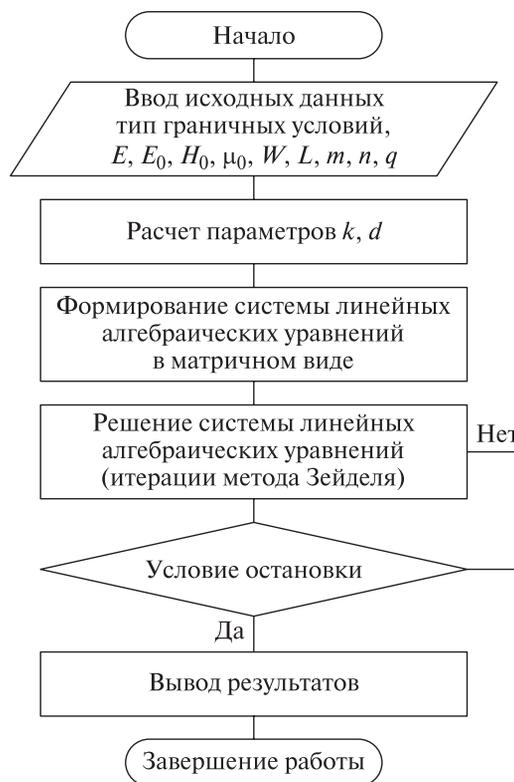


Рис. 5. Алгоритм работы программы для расчета показателей воздействия движителя лесной машины на синтетический мат

Fig. 5. Algorithm of the program for calculating the indicators of the impact of the forest machine mover on the synthetic mat

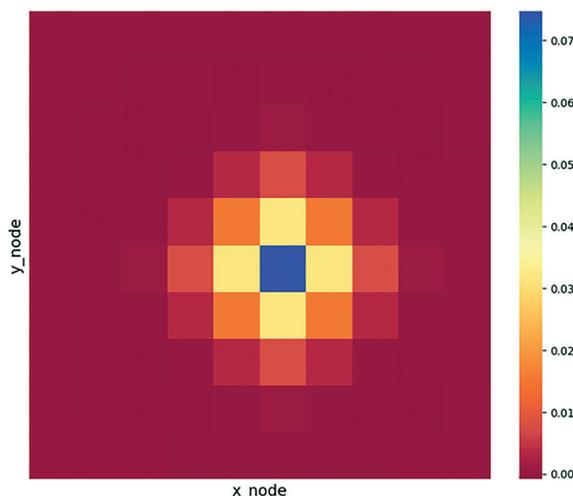


Рис. 6. Результаты расчета по разработанной программе, реализующей конечно-разностную схему решения задачи по определению прогиба плиты

Fig. 6. The results of the calculation according to the developed program, which implements a finite-difference scheme for solving the problem of determining the deflection of the plate

### Основные результаты расчетов прогиба синтетического дорожного мата под воздействием движителя лесной машины

The main results of calculations of the deflection of a synthetic road matting under the influence of a forest machine

Толщина синтетического мата $H_0$ , мм	Давление движителя $p$ , МПа								
	III категория лесного грунта			II категория лесного грунта			I категория лесного грунта		
	0,4	0,07	0,1	0,4	0,07	0,1	0,4	0,07	0,1
0	37,2	65	92,9	11,6	20,3	29,1	2,2	3,9	5,6
20	32,4	56,6	80,9	11,1	19,4	27,7	2,2	3,9	5,6
40	19,8	34,7	49,5	8,7	15,2	21,7	2,1	3,7	5,2
102	5,2	9,1	13	3	5,2	7,5	1,2	2,1	3

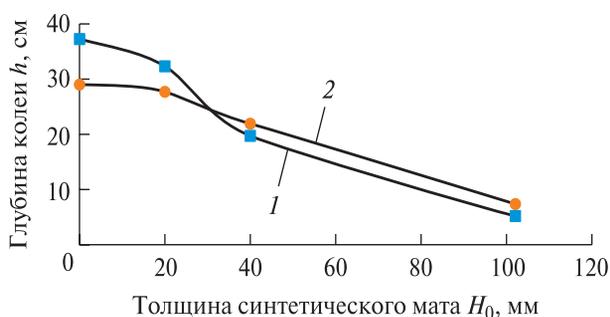


Рис. 7. Результаты расчета по конечно-разностной схеме (глубина колеи при варьировании толщины синтетического мата, воздействие движителя по центру): 1 — III категория грунта,  $p = 0,04$  МПа; 2 — II категория грунта,  $p = 0,1$  МПа

Fig. 7. The results of the calculation according to the finite difference scheme (track depth with varying thickness of the synthetic mat, the effect of the mover in the center): 1 — III category of soil,  $p = 0,04$  МПа; 2 — II category of soil,  $p = 0,1$  МПа

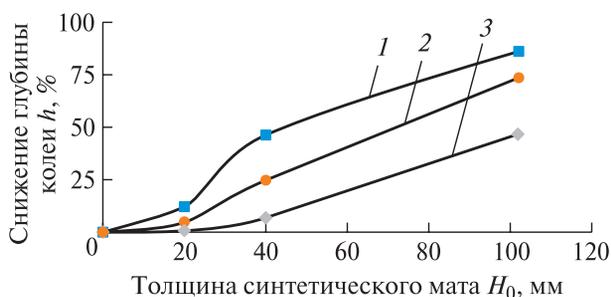


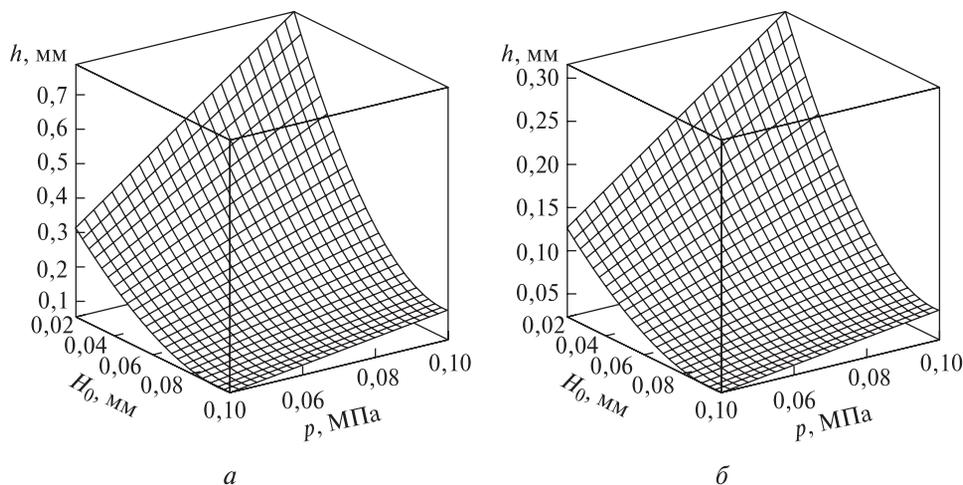
Рис. 8. Снижение глубины колеи, образующейся на волоке, укрепленном синтетическим матом: 1 — III категория грунта; 2 — II категория грунта; 3 — I категория грунта

Fig. 8. Reducing the depth of the track formed on the fiber reinforced with synthetic mat: 1 — evaluative category primer; 2 — evaluative category primer; 3 — evaluative category primer

При использовании традиционного приема обеспечения работоспособности лесных машин на лесосеках со слабонесущими почвогрунтами, а также сохранения объектов биоразнообразия, заключающегося в расширении сети трелевочных волоков и технологических коридоров, достаточно сложно выполнить требования приказа Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 23 от 17.01.2022 г., в частности «Общая площадь трасс волоков и дорог должна составлять при сплошных рубках не более 20 %, при выборочных — не более 15 % площади лесосеки. На лесосеках сплошных рубок, проводимых с применением многооперационной техники, допускается увеличение площади волоков и дорог до 30 % общей площади лесосеки». Невыполнение этих требований приводит к штрафным санкциям, которые существенно снижают и без того невысокую рентабельность лесозаготовительного производства.

При использовании сборно-разборных дорожных конструкций из современных пластиковых матов после их демонтажа на почвогрунте практически не остается следов воздействия техники, в отличие от машин, проходящих непосредственно по сырому почвогрунту. Как показывает практика, оснащение колесных машин специальными моногусеницами или использование гусеничных машин на слабонесущем почвогрунте в теплый период года вместо колесных не решает проблему.

Широко известен и распространен вариант укрепления трелевочных волоков и технологических коридоров на слабонесущих почвогрунтах порубочными остатками [26]. У такого варианта есть и отрицательные моменты: во-первых, раздробленные и вдавленные в почвогрунт порубочные остатки быстро перегнивают и удобряют почвенный горизонт далеко не везде. Например, в лесах на вечной мерзлоте,



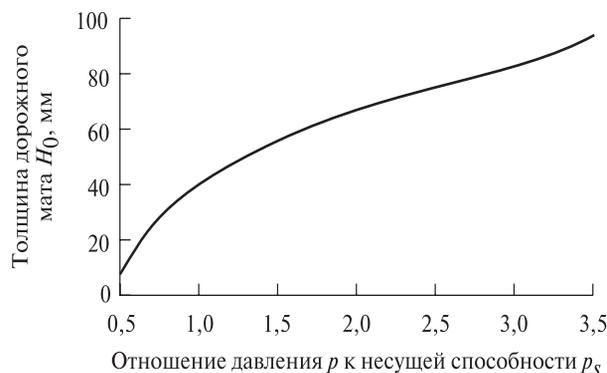
**Рис. 9.** Оценка глубины колеи, образующейся под воздействием движителя: *a* — лесной почвогрунт III категории; *б* — лесной почвогрунт II категории  
**Fig. 9.** Assessment of the depth of the track formed under the influence of the mover: *a* — forest soil of category III; *б* — forest soil of category II

которых в нашей стране около 60 %, ввиду крайне бедной биоты почвенного горизонта, эта древесина перегнивает крайне медленно, и становится лесным горючим материалом, очагом деструкции мерзлоты [27]. Во-вторых, такой вариант не применим, если требуется по кратчайшему маршруту пересечь ключевой биотоп или другое обводненное понижение.

Отсюда очевидно, что использование сборно-разборных дорожных конструкций из современных пластиковых матов для сети трелевочных волоков и технологических коридоров в определенных природно-производственных условиях является практически безальтернативным.

Причем представленный в настоящей работе анализ показывает, что для транспортировки матов в условиях лесосеки наилучшим образом подходят форвардеры большой грузоподъемности (наиболее популярные у лесозаготовителей РФ [28, 29]), которые помимо транспортировки могут обеспечить погрузку и выгрузку элементов временного покрытия, а также его укладку с помощью гидроманипулятора.

Для строительства (сборки) покрытия на 1 км трелевочного волока (шириной 4,5 м), способного выдержать воздействие тяжелых лесных машин, массой до 40 т потребуется 500 матов серии «Н» с габаритными размерами 2×4 м. Трудоемкость монтажа матов на 1 км сети трелевочных волоков составит приблизительно два рабочих дня силами трех человек. Состав бригады для укладки матов: рабочий — 2 чел.; оператор форвардера — 1 чел. Время монтажа одного мата 2000×4000 составляет



**Рис. 10.** Толщина дорожного мата, обеспечивающего соблюдение критерия экологичности трелевки, в зависимости от соотношения среднего давления движителя и несущей способности лесного почвогрунта

**Fig. 10.** The thickness of the road mat that ensures compliance with the criteria of environmental friendliness of the skidding, depending on the ratio of the average pressure of the mover and the bearing capacity of the forest soil

от 1 до 3 мин. Сборка коридора длиной 100 м, шириной 4 м — около 4 ч.

Еще одним вариантом являются вездеходные машины, также оснащенные манипулятором или краном. Машины такой конструкции используются, например, для доставки посадочного материала в трудных условиях, а также при пожаротушении, т. е. при достаточной площади грузовой платформы, поэтому могут быть использованы и для решения поставленной задачи [30, 31].

Уменьшения потребного количества матов для сборно-разборного покрытия и снижения трудоемкости монтажно-демонтажных работ можно добиться с помощью решения оптимизационных задач для конкретных лесосек — по площади, почвенно-грунтовым условиям, наличию и особенностям размещения неэксплуатационных площадей, финансовым возможностям лесозаготовительного предприятия.

Анализ литературных источников показывает, что различные авторы по-разному подходят к вопросам моделирования и решения оптимизационных задач. При этом в качестве критериев оптимизации устанавливаются не только экономические, но и экологические факторы. Например, в статьях [32, 33] предложен метод моделирования транспортных путей вывоза леса с лесосеки с помощью гиперсети. Предполагается, что модель лесосеки разбита на элементарные участки, с которых необходимо собрать заготовленные лесоматериалы. Гиперсеть представляет собой двухуровневую структуру, нижний уровень которой является гиперграфом, а верхний — ориентированным графом. Вершины гиперграфа нижнего уровня соответствуют элементарным участкам (позициям сбора пачек лесоматериалов), а гиперребра — возможным комбинациям близко расположенных участков, лесоматериалы с которых можно вывезти за один проход трелевочного трактора.

Узлы ориентированного графа верхнего уровня взаимно однозначно соответствуют вершинам гиперграфа нижнего уровня, в дуги — путям прохода форвардера между местами сбора лесоматериалов, направленными в сторону пункта его сбора. Критерием оптимальности служит уменьшение доли участков с глубокой или недопустимо глубокой колеей, которая образуется при движении трелевочного трактора. Перспективным направлением дальнейшего развития этого подхода видится в применении геометрических методов для разбиения лесосеки на участки сбора пачек лесоматериалов и связывания их между собой в единую транспортную сеть.

В работах [34–36] предложен вариант оптимизации с разбиением арендной базы, или лесосеки, на центры запаса леса с выделением неэксплуатационных участков, например ключевых биотопов, прогалин, вырубок. Однако составление и решение оптимизационных задач размещения сети трелевочных волоков и технологических коридоров с ездовой поверхностью из сборно-разборных пластиковых матов по критериям снижения потребного количества матов и трудоемкости монтажно-демонтажных

работ и с учетом практически полного отсутствия требований учета несущей способности почвогрунтов на отдельных участках их трасс выходит за рамки данного исследования, оставаясь задачей будущего.

Помимо выкладки сборно-разборного покрытия из пластиковых матов на сети трелевочных волоков и технологических коридоров весьма целесообразной является выкладка сборно-разборного покрытия на площадках верхних складов (погрузочных пунктов), где почвогрунты подвергаются максимальному негативному воздействию, даже больше, чем на магистральных трелевочных волоках.

## Выводы

Реализация математической модели взаимодействия колесного штампа-двигателя с двуслойной опорной поверхностью, состоящей из синтетического дорожного мата и подстилающего лесного почвогрунта, показала, что связь глубины образующейся колеи и толщины дорожного мата, носит квадратичный характер.

Оценка требуемой толщины дорожного мата, обеспечивающего соблюдение условия экологичности и проходимости техники, показала, что при толщине дорожного мата 40 мм допустимо соотношение допустимого давления и несущей способности грунта 1:1 (глубина колеи не превысит 20 см) (известные ранее рекомендации ограничивали это соотношение величиной 1:2, в противном случае колея превысит 20 см).

Установлено, что использование дорожных матов целесообразно при укреплении лесных дорог. При использовании дорожных матов толщиной 102 мм расчетное значение глубины колеи на лесных почвогрунтах II (средней прочности) и III (слабонесущие) категории снижается на величину до 75 %; на прочных лесных грунтах I категории снижение оценивается в 50 %.

*Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства». Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.*

## Список литературы

- [1] Григорьева О.И. Эффективность транспортно-технологических систем для лесного хозяйства // Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Тюмень,

- 19 апреля 2018 г / под ред. Н.С. Захарова. Тюмень: Изд-во Тюменского индустриального университета, 2018. С. 79–83.
- [2] Злобина Н.И., Зеликов В.А., Григорьева О.И., Гурьев А.Ю. Определение пропускной способности лесовозных автомобильных дорог эмпирическим путем с учетом безопасности дорожного движения // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах, 2022. № 5. С. 38–65.
- [3] Давтян А.Б., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Энергетические лесные плантации для эффективного вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения в РФ // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: Материалы 86-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотр. и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 31 января – 12 февраля 2022 г. Минск, 2022. С. 42–45.
- [4] Каляшов В.А., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Инновационные методы освоения горных лесосек // Инновации в химико-лесном комплексе: тенденции и перспективы развития: Материалы Всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 06–07 июня 2022 г. / под ред. Ю.А. Безруких, Е.В. Мельникова. Красноярск: Изд-во Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, 2022. С. 88–92.
- [5] Григорьева О.И., Григорьев М.Ф., Григорьев И.В. Анализ естественного лесовозобновления в Алексеевском участковом лесничестве Республики Саха (Якутия) // Forest Engineering: Материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием, Якутск, 30–31 мая 2018 г. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2018. С. 72–75.
- [6] Шапиро В.Я., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Иванов В.А. Исследование закономерностей разрушения грунта при работе комбинированных грунтометов для тушения лесных пожаров // Системы. Методы. Технологии, 2017. № 1 (33). С. 146–151
- [7] Ковалев Р.Н., Еналеева-Бандура И.М., Баранов А.Н., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Математическая модель определения общей стоимости ресурсов лесных земель с учетом уровня развития лесотранспортной сети // Resources and Technology, 2022. Т. 19. № 4. С. 102–117.
- [8] Каляшов В.А., Григорьева О.И., Григорьев И.В. Перспективные варианты восстановления лесов на склонах // Вестник АГАТУ, 2022. № 1 (5). С. 86–96.
- [9] Злобина Н.И., Зеликов В.А., Григорьева О.И., Новгородов Д.В. Обоснование пропускной способности по критерию безопасности дорожного движения на лесовозных автомобильных дорогах // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах, 2022. № 4. С. 19–35.
- [10] Злобина Н.И., Зеликов В.А., Григорьева О.И., Новгородов Д.В. Экспериментальное обоснование выбора скорости движения по лесовозной дороге в качестве показателя безопасности дорожного движения // Безопасность и охрана труда в лесозаготовительном и деревообрабатывающем производствах, 2022. № 6. С. 27–42.
- [11] Григорьева О.И., Нгуен Ф.З. Лесные плантации для сырьевого обеспечения деревоперерабатывающих предприятий // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы III Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Петрозаводск, 30 мая 2017 г. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского государственного университета, 2017. С. 59–61.
- [12] Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Sushkov S.I., Kruchinin I.N., Grigorev I.V., Nikiforov A.A., Pilnik Y.N., Teppoev A.V., Lavrov M., Timokhova O.M. Enhancing quality of road pavements through adhesion improvement // J. of the Balkan Tribological Association, 2019, t. 25, no. 3, pp. 678–694.
- [13] Grigoreva O., Runova E., Ivanov V., Alyabyev A., Hertz E., Voronova A., Shadrina S., Grigorev I. Influence of different forest management techniques on the quality of wood // J. of Renewable Materials, 2021, t. 9, no. 12, pp. 2175–2188.
- [14] Рудов С.Е., Григорьев И.В., Григорьева О.И., Григорьев М.Ф., Григорьева А.И. Эффективность лесопользования в криолитозоне // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 09–10 июня 2020 года. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного аграрного университета имени Императора Петра I, 2020. С. 460–463.
- [15] Григорьева О.И. Приборные комплексы для изучения поверхности лесосек // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Петрозаводск, 22–23 мая 2018 г. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского государственного университета, 2018. С. 47–49.
- [16] Григорьева О.И. Перспективные направления повышения эффективности проведения рубок ухода за лесом // Повышение эффективности лесного комплекса. Материалы третьей Всероссийской науч.-практ. конф. с международным участием, Петрозаводск, 30 мая 2017 г. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского государственного университета, 2017. С. 56–58.
- [17] Григорьев И.В., Григорьева О.И. Эффективность лесопользования в России // Энергия: экономика, техника, экология, 2016. № 5. С. 24–30.
- [18] Beskopylny A., Kadomtseva E., Strelnikov G. Numerical study of the stress-strain state of reinforced plate on an elastic foundation by the Bubnov-Galerkin method // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, v. 90(1), p. 012017. DOI:10.1088/1755-1315/90/1/012017
- [19] Beskopylny A., Veremeenko A., Kadomtseva E., Shilov A. Dynamic response of a plate laying on elastic base during the impact of a conical indenter // MATEC Web of Conferences, 2018, p. 01001. DOI: 10.1051/mateconf/201819601001
- [20] Beskopylny A.N., Kadomtseva E.E., Strelnikov G.P., Berdnik Y.A. Stress-strain state of reinforced bimodulus beam on an elastic foundation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, v. 90(1), p. 012064. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012064
- [21] Beskopylny A.N., Veremeenko A.A., Kadomtseva E.E., Beskopylnaia N.I. The impact of the conical indenter on a plate laying on a winker foundation // Materials Science Forum, 2018, t. 931, pp. 84–90.
- [22] Кадомцева Е.Э., Бескопыльный А.Н., Бердник Я.А. Расчет на жесткость пластины, подкрепленной ребрами, на упругом основании методом Бубнова — Галеркина // Инженерный вестник Дона, 2016. № 3 (42). С. 61.

- [23] Кадомцева Е.Э., Бескопыльный А.Н., Бескопыльная Н.И., Бердник Я.А. Расчет на жесткость гофрированной пластины на упругом основании методом Бубнова — Галеркина // Научное обозрение. Технические науки, 2016. № 6. С. 33–35.
- [24] Кадомцева Е.Э., Сикачева Н.В., Кирсанов Ю.А. Расчет на прочность гофрированной тонкой пластины на упругом основании обратным методом // Инженерный вестник Дона, 2017. № 2 (45). С. 150.
- [25] Кадомцева Е.Э., Сикачева Н.В., Кирсанов Ю.А. Расчет на прочность пластины, подкрепленной ребрами жесткости, на упругом основании обратным методом // Инженерный вестник Дона, 2018. № 1 (48). С. 103.
- [26] Григорьева О.И. Новая машина для очистки лесосек // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2014. Т. 2. № 5–3 (10–3). С. 96–99.
- [27] Григорьев Г.В., Дмитриева И.Н., Григорьев И.В., Каляшов В.А., Рудов С.Е., Иванов В.А. Проблемы и перспективы лесозаготовительного производства в условиях районов распространения вечной мерзлоты // Системы. Методы. Технологии, 2021. № 3 (51). С. 59–67.
- [28] Рудов С.Е., Григорьев И.В. Правила эффективной эксплуатации форвардеров // Повышение эффективности лесного комплекса: Материалы VII Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Петрозаводск, 25 мая 2021 г. Петрозаводск: Изд-во Петрозаводского государственного университета, 2021. С. 166–168.
- [29] Григорьев И.В., Петров М.Е. Дополнительные технические опции для повышения безопасности, надежности и энергоэффективности лесных машин // Вестник АГАТУ, 2021. № 3 (3). С. 73–81.
- [30] Тетеревлева Е.В., Гринько О.И., Григорьева О.И. Транспортно-технологические машины для тушения лесных пожаров на базе колесных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Тюмень, 22 октября 2020 г. / под ред. Н.С. Захарова. Тюмень: Изд-во Тюменского индустриального университета, 2020. С. 374–377.
- [31] Чемшикова Ю.М., Давтян А.Б., Григорьева О.И. Транспортно-технологические системы для лесоразведения на базе гусеничных вездеходов // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Тюмень, 22 октября 2020 г. / под ред. Н.С. Захарова. Тюмень: Изд-во Тюменского индустриального университета, 2020. С. 400–403.
- [32] Rego G.E., Voronov R.V., Grigoreva O.I. Algorithms for calculating schemes of transport routes in a felling area // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2. Ser. «II All-Russian Scientific-Technical Conference “Digital Technologies in Forest Sector”» 2021. С. 012025.
- [33] Соколов А.П., Селиверстов А.А., Суханов Ю.В., Сенькин В.А. О влиянии частичной автоматизации управления манипуляторами на эргономические показатели лесозаготовительных машин // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 1. С. 139–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-139-152
- [34] Воронова А.М., Воронов Р.В., Пискунов М.А. Моделирование схемы волоков при помощи покрытия гиперсети взвешенным корневым деревом // Ученые записки Петрозаводского государственного университета, 2012. № 2 (123). С. 114–117.
- [35] Григорьев И.В., Жукова А.И. Координатно-объемная методика трассирования при освоении лесосек трелевкой // ИзВУЗ Лесной журнал, 2004. № 4. С. 39–44.
- [36] Rudov S.E., Voronova A.M., Chemshikova J.M., Teterlevleva E.V., Kruchinin I.N., Dondokov Yu.Zh., Khaldeeva M.N., Burtseva I.A., Danilov V.V., Grigorev I.V. Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain // Asian J. of Water, Environment and Pollution, 2019. Т. 16. № 4. С. 61–75.

## Сведения об авторах

**Зорин Максим Владимирович** — аспирант, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова» (ВГЛТУ), [mr.maks489@ya.ru](mailto:mr.maks489@ya.ru)

**Хитров Егор Германович** — д-р техн. наук, доцент Высшей школы интеллектуальных систем и суперкомпьютерных технологий, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», [yegorkhitrov@gmail.com](mailto:yegorkhitrov@gmail.com)

**Куницкая Ольга Анатольевна** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология и оборудование лесного комплекса», ФГБОУ ВО «Арктический государственный агротехнологический университет», [ola.ola07@mail.ru](mailto:ola.ola07@mail.ru)

**Елисеев Павел Сергеевич** — ассистент кафедры «Транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), [peliseev@bmstu.ru](mailto:peliseev@bmstu.ru)

**Юдилевич Александр Михайлович** — аспирант, ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», [kafedra388@mail.ru](mailto:kafedra388@mail.ru)

**Клубничкин Владислав Евгеньевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), [vklubnichkin@mgul.ac.ru](mailto:vklubnichkin@mgul.ac.ru)

Поступила в редакцию 04.05.2024.

Одобрено после рецензирования 01.11.2024.

Принята к публикации 14.11.2024.

# FINITE-DIFFERENCE SCHEME TO CALCULATE ROAD MATTING DEFLECTION UNDER FOREST FORWARDER

M.V. Zorin<sup>1</sup>, E.G. Khitrov<sup>2✉</sup>, O.A. Kunitskaya<sup>3</sup>, P.S. Eliseev<sup>4</sup>, A.M. Yudilevich<sup>5</sup>, V.E. Klubnichkin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev st., 394087, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29, Politechnicheskaya st., 195251, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Arctic State Agrotechnological University, 3, Sergelyakhskoye highway, 3 km, 677007, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

<sup>4</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

<sup>5</sup>Bratsk State University, 40, Makarenko st., 665709, Bratsk, Irkutsk reg., Russia

yegorkhitrov@gmail.com

A mathematical model of the interaction of a wheeled drive vehicle with a two-layer support surface consisting of a synthetic road matting and an underlying forest soil is considered. A model of a deformable plate placed on a pliable (Winkler) base is proposed. A finite-difference scheme is proposed, assuming an arbitrary load distribution over the grid nodes, to solve the differential equation of plate deflection (and base precipitation), as well as several options for fixing boundary nodes. A Python program has been developed to implement the proposed model. A computational experiment was conducted using this program. The deviation of the calculated data from the particular case of the exact solution did not exceed 5%. The processing of the calculated data made it possible to obtain an equation convenient for estimating the depth of the track formed by a vehicle.

**Keywords:** temporary forest roads, strengthening of skidding drags, collapsible road surfaces, logging, skidding, land transport of forests

**Suggested citation:** Zorin M.V., Khitrov E.G., Kunitskaya O.A., Eliseev P.S., Yudilevich A.M., Klubnichkin V.E. *Konechno-raznostnaya skhema dlya rascheta progiba dorozhnogo mata pod vozdeystviem dvizhitelya lesnoy mashiny* [Finite-difference scheme to calculate road matting deflection under forest forwarder]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 96–111. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-96-111

## References

- [1] Grigor'eva O.I. *Effektivnost' transportno-tekhnologicheskikh sistem dlya lesnogo khozyaystva* [Efficiency of transport and technological systems for forestry]. *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: mater. Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Transport and transport and technological systems: materials of the International scientific and technical conference], Tyumen, April 19, 2018. Ed. N.S. Zakharov. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2018, pp. 79–83.
- [2] Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigor'eva O.I., Gur'ev A.Yu. *Opreделение пропускной способности лесовозных автомобилей на дорогах эмпирическим путем с учетом безопасности дорожного движения* [Determining the capacity of logging roads empirically, taking into account road safety]. *Bezopasnost' i okhrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatyvayushchem proizvodstvakh* [Occupational Safety and Health in Logging and Woodworking Industries], 2022, no. 5, pp. 38–65.
- [3] Davtyan A.B., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. *Energeticheskie lesnye plantatsii dlya effektivnogo вовлечения в оборот земель сельскохозяйственного назначения в РФ* [Energy forest plantations for the efficient use of agricultural land in the Russian Federation]. *Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizayn: mater. 86-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Forest engineering, materials science and design: materials of the 86th scientific and technical conference of the faculty, researchers and postgraduate students (with international participation)], Minsk, January 31–February 12, 2022. Minsk, 2022, pp. 42–45.
- [4] Kalyashov V.A., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. *Innovatsionnye metody osvoeniya gornyykh lesosek* [Innovative methods for developing mountain logging areas]. *Innovatsii v khimiko-lesnom komplekse: tendentsii i perspektivy razvitiya. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Innovations in the chemical and forestry complex: trends and development prospects. Materials of the All-Russian scientific and practical conference], Krasnoyarsk, June 6–7, 2022. Eds. Yu.A. Bezrukih, E.V. Melnikova. Krasnoyarsk: Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetneva, 2022, pp. 88–92.
- [5] Grigor'eva O.I., Grigor'ev M.F., Grigor'ev I.V. *Analiz estestvennogo lesovozobnovleniya v Alekseevskom uchastkovom lesnichestve Respubliki Sakha (Yakutiya)* [Analysis of natural reforestation in the Alekseevsky district forestry of the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Forest Engineering: mater. nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Forest Engineering: materials of the scientific and practical conference with international participation], Yakutsk, Russia, May 30–31, 2018. Yakutsk: Publishing house of NEFU, 2018, pp. 72–75.

- [6] Shapiro V.Ya., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Ivanov V.A. *Issledovanie zakonomernostey razrusheniya grunta pri rabote kombinirovannykh gruntometov dlya tusheniya lesnykh pozharov* [Study of soil destruction patterns during operation of combined soil throwers for extinguishing forest fires]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2017, no. 1 (33), pp. 146–151.
- [7] Kovalev R.N., Enaleeva-Bandura I.M., Baranov A.N., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. *Matematicheskaya model' opredeleniya obshchey stoimosti resursov lesnykh zemel's uchetom urovnya razvitiya lesotransportnoy seti* [Mathematical model for determining the total value of forest land resources taking into account the level of development of the forest transport network]. *Resources and Technology* [Resources and Technology], 2022, v. 19, no. 4, pp. 102–117.
- [8] Kalyashov V.A., Grigor'eva O.I., Grigor'ev I.V. *Perspektivnye varianty vosstanovleniya lesov na sklonakh* [Promising options for forest restoration on slopes]. *Vestnik AGATU* [Bulletin of AGATU], 2022, no. 1 (5), pp. 86–96.
- [9] Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigor'eva O.I., Novgorodov D.V. *Obosnovanie propusknoy sposobnosti po kriteriyu bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya na lesovoznykh avtomobil'nykh dorogakh* [Justification of the throughput capacity based on the road safety criterion on logging roads]. *Bezopasnost' i okhrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatvayushchem proizvodstvakh* [Occupational Safety and Health in Logging and Woodworking Industries], 2022, no. 4, pp. 19–35.
- [10] Zlobina N.I., Zelikov V.A., Grigor'eva O.I., Novgorodov D.V. *Ekspperimental'noe obosnovanie vybora skorosti dvizheniya po lesovoznoy doroge v kachestve pokazatelya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya* [Experimental justification for the choice of travel speed on a logging road as an indicator of road safety]. *Bezopasnost' i okhrana truda v lesozagotovitel'nom i derevoobrabatvayushchem proizvodstvakh* [Occupational Safety and Health in Logging and Woodworking Industries], 2022, no. 6, pp. 27–42.
- [11] Grigor'eva O.I., Nguen F.Z. *Lesnye plantatsii dlya syr'evogo obespecheniya derevopererabatyvayushchikh predpriyatiy* [Forest plantations for raw material supply of wood processing enterprises]. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: Mater. III Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Improving the efficiency of the forest complex: materials. III All-Russian scientific and practical conference with international participation], Petrozavodsk, May 30, 2017. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2017, pp. 59–61.
- [14] Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I., Grigor'ev M.F., Grigor'eva A.I. *Effektivnost' lesopol'zovaniya v kriolitozone* [Efficiency of forest management in the cryolithozone]. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie v sovremennom proizvodstve i obshchestve: mater. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy efficiency and energy saving in modern production and society: Proc. of the International scientific and practical conference], Voronezh, June 9–10, 2020. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2020, pp. 460–463.
- [15] Grigor'eva O.I. *Pribornye komplekсы dlya izucheniya poverkhnosti lesosek* [Instrumental complexes for studying the surface of cutting areas]. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa. Materialy IV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Improving the efficiency of the forest complex. Proceedings of the IV All-Russian scientific and practical conference with international participation], Petrozavodsk, May 22–23, 2018. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2018, pp. 47–49.
- [16] Grigor'eva O.I. *Perspektivnye napravleniya povysheniya effektivnosti provedeniya rubok ukhoda za lesom* [Promising directions for improving the efficiency of forest thinning]. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa. Materialy tret'ey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Improving the efficiency of the forest complex. Proceedings of the third All-Russian scientific and practical conference with international participation], Petrozavodsk, May 30, 2017. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2017, pp. 56–58.
- [17] Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. *Effektivnost' lesopol'zovaniya v Rossii* [Efficiency of forest management in Russia]. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya* [Energy: economics, technology, ecology], 2016, no. 5, pp. 24–30.
- [22] Kadomtseva E.E., Beskopyl'nyy A.N., Berdnik Ya.A. *Raschet na zhestkost' plastiny, podkreplennoy rebrami, na uprugom osnovanii metodom Bubnova — Galerkina* [Calculation of the rigidity of a plate reinforced with ribs on an elastic foundation using the Bubnov — Galerkin method]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2016, no. 3 (42), p. 61.
- [23] Kadomtseva E.E., Beskopyl'nyy A.N., Beskopyl'naya N.I., Berdnik Ya.A. *Raschet na zhestkost' gofirovannoy plastiny na uprugom osnovanii metodom Bubnova — Galerkina* [Calculation of the rigidity of a corrugated plate on an elastic foundation using the Bubnov — Galerkin method]. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki* [Scientific Review. Technical Sciences], 2016, no. 6, pp. 33–35.
- [24] Kadomtseva E.E., Sikacheva N.V., Kirsanov Yu.A. *Raschet na prochnost' gofirovannoy tonkoy plastiny na uprugom osnovanii obratnym metodom* [Strength calculation of a corrugated thin plate on an elastic foundation using the inverse method]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2017, no. 2 (45), p. 150.
- [25] Kadomtseva E.E., Sikacheva N.V., Kirsanov Yu.A. *Raschet na prochnost' plastiny, podkreplennoy rebrami zhestkosti, na uprugom osnovanii obratnym metodom* [Strength calculation of a plate reinforced with stiffeners on an elastic foundation using the inverse method]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2018, no. 1 (48), p. 103.
- [26] Grigor'eva O.I. *Novaya mashina dlya ochistki lesosek* [New machine for clearing logging sites]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2014, v. 2, no. 5–3 (10–3), pp. 96–99.
- [27] Grigor'ev G.V., Dmitrieva I.N., Grigor'ev I.V., Kalyashov V.A., Rudov S.E., Ivanov V.A. *Problemy i perspektivy lesozagotovitel'nogo proizvodstva v usloviyakh rayonov rasprostraneniya vechnoy merzloty* [Problems and prospects of logging production in permafrost areas]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2021, no. 3 (51), pp. 59–67.

- [28] Rudov S.E., Grigor'ev I.V. *Pravila effektivnoy ekspluatatsii forvarderov* [Rules for efficient operation of forwarders]. *Povyshenie effektivnosti lesnogo kompleksa: Mater. VII Vserossiyskoy natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Improving the efficiency of the forestry complex: Proc. of the VII All-Russian National Scientific and Practical Conference with International Participation], Petrozavodsk, May 25, 2021. Petrozavodsk: Petrozavodsk State University, 2021, pp. 166–168.
- [29] Grigor'ev I.V., Petrov M.E. *Dopolnitel'nye tekhnicheskie optsii dlya povysheniya bezopasnosti, nadezhnosti i energoeffektivnosti lesnykh mashin* [Additional technical options for improving the safety, reliability and energy efficiency of forestry machines]. *Vestnik AGATU* [Bulletin of AGATU], 2021, no. 3 (3), pp. 73–81.
- [30] Terevleva E.V., Grin'ko O.I., Grigor'eva O.I. *Transportno-tekhnologicheskie mashiny dlya tusheniya lesnykh pozharov na baze kolesnykh vezdekhodov* [Transport and technological vehicles for extinguishing forest fires based on wheeled all-terrain vehicles]. *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Transport and transport-technological systems. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference], Tyumen, October 22, 2020. Ed. N.S. Zakharov. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2020, pp. 374–377.
- [31] Chemshikova Yu.M., Davtyan A.B., Grigor'eva O.I. *Transportno-tekhnologicheskie sistemy dlya lesorazvedeniya na baze gusenichnykh vezdekhodov* [Transport and technological systems for afforestation based on tracked all-terrain vehicles]. *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Transport and transport-technological systems. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference], Tyumen, October 22, 2020. Ed. N.S. Zakharov. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2020, pp. 400–403.
- [32] Sokolov A.P., Seliverstov A.A., Sukhanov Yu.V., Sen'kin V.A. *O vliyaniy chastichnoy avtomatizatsii upravleniya manipulyatorami na ergonomicheskie pokazateli lesozagotovitel'nykh mashin* [Ergonomic evaluation of forestry crane partial automation system]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 1, pp. 139–152. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-1-139-152
- [33] Voronova A.M., Voronov R.V., Piskunov M.A. *Modelirovanie skhemy volokov pri pomoshchi pokrytiya giperseti vzveshennym kornevym derevom* [Modeling the scheme of dragways using the hypernet coverage with a weighted root tree]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Scientific Notes of Petrozavodsk State University], 2012, no. 2 (123), pp. 114–117.
- [34] Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. *Koordinatno-ob'emnaya metodika trassirovaniya pri osvoenii lesesek trelevkoy* [Coordinate-volume method of tracing during the development of logging areas by skidding]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2004, no. 4, pp. 39–44.
- [35] Rudov S.E., Voronova A.M., Chemshikova J.M., Terevleva E.V., Kruchinin I.N., Dondokov Yu.Zh., Khaldeeva M.N., Burtseva I.A., Danilov V.V., Grigorev I.V. *Theoretical approaches to logging trail network planning: increasing efficiency of forest machines and reducing their negative impact on soil and terrain* // *Asian J. of Water, Environment and Pollution*, 2019. T. 16. № 4. С. 61–75.

*The work was carried out within the framework of the scientific school «Innovative developments in the field of logging industry and forestry». The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.*

## Authors' information

**Zorin Maksim Vladimirovich** — pg., Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, mr.maks489@ya.ru

**Khitrov Egor Germanovich** — Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiiy universitet Petra Velikogo, yegorkhitrov@gmail.com

**Kunitskaya Ol'ga Anatol'evna** — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Arctic State Agrotechnological University, ola.ola07@mail.ru

**Eliseev Pavel Sergeevich** — assistant, BMSTU (Mytishchi branch), peliseev@bmstu.ru

**Yudilevich Aleksandr Mikhaylovich** — pg., Bratsk State University, kafedra388@mail.ru

**Klubnichkin Vladislav Evgen'evich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, BMSTU (Mytishchi branch), vklubnichkin@mgul.ac.ru

Received 04.05.2024.

Approved after review 01.11.2024.

Accepted for publication 14.11.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
 Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
 Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
 The authors declare that there is no conflict of interest

## МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПОГРУЗОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН ДЛЯ СОРТИМЕНТНОЙ ЗАГОТОВКИ ДРЕВЕСИНЫ

**Е.Е. Клубничкин**

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

klubnichkin@bmstu.ru

Представлены результаты теоретических обоснований метода повышения энергоэффективности и экологической безопасности погрузочно-транспортных машин, используемых при сортиментной заготовке древесины. Установлено, что, исходя из принципов равенства грузопотока погрузочно-транспортных машин, производительности валочно-сучкорезно-раскряжевых машин, получено значение мощности двигателя погрузочно-транспортных машин, которое позволит определить облик создаваемой машины в зависимости от сопротивления движению и пути, который проходит валочно-сучкорезно-раскряжевая машина в зависимости от плотности древостоя. Показано, что принцип данной модели заключается в том, что производительность валочно-сучкорезно-раскряжевых работ равна производительности погрузочно-транспортных работ, т. е. валочно-сучкорезно-раскряжевые машины и погрузочно-транспортные машины не простаивают. Предлагаемая методика расчета позволит на стадии разработки конструкции погрузочно-транспортных машин определить тип движителя и конструкцию ходовой системы погрузочно-транспортных машин. Установлено, что предлагаемая модель не затрагивает экономические вопросы, как у других исследователей в данной области. Используются интегральные модели на уровне формул.

**Ключевые слова:** погрузочно-транспортная машина, мощность двигателя, энергоэффективность, экологическая безопасность, моделирование, сортиментная технология заготовки древесины

**Ссылка для цитирования:** Клубничкин Е.Е. Метод повышения энергоэффективности погрузочно-транспортных машин для сортиментной заготовки древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 112–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-112-125

Основу современной полностью механизированной сортиментной технологии заготовки леса составляют валочно-сучкорезно-раскряжевые машины (ВСРМ) и погрузочно-транспортные машины (ПТМ), выпускаемые как на колесной, так и на гусеничной базе. Они подразделяются на классы: легких, средних и тяжелых машин. Данную технику производит огромное количество фирм.

Наиболее распространенной системой машин для заготовки сортиментов у пня при сплошных рубках является система, включающая в себя ВСРМ массой 18–20 т с вылетом стрелы манипулятора 8–10 м, оснащенного валочно-сучкорезно-раскряжевой головкой, способной срезать деревья в среднем со стволами диаметром до 70 см. В комплекте с ними применяются ПТМ массой около 20 т, имеющие полезную нагрузку 17–18 т.

В зависимости от условий местности производительность таких машин может составлять до 350 м<sup>3</sup> древесины в день (15...20 м<sup>3</sup>/ч) [1–4]. Ныне намечается тенденция увеличения мощности и массы таких машин.

При заготовке леса наиболее сложной и тяжелой операцией с точки зрения энергоэффективности, производительности и экологической безопасности является транспортная (трелевочная) операция [5]. В связи с этим рассмотрим трелевочную ПТМ, поскольку у ВСРМ энергоэффективность (если рассматривать энергетическую установку и потребность в энергетике) [6–10] определяется в основном работой технологического оборудования. Высокая производительность ВСРМ требуется только при выполнении технологических операций, в частности при валке, обрезке сучьев и раскряжке. Машина при выполнении этих технологических операций остается неподвижной. В отличие от ВСРМ у ПТМ на энергоэффективность влияет скорость выполнения погрузочно-транспортных (трелевочных) операций.

Ведущие ученые отмечают [11–14], что принципы сортиментной технологии в области создания машин для заготовки древесины различаются для ВСРМ и ПТМ. По их мнению в транспортных операциях при сортиментной заготовке древесины основной машиной, затрачивающей большее количество энергии на перемещение (движение), является ПТМ. Исходя из этого представим методику повышения энергоэффективности и экологической безопасности ПТМ.

## Цель работы

Цель работы — исследование возможности повышения энергоэффективности и экологической безопасности ПТМ, предназначенных для сортиментной заготовки древесины путем научно обоснованного выбора рациональных конструктивных параметров на этапе проектирования с помощью математического моделирования технологического процесса, а также опыт создания методов, направленных на улучшение процессов принятия решений в области проектирования ПТМ на основании использования данных для создания моделей ПТМ для различных лесных зон РФ.

## Материалы и методы

**Метод определения мощности силовой установки ПТМ.** От породы древесины и степени ее влажности зависит количество принимаемого к трелевке леса [15–17], поскольку масса древесины влияет на грузоподъемность ПТМ. Учет круглого леса проводится по плотной массе древесины путем определения объема каждого сортимента или в складочной (штабельной) мере. Для выполнения расчетов, связанных с определением мощности силовой установки ПТМ в процессе погрузки, каждую рабочую смену следует определять среднюю массу 1 м<sup>3</sup> леса, которую можно получить как частное от деления количества погруженного леса в тоннах на его объем. Например: 1 м<sup>3</sup> свежеспиленной березы имеет массу 930 кг, влажность — 78 %; ель — 710 кг, влажность — 91 %; сосна — 800 кг, влажность 88 %, осина — 760 кг, влажность 82 % [18]. (Используя эти показатели для удобства расчетов вместо кубических метров будем использовать тонны).

Определяем производительность ВСРМ ( $\Pi_{с.м.х}$ )

$$\Pi_{с.м.х} = \frac{M_{гр}}{t_{цл}}$$

Далее определяем производительность ПТМ – грузопоток ( $\Pi_{с.м.ф}$ )

$$\Pi_{с.м.ф} = \frac{M_{ф.гр}}{t_{цл}}$$

Условие  $\Pi_{с.м.х} = \Pi_{с.м.ф}$ .

Определяем производительность ПТМ ( $\Pi_{гр}$ ) при погрузке или разгрузке сортимента массой  $M_{ф.гр}$  за время  $t_{п/р}$

$$\Pi_{гр} = \frac{M_{ф.гр}}{t_{п/р}}$$

Коэффициент использования массы ПТМ ( $k_{мф}$ ) равен

$$k_{мф} = \frac{M_{ф.гр}}{M_{ф}}$$

Для фокусировки на ключевых аспектах примем допущения, которые лучше помогут понять основные принципы, влияющие на исследуемую систему машин для сортиментной технологии заготовки древесины.

*Допущения:*

- на пути следования ПТМ повторяет путь ВСРМ;
- коэффициент сопротивления движению ПТМ не изменяется в зависимости от числа проходов и массы ПТМ;
- КПД трансмиссии равен 1; буксование отсутствует;
- масса  $M_{гр}$  заготовленного сортимента ВСРМ равна массе сортимента, трелюемого ПТМ на верхний склад  $M_{ф.гр}$ .

*Решение:*

На один рейс ПТМ  $t_{цл}$  включает в себя время: на движение ПТМ в холостом направлении от погрузочного пункта до места сбора транспортируемой пачки; на набор пачки сортиментов; на движение ПТМ в грузовом направлении с пачкой сортиментов к погрузочному пункту; на перегрузку сортиментов с ПТМ в штабель:

$$t_{н} = \frac{M_{гр}}{\Pi_{гр}}$$

$$t_{гр.i} = \frac{S_i}{v_{гр.i}}$$

Скорость движения ПТМ в грузовом направлении с пачкой сортиментов к погрузочному пункту можно определить таким образом:

$$v_{гр.i} = \frac{N_{дв.ф}}{(M_{ф} + M_{ф.гр})} fg;$$

## Список принятых обозначений

Буквенное обозначение	Единица измерения	Объяснение
$M_{гр}$	т	Масса заготавливаемого сортимента ВСРМ
$t_{ц2}$	мин	Время для подъезда, валки, обрезки сучьев и раскряжевки при заготовке сортимента массой $M_{гр}$
$\Pi_{с.м.ф}$	т	Грузопоток
$M_{ф.гр}$	т	Масса сортимента, трелюемого на верхний склад
$t_{ц1}$	мин	Время на погрузку и трелевку сортимента массой $M_{ф.гр}$
$\Pi_{с.м.х}$	т	Производительность ВСРМ
$S_X$	м	Путь, пройденный ВСРМ при заготовке сортимента массой $M_{ф.гр}$ за время $t_{ц2}$
$t_{п/р}$	мин	Время при погрузке или разгрузке сортимента массой $M_{ф.гр}$
$\Pi_{гр}$	т	Производительность при погрузке или разгрузке сортимента массой $M_{ф.гр}$ за время $t_{п/р}$
$k_{мф}$		Коэффициент использования массы ПТМ
$M_{ф}$	т	Масса ПТМ
$t_{гр.i}$	мин	Время движения с грузом по пути $S_i$ со скоростью $v_{гр.i}$
$S_i$	м	Путь
$v_{гр.i}$	км/ч	Скорость
$t_{п}$	мин	Время на перегрузку сортиментов с ПТМ в штабель
$t_{гр.i}$	мин	Время на движение ПТМ в грузовом направлении с пачкой сортиментов к погрузочному пункту
$N_{дв.ф}$	кВт	Мощность двигателя ПТМ
$f$		Суммирующий коэффициент сопротивления движению
$n$		Число проходов от места заготовки ВСРМ до верхнего склада
$t_{б/гр.i}$	мин	Время движения без груза на пути $S_i$ со скоростью $v_{б/гр.i}$
$v_{б/гр.i}$	км/ч	Скорость движения ПТМ без груза
$t_x$	мин	Время работы ВСРМ
$S_x$	м	Путь который прошла ВСРМ, не просто перемещение машины, а движение, связанное с особенностью расположения деревьев, их размером, частотой произрастания на лесосеке
$S_i$	м	Путь ПТМ с приращением
$f_0$		Начальное сопротивление движению
$f_{max}$		Сопротивление движению ПТМ после $n$ проходов
$z_0$	мм	Радиус ведущего колеса
$G_{max}$	–	Буксование движителя при $f_{max}$
$N_{движ}$	–	Зависимость изменения сопротивления движению ПТМ
$\Delta f$	–	Изменение сопротивления движения за каждый проход
$n^*$	–	Число проходов за смену, соответствует минимальной расчетной мощности двигателя $\min N_{дв.ф}$
$n_{г}$	–	Число проходов ПТМ в груженом состоянии

$$\begin{aligned}
 t_{гр,i} &= \sum_{i=1}^n t_{гр,i}; \\
 t_{6/гр,i} &= \frac{S_i}{v_{6/гр,i}}; \\
 v_{6/гр,i} &= \frac{N_{дв.ф}}{M_{\phi}} fg; \\
 t_x &= \sum_{i=1}^n t_{6/гр,i}; \\
 t_{цл} &= 2 \frac{M_{гр}}{\Pi_{гр}} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i (M_{\phi} + M_{гр,i}) fg}{N_{дв.ф}} + \\
 &\quad + \sum_{i=1}^n \frac{S_i M_{\phi} fg}{N_{дв.ф}}; \\
 t_{цл} &= \frac{2M_{гр}}{\Pi_{гр}} + \frac{2M_{\phi} fg}{N_{дв.ф}} \sum_{i=1}^n + \\
 &\quad + \frac{fg}{N_{дв.ф}} \sum_{i=1}^n + \frac{fg}{N_{дв.ф}} \sum_{i=1}^n S_i M_{\phi,гр}.
 \end{aligned}$$

Особенность технологического процесса механизированной сортиментной технологии заготовки леса заключается в том, что ПТМ все время движется за ВСРМ. ПТМ доезжает до ВСРМ, выполняет погрузку сортиментов и движется обратно к верхнему складу или лесовозной дороге — и так за смену несколько раз. Если известна производительность ВСРМ, известна производительность погрузочно-разгрузочных операций технологического оборудования ПТМ, то можно закладывать общий уровень создаваемой конструкции  $k_{мф}$  (коэффициент используемой массы). Далее определяем или выбираем производительность ВСРМ. Понятно, что она разная, но при расчете необходимо закладывать высокие показатели производительности, в том числе на погрузочно-разгрузочное оборудование, установленное на ПТМ. Путь  $S_x$ , который прошла ВСРМ, не просто перемещение машины, а движение, связанное с особенностью расположения деревьев, их размером, частотой произрастания на лесосеке [19–23].

Тогда мощность двигателя ПТМ примет вид

$$N_{дв.ф} = \frac{fgS_x \left( \frac{1}{k_{мф}} + \frac{1}{2} \right)}{\left( \frac{1}{\Pi_{с.м.х}} - \frac{2}{\Pi_{гр}} \right)}. \quad (1)$$

Если заданы производительность ВСРМ и производительность погрузочно-разгрузочных операций технологического оборудования ПТМ, то с помощью формулы (1) получим мощность двигателя ПТМ. Если мощность двигателя ПТМ поделить на  $f$  и  $g$  и задать среднюю скорость движения, например 10 км/ч, то получим среднюю массу ПТМ, поскольку скорость в одном направлении и скорость в другом будут различаться, так как кривая мощности задана в виде гиперболы [13]. Через коэффициент использования массы ПТМ получаем, количество перевозимых сортиментов, что позволит в дальнейшем рассчитать транспортную работу ПТМ.

Формула (1) имеет три варианта:

1) ПТМ едет все время за ВСРМ, повторяет один и тот же путь, а в зависимости, как она проезжает между пасаками и собирает пакет сортиментов, выбрать другую модель движения ПТМ;

2) при разном сопротивлении движению груженой и порожней ПТМ коэффициент сопротивления движению от массы не зависит, но в зависимости от состояния ПТМ давление на грунт меняется;

3) коэффициент сопротивления движению зависит от числа проходов, но принцип функционирования модели более понятен в данном виде с учетом принятых допущений.

Полученные выводы можно проверить путем моделирования в прикладных пакетах программ [24–32].

Усовершенствовать формулу (1) можно с учетом сопротивления движению ПТМ. Чем больше сопротивление движению, тем мощнее двигатель ПТМ, чем меньше сопротивление, тем меньше мощность. Впоследствии это позволит определить необходимое количество ПТМ для своевременного выполнения погрузочно-транспортных операций на пути вслед за ВСРМ с учетом типа лесосеки, запаса и объема древесины, от того, какой путь проходит ВСРМ и какая у нее производительность. Предлагаемая модель не затрагивает экономические вопросы, как у других исследователей [33–36] в данной области.

Принцип разработанной модели заключается в том, что производительность валочно-сучкорезно-раскряжевых работ равна производительности погрузочно-транспортных работ, т. е. ВСРМ и ПТМ не простаивают. Отсюда следует, что можно ехать по лесосеке с высокой скоростью и перевозить малый объем груза (объем сортиментов), поскольку при этом мощность определяется сразу (если необходимо вывезти малый объем) либо ехать медленнее и перевозить большой объем.

С учетом числа проходов и согласно конструкции машины можно достичь баланс. Важно прийти к оптимальному решению — сколько ПТМ использовать и с каким типом движителя, в каких условиях в зависимости от значения коэффициента  $f$  должна ездить ПТМ и вслед за какой ВСРМ. Можно сделать следующий основной вывод по этой модели: производительность ВСРМ должна равняться грузопотоку ПТМ (все, что заготовлено ВСРМ, должно быть собрано и вывезено ПТМ). Если производительность ВСРМ возрастет и путь, который она проезжает, тоже увеличится, то мощность двигателя следует существенно повысить, а скорость ПТМ должна очень увеличиться, чтобы машина успевала за ВСРМ. Далее на скорость движения ПТМ налагаются ограничения. В этом случае необходимо использовать два ПТМ, что не соответствует разработанной модели.

Принцип схемы «одна ВСРМ — два ПТМ» обеспечит вывозку всего заготовленного объема древесины. Машины двигаются при этом не одна за другой, проезжая путь по пасечному волоку, собирая пачку, и уже груженные двигаются в обратном направлении по пройденной пасеке, что ухудшает условия движения вследствие вторичного воздействия движителями на поверхность пасеки. Возвращаясь разгруженными на пасеку, они выезжают вслед за ВСРМ. Здесь будет применяться другая схема — согласно предложенной модели. Конкретный пример: коэффициент  $f$  изменяется в зависимости от движения по пасеке груженой или порожней ПТМ и от числа проходов.

Исходя из принципов равенства грузопотока ПТМ, производительности ВСРМ, нами получено значение мощности двигателя ПТМ, которое позволит определить облик создаваемой машины с учетом сопротивления движению и продолжительности проходимого пути, а также плотности древостоя, которое учитывается в  $t_x$

$$N_{\text{дв.ф}} = \frac{fgS_x \left( \frac{1}{k_{\text{мф}}} + \frac{1}{2} \right)}{\left( \frac{1}{\Pi_{\text{с.м.х}}} - \frac{2}{\Pi_{\text{гр}}} \right)}$$

Если  $\Pi_{\text{с.м.х}}$  и  $\Pi_{\text{гр}}$  неизвестны, их определяют экспериментально с помощью хронометражных наблюдений за работой ВСРМ и ПТМ.

Предлагаемая методика расчета позволяет на стадии разработки конструкции ПТМ определить тип движителя и конструкцию ходовой системы ПТМ [37].

Путь у ПТМ будет изменяться, поскольку ВСРМ будет постоянно уезжать вперед.

Когда число проходов равно единице, ВСРМ выполняет заготовку, ПТМ быстро приезжает, собирает все заготовленные сортименты и вывозит на верхний склад (рисунок, а)

$$\sum_{i=1}^n S_i,$$

если  $n = 1$ , то

$$\sum_{i=1}^n S_i = S_x.$$

На рисунке, б представлен случай, когда ВСРМ провела заготовку леса до середины участка пути и продолжила движение по пасеке, заготавливая древесину, ПТМ прошла путь до середины участка пути, провела погрузку, уехала на верхний склад и разгрузилась. Затем от верхнего склада ПТМ прошла путь до места заготовки леса, ВСРМ выполнила погрузку сортиментов и вернулась на верхний склад для разгрузки ( $n = 2$ ).

Такой подход пригоден для трех трелевок ( $n = 3$ ), и более, к примеру, для 20 или 30, которые ПТМ сможет совершить за смену.

Если  $n = 2$ , то

$$\sum_{i=1}^2 S_i = \frac{S_x}{2} + S_x \frac{2}{2}.$$

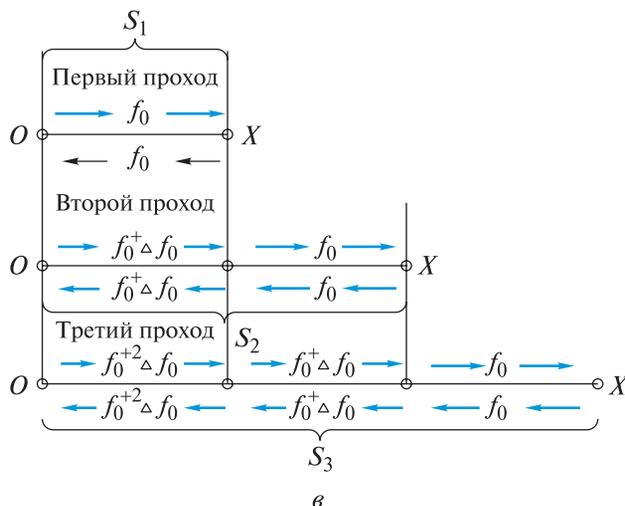
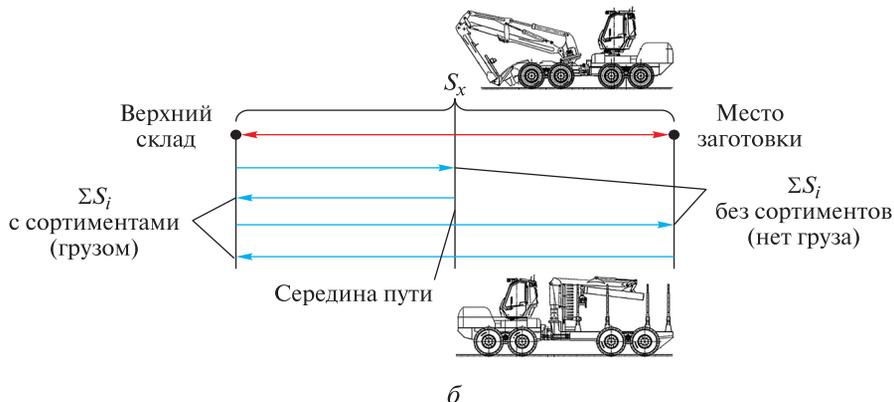
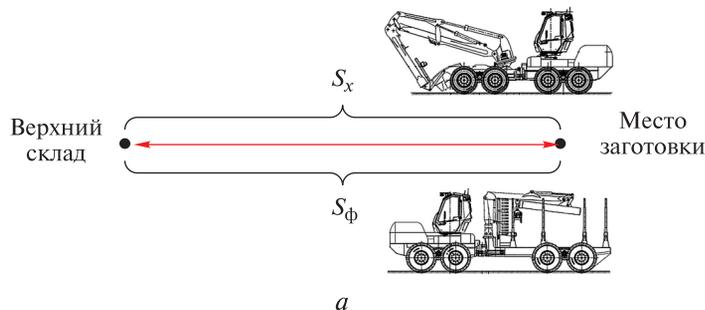
То же самое и для  $n = 3$  и так далее для каждой последующей ходки до конца смены:

$$\sum_{i=1}^3 S_i = \frac{S_x}{3} + \frac{2}{3} S_x + S_x \frac{3}{3};$$

$$\sum_{i=1}^n S_i = \frac{S_x \sum_{i=1}^n i}{n} = \frac{S_x n(n+1)}{2},$$

$$\sum_{i=1}^n S_i = \frac{S_x (n+1)}{2}.$$

Рассмотрим случай, когда  $n = 2$ , т. е. ПТМ один раз съездила до половины пути и один раз до конца, где  $S_i$  — путь ПТМ в одну сторону. Чем больше ВСРМ работает на пути  $S_x$ , тем точнее будет расчет, потому что  $S_x$  — путь, пройденный ВСРМ при заготовке сортимента массой  $M_{\text{гр}}$  за время  $t_x$  за смену. Чем длиннее путь  $S_x$  тем легче нивелировать колебание мощности; величина  $S_x$  зависит от плотности древостоя на разрабатываемом участке.



Метод повышения энергоэффективности погрузочно-транспортных машин для сортирентной заготовки древесины: *а* — трелевка сортирентов за один проход; *б* — трелевка сортирентов за два прохода по лесосеке; *в* — изменение сопротивления движению ПТМ по лесосеке

Method of increasing energy efficiency of haul-load-dump machines for cut-to-length harvesting: *a* — skidding of assorted timber in one pass; *б* — skidding of assorted timber in two passes along the harvesting area; *в* — change of resistance to movement of the machine along the harvesting area

Перед расчетом важно получить данные по характеристикам древостоя:

$$M_{гр} = \sum_{i=1}^n M_{ф.гр} = \Pi_{с.м.ф} M_{ф.гр};$$

$$t_{ил} = \frac{2M_{гр}}{\Pi_{гр}} + \frac{fg}{N_{дв.ф}} (2M_{ф} + M_{ф.гр}) \times \frac{S_x (n+1)}{2} = \frac{M_{гр}}{\Pi_{с.м.х}};$$

$$\frac{1}{\Pi_{с.м.х}} = \frac{2}{\Pi_{гр}} + \frac{fgS_x(n+1)}{N_{дв.ф} 2} \left( \frac{2}{nk_{мф}} + \frac{1}{n} \right),$$

полагая, что  $n > 20$ ,

$$n + 1 \approx n;$$

$$\frac{n+1}{n} \approx 1;$$

$$\frac{1}{\Pi_{с.м.х}} = \frac{2}{\Pi_{гр}} + \frac{fgS_x}{N_{дв.ф}} \left( \frac{1}{k_{мф}} + \frac{1}{2} \right);$$

$$N_{дв.ф} = \frac{fgS_x \left( \frac{1}{k_{мф}} + \frac{1}{2} \right)}{\left( \frac{1}{\Pi_{с.м.х}} - \frac{2}{\Pi_{гр}} \right)}. \quad (2)$$

Представленная методика применима для лесозаготовительных машин с колесным, гусеничным и комбинированным типом движителя. В формуле (2) есть суммарный коэффициент сопротивления движению  $f$ , от которого зависит выбор типа движителя. Например, при небольшом сопротивлении используется колесный движитель, если возрастает сопротивление, то используется колесно-гусеничный, при высоком сопротивлении гусеничный. Суммарный коэффициент сопротивления движению  $f$  зависит от категории грунта и его несущей способности.

Далее рассмотрим вопросы буксования движителя лесозаготовительной машины.

**Коэффициент сопротивления движению.**

Необходимо наполнить предлагаемую модель выбора ПТМ, в зависимости от потребной мощности конкретными характеристиками пасаки: ее длиной и шириной, запасами и плотностью древостоя, расчетом сменной производительности ВСРМ, коэффициентом использования массы ПТМ.

*Основные положения и допущения:*

– производительность (за смену) ПТМ — грузоподъемность равна производительности (за смену) ВСРМ;

– сопротивление движению на пути ПТМ изменится только после прохода с грузом (пачкой сортиментов)

$$t_{ул} = 2 \frac{M_{гр}}{\Pi_{гр}} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i (M_{ф} + M_{ф.гр}) t_i g}{N_{дв.ф}} + \sum_{i=1}^n \frac{S_i M_{ф} t_i g}{N_{дв.ф}},$$

где  $2 \frac{M_{гр}}{\Pi_{гр}}$  — время погрузки и разгрузки ПТМ;

$\sum_{i=1}^n \frac{S_i (M_{ф} + M_{ф.гр}) t_i g}{N_{дв.ф}}$  — время движения груженой ПТМ;

$\sum_{i=1}^n \frac{S_i M_{ф} t_i g}{N_{дв.ф}}$  — время движения порожней ПТМ;

$n$  — число проходов (при движения как в порожнем, так и в груженом состоянии).

$$T_f = 2 \frac{M_{гр}}{\Pi_{гр}} + \frac{g}{N_{дв.ф}} \left( \sum_{i=1}^n S_i t_i \right) (2M_{ф} + M_{ф.гр}).$$

Определим  $\sum_{i=1}^n S_i t_i$ , если  $n = 3$ , то

$$\begin{aligned} & (S_3 - S_2) f_0 + (S_2 - S_1) (f_0 + \Delta f) + \\ & + S_1 (f_0 + 2\Delta f) = \\ & = S_3 f_0 + S_2 \Delta f + S_1 \Delta f = \\ & = S_3 f_0 + \sum_{i=1}^2 S_i \Delta f. \end{aligned}$$

Рассмотрим  $n$ -й проход:

$$S_n f_0 + \sum_{j=1}^{n-1} S_j \Delta f;$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n S_i f_i &= \sum_{i=1}^n \left( S_i f_0 + \sum_{j=1}^{i-1} S_j \Delta f \right) = \\ &= f_0 \sum_{i=1}^n S_i + \Delta f \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} S_j. \end{aligned}$$

Погрузочно-транспортная машина прошла  $n$  количество проходов (например, 20), в результате сопротивление движению изменится — это и будет суммарное сопротивление, которое находится путем аппроксимации (учитываем  $M_{гр} = n \cdot M_{ф.гр}$ ).

$$S_i = S_j = \frac{S_x}{\Pi};$$

$$\sum_{i=1}^m S_i t_i = \frac{f_0 S_x}{n} \sum_{i=1}^n i + \frac{\Delta f S_x}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} j;$$

$$\sum_{i=1}^n i \xi \frac{n(n+1)}{2};$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} j \xi \sum_{i=1}^n \frac{(i-1)i}{2} \xi \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^n i^2 - \sum_{i=1}^n i \right);$$

$$\sum_{i=1}^n S_i t_i = \frac{f_0 S_x}{2} (n+1) + \frac{\Delta f S_x (n+1)(n+1)}{6};$$

$$t_{\text{ил}} = 2 \frac{M_{\text{гр}}}{\Pi_{\text{гр}}} + \frac{g(2M_{\text{гр}} + M_{\text{фр.р}}) S_x (f_0 + \Delta f (n-1))(n+1)}{N_{\text{дв.ф}} 2};$$

$$\frac{1}{\Pi_{\text{с.м.х}}} = \frac{2}{\Pi_{\text{гр}}} + \frac{g S_x \left( f_0 + \frac{\Delta f (n-1)}{3} \right)}{N_{\text{дв.ф}}} \times \left( \frac{1}{k_{\text{мф}}} + \frac{1}{2} \right) (n+1) \frac{1}{n}.$$

Далее  $\Delta f n - 1 + f_0$  — это суммарное конечное сопротивление. Другими словами, перед началом движения на местности фиксируется одно сопротивление, после того как машина прошла  $n$  проходов (например, 20), а далее сопротивление изменится, т. е. и будет суммарное конечное сопротивление, которое находится путем аппроксимации.

$$N_{\text{дв.ф}} = \frac{g S_x}{\frac{1}{\Pi_{\text{с.м.х}}} - \frac{2}{\Pi_{\text{гр}}}} \left( \frac{1}{k_{\text{мф}}} + \frac{1}{2} \right) \frac{n+1}{n} \times \left( f_0 + \frac{\Delta f (n-1)}{3} \right); \tag{3}$$

приравниванием выражение (3) к  $A$  и получаем:

$$\frac{g S_x}{\frac{1}{\Pi_{\text{с.м.х}}} - \frac{2}{\Pi_{\text{гр}}}} \left( \frac{1}{k_{\text{мф}}} + \frac{1}{2} \right) \frac{n+1}{n} \rightarrow A;$$

$$N_{\text{дв.ф}} = \frac{g S_x}{\frac{1}{\Pi_{\text{с.м.х}}} - \frac{2}{\Pi_{\text{гр}}}} \left( \frac{1}{k_{\text{мф}}} + \frac{1}{2} \right) \frac{n+1}{n} \left( f_0 + \frac{\Delta f (n-1)}{3} \right) = A \left( \frac{n+1}{n} f_0 + \frac{\Delta f}{3n} n^2 - 1 \right);$$

$$\frac{\partial N_{\text{дв.ф}}}{\partial n} = A \left( f_0 \frac{n-n-1}{n^2} + \frac{\Delta f}{3} \frac{2n \cdot n - n^2 + 1}{n^2} \right) = \frac{A}{n^2} \left( -f_0 + \frac{\Delta f}{3} (n^2 + 1) \right);$$

$$\frac{\partial N}{\partial n} = 0 \rightarrow n^* = \sqrt{\frac{3f_0}{\Delta f}} - 1 - \min N_{\text{дв.ф}};$$

$$\frac{\partial^2 N_{\text{дв.ф}}}{\partial n^2} = A \left( \frac{2f_0}{n^3} - \frac{\Delta f}{3} \cdot \frac{2}{n^3} \right) = \frac{2A}{n^3} \left( f_0 - \frac{\Delta f}{3} \right).$$

Если скорость движения ПТМ составляет 10 км/ч, трелевка 250 м, то при  $f_0 = 0,1$  и  $\Delta f = 0,008$  число проходов за смену при  $\min N_{\text{дв.ф}}$  составит  $n = 6$ , т. е.

$$n^* = \sqrt{\frac{2,5 \cdot 0,1}{0,008}} - 1 = 5,5 \approx 6.$$

**Учет буксования движителя.** Для определения потребной мощности на привод движителя ПТМ с учетом изменения сопротивления движению получена зависимость

$$\frac{1}{\Pi_{\text{с.м.х}}} = \frac{2}{\Pi_{\text{гр}}} + \frac{g S_x \left( f_0 + \frac{\Delta f (n_r - 1)}{3} \right)}{N_{\text{движ}}} \times \left( \frac{1}{k_{\text{мф}}} + \frac{1}{2} \right) (n+1) \frac{1}{n}.$$

Получим зависимость с учетом буксования движителя:

пусть  $n \gg 1 \rightarrow \frac{\infty n + 1}{n} \approx 1$ ,  
тогда  $f_0 + \Delta f (n-1) = f_{\text{max}}$ .

Приведем пример: сухая грунтовая дорога  $\rightarrow$  разбитая грунтовая дорога.

Пусть  $G_0$  — буксование движителя при начальном сопротивлении движению  $f_0$ :

$$G = \frac{\omega z_0 - v}{\omega z_0},$$

$$N_{\text{движ}} = \frac{N_{\text{движ}}}{1 - G}$$

$$N_{\text{движ}} = f m g v + R_x (\omega z_0 - v) =$$

$$= f m g \omega z_0 = \frac{f m g v}{1 - G}$$

$$\frac{1}{3} (3 f_0 + \Delta f (n-1))$$

Определяем удельные затраты энергии на величину пройденного пути при движении к погрузке:

$$\frac{1}{P_{с.м.х.}} = \frac{2}{P_{гр}} + \frac{gS_x(2f_0 + f_{\max})\left(\frac{1}{k_{мф}} + \frac{1}{2}\right)}{3N_{двиг}},$$

$$\frac{1}{P_{с.м.х.}} = \frac{2}{P_{гр}} + \left(\frac{1}{k_{мф}} + \frac{1}{2}\right) \times$$

$$\times \frac{gS_x\left(2\frac{f_0}{1-G_0} + \frac{f_{\max}}{1-G_{\max}}\right)}{3N_{двиг}}.$$

Сопротивление движению изменяется от числа проходов, волок (дорога/путь) разбивается — двигаться становится крайне затруднительно, поэтому следует отказаться от колесного движителя в пользу гусеничного, а если волок не разбит, то можно продолжить использование колесного движителя.

Таким образом, определяем тип движителя, устанавливаемый на ПТМ, поскольку необходима удельная мощность. В качестве допущения принимаем, что используется бесступенчатая трансмиссия.

Следует вычестить из общего пути ПТМ по лесосеке оставшийся участок  $\Delta f + f_0$ , на котором должно быть преодолено самое высокое сопротивление движению ПТМ, с учетом равного общего времени работы ПТМ и времени работы ВСРМ. Для решения задачи нет необходимости ни в большой удельной мощности (ездить быстро туда и обратно) и малая не нужна, потому что иначе ПТМ не будет успевать за ВСРМ. Все, что наработала ВСРМ, ПТМ должна перевезти от места лесозаготовок до верхнего склада и выгрузить.

## Выводы

В настоящее время в отечественной и зарубежной практике отсутствуют объективные методы определения мощности ПТМ. Рационально подобранный двигатель для ПТМ не просто улучшает ее производительность — он является необходимым условием для эффективной работы в сложной лесной среде. Он обеспечивает проходимость, тяговую способность, устойчивость к нагрузкам и эффективность работы с различным оборудованием. Эти факторы делают двигатель критически важным элементом для успешного выполнения лесозаготовительных операций.

Таким образом, актуальным является разработанная выше методика определения мощности двигателя ПТМ. С помощью предла-

гаемой методики можно получить на стадии разработки конструкции ПТМ тип движителя и конструкцию ходовой системы ПТМ.

По полученным результатам осуществляется определение основных характеристик ВСРМ и ПТМ в частности: мощности двигателя, коэффициента грузоподъемности, времени погрузочно-разгрузочных работ технологического оборудования и т. д. Полученные параметры позволят подобрать комплекс машин для сортиментной заготовки древесины, обладающий лучшей производительностью.

Разработанная модель определения мощности ПТМ и алгоритм позволяет выполнить инженерные расчеты и определить влияние масса заготавливаемого сортимента, с учетом общей масса ПТМ и компенсации потери мощности на показатели двигателя, а выведенные формулы по определению необходимой мощности двигателя, а также формулы учета сопротивления движению машины зависящие от количества проходов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Новизна данного научного результата заключается в установлении аналитической связи между значением необходимой грузоподъемности ПТМ и значениями максимальной мощности двигателя ПТМ, а также коэффициента эффективности работы ее погрузочно-разгрузочного оборудования.

## Список литературы

- [1] Moskalik T., Borz S. A., Dvorak J., Ferencik M., Glushkov S., Muiste P., Lazdins A., Styranivsky O. Timber Harvesting Methods in Eastern European Countries: A Review // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2017, no. 38(2), pp. 231–241.
- [2] Шегельман И.Р., Васильев А.С. Системный анализ объектов технологий и техники для лесосечных работ с целью синтеза новых патентоспособных решений // *Инженерный вестник Дона*, 2019. № 1 (52). С. 99.
- [3] Дербин В.М., Дербин М.В. Сортиментная заготовка древесины при выборочных рубках // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2016. № 5 (353). С. 123–131.
- [4] Дербин В.М., Дербин М.В. Оценка сортиментной технологии заготовки древесины // *Системы. Методы. Технологии*, 2015. № 2 (26). С. 148–152.
- [5] Фам Н.Л., Валяжонков В.Д., Пушков Ю.Л. Вероятностно-статистическая оценка временных режимов совместной трелевки и транспортировки сортиментов тракторным колесным сортиментоподборщиком // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2019. № 226. С. 66–81.
- [6] Мануковский А.Ю., Зорин М.В., Просужих А.А., Куницкая О.А., Григорьев И.В. Современные подходы к повышению энергоэффективности и экономичности лесных машин // *Приоритетные*

- направления инновационной деятельности в промышленности: Труды IV Междунар. науч. конф., Казань, 29–30 июня 2020 г. Казань: Конверт, 2020. С. 138–140.
- [7] Григорьев И.В., Петров М.Е. Дополнительные технические опции для повышения безопасности, надежности и энергоэффективности лесных машин // Вестник АГАТУ, 2021. № 3 (3). С. 73–81.
- [8] Благоданов А.А., Юркевич А.В. Повышение энергоэффективности транспортных машин при использовании механических бесступенчатых передач с регулируемыми силовыми функциями // Журнал автомобильных инженеров, 2017. № 2 (103). С. 18–21.
- [9] Кузнецова В.Н., Савинкин В.В. К вопросу повышения энергоэффективности гидропривода машин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии, 2013. № 5 (33). С. 22–25.
- [10] Падалкин Б.В., Иваненков В.В., Косицын Б.Б., Стадучин А.А., Балковский К.С. Метод оценки эффективности применения электромеханических трансмиссий транспортных средств на этапе проектирования // Известия МГТУ «МАМИ», 2020. № 2 (44). С. 58–68.
- [11] Божбов В.Е., Ильюшенко Д.А., Хитров Е.Г. Повышение эффективности процесса трелевки путем обоснования рейсовой нагрузки форвардеров. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, 2015. 119 с.
- [12] Клоков Д.В., Леонов Е.А., Турлай И.В. Модель работы форвардера с учетом надежности // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2015. № 2(175). С. 23–26.
- [13] Голякевич С.А., Горонковский А.Р., Мохов С.П. Методика оценки технических характеристик форвардеров на стадии проектирования // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность, 2016. № 2(184). С. 15–19.
- [14] Божбов В.Е., Хитров Е.Г., Дмитриева И.Н., Григорьев Г.В. Обзор технических характеристик современных четырехосных колесных форвардеров // Леса России В XXI веке: Материалы XI Междунар. науч.-техн. интернет-конф., посвященной 85-летию Лесоинженерного факультета СПбГЛТУ и 95-летию кафедры Сухопутного транспорта леса, Санкт-Петербург, 08–10 октября 2014 г. СПб.: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, 2014. С. 17–20.
- [15] Капитонова Е.В., Кузнецов М.В., Баранова А.А. Сорбционная влажность древесины лиственных и хвойных пород // Современные технологии и научно-технический прогресс, 2023. № 10. С. 165–166.
- [16] Квитко К.С. Формирование партий груза древесины с учетом ее влажности // Инновационные технологии на автомобильном транспорте: Материалы Всерос. науч.-техн. конф. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова, 2021. С. 16–18.
- [17] Иванников В.А., Квитко К.С. Оптимизация процесса перевозки леса автомобильным транспортом с учетом влажности перевозимой древесины // Перспективное развитие науки, техники и технологий: Труды X Междунар. науч.-практ. конф. / под ред. А.А. Горохова. Курск: Изд-во Юго-Западного государственного университета, 2020. С. 58–60.
- [18] ГОСТ 2292–88 Лесоматериалы круглые. Маркировка, сортировка, транспортирование, методы измерения и приемка. Дата введения 1991.01.01. М.: Стандартинформ, 2005. 10 с.
- [19] Дербин В.М., Дербин М.В. Технология работы харвестера при выборочных рубках // Лесотехнический журнал, 2016. Т. 6. № 2(22). С. 69–75.
- [20] Proto A.R., Macri G., Visser R., Harrill H., Russo D., Zimbalatti G. Factors Affecting Forwarder Productivity // European J. of Forest Research, 2018, v. 137, no. 2, pp. 143–151.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6>
- [21] Дербин В.М., Дербин М.В., Каморин М.Ю., Малыгин В.И., Седаков Е.О. Подсортировка сортиментов при выполнении лесосечных работ // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Вологда, 06–07 декабря 2016 г. Вологда: Изд-во Вологодского государственного университета, 2017. С. 62–64.
- [22] Borz S.A., Rommel D., Ziesak M., Vasiliauskas G. Operational requirements and preferences towards forwarding technology // Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Series II: Forestry — Wood industry — Agricultural Food Engineering, 2019, no. 12(61)1, pp. 1–12.  
DOI: <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2019.12.61.1.1>
- [23] Сивков Е.Н. Производительность форвардера как составляющая затрат энергии в системе машин харвестер — форвардер // Февральские чтения: Материалы науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава Сыктывкарского лесного института по итогам научно-исследовательской работы в 2010 году, 15–18 февраля 2011 г., Сыктывкар / под ред. Е.В. Хохлова. Сыктывкар: Изд-во Сыктывкарского лесного института, 2011. С. 264–267.
- [24] Шашкин С.Ю. Использование пакета программ Maple для математического моделирования в экономике // Образование, инновации, исследования как ресурс развития сообщества: Материалы Междунар. науч.-практ. конф., Чебоксары, 19 декабря 2017 г. Чебоксары: Среда, 2017. С. 121–127.
- [25] Базеева Н.А., Голечков Ю.И., Щенникова Е.В. О структуре пакета проблемно-ориентированных программ, используемых при математическом моделировании динамических систем транспорта // Вестник Мордовского университета, 2010. Т. 20. № 4. С. 114–117.
- [26] Семенова М.Н., Якушев И.А. Оценка результатов математического моделирования технических систем в пакете программ Matlab при помощи интерактивного обозревателя // Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике: Материалы XII Всерос. науч.-техн. конф., Чебоксары, 05 июня 2020 г. Чебоксары: Изд-во Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, 2020. С. 491–497.
- [27] Федотов Н.И. Применение компьютерного моделирования и получение навыков использования пакетов программ // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации, 2006. № 110. С. 49–52.
- [28] Зыкина А.В., Запорожец Д.Н. Пакет прикладных программ для моделирования и решения процессов

- с использованием аппарата вариационных неравенств // Современные информационные технологии и ИТ-образование, 2015. Т. 11. № 2. С. 284–289.
- [29] Бычина Д.Р., Скоромнов В.М. Методология математического моделирования физических процессов с использованием пакетов прикладных программ // Студенческая наука Подмосквю: Материалы Междунар. науч. конф. молодых ученых, Орехово-Зуево, 13 апреля 2022 г. Орехово-Зуево: Изд-во Государственного гуманитарно-технологического университета, 2022. С. 128–131.
- [30] Беззубцева М.М., Волков В.С. Аналитический обзор пакетов прикладных программ для моделирования энергетических процессов потребительских энергосистем АПК // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2015. № 6–2. С. 191–195.
- [31] Исламова Г.Г. Применение различных пакетов программ при решении задач по моделированию // Повышение эффективности и устойчивости развития агропромышленного комплекса: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (в рамках XV Междунар. специализ. выставки «АгроКомплекс — 2005»), Уфа, 01–03 марта 2005 г. Уфа: Изд-во Башкирского государственного аграрного университета, 2005. С. 258–259.
- [32] Афанасьева И.А., Жураковский В.Н. Моделирование трехмерных объектов в движении в пакете прикладных программ Matlab // Наука без границ, 2018. № 4 (21). С. 80–84.
- [33] Ringdahl O., Hellström T., Lindroos O. Potentials of Possible Machine Systems for Directly Loading Logs in Cut-to-Length Harvesting // Canadian J. of Forest Research, 2012, v. 42, no. 5, pp. 970–985. DOI: <https://doi.org/10.1139/x2012-036>
- [34] Вербицкая Н.О., Чекотин Р.С., Корж М.А. Влияние харвестерных лесозаготовок на повреждение почвенного покрова // Леса России и хозяйство в них, 2018. № 2(65). С. 42–50.
- [35] Прядкин В.И., Бартенев И.М. Эколого-экономическая оценка применения сортиментной технологии заготовки древесины на рубках ухода // Лесотехнический журнал, 2018. Т. 8. № 4 (32). С. 250–259.
- [36] Мехренцев А.В., Уразова А.Ф., Ефимов Ю.В., Кашников Г.В. Меры нефинансовой поддержки предприятий лесного комплекса по переходу на инновационные технологии // Системы. Методы. Технологии, 2022. № 3(55). С. 141–145.
- [37] Алябьев А.Ф., Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Котов А.А. Определение коэффициента ускорения испытаний на надежность несущих систем лесозаготовительных машин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2023. № 194. С. 1–11.

## Сведения об авторе

**Клубничкин Евгений Евгеньевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры транспортно-технологических средств и оборудования лесного комплекса, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), [kclubnichkin@mgtu.ac.ru](mailto:kclubnichkin@mgtu.ac.ru)

Поступила в редакцию 05.02.2024.

Одобрено после рецензирования 17.05.2024.

Принята к публикации 27.11.2024.

# INCREASING ENERGY EFFICIENCY METHOD FOR CUT-TO-LENGTH HAUL-LOAD-DUMP MACHINES

**E.E. Klubnichkin**

BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

klubnichkin@mgul.ac.ru

The results of theoretical substantiation of the method of increasing energy efficiency and environmental safety of haul-load-dump machines used in cut-to-length harvesting are presented. It is established that, based on the principles of equality of load flow of haul-load-dump machines, productivity of feller-buncher and bucking machines, the value of engine power of haul-load-dump machines is obtained, which will allow to determine the shape of the created machine depending on the resistance to movement and the path that passes the feller-delimber-buncher machine depending on the density of the stand. It is shown that the principle of this model is that the productivity of felling, hauling and dumping works is equal to the productivity of loading and transporting works, i.e. felling, hauling and dumping machines and feller-buncher and bucking machines are not idle. The proposed method of calculation will allow to determine the type of mover and the design of the running system of haul-load-dump machines at the stage of design development. It is found that the proposed model does not address economic issues as other researchers in the field. Integral models at the formula level are used.

**Keywords:** haul-load-dump machine, engine power, energy efficiency, environmental safety, modeling, cut-to-length technology of wood harvesting

**Suggested citation:** Klubnichkin E.E. *Metod povysheniya energoeffektivnosti pogruzochno-transportnykh mashin dlya sortimentnoy zagotovki drevesiny* [Increasing energy efficiency method for cut-to-length haul-load-dump machines]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 112–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-112-125

## References

- [1] Moskalik T., Borz S. A., Dvorak J., Ferencik M., Glushkov S., Muiste P., Lazdins A., Styranivsky O. Timber Harvesting Methods in Eastern European Countries: A Review. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2017, no. 38(2), pp. 231–241.
- [2] Shegel'man I.R., Vasil'ev A.S. *Sistemnyy analiz ob'ektov tekhnologii i tekhniki dlya lesoshechnykh rabot s tsel'yu sinteza novykh patentosposobnykh resheniy* [Systems analysis of objects of technologies and equipment for logging operations in order to synthesize new patentable solutions]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2019, no. 1 (52), p. 99.
- [3] Derbin V.M., Derbin M.V. *Sortimentnaya zagotovka drevesiny pri vyborochnykh rubkakh* [Assortment harvesting of timber during selective logging]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2016, no. 5 (353), pp. 123–131.
- [4] Derbin V.M., Derbin M.V. *Otsenka sortimentnoy tekhnologii zagotovki drevesiny* [Assessment of assortment technology for timber harvesting]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2015, no. 2 (26), pp. 148–152.
- [5] Fam N.L., Valyazhonkov V.D., Pushkov Yu.L. *Veroyatnostno-statisticheskaya otsenka vremennykh rezhimov sovmestnoy trelevki i transportirovki sortimentov traktornym kolesnym sortimentopodborschchikom* [Probabilistic-statistical assessment of time modes of joint skidding and transportation of timber assortments by a tractor wheeled timber picker]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2019, no. 226, pp. 66–81.
- [6] Manukovskiy A. Yu., Zorin M.V., Prosuzhikh A. A., Kunitskaya O. A., Grigor'ev I. V. *Sovremennye podkhody k povysheniyu energoeffektivnosti i ekonomichnosti lesnykh mashin* [Modern approaches to improving the energy efficiency and cost-effectiveness of forestry machines]. *Prioritetnye napravleniya innovatsionnoy deyatel'nosti v promyshlennosti: Trudy IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Priority areas of innovation activity in industry: collection of papers of the IV international scientific conference], Kazan, June 29–30, 2020. Kazan: Konvert, 2020, pp. 138–140.
- [7] Grigor'ev I.V., Petrov M.E. *Dopolnitel'nye tekhnicheskie optsi dlya povysheniya bezopasnosti, nadezhnosti i energoeffektivnosti lesnykh mashin* [Additional technical options to improve the safety, reliability and energy efficiency of forestry machines]. *Vestnik AGATU* [Bulletin of AGATU], 2021, no. 3 (3), pp. 73–81.
- [8] Blagonravov A.A., Yurkevich A.V. *Povyshenie energoeffektivnosti transportnykh mashin pri ispol'zovanii mekhanicheskikh besstupenchatykh peredach s reguliruemymi silovymi funktsiyami* [Improving the energy efficiency of transport vehicles using mechanical continuously variable transmissions with adjustable power functions]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov* [J. of Automotive Engineers], 2017, no. 2 (103), pp. 18–21.
- [9] Kuznetsova V.N., Savinkin V.V. *K voprosu povysheniya energoeffektivnosti gidroprivoda mashin* [On the issue of improving the energy efficiency of machine hydraulic drives]. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii* [Bulletin of the Siberian State Automobile and Highway Academy], 2013, no. 5 (33), pp. 22–25.
- [10] Padalkin B.V., Ivanenkov V.V., Kositsyn B.B., Stadukhin A.A., Balkovskiy K.S. *Metod otsenki effektivnosti primeneniya elektromekhanicheskikh transmissiy transportnykh sredstv na etape proektirovaniya* [Method for assessing

- the efficiency of using electromechanical transmissions of vehicles at the design stage]. *Izvestiya MGTU «MAMI»* [Bulletin of MGTU «MAMI»], 2020, no. 2 (44), pp. 58–68.
- [11] Bozhbov V.E., Il'yushenko D.A., Khitrov E.G. *Povyshenie effektivnosti protsessa trelevki putem obosnovaniya reysovoy nagruzki forvarderov* [Increasing the efficiency of the skidding process by substantiating the voyage load of forwarders]. St. Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet im. S.M. Kirova [St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov], 2015, 119 p.
- [12] Klokov D.V., Leonov E.A., Turlay I.V. *Model' raboty forvardera s uchetom nadezhnosti* [Forwarder operation model taking into account reliability]. *Trudy BGTU. № 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Proceedings of BSTU. no. 2. Forestry and woodworking industry], 2015, no. 2 (175), pp. 23–26.
- [13] Golyakevich S.A., Goronovskiy A.R., Mokhov S.P. *Metodika otsenki tekhnicheskikh kharakteristik forvarderov na stadii proektirovaniya* [Methodology for assessing the technical characteristics of forwarders at the design stage]. *Trudy BGTU. № 2. Lesnaya i derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Proceedings of BSTU. no. 2. Forestry and woodworking industry], 2016, no. 2 (184), pp. 15–19.
- [14] Bozhbov V.E., Khitrov E.G., Dmitrieva I.N., Grigor'ev G.V. *Obzor tekhnicheskikh kharakteristik sovremennykh chetyrekhosnykh kolesnykh forvarderov* [Review of technical characteristics of modern four-axle wheeled forwarders]. *Les Rossii V XXI veke: mater. XI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy internet-konferentsii, posvyashchennoy 85-letiyu Lesoinzhenernogo fakul'teta SPbGLTU i 95-letiyu kafedry Sukhoputnogo transporta lesa* [Forests of Russia in the 21st century: Proc. of the XI international scientific and technical Internet conference dedicated to the 85th anniversary of the Forest Engineering Faculty of SPbGLTU and the 95th anniversary of the Department of Land Forest Transport], St. Petersburg, October 8–10, 2014. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Engineering University named after S. M. Kirov, 2014, pp. 17–20.
- [15] Kapitonova E.V., Kuznetsov M.V., Baranova A.A. *Sorbtsionnaya vlazhnost' drevesiny listvennykh i khvoynnykh porod* [Sorptions moisture content of deciduous and coniferous wood]. *Sovremennyye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskii progress* [Modern technologies and scientific and technical progress], 2023, no. 10, pp. 165–166.
- [16] Kvitko K.S. *Formirovaniye partiy gruza drevesiny s uchetom ee vlazhnosti* [Formation of timber cargo batches taking into account its moisture content]. *Innovatsionnyye tekhnologii na avtomobil'nom transporte: mater. Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Innovative technologies in automobile transport: Proc. of the All-Russian scientific and technical conference]. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy lesotekhnicheskii universitet im. G.F. Morozova [Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov], 2021, pp. 16–18.
- [17] Ivannikov V.A., Kvitko K.S. *Optimizatsiya protsessa perevozki lesa avtomobil'nym transportom s uchetom vlazhnosti perevozimoy drevesiny* [Optimization of the timber transportation process by automobile transport taking into account the moisture content of the transported wood]. *Perspektivnoye razvitiye nauki, tekhniki i tekhnologii: Trudy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii / Pod red. A.A. Gorokhov. Kursk: Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet* [Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet], 2020, pp. 58–60.
- [18] GOST 2292–88 *Lesomaterialy kruglye. Markirovka, sortirovka, transportirovaniye, metody izmereniya i priemka* [GOST 2292–88 Round timber. Marking, sorting, transportation, measurement methods and acceptance], date of introduction 1991.01.01. Moscow: Standartinform, 2005, 10 p.
- [19] Derbin V.M., Derbin M.V. *Tekhnologiya raboty kharvestera pri vyborochnykh rubkakh* [Harvester operation technology for selective felling]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry engineering J.], 2016, v. 6, no. 2(22), pp. 69–75.
- [20] Proto A.R., Macri G., Visser R., Harrill H., Russo D., Zimbalatti G. Factors Affecting Forwarder Productivity. *European J. of Forest Research*, 2018, v. 137, no. 2, pp. 143–151. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-017-1088-6>
- [21] Derbin V.M., Derbin M.V., Kamorin M.Yu., Malygin V.I., Sedakov E.O. *Podsortirovka sortimentov pri vypolnenii lesosechnykh rabot* [Sorting of assortments during logging operations]. *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: mater. Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Actual problems of forestry complex development: Proc. of the International Scientific and Technical Conference], Vologda, December 6–7, 2016. Vologda: Vologda State University, 2017, pp. 62–64.
- [22] Borz S.A., Rommel D., Ziesak M., Vasiliauskas G. Operational requirements and preferences towards forwarding technology. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Series II: Forestry–Wood industry–Agricultural Food Engineering*, 2019, no. 12(61)1, pp. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.31926/but.fwi.2019.12.61.1.1>
- [23] Sivkov E.N. *Proizvoditel'nost' forvardera kak sostavlyayushchaya zatrat energii v sisteme mashin kharvester — forvarder* [Forwarder productivity as a component of energy costs in the harvester — forwarder machine system]. *Fevral'skie chteniya: mater. Nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava Syktyvkarского лесного института по итогам научно-исследовательской работы в 2010 году* [February readings: materials. Scientific and practical conference of the faculty of the Syktyvkar Forestry Institute based on the results of research work in 2010]. Ed. by E.V. Khokhlova, Syktyvkar, February 15–18, 2011. Syktyvkar: [Syktyvkar Forestry Institute], 2011, pp. 264–267.
- [24] Shashkin S.Yu. *Ispol'zovanie paketa programm maple dlya matematicheskogo modelirovaniya v ekonomike* [Using the maple software package for mathematical modeling in economics]. *Obrazovanie, innovatsii, issledovaniya kak resurs razvitiya soobshchestva: mater. Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Education, innovation, research as a resource for community development: materials of the International scientific and practical conference], Cheboksary, December 19, 2017. Cheboksary: Sreda Publishing House, 2017, pp. 121–127.
- [25] Bazeeva N.A., Golechkov Yu.I., Shchennikova E.V. *O strukture paketa problemno-orientirovannykh programm, ispol'zuemykh pri matematicheskom modelirovanii dinamicheskikh sistem transporta* [On the structure of the package of problem-oriented programs used in mathematical modeling of dynamic transport systems]. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Bulletin of the Mordovian University], 2010, v. 20, no. 4, pp. 114–117.
- [26] Semenova M.N., Yakushev I.A. *Otsenka rezul'tatov matematicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem v pakete programm Matlab pri pomoshchi interaktivnogo obozrevatelya* [Evaluation of the results of mathematical modeling of

- technical systems in the Matlab software package using an interactive browser]. *Informatsionnye tekhnologii v elektrotekhnike i elektroenergetike: mater. XII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Information technologies in electrical engineering and electric power engineering: materials. XII All-Russian scientific and technical conference], Cheboksary, June 5, 2020. Cheboksary: Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, 2020, pp. 491–497.
- [27] Fedotov N.I. *Primenenie komp'yuternogo modelirovaniya i poluchenie navykov ispol'zovaniya paketov programm* [Application of computer modeling and acquisition of skills in using software packages]. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviatsii* [Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation], 2006, no. 110, pp. 49–52.
- [28] Zykina A.V., Zaporozhets D.N. *Paket prikladnykh programm dlya modelirovaniya i resheniya protsessov s ispol'zovaniem apparata variatsionnykh neravenstv* [Package of applied programs for modeling and solving processes using the apparatus of variational inequalities]. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* [Modern information technologies and IT education], 2015, v. 11, no. 2, pp. 284–289.
- [29] Bychina D.R., Skoromnov V.M. *Metodologiya matematicheskogo modelirovaniya fizicheskikh protsessov s ispol'zovaniem paketov prikladnykh programm* [Methodology of mathematical modeling of physical processes using application packages]. *Studencheskaya nauka Podmoskov'yu: mater. Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh* [Student science in the Moscow region: materials of the International scientific conference of young scientists], Orekhovo-Zuyevo, April 13, 2022. Orekhovo-Zuyevo: State Humanitarian and Technological University, 2022, pp. 128–131.
- [30] Bezzubtseva M.M., Volkov V.S. *Analiticheskiy obzor paketov prikladnykh programm dlya modelirovaniya energeticheskikh protsessov potrebitel'skikh energosistem APK* [Analytical review of application software packages for modeling energy processes of consumer energy systems of the agro-industrial complex]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International J. of Applied and Fundamental Research], 2015, no. 6–2, pp. 191–195.
- [31] Islamova G.G. *Primenenie razlichnykh paketov programm pri reshenii zadach po modelirovaniyu* [Application of various software packages in solving modeling problems]. *Povyshenie effektivnosti i ustoychivosti razvitiya agropromyshlennogo kompleksa: mater. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (v ramkakh XV Mezhdunarodnoy spetsializirovannoy vystavki «AgroKompleks – 2005»)* [Improving the efficiency and sustainability of development of the agro-industrial complex: Proc. of the All-Russian scientific and practical conference (within the framework of the XV International specialized exhibition «AgroComplex – 2005»)], Ufa, March 1–3, 2005. Ufa: Bashkir State Agrarian University, 2005, pp. 258–259.
- [32] Afanas'eva I.A., Zhurakovskiy V.N. *Modelirovanie trekhmernykh ob'ektov v dvizhenii v pakete prikladnykh programm Matlab* [Modeling of three-dimensional objects in motion in the Matlab software package]. *Nauka bez granits* [Science without Borders], 2018, no. 4 (21), pp. 80–84.
- [33] Ringdahl O., Hellström T., Lindroos O. Potentials of Possible Machine Systems for Directly Loading Logs in Cut-to-Length Harvesting. *Canadian J. of Forest Research*, 2012, v. 42, no. 5, pp. 970–985. DOI: <https://doi.org/10.1139/x2012-036>
- [34] Verbitskaya N.O., Chekotin R. S., Korzh M.A. *Vliyanie kharvesternykh lesozagotovok na povrezhdenie pochvennogo pokrova* [The impact of harvester logging on soil cover damage]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and their management], 2018, no. 2 (65), pp. 42–50.
- [35] Pryadkin V.I., Bartenev I.M. *Ekologo-ekonomicheskaya otsenka primeneniya sortimentnoy tekhnologii zagotovki drevesiny na rubkakh ukhoda* [Ecological and economic assessment of the use of assortment technology for timber harvesting in thinnings]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering J.], 2018, v. 8, no. 4 (32), pp. 250–259.
- [36] Mekhrentsev A.V., Urazova A.F., Efimov Yu.V., Kashnikov G.V. *Mery nefinansovoy podderzhki predpriyatiy lesnogo kompleksa po perekhodu na innovatsionnye tekhnologii* [Non-financial support measures for forestry enterprises in transition to innovative technologies]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], 2022, no. 3(55), pp. 141–145.
- [37] Alyab'ev A.F., Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Kotov A.A. *Opreделение koeffitsienta uskoreniya ispytaniy na nadezhnost' nesushchikh sistem lesozagotovitel'nykh mashin* [Determination of the acceleration coefficient for reliability tests of supporting systems of logging machines]. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University], 2023, no. 194, pp. 1–11.

## Author's information

**Klubnichkin Yevgeniy Yevgen'yevich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Transport and Technological Means and Equipment of the Forest Complex, BMSTU (Mytishchi branch), [klubnichkin@mgul.ac.ru](mailto:klubnichkin@mgul.ac.ru)

Received 05.02.2024.

Approved after review 17.05.2024.

Accepted for publication 27.11.2024.

## РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ИНФРАКРАСНОЙ СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ В УСТАНОВКЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

В.Н. Левинский✉, С.И. Уразов, В.А. Афонькина

ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», Россия, 457103, Челябинская обл., г. Троицк, ул. им. Ю.А. Гагарина, д. 13

Lv\_74rus@mail.ru

Приведен анализ проблематики создания систем автоматического управления для набирающих популярность сушильных установок на основе низкотемпературных инфракрасных генераторов. Описаны методы и средства получения математической модели инфракрасной сушки древесины с применением пленочных электронагревателей, разработанных учеными Института агроинженерии ФГБОУ ВО «Южно-Уральский ГАУ» г. Челябинск. Приведено описание экспериментальной сушильной установки и системы автоматического управления процессом сушки с функцией архивирования всех показателей технологических параметров необходимых для получения динамических кривых температуры и влажности. С помощью метода корреляционно-регрессионного анализа установлена связь между параметрами технологического процесса сушки соснового пиломатериала. Проведены натуральные эксперименты по низкотемпературной сушке сосновых досок, уложенных в штабеле, по результатам которых определено соответствие полученных температурно- и влажностно-временных зависимостей с кинетическими кривыми известной теории сушки. Выполнен развернутый регрессионный анализ по полученному массиву данных основных параметров сушки (время, температура и влажность воздуха в камере, температура древесины). Доказано эффективное дробление кривой кинетики сушки на три поддиапазона, характеризующихся собственными параметрами теплодинамики, математические модели которых стали основой алгоритмов интеллектуальной системы автоматического управления. Разработаны практические рекомендации по организации инфракрасной сушки пиломатериалов, созданию и регулировке систем автоматического контроля. По динамическим характеристикам сушилки как результату новых знаний можно через передаточные функции САУ определить тип и настройки регуляторов. Подтверждена гипотеза о том, что окончание массообменных процессов с переходом работы установки в квазистационарный тепловой режим происходит до окончания фактического периода сушки.

**Ключевые слова:** ИК-сушка, древесина, математическая модель, регрессионный анализ, пленочный электронагреватель

**Ссылка для цитирования:** Левинский В.Н., Уразов С.И., Афонькина В.А. Регрессионный анализ процесса инфракрасной сушки древесины в установке с применением пленочных электронагревателей // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 126–143.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-126-143

Известно, что 90...95 % пиломатериалов на сегодняшний день высушивается в конвективных камерах [1–6]. Благодаря популярности данных установок для них существенно проработаны методики расчетов конструктивных, технологических и режимных параметров, соответственно, и система автоматического управления процессом сушки так же достаточно проработана. Система управления с высокой точностью позволяет управлять режимом сушки по влажности воздуха, времени, температуре и температурному перепаду в штабеле. Этого нельзя сказать о менее популярных, но весьма перспективных с точки зрения мобиль-

ности, энергоэффективности (при сравнении с электрическими установками), доступности по цене для любого потребителя, экологичности, простоты эксплуатации и выхода качественного сухопродукта сушильных установках на основе низкотемпературных пленочных электронагревателей (рис. 1) [7, 8].

Эффективность систем автоматического управления процессом сушки зависит от совершенства алгоритма управления, заложенного в контроллер, управляющий технологическим процессом и от точности регистрации технологических параметров [9, 10]. Алгоритм управления может быть построен на основе математического описания тепло- массообменных процессов сушки [11–13]. Однако такой подход не находит применения вследствие сложности



**Рис. 1.** Сушильная установка на основе низкотемпературных пленочных электронагревателей

**Fig. 1.** Drying plant based on low-temperature film electric heaters

математического аппарата и неопределенности исходных данных для расчета.

Другой подход основан на изучении динамических свойств сушильной камеры как объекта управления. В этом случае алгоритм определяется передаточной функцией объекта управления, которая получается экспериментально для конкретной конструкции сушилки и высушиваемого материала. Сложность реализации такого подхода заключается в том, что сушильная камера состоит из нескольких зон, обладающих различными передаточными функциями [14, 15]. Еще один подход к созданию алгоритма управления основан на использовании экспериментально полученной модели сушки от технологических параметров процесса [16–18].

## Цель работы

Цель работы — получение математической модели процесса сушки древесины в установке на основе пленочных электронагревателей.

## Объекты и методы исследования

Исследования проводились на экспериментальной сушильной установке с набором конкретных характеристик (табл. 1).

Набор оборудования сушильной установки для реализации управления процессом сушки древесины включал в себя универсальный измеритель-регулятор температуры и влажности ТРМ-138 (1 шт.), датчик температуры ДТС014-

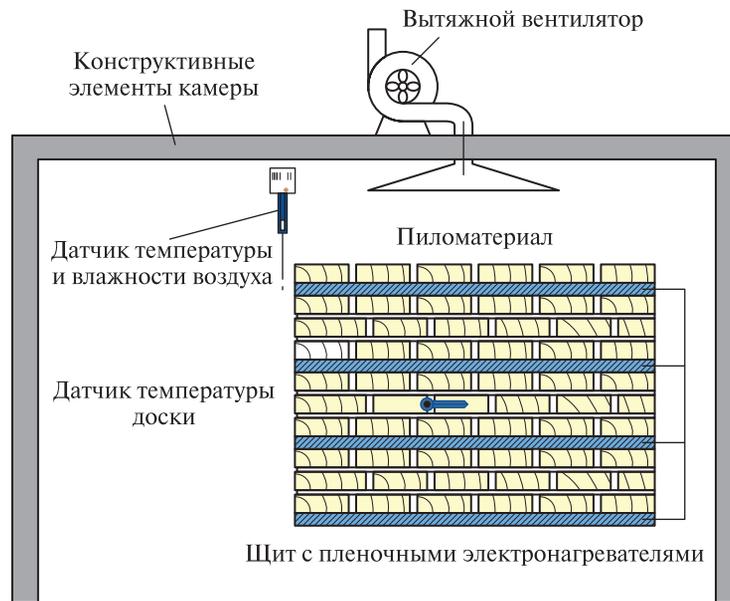
Т а б л и ц а 1

**Технические характеристики  
экспериментальной сушильной установки**  
Technical characteristics  
of the experimental drying plant

Наименование параметра	Количество
Объем камеры, м <sup>3</sup>	20
Максимальный объем загрузки древесины, м <sup>3</sup>	4
Количество щитов с пленочными электронагревателями, шт.	10
Размер щита, м	1,4×2,0
Установленная мощность одного щита, кВт	1
Вытяжной вентилятор ВЦ 4-70(М)-2,5 с параметрами: 0,12 кВт; 1500 об./мин; 0,38...0,88 м <sup>3</sup> /ч	1

50М.В3.20/5 (1 шт.), датчик температуры и влажности ДВТ-03.ТЭ.2.Н1.80 (1 шт.), преобразователь интерфейсов АС-4 RS-485<->USB (1 шт.).

Вначале укладывался штабель, который представлял собой несколько слоев досок с разделительными рейками, укладываемыми поперек (рис. 2). Между слоями (не менее двух слоев) размещали сбитый щит с пленочными электронагревателями [19, 20], перекрывающими всю поперечную площадь штабеля. В основании штабеля и наверху устанавливали щиты с отражателями для направления теплового потока внутрь. Далее пленочные электронагреватели посредством разъемов подключались к сети питания [7, 8, 21, 22].

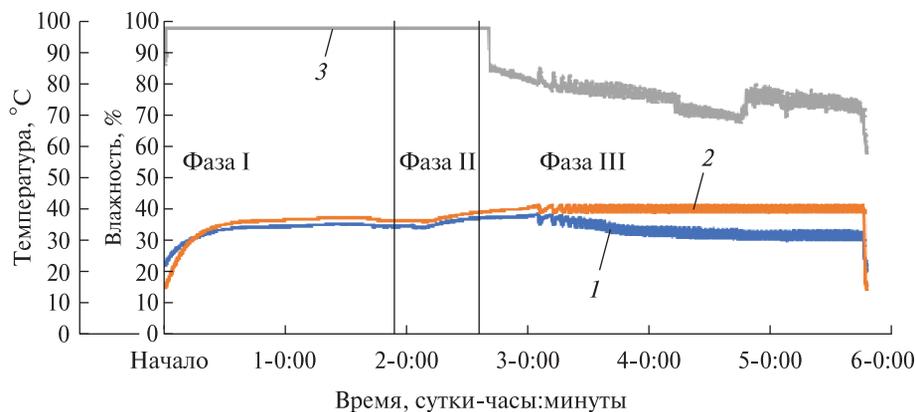


**Рис. 2.** Схема расположения технологического оборудования и первичных измерительных преобразователей  
**Fig. 2.** Layout of technological equipment and primary measuring transducers

Т а б л и ц а 2

**Экспериментальные показатели сушки сосны**  
**Experimental indicators of pine drying**

Номер п/п	Объем загрузки, м <sup>3</sup>	Влажность, %		Время процесса сушки, ч	Удельные затраты электрической энергии, кВт·ч/м <sup>3</sup>
		начальная	конечная		
1	3,0	58	14	139	310
2	2,2	59	12	166	390
3	3,0	66	16	187	390
4	3,5	65	16	152	330
5	3,8	56	14	170	330



**Рис. 3.** Кривые сушки древесины согласно эксперименту № 1 из табл. 3: 1 — температура сушильного агента; 2 — температура древесины; 3 — влажность сушильного агента  
**Fig. 3.** Drying curves of wood according to experiment No. 1 from Table 3: 1 — temperature of the drying agent; 2 — temperature of wood; 3 — humidity of the drying agent

**Корреляционная матрица по первичному набору данных**  
Correlation matrix for the primary data set

$n = 2775$ $t_{кр}(5\%, 2773) = 1,96$	Температура сушильного агента	Температура древесины	Влажность сушильного агента
Температура сушильного агента	–	$r = 0,4927$ (умеренная)	$r = 0,2584$ (слабая)
Температура древесины	$t_p = 29,81$ ( $H_0$ отвергается)	–	$r = -0,5607$ (заметная)
Влажность сушильного агента	$t_p = 14,08$ ( $H_0$ отвергается)	$t_p = 35,66$ ( $H_0$ отвергается)	–

Процесс сушки осуществлялся циклично в зависимости от температуры нагрева доски, фиксируемой по датчику, установленному непосредственно в ней в предварительно-просверленном отверстии (см. рис. 2). Температура нагрева была выставлена на уровне  $40\text{ }^\circ\text{C}$ , гистерезис —  $1\text{ }^\circ\text{C}$  [7, 21].

Работа вентиляционной камеры осуществлялась по верхней (85...90 %) и нижней уставке (60...65 %) по датчику относительной влажности воздуха. Окончание процесса сушки устанавливалось по значению относительной влажности камеры, соответствующему табличным данным влажности древесины для этих условий [7, 21].

Для архивирования всех показателей процесса сушки применялось предварительно установленное на персональном компьютере (ПК) программное обеспечение Owen Process Manager (ОПМ), позволяющее анализировать полученные характеристики технологического процесса, в том числе в формате Excel, в котором в дальнейшем можно получить уравнения кривых процесса сушки, провести корреляционный анализ и получить уравнение регрессии, что впоследствии станет основой для разработки алгоритмов систем автоматического управления процессом сушки пиломатериалов с применением пленочных электронагревателей в камере. Связь между ПК и прибором ТРМ-138 осуществлялось посредством адаптера АС-4.

## Результаты и обсуждение

На указанной установке проведены некоторые эксперименты по сушке образцов сосны толщиной 50 мм, длиной 4 м (табл. 2).

Адекватность приведенных значений (см. табл. 2) следует из закономерностей временных показателей и затрат электрической энергии. Полученные кривые всех экспериментов, один из которых (№ 1, см. табл. 2) приведен на рис. 3, схожи и соответствуют известной теории сушки [23, 24].

По результатам проведенного эксперимента № 1 (см. табл. 2) получена выборка значений по измерениям из 2775 квадр: время от начала эксперимента с шагом 3 мин., температура сушильного агента (воздуха в камере); температура сушеного материала (древесины); влажность сушильного агента.

Для первичной оценки полученных экспериментальных данных выполнен корреляционный анализ (табл. 3) [25, 26]. Для этого попарно рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона  $r$  по формуле

$$r = \frac{\text{cov}(X, Y)}{S_X S_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - M[X])(Y_i - M[Y])}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (X_i - M[X])^2\right) \left(\sum_{i=1}^n (Y_i - M[Y])^2\right)}} \quad (1)$$

где  $S_X, S_Y$  — средние квадратичные отклонения случайных величин  $X$  и  $Y$  соответственно;  $M[X], M[Y]$  — математические ожидания случайных величин  $X$  и  $Y$  соответственно;  $n$  — количество пар значений в наборе данных;  $X, Y$  — парные случайные величины.

Дополнительно к значению коэффициента корреляции Пирсона определялось соответствующее значение по шкале Чеддока, которое записывалось в скобках.

Для проверки нулевой гипотезы ( $H_0$ ) о том, что между случайными величинами нет взаимосвязи (случайные величины независимы одна от другой), необходима оценка существенности коэффициента корреляции. При больших объемах выборки в парных корреляциях для данной оценки достаточно использовать  $t$ -критерий Стьюдента, рассчитываемый по формуле

$$t_p = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (2)$$

На уровне значимости  $\alpha$  нулевая гипотеза в парной корреляции отвергается, если расчет-

ное значение  $t$ -критерия превысит критическое  $t_{кр}(\alpha, n - 2)$ .

По данным табл. 3 можно сделать следующие выводы:

1) изменчивость в наборе данных нельзя объяснить ошибкой измерений, явно имеется некоторая взаимная изменчивость;

2) в наборе данных не прослеживаются явно выраженные сильные корреляции;

3) взаимосвязь между температурой древесины и температурой сушильного агента не является сильной, что противоречит физической картине тепломассообмена при сушке.

Таким образом, в целом рассмотрение всего набора данных является ошибочным. Для устранения этой ошибки набор данных был разделен на три диапазона с качественно различными условиями тепломассообмена согласно известной теории сушки [23, 24, 27] (табл. 4–6):

– фаза I — первые двое сут. (от начала сушки до момента времени 2-е сут. 00:00 ч) — продукт обладает большим количеством влаги, которая легко испаряется, при этом сушильный агент перенасыщен влагой, что ведет к активному образованию конденсата на всех частях сушильной камеры (в том числе на продукте);

– фаза II — следующие 16 ч (от 2-х сут. 00:00 ч до 2-х сут. 16:00 ч) — продукт обладает большим количеством влаги, которая легко испаряется, при этом сушильный агент полностью насыщен влагой, конденсат образуется на ограждающих конструкциях (поскольку они имеют температуру ниже продукта);

– фаза III — до окончания сушки (от 2-х сут. 16:00 ч до 6-ти сут. 00:00 ч) — продукт обладает избыточной влагой, сушильный агент поглощает и удаляет всю испаряемую влагу, конденсат в сушильной камере не образуется.

По данным табл. 4–6 можно сделать следующие выводы:

1) изменчивость в наборе данных нельзя объяснить ошибкой измерений;

2) слабые корреляции с влажностью фазы I можно объяснить тем фактом, что измеренная влажность воздуха (в относительных единицах) фактически постоянное значение;

3) усиление корреляций с влажностью фазы II можно объяснить тем, что динамика температуры сушильного агента и древесины близка к линейной;

4) выявленные сильные корреляции по диапазонам согласуются с физической картиной тепломассообмена и соответствуют известной теории сушки, что свидетельствует о корректности разделения всего набора данных на диапазоны;

5) сильные парные корреляции фазы II необходимо дополнительно проверить на наличие автокорреляции в тройках.

Для проверки автокорреляции в тройках (табл. 7) используют формулу множественного коэффициента корреляции Пирсона [23, 24]

$$r_{z(x,y)} = \sqrt{\frac{r_{xz}^2 + r_{yz}^2 - 2r_{xz}r_{yz}r_{xy}}{1 - r_{xy}^2}} \quad (3)$$

Т а б л и ц а 4

**Корреляционная матрица по диапазону фазы I**  
Correlation matrix for the phase I range

$n = 958$ $t_{кр}(5\%, 956) = 1,96$	Температура сушильного агента	Температура древесины	Влажность сушильного агента
Температура сушильного агента	–	$r = 0,9941$ (практически функциональная)	$r = 0,3314$ (умеренная)
Температура древесины	$t_p = 480,83$ ( $H_0$ отвергается)	–	$r = 0,3388$ (умеренная)
Влажность сушильного агента	$t_p = 18,50$ ( $H_0$ отвергается)	$t_p = 18,96$ ( $H_0$ отвергается)	–

Т а б л и ц а 5

**Корреляционная матрица по диапазону фазы II**  
Phase II range correlation matrix

$n = 319$ $t_{кр}(5\%, 317) = 1,96$	Температура сушильного агента	Температура древесины	Влажность сушильного агента
Температура сушильного агента	–	$r = 0,9856$ (очень сильная)	$r = -0,7796$ (сильная)
Температура древесины	$t_p = 306,40$ ( $H_0$ отвергается)	–	$r = -0,7090$ (сильная)
Влажность сушильного агента	$t_p = 65,55$ ( $H_0$ отвергается)	$t_p = 52,94$ ( $H_0$ отвергается)	–

Т а б л и ц а 6

## Корреляционная матрица по диапазону фазы III

## Phase III range correlation matrix

$n = 1498$ $t_{кр}(5\%, 1496) = 1,96$	Температура сушильного агента	Температура древесины	Влажность сушильного агента
Температура сушильного агента	–	$r = 0,3413$ (слабая)	$r = 0,7454$ (сильная)
Температура древесины	$t_p = 19,12$ ( $H_0$ отвергается)	–	$r = 0,1284$ (слабая)
Влажность сушильного агента	$t_p = 58,89$ ( $H_0$ отвергается)	$t_p = 6,82$ ( $H_0$ отвергается)	–

Т а б л и ц а 7

## Проверка корреляций в тройках в диапазоне фазы II

## Checking correlations in triples in the phase II range

Параметр	Возмущающая пара	Коэффициент корреляции $r$
Температура сушильного агента	Температура древесины и влажность сушильного агента	0,9922 (практически функциональ- ная)
Температура древесины	Температура и влажность сушильного агента	0,9901 (практически функциональ- ная)
Влажность сушильного агента	Температура сушильного агента и температура древесины	0,8548 (сильная)

Общие выводы по результатам корреляционного анализа:

1) полученные экспериментальные данные подтверждают неслучайность изменения всех измеряемых величин;

2) по виду множества точек фазы I можно предположить, что изменение температур носит известный из теории сушки характер (функция вида  $1 - e^{-x}$ ); этот же вывод справедлив для влажности и температуры сушильного агента на диапазоне фазы III (функция вида  $e^{-x}$ ); прочие функции в первом приближении можно рассматривать как линейные;

3) целесообразно проводить регрессионный анализ в независимых парах величин: время — температура сушильного агента; время — температура древесины; для влажности регрессионный анализ не имеет смысла;

4) по экспериментальным данным фазы III четко прослеживается прерывистый режим сушки, что должно быть учтено при анализе.

## Регрессионный анализ для температуры. Целевая функция

Рассматриваемый набор экспериментальных данных отражает картину сушки капиллярно-пористого тела [28–31]. Учитывая сложность процессов теплообмена, нахождение функции кривой нагрева возможно разными способами. Так, например, известно

общее выражение для кривой нагрева тела в наиболее простом случае при соблюдении следующих условий:

- температура окружающей среды неизменна;
- теплоотдача  $A$  нагреваемого тела не изменяется в течение нагрева;
- теплоемкость  $C$  нагреваемого тела не изменяется в течение нагрева;
- к нагреваемому телу подводится постоянный поток теплоты  $P$ .

Данные допущения можно применить и для процессов теплообмена (где не стабильны теплоемкость и теплоотдача) с оговоркой, что в рассматриваемом диапазоне времени параметры можно усреднить, причем ошибка будет ниже, если параметры будут изменяться монотонно.

С учетом приведенных допущений можно получить уравнение теплового баланса

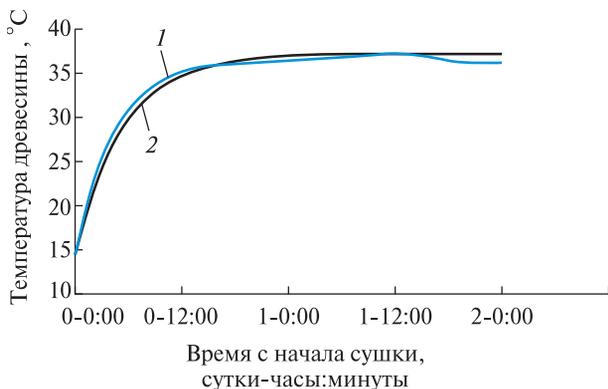
$$P \cdot dt = C \cdot d\tau + A \cdot dt. \quad (4)$$

Решение данного дифференциального уравнения для превышения температуры  $\tau$  при граничном условии  $\tau(0) = \tau_n$  имеет вид

$$\tau(t) = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_n}} \right) + \tau_n e^{-\frac{t}{T_n}}, \quad (5)$$

где  $\tau_y = \frac{P}{A}$  — установившееся превышение температуры нагревателя над температурой окружающей среды;

$T_n = \frac{C}{A}$  — постоянная нагрева.



**Рис. 4.** Регрессионный анализ диапазона фазы I для температуры древесины (параметры функции:  $\tau_n = 14,66$  °C;  $\tau_y = 37,2$  °C;  $T_n = 327,24$  мин по 478 из 958 точек;  $R^2 = 0,9780$ ); *здесь и на рис. 5–7: 1 — опыт; 2 — теория*

**Fig. 4.** Regression analysis on the phase I range for wood temperature (function parameters:  $\tau_n = 14,66$  °C;  $\tau_y = 37,2$  °C;  $T_n = 327,24$  min at 478 of 958 points;  $R^2 = 0,9780$ ); 1 — experience; 2 — theory

При одинаковом смещении установившегося и начального значения превышения температуры вид функции и ее динамика не изменяются, что отражает важное свойство функции (5). Таким образом, появляется возможность проведения расчетов с помощью температуры.

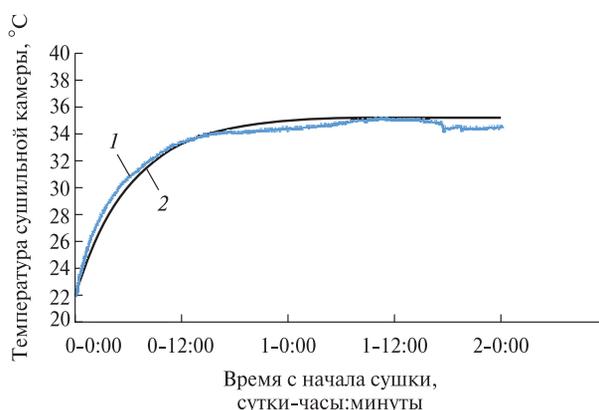
Для уравнения (5) невозможно методом наименьших квадратов определить все параметры одновременно. По этой причине целесообразно их установить опытным путем, подбирая превышения температуры и определяя методом наименьших квадратов такое значение  $T_n$  в вычислительных средах, которое поможет добиться большего значения коэффициента детерминации  $R^2$ .

При таких условиях постоянную нагрева  $T_n$  определяют по формуле

$$T_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\left( \frac{\tau_y - \tau_n}{\tau_y - \tau_i} \right)} \quad (6)$$

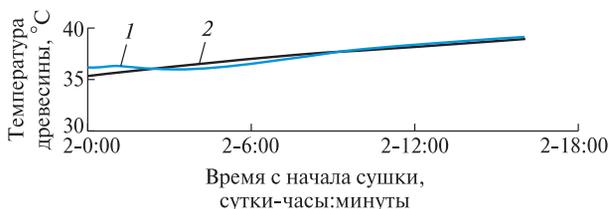
Формулу (6) нельзя механически применить для всего набора точек. Так, подстановка начального превышения температуры в момент времени 0 приводит к ошибке вычислений, поэтому первую точку необходимо исключить.

В силу асимптотического приближения значения функции к значению  $\tau_y$  вес точек перестает быть одинаковым и большое количество точек, близких к значению  $\tau_y$ , смещает оценку  $T_n$  в большую сторону, тем самым увеличивая ошибку.



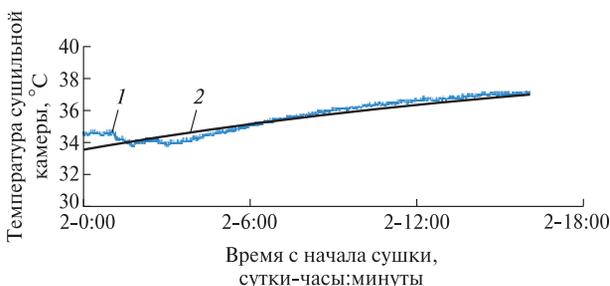
**Рис. 5.** Регрессионный анализ диапазона фазы I для температуры сушильной камеры (параметры функции:  $\tau_n = 22,05$ °C;  $\tau_y = 35,2$ °C;  $T_n = 378,87$  мин по 478 из 958 точек;  $R^2 = 0,9564$ )

**Fig. 5.** Regression analysis for digital camera operators (parameters:  $\tau_n = 22,05$  °C;  $\tau_y = 35,2$  °C;  $T_n = 378,87$  min at 478 of 958 points;  $R^2 = 0,9564$ )



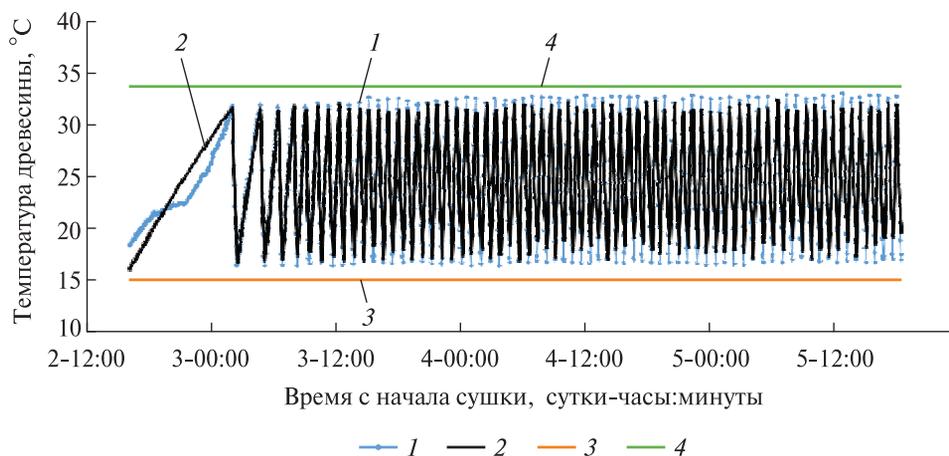
**Рис. 6.** Регрессионный анализ диапазона фазы II для температуры древесины (параметры функции:  $\tau_n = 35,3$  °C;  $\tau_y = 42$  °C;  $T_n = 1250,41$  мин по 318 из 319 точек;  $R^2 = 0,9145$ )

**Fig. 6.** Regression analysis on the phase II range for wood temperature (function parameters:  $\tau_n = 35,3$  °C;  $\tau_y = 42$  °C;  $T_n = 1250,41$  min at 318 of 319 points;  $R^2 = 0,9145$ )



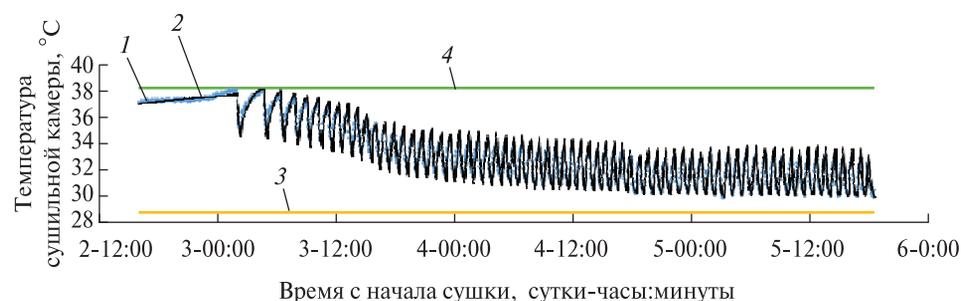
**Рис. 7.** Регрессионный анализ диапазона фазы II для температуры сушильной камеры (параметры функции:  $\tau_n = 33,5$ °C;  $\tau_y = 40$ °C;  $T_n = 1228,44$  мин по 308 из 319 точек;  $R^2 = 0,9048$ )

**Fig. 7.** Regression analysis on the phase II range for the temperature of the drying chamber (function parameters:  $\tau_n = 33,5$ °C;  $\tau_y = 40$ °C;  $T_n = 1228,44$  min at 308 of 319 points;  $R^2 = 0,9048$ )



**Рис. 8.** Регрессионный анализ диапазона фазы III для температуры древесины (параметры модели:  $\tau_y = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $38,8 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $R^2 = 0,9211$ ; предсказательный интервал  $39,96 \pm 1,288 \text{ }^\circ\text{C}$  на уровне значимости 5 %); *здесь и на рис. 9:* 1 — опыт; 2 — теория; 3 — нижняя граница (5 %); 4 — верхняя граница (5 %)

**Fig. 8.** Regression analysis in the phase III range for wood temperature (model parameters:  $\tau_y = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $38,8 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $R^2 = 0,9211$ ; predictive interval  $39,96 \pm 1,288 \text{ }^\circ\text{C}$  at a significance level of 5 %); *here and in Fig. 9:* 1 — experience; 2 — theory; 3 — lower bound (5%); 4 — upper bound (5%)



**Рис. 9.** Регрессионный анализ диапазона фазы III для температуры сушильной камеры (параметры модели:  $\tau_y = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $29,75 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $R^2 = 0,9864$ ; предсказательный интервал  $33,49 \pm 4,775 \text{ }^\circ\text{C}$  на уровне значимости 5 %)

**Fig. 9.** Regression analysis on the phase III range for the temperature of the drying chamber (model parameters:  $\tau_y = 38,5 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $29,75 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $R^2 = 0,9864$ ; predictive interval  $33,49 \pm 4,775 \text{ }^\circ\text{C}$  at a significance level of 5 %)

В связи с этим в дальнейших расчетах значение  $T_n$  сначала будет рассчитываться по всему диапазону данных, а затем с конца будут последовательно удалять слагаемые до тех пор, пока коэффициент детерминации  $R^2$  не начнет уменьшаться. Полученное таким образом значение  $T_n$  можно использовать в дальнейших расчетах.

Поскольку количество исходных опытных точек для превышения температуры достаточно велико, оценка доверительной и предсказательной областей не проводится.

Результаты регрессионного анализа по диапазонам фаз I и II приведены на рис. 4–7.

На фазе III отмечаются явно выраженные колебания температуры, обусловленные преры-

вистым режимом сушки. Отталкиваясь от допущения, что система автоматического управления осуществляет включения и отключения постоянного нерегулируемого нагревателя по достижении температуры уставки теплового реле (с непостоянными временными интервалами), целесообразно выполнить разделение набора точек фазы III на поддиапазоны. Общий объем набора данных фазы III составляет 1489 точек. Разделение на поддиапазоны выполнялось в электронных таблицах следующим образом:

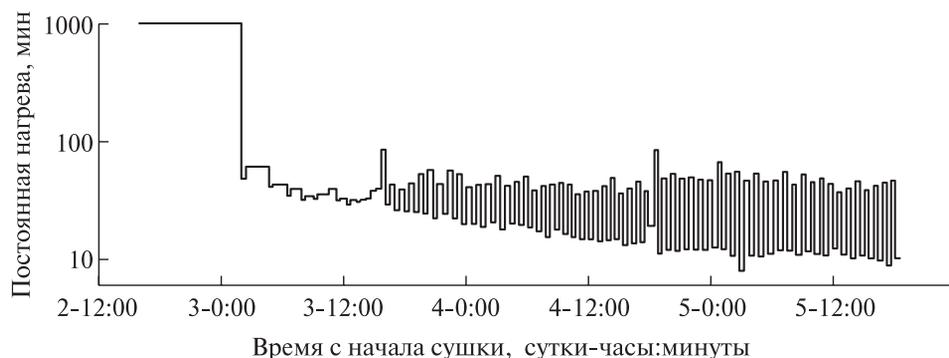
1) к набору данных добавили новый столбец, значения в котором могут принимать +1 или -1;

2) значение +1 для точки присваивается, если температура в данной точке превышает



**Рис. 10.** Расчетные значения постоянной нагрева  $T_n$  по периодам с включенным и отключенным нагревателем для древесины по поддиапазнам фазы III

**Fig. 10.** Values of the heating constant  $T_n$  for wood in the sub-ranges of phase III



**Рис. 11.** Расчетные значения постоянной нагрева  $T_n$  по периодам с включенным и отключенным нагревателем для сушильной камеры по поддиапазнам фазы III

**Fig. 11.** Values of the heating constant  $T_n$  for the drying chamber in the sub-ranges of phase III

температуру предыдущей точки; значение  $-1$  для точки присваивается, если температура в данной точке ниже температуры предыдущей точки;

3) первой точке присвоено значение  $+1$  вручную;

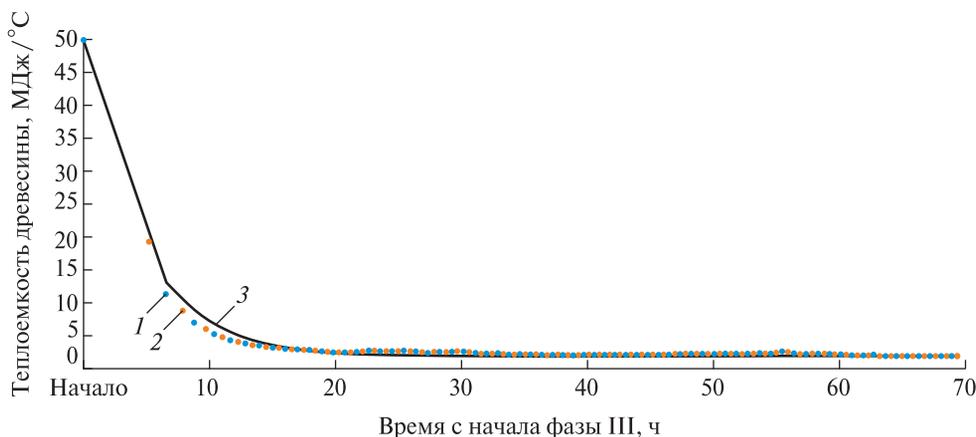
4) полученные результаты просматривались на предмет возможных выбросов под влиянием случайных факторов — для таких точек значение столбца изменялось вручную.

Таким образом, есть возможность разделить 1489 исходных точек набора данных диапазона фазы III на 136 поддиапазонов с наборами данных объемом от 7 до 199 точек. На каждом поддиапазоне принималось одинаковое значение  $\tau_y$ . Начальное значение  $\tau_n$  принималось по первой точке соответствующего диапазона. Поскольку некоторые из поддиапазонов малы по объему набора данных, никакие точки не исключались, ошибку вычислений в первой

точке набора данных устранили путем введения добавочного уменьшения  $\tau_n$  на величину  $0,01$  °C. Подобная манипуляция не вносит существенной погрешности в вычисления, однако позволяет сохранить весь набор точек поддиапазона для расчетов.

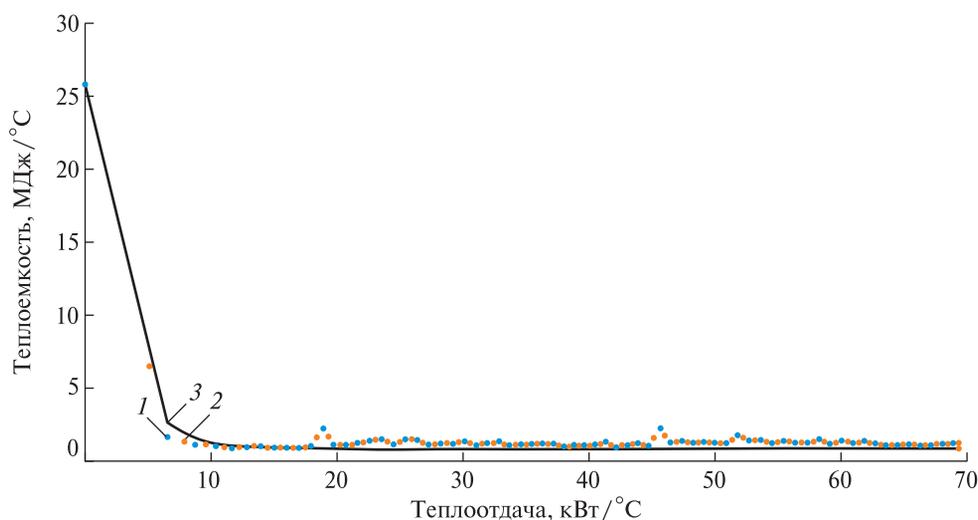
Результаты регрессионного анализа по данной модели для диапазона фазы III приведены на рис. 8–11. Для кривых нагрева на рис. 8 и 9 выделены предсказательные интервалы на уровне значимости 5 % (при соблюдении условий повторяемости и воспроизводимости 95 % всех возможных значений с учетом будущих укладывается в границы данного интервала). Установившиеся значения температуры указаны для поддиапазонов с включенным и отключенным нагревателем различно.

Как видно, в диапазоне фазы III температура древесины изменяется на всем диапазоне в узком интервале ( $\pm 1,288$ °C), что позволяет



**Рис. 12.** Динамика теплоемкости древесины (теоретическое моделирование при  $C_n = 49,807$  МДж/°С;  $C_y = 1,915$  МДж/°С;  $B = 4,528$  ч по 29 точкам из 136;  $R^2 = 0,9991$ : 1 — включено; 2 — отключено; 3 — теория

**Fig. 12.** Dynamics of the heat capacity of wood (theoretical modeling at  $C_n = 49,807$  MJ/°C;  $C_y = 1,915$  MJ/°C;  $B = 4,528$  h at 29 points out of 136;  $R^2 = 0,9991$ ): 1 — enabled; 2 — disabled; 3 — theory



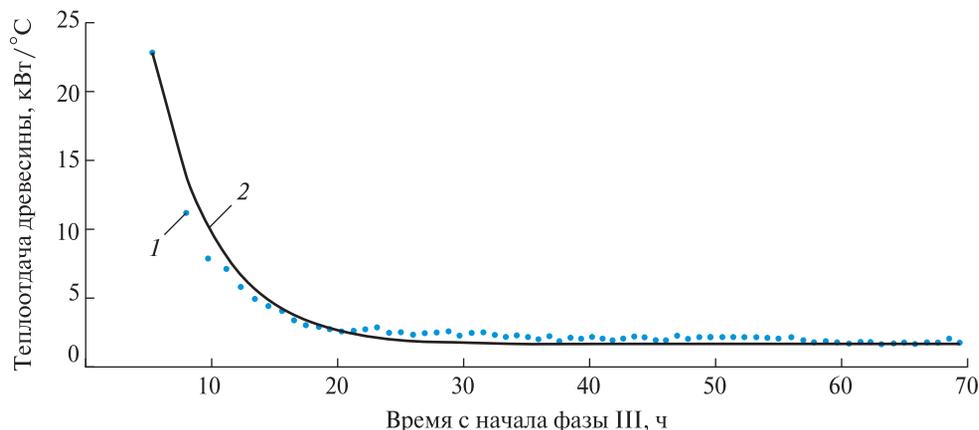
**Рис. 13.** Динамика теплоемкости сушильной камеры (теоретическое моделирование при  $C_n = 25,705$  МДж/°С;  $C_y = 0,8249$  МДж/°С;  $B = 2,458$  ч по 11 точкам из 136;  $R^2 = 0,9471$ ): 1 — включено; 2 — отключено; 3 — теория

**Fig. 13.** Dynamics of the heat capacity of the drying chamber (theoretical modeling at  $C_n = 25,705$  MJ/°C;  $C_y = 0,8249$  MJ/°C;  $B = 2,458$  h at 11 points out of 136;  $R^2 = 0,9471$ ): 1 — enabled; 2 — disabled; 3 — theory

предположить достижение квазистационарного теплового режима. Вместе с тем в сушильной камере в целом предсказательный интервал достаточно широкий ( $\pm 4,775^\circ\text{C}$ ), однако с периода 3-х сут. 18:00 ч колебания температуры становятся похожими на квазистационарный тепловой режим. Эти же наблюдения подтверждаются (рис. 12, 13): колебания постоянной нагрева  $T_n$  по древесине слабы после момента времени 3-х сут. 15:00 ч и могут быть объяснены влиянием случайной ошибки; это же

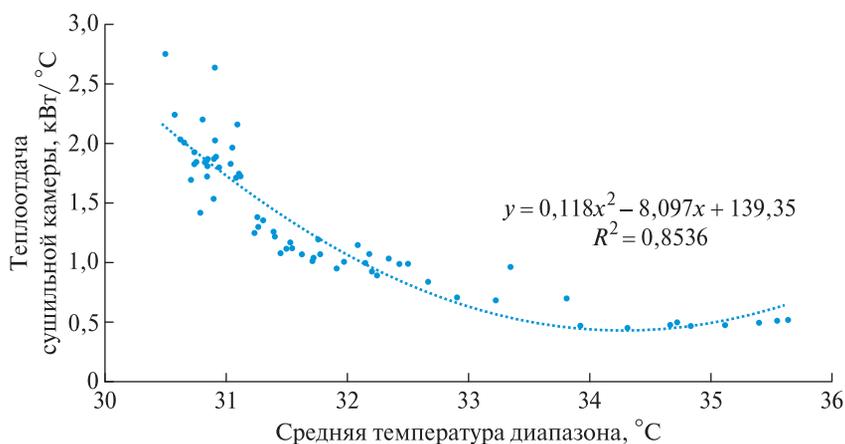
справедливо для постоянной нагрева по сушильной камере после момента времени 4-х сут. 16:00 ч.

Гипотезу можно сформулировать следующим образом: окончание процессов теплообмена с переходом режимы работы установки в квазистационарный тепловой режим происходит до завершения фактического периода сушки. Для проверки этого необходимо оценить динамику теплоемкости и теплоотдачи в процессе сушки [32, 33].



**Рис. 14.** Динамика теплоотдачи древесины (теоретическое моделирование при  $A_n = 22,87$  кВт/°С;  $A_y = 1,672$  кВт/°С;  $B = 4,89$  ч по 14 точкам из 68;  $R^2 = 0,9533$ ): 1 — опыт; 2 — теория

**Fig. 14.** Dynamics of heat transfer of wood (theoretical modeling at  $A_n = 22,87$  kW/°C;  $A_y = 1,672$  kW/°C;  $B = 4,89$  h at 14 points out of 68;  $R^2 = 0,9533$ ): 1 — experience; 2 — theory



**Рис. 15.** Взаимосвязь между теплоотдачей сушильной камеры и средними значениями температуры по поддиапазонам с отключенным нагревателем

**Fig. 15.** The relationship between the heat transfer of the drying chamber and the average temperatures in the sub-ranges with the heater turned off

В целях оценки значений теплоемкости и теплоотдачи было сделано следующее (на примере древесины):

1) принимая температуру окружающей среды за 14 °С, выполнили расчет фактического превышения температуры (например, по древесине — 36 °С), если из модели известны установившиеся значения температуры для поддиапазонов с включенным нагревателем;

2) нагревателями выступают щиты пленочных нагревателей с известной мощностью 10,8 кВт;

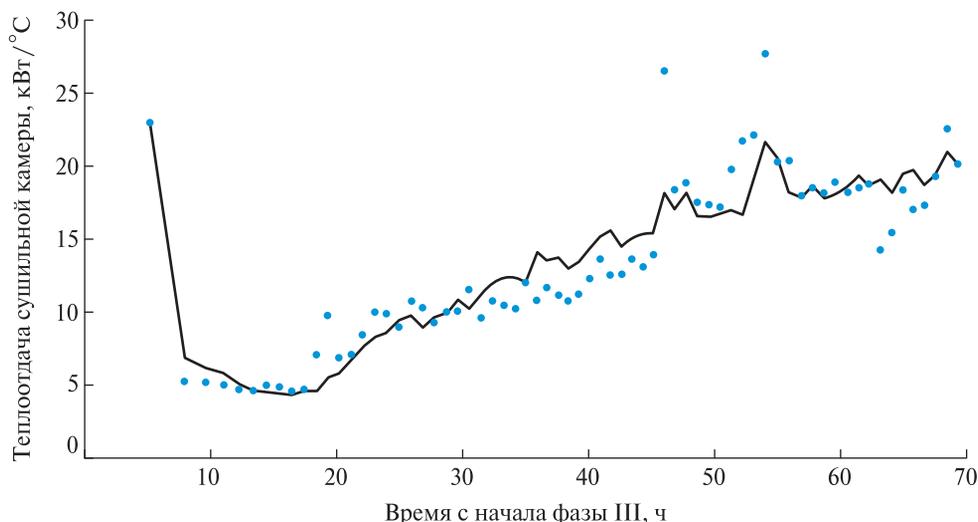
3) значение теплоотдачи оценивали по формуле

$$A = \frac{P}{\tau_y},$$

т. е. теплоотдача не изменяется во времени для периодов с включенным нагревателем;

4) значение теплоемкости оценивали по формуле  $C = AT_n$  на каждом из 68 поддиапазонов с включенным нагревателем;

5) выявили поддиапазон с отключенным нагревателем, для которого не может быть резких колебаний теплоемкости, находящийся между двумя смежными поддиапазонами с включенным нагревателем;



**Рис. 16.** Динамика теплоотдачи сушильной камеры ( $A_n = 2,288$  кВт/°C;  $B = 0,75$  ч; коэффициент детерминации модели  $R^2 = 0,8588$ ): 1 — опыт; 2 — теория  
**Fig. 16.** Dynamics of heat transfer of the drying chamber ( $A_n = 2,288$  kW/°C;  $B = 0,75$  h; coefficient of determination of the model  $R^2 = 0,8588$ ): 1 — experience; 2 — theory

б) выполнили расчет значения теплоемкости на поддиапазонах с отключенным нагревателем с помощью линейной аппроксимации от значений теплоемкости на смежных поддиапазонах с включенным нагревателем с учетом продолжительности этих поддиапазонов;

7) оценили естественную теплоотдачу (без учета искажения конвективных потоков за счет теплового возмущения от нагревателя) по известным теплоемкости и постоянных нагрева для поддиапазонов с отключенным нагревателем.

Результаты определения теплоемкости древесины и сушильной камеры, а также теплоотдачи древесины приведены на рис. 12–16. На расчетные точки наложена функция вида

$$C(t) = C_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{B}} \right) + C_n e^{-\frac{t}{B}}, \quad (7)$$

где  $C$  — теплоемкость;

$C_y$  — предельное значение теплоемкости, Дж/°C;

$C_n$  — начальное значение теплоемкости, Дж/°C;

$B$  — постоянная времени, ч.

$$A(t) = A_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{B}} \right) + A_n e^{-\frac{t}{B}}, \quad (8)$$

где  $A_y$  — предельное значение теплоотдачи, Вт/°C;

$A_n$  — начальное значение теплоотдачи, Вт/°C;

$B$  — постоянная времени, ч.

Т а б л и ц а 8

**Завершение массообменных процессов на уровне 1 %**

**Completion of mass transfer processes at level 1 %**

Процессы	По параметрам древесины	По параметрам сушильной камеры
Для теплоемкости	3-е сут. 17:51 ч	3-е сут. 13:21 ч
Для теплоотдачи	4-е сут. 00:45 ч	3-е сут. 05:29 ч

Расчет постоянной  $B$  выполнен аналогично расчету  $T_n$  по формуле (6).

Для теплоотдачи сушильной камеры применена иная модель. В частности, учтено, что за счет колебаний температуры нагретого тела коэффициент конвективного теплообмена может существенно изменяться.

Таким образом, сначала была установлена взаимосвязь между теплоотдачей сушильной камеры и средними значениями температуры поддиапазонов с отключенным нагревателем (см. рис. 15) предполагалось, что процессы тепломассообмена не оказывают существенного влияния, в связи с чем исключена первая точка из общего количества — 68.

Для моделирования была применена зависимость вида

$$A(t) = (A_n - f(\tau_0)) e^{-\frac{t}{B}} + f(\tau_{ND}), \quad (9)$$

где  $f(\tau_{ND})$  — полиномиальная функция теплоотдачи от средних температур на поддиапазонах;

$f(\tau_0)$  — поправка теплоотдачи на начальную температуру.

На основании полученных зависимостей и с учетом того факта, что функция вида  $e^{-x}$  асимптотически приближается к установившемуся значению, можно оценить время окончания процессов теплообмена, предположив, что изменением значения менее 1 % можно пренебречь.

По данным табл. 8 видно, что фактически процессы теплообмена можно считать завершившимися с момента времени 4-х сут. 00:45 ч, тогда как работа сушильной камеры продолжалась до 5 сут. 18:33 ч. Это объясняется тем, что для установления желаемой абсолютной величины влагосодержания в древесине необходимо создать равновесные условия в камере, а именно: стабилизировать параметры относительной влажности и температуры воздуха. Стабилизация параметров в рассматриваемом эксперименте, т. е. продолжение работы сушилки, составило одни полные сутки и 18 ч, что несомненно увеличивает расход электрической энергии.

Применение камеры с разряженной средой (вакуум) является одним из вариантов снижения затрат электрической энергии и времени сушки в установке с применением пленочных электронагревателей [8].

## Выводы

Анализ экспериментальных кривых сушки, регрессионный анализ которых был проведен для диапазонов фаз I, II, III с полученными функциями для каждой из них позволяет в дальнейшем проводить математическое моделирование режимов сушки древесины в установке на основе пленочных электронагревателей.

Полученные кривые динамики изменения теплоемкости и теплоотдачи, функции которых позволяют оценивать завершение процессов теплообмена, могут позволить прогнозировать окончание фактического периода сушки в зависимости от установленной мощности пленочных электронагревательных элементов, рассчитанных на высушивание 1 м<sup>3</sup> древесины, а также в зависимости от их температуры нагрева, которая должна коррелироваться со спектральной характеристикой высушиваемого объекта [34–36].

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-01090, <https://rscf.ru/project/23-76-01090/>.*

## Список литературы

- [1] Деянов Д.И., Косарин А.А., Моисеев С.А., Курьшов Г.Н. Импульсная сушка заготовок из древесины ироко, мербау и венге в конвективной сушильной камере // Лесной вестник / ForestryBulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 143–149. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-143-149
- [2] Моисеев С.А., Деянов Д.И., Косарин А.А., Курьшов Г.Н. Импульсная сушка заготовок из древесины красного и черного дерева в конвективных сушильных камерах // Лесной вестник / ForestryBulletin, 2022. Т. 26. № 5. С. 112–119. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-112-119
- [3] Косарин А.А., Курьшов Г.Н. Импульсные режимы сушки для заготовок из древесины ироко // Научные труды Московского государственного университета леса, 2011. № 353. С. 27.
- [4] Косарин А.А., Курьшов Г.Н., Красухина Л.П., Петяйкина Е.Г. Сушка американского ореха импульсными режимами // Научные труды Московского государственного университета леса, 2015. № 377. С. 91.
- [5] Чернышев А.Н., Ефимова Т.В. Исследование процесса сушки древесины вишни и черешни без искусственного увлажнения в конвективных сушильных камерах периодического действия // Лесотехнический журнал, 2012. №2(6). С. 47–53.
- [6] Skarbalius G., Džiugys A., Navakas R. A novel method for convective drying rate estimation in a deep fixed porous material bed // Powder Technology, 2022, v. 404, p. 117499. DOI:10.1016/j.powtec.2022.117499
- [7] Левинский В.Н., Филатов М.В. К вопросу об ИК-сушке массивных спилов из ценных пород древесины // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК, 2023. № 2(18). С. 20–26.
- [8] Levinskiy V.N. Comparative experiment on the use of a film electric heater for drying wood in vacuum conditions // BIO Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference «Methods for Synthesis of New Biologically Active Substances and Their Application in Various Industries of the World Economy – 2023» (MSNBAS2023). Les Ulis, 2024, p. 05025.
- [9] Поляков С.И., Лубков В.О. Совершенствование автоматизированного управления роликовой сушилкой для сушки шпона // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2018. Т. 6. № 4(40). С. 361–366.
- [10] Дунаев А.М., Дунаев М.П. Автоматизированная система научных исследований технологического процесса сушки древесины // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2019. Т. 23. № 3(146). С. 443–450.
- [11] Манасян С.К., Демский Н.В., Лунева Т.А., Манасян М.С., Куликов Н.Н. Моделирование и оптимизация процессов сушки // Вестник КрасГАУ, 2010. № 12(51). С. 128–133.
- [12] Аипов Р.С., Тухватуллин М.И., Яруллин Р.Б., Кабашов В.Ю. Математическая модель процесса сушки пиломатериалов при дискретном расположении источников СВЧ-энергии // Вестник Башкирского государственного аграрного университета, 2019. № 2(50). С. 82–88. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-82-89

- [13] Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zaytsev V.A. Modeling of the deep drying process of granulated polyamide at convective-infrared energy sub-supply // *ChemChem-Tech*, 2019, t. 62, no. 12, pp. 94–100.
- [14] Андрианов Н.М., Мэй Ш., Сюе Ю. Идентификация шахтной зерносушилки в условиях нормальной работы // *Фундаментальные исследования*, 2015. № 2–16. С. 3459–3465.
- [15] Захахатнов В.Г., Кашин П.В., Коковин Г.Д. Планирование эксперимента по исследованию времени сушки зерна в шахтной сушилке // *АПК России*, 2018. Т. 25. № 3. С. 400–404.
- [16] Афонькина В.А., Захахатнов В.Г., Майоров В.И., Попов В.М. К вопросу управления процессом комбинированной сушки зерна // *Вестник Мордовского университета*, 2016. Т. 26. № 1. С. 32–33. DOI: 10.15507/0236-2910.026.201601.032-039
- [17] Захахатнов В.Г., Кашин П.В. Определение начальной влажности зерна при сушке по времени его нагрева // *Вестник ВИЭСХ*, 2018. № 1(30). С. 33–37.
- [18] Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е. Особенности теплообмена при сушке пиломатериалов бесступенчатыми режимами // *Хвойные бореальной зоны*, 2019. Т. 37. № 2. С. 139–143.
- [19] Епишков Е.Н., Ткачев А.Н., Баженова С.В. Математическая модель распределения температуры по поверхности пленочного электронагревателя с токоведущей частью в виде ленты из высокоомного материала // *Современная техника и технологии в электроэнергетике и на транспорте: задачи, проблемы, решения: сб. трудов VI Всерос. (нац.) науч.-практ. конф., Челябинск, 25 января 2022 г. Челябинск: Изд-во Южно-Уральского технологического университета*, 2022. С. 10–17.
- [20] Косарин А.А. Технология импульсной сушки пиломатериалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2012.
- [21] Попов В.М., Афонькина В.А., Шукшина Е.И. Способ сушки древесины. Пат. № 2514576 РФ, МПК F26B 3/34 F26B 3/353, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия», № 2012134370/06; заявл. 08.10.2012; опубл. 27.04.2014. Бюл. № 12.
- [22] Епишков Н.Е., Епишков Е.Н., Глухов С.В., Зверев А.Л., Паламарчук В.П. Способ сушки древесины. Пат. № 2367861 РФ, МПК F26B 3/20, № 2008111441/06; заявл. 24.03.2008; опубл. 20.09.2009
- [23] Колобаева А.А., Котик О.А., Панина Е.В., Чернышова К.Д. Исследование кинетики сушки растительного сырья // *Технология и товароведение сельскохозяйственной продукции*, 2021. № 2(17). С. 154–160
- [24] Рудобашта С.П., Дорняк О.Р., Дмитриев В.М. Расчет кинетики сушки пластины с учетом ее усадки // *Теоретические основы химической технологии*, 2021. Т. 55. № 5. С. 612–617. DOI: 10.31857/S004035712104014X
- [25] Изяков Ф.Я. Планирование эксперимента и обработка опытных данных. Челябинск: Изд-во Челябинского ГАУ, 2003. 103 с.
- [26] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
- [27] Рудак О.Г. Исследование параметров технологии начального прогрева древесины в ненасыщенной среде // *Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*, 2021. № 2(246). С. 268–276.
- [28] Протасов С.К., Матвейко Н.П., Боровик А.А. Исследование кинетики сушки слоя капиллярно-пористого дисперсного материала // *Химическая промышленность*, 2019. Т. 96. № 2. С. 87–94.
- [29] Стородубцева Т.Н., Томилин А.И. Исследование водопоглощения древесины лиственных и хвойных пород, результаты испытаний // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*, 2013. № 5. С. 331–336.
- [30] Артемов И.Н. Использование уравнений регрессии для входящего и выходящего потока сушильного агента для экспериментальной сушильной камеры конденсационного типа // *Инновации и инвестиции*, 2022. № 2. С. 152–154.
- [31] Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А. ИК-сушка пластины в непрерывно действующем электромагнитном поле // *Инженерно-физический журнал*, 2022. Т. 95. № 2. С. 364–372.
- [32] Зарипов Ш.Г., Чижов А.П., Корниенко В.А., Семенова Н.И. Влияние водорастворимых веществ на распределение влажности в листовых пиломатериалах перед сушкой // *ИЗВУЗ Лесной журнал*, 2019. № 6 (372). С. 185–193.
- [33] Мизинов В.Е., Митрофанов А.В., Tannous K., Овчинников Л.Н. Расчетно-экспериментальное исследование гранулирования в реакторе с кипящим слоем // *Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология*, 2019. Т. 62. № 5. С. 97–103.
- [34] Levinskiy V.N. Spectral analysis of various types of wood as the basis of low-temperature drying technology in vacuum conditions // *BIO Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference «Methods for Synthesis of New Biologically Active Substances and Their Application in Various Industries of the World Economy – 2023» (MSNBAS2023). Les Ulis*, 2024. С. 05026.
- [35] Меркелов В.М., Романов В.А., Михеенко В.В. Программа выбора коэффициентов для расчета тепловых потерь через ограждения лесосушильных камер // *Актуальные проблемы лесного комплекса*, 2014. № 40. С. 82–85.
- [36] Попов В.М., Афонькина В.А., Шукшина Е.И. Сушка термолабильных культур в ИК-диапазоне с учетом оптических свойств продукта // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*, 2012. № 37(296). С. 90–92.

## Сведения об авторах

**Левинский Василий Николаевич**  — канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», lv\_74rus@mail.ru

**Уразов Сергей Игоревич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», eskaton@mail.ru

**Афонькина Валентина Александровна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет», afva82@mail.ru

Поступила в редакцию 02.04.2024.

Одобрено после рецензирования 13.09.2024.

Принята к публикации 19.11.2024.

## REGRESSION ANALYSIS OF IR WOOD DRYING PROCESS IN INSTALLATION USING MEMBRANOUS ELECTRIC HEATERS

V.N. Levinsky , S.I. Urazov, V.A. Afon'kina

South Ural State Agrarian University, 13, Gagarin st., 457103, Troitsk, Chelyabinsk reg., Russia

Lv\_74rus@mail.ru

The analysis of the problems of creating automatic control systems for drying plants based on low-temperature infrared generators, which are gaining popularity, is presented. The methods and means of obtaining a mathematical model of infrared drying of wood using film electric heaters developed by scientists of the Institute of Agroengineering of the South Ural State Agrarian University of Chelyabinsk are described. The description of an experimental drying plant and an automatic control system for the drying process with the function of archiving all indicators of technological parameters necessary to obtain dynamic temperature and humidity curves is given. The article uses the method of correlation and regression analysis to establish a relationship between the parameters of the technological process of drying pine lumber. Natural experiments on low-temperature drying of pine boards stacked have been carried out, according to the results of which the correspondence of the obtained temperature and humidity-time dependences with the kinetic curves of the known drying theory has been determined. A detailed regression analysis was performed based on the obtained data set of the main drying parameters (time, temperature and humidity in the chamber, wood temperature). The effective splitting of the drying kinetics curve into 3 sub-ranges is proved, characterized by their own thermal dynamics parameters, the mathematical models of which became the basis for the algorithms of an intelligent automatic control system. Practical recommendations have been developed on the organization of infrared drying of lumber, the creation and adjustment of automatic control systems. Based on the dynamic characteristics of the dryer as a result of new knowledge, it is possible to determine the type and settings of the regulators through the transmission functions of the ACS. The hypothesis is confirmed that the end of mass transfer processes with the transition of the installation to a quasi-stationary thermal regime occurs before the end of the actual drying period.

**Keywords:** IR drying, wood, mathematical model, regression analysis, film electric heater

**Suggested citation:** Levinskiy V.N., Urazov S.I., Afon'kina V.A. *Regressionnyy analiz protsessa infrakrasnoy sushki drevesiny v ustanovke s primeneniem plenochnykh elektronagrevateley* [Regression analysis of IR wood drying process in installation using membranous electric heaters]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 126–143. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-126-143

## References

- [1] Deyanov D.I., Kosarin A.A., Moiseev S.A., Kuryshov G.N. Impul'snaya sushka zagotovok iz drevesiny iroko, merbau i wenge v konvektivnoy sushil'noy kamere [Impulse drying of african teak, merbau and wenge wood blanks in a convection drying chamber]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 143–149. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-143-149

- [2] Moiseev S.A., Deyanov D.I., Kosarin A.A., Kuryshov G.N. Impul'snaya sushka zagotovok iz drevesiny krasnogo i chernogo dereva v konvektivnykh sushil'nykh kamerakh [Redwood and ebony blanks impulse convective drying]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 112–119. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-5-112-119
- [3] Kosarin A.A., Kuryshov G.N. *Impul'snye rezhimy sushki dlya zagotovok iz drevesiny iroko* [Pulse drying modes for iroko wood blanks]. *Nauchnye trudy Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa* [Scientific works of the Moscow State Forest University], 2011, no. 353, p. 27.
- [4] Kosarin A.A., Kuryshov G.N., Krasukhina L.P., Petyaykina E.G. *Sushka amerikanskogo orekha impul'snymi rezhimami* [Drying of American walnut using pulse modes]. *Nauchnye trudy Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa* [Scientific works of Moscow State Forest University], 2015, no. 377, p. 91.
- [5] Chernyshev A.N., Efimova T.V. *Issledovanie protsessa sushki drevesiny vishni i chereshni bez iskusstvennogo uvlazhneniya v konvektivnykh sushil'nykh kamerakh periodicheskogo deystviya* [Investigation of the drying process of cherry and cherry wood without artificial humidification in convective drying chambers of periodic action]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry J.], 2012, no. 2(6), pp. 47–53.
- [6] Skarbalius G., Džiugys A., Navakas R. A novel method for convective drying rate estimation in a deep fixed porous material bed. *Powder Technology*, 2022, v. 404, p. 117499. DOI:10.1016/j.powtec.2022.117499
- [7] Levinskiy V.N., Filatov M.V. *K voprosu ob IK-sushke massivnykh spilov iz tsennykh porod drevesiny* [On the issue of IR drying of massive cuts from valuable wood species]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik: Tekhnicheskie sistemy v APK* [Scientific and technical bulletin: Technical systems in agriculture], 2023, no. 2(18), pp. 20–26.
- [8] Levinskiy V.N. Comparative experiment on the use of a film electric heater for drying wood in vacuum conditions. *BIO Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference «Methods for Synthesis of New Biologically Active Substances and Their Application in Various Industries of the World Economy – 2023» (MSNBAS2023)*. Les Ulis, 2024, p. 05025.
- [9] Polyakov S.I., Lubkov V.O. *Sovershenstvovanie avtomatizirovannogo upravleniya rolikovoy sushilkoy dlya sushki shpona* [Improvement of automated control of a roller dryer for drying veneer]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice], 2018, v. 6, no. 4(40), pp. 361–366.
- [10] Dunaev A.M., Dunaev M.P. *Avtomatizirovannaya sistema nauchnykh issledovaniy tekhnologicheskogo protsessa sushki drevesiny* [Automated system of scientific research of the technological process of wood drying]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2019, v. 23, no. 3(146), pp. 443–450.
- [11] Manasyan S.K., Demskiy N.V., Luneva T.A., Manasyan M.S., Kulikov N.N. *Modelirovanie i optimizatsiya protsessov sushki* [Modeling and optimization of drying processes]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2010, no. 12(51), pp. 128–133.
- [12] Aipov R.S., Tukhvatullin M.I., Yarullin R.B., Kabashov V.Yu. *Matematicheskaya model' protsessa sushki pilomaterialov pri diskretnom raspolozhenii istochnikov SVCh-energii* [A mathematical model of the drying process of lumber with a discrete arrangement of microwave energy sources]. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Bashkir State Agrarian University], 2019, no. 2(50), pp. 82–88. DOI: 10.31563/1684-7628-2019-50-2-82-89
- [13] Rudobashta S.P., Zueva G.A., Zaytsev V.A. Modeling of the deep drying process of granulated polyamide at convective-infrared energy sub-supply // *ChemChemTech*, 2019, t. 62, no. 12, pp. 94–100.
- [14] Andrianov N.M., Mey Sh., Syue Yu. *Identifikatsiya shakhtnoy zernosushilki v usloviyakh normal'noy raboty* [Identification of a mine grain dryer in conditions of normal operation]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2015, no. 2–16, pp. 3459–3465.
- [15] Zakhkhatnov V.G., Kashin P.V., Kokovin G.D. *Planirovanie eksperimenta po issledovaniyu vremeni sushki zerna v shakhtnoy sushilke* [Planning an experiment to study the drying time of grain in a mine dryer]. *APK Rossii* [Agroindustrial Complex of Russia], 2018, v. 25, no. 3, pp. 400–404.
- [16] Afon'kina V.A., Zakhkhatnov V.G., Mayorov V.I., Popov V.M. *K voprosu upravleniya protsessom kombinirovannoy sushki zerna* [On the issue of managing the process of combined grain drying]. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Bulletin of the Mordovian University], 2016, v. 26, no. 1, pp. 32–33. DOI: 10.15507/0236-2910.026.201601.032-039
- [17] Zakhkhatnov V.G., Kashin P.V. *Opreделение nachal'noy vlazhnosti zerna pri sushke po vremeni ego nagreva* [Determination of the initial moisture content of grain during drying by its heating time]. *Vestnik VIESKh* [Bulletin of RESCH], 2018, no. 1(30), pp. 33–37.
- [18] Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E. *Osobennosti teplomassoobmena pri sushke pilomaterialov besstupenchatymi rezhimami* [Features of heat and mass transfer during drying of sawn timber in stepless modes]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2019, v. 37, no. 2, pp. 139–143.
- [19] Epishkov E.N., Tkachev A.N., Bazhenova S.V. *Matematicheskaya model' raspredeleniya temperatury po poverkhnosti plenochnogo elektronagrevatelya s tokovedushchey chast'yu v vide lenty iz vysokoomnogo materiala* [Mathematical model of temperature distribution over the surface of a film electric heater with a current-carrying part in the form of a tape made of high-resistance material]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii v elektroenergetike i na transporte: zadachi, problemy, resheniya: sb. trudov VIVserossiyskoy (natsional'noy) nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern equipment and technologies in electric power engineering and transport: tasks, problems, solutions: collection of works of the VI All-Russian (national) scientific and practical conference, Chelyabinsk, January 25, 2022. Chelyabinsk: South Ural Technological University, 2022, pp. 10–17.
- [20] Kosarin A.A. *Tekhnologiya impul'snoy sushki pilomaterialov* [Technology of pulse drying of sawn timber]. Abstract Dis. Cand. Sci. (Tech.). Moscow, 2012.

- [21] Popov V.M., Afon'kina V.A., Shukshina E.I. *Sposob sushki drevesiny* [Method of drying wood]. Pat. № 2514576 RF, IPC F26B 3/34 F26B 3/353; applicant and patent holder of the Chelyabinsk State Agroengineering Academy, No. 2012134370/06, application 08.10.2012, publ. 27.04.2014, bul. no. 12.
- [22] Epishkov N.E., Epishkov E.N., Glukhov S.V., Zverev A.L., Palamarchuk V.P. *Sposob sushki drevesiny* [Method of drying wood]. Pat. № 2367861 RF, IPC F26B 3/20, no. 2008111441/06, application. 03.24.2008, publ. 20.09.2009.
- [23] Kolobaeva A.A., Kotik O.A., Panina E.V., Chernyshova K.D. *Issledovanie kinetiki sushki rastitel'nogo syr'ya* [Investigation of the kinetics of drying vegetable raw materials]. *Tekhnologiya i tovarovedenie sel'skokhozyaystvennoy produktii* [Technology and commodity science of agricultural products], 2021, no. 2 (17), pp. 154–160.
- [24] Rudobashta S.P., Dorniyak O.R., Dmitriev V.M. *Raschet kinetiki sushki plastiny s uchetom ee usadki* [Calculation of the kinetics of plate drying taking into account its shrinkage]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical foundations of chemical technology], 2021, v. 55, no. 5, pp. 612–617. DOI: 10.31857/S004035712104014X
- [25] Izyakov F.Ya. *Planirovanie eksperimenta i obrabotka opytnykh dannykh* [Planning an experiment and processing experimental data]. Chelyabinsk: Chelyabinsk State Agrarian University, 2003, 103 p.
- [26] Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Planning an experiment in searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976, 279 p.
- [27] Rudak O.G. *Issledovanie parametrov tekhnologii nachal'nogo progrevaya drevesiny v nenasyshchennoy srede* [Investigation of the parameters of the technology of initial heating of wood in an unsaturated environment]. *Trudy BGTU. Ser. 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodnopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемykh resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources], 2021, no. 2(246), pp. 268–276.
- [28] Protasov S.K., Matveyko N.P., Borovik A.A. *Issledovanie kinetiki sushki sloya kapillyarno-poristogo dispersnogo materiala* [Investigation of the kinetics of drying a layer of capillary-porous dispersed material]. *Khimicheskaya promyshlennost'* [Chemical industry], 2019, v. 96, no. 2, pp. 87–94.
- [29] Storodubtseva T.N., Tomilin A.I. *Issledovanie vodopogloshcheniya drevesiny listvennykh i khvoynnykh porod, rezul'taty ispytaniy* [Study of water absorption of deciduous and coniferous wood, test results]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2013, no. 5, pp. 331–336.
- [30] Artemov I.N. *Iskol'zovanie uravneniy regressii dlya vkhodyashchego i vykhodyashchego potoka sushil'nogo agenta dly aeksperimental'noy sushil'noy kamery kondensatsionnogo tipa* [Using regression equations for the incoming and outgoing flow of drying agent for an experimental condensation-type drying chamber]. *Innovatsii i investitsii* [Innovations and investments], 2022, no. 2, pp. 152–154.
- [31] Rudobashta S.P., Kartashov E.M., Zueva G.A. *IK-sushka plastiny v nepreryvno deystvuyushchem elektromagnitnom pole* [IR-drying of a plate in a continuously acting electromagnetic field]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* [Engineering and Physics journal], 2022, v. 95, no. 2, pp. 364–372.
- [32] Zaripov Sh.G., Chizhov A.P., Kornienko V.A., Semenova N.I. *Vliyaniye vodorastvorimykh veshchestv na raspredeleniye vlazhnosti v listvennichnykh pilomaterialakh pered sushkoy* [Influence of water-soluble substances on the distribution of moisture in larch sawn timber before drying]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2019, no. 6 (372), pp. 185–193.
- [33] Mizonov V.E., Mitrofanov A.V., Tannous K., Ovchinnikov L.N. *Raschetno-eksperimental'noe issledovanie granulirovaniya v reaktore s kipyashchim sloem* [Calculation and experimental study of granulation in a fluidized bed reactor]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series Chemistry and chemical technology], 2019, v. 62, no. 5, pp. 97–103.
- [34] Levinskiy V.N. Spectral analysis of various types of wood as the basis of low-temperature drying technology in vacuum conditions // BIO Web of Conferences. International Scientific and Practical Conference «Methods for Synthesis of New Biologically Active Substances and Their Application in Various Industries of the World Economy – 2023» (MSNBAS2023). Les Ulis, 2024. C. 05026.
- [35] Merkelov V.M., Romanov V.A., Mikheenko V.V. *Programma vybora koeffitsientov dlya rascheta teplovykh poter' cherez ograzhdeniya lesosushil'nykh kamer* [Program for selecting coefficients for calculating heat losses through the fences of timber drying chambers]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of the forest complex], 2014, no. 40, pp. 82–85.
- [36] Popov V.M., Afon'kina V.A., Shukshina E.I. *Sushka termolabil'nykh kul'tur v IK-diapazone s uchetom opticheskikh svoystv produkta* [Drying of thermolabile cultures in the IR range taking into account the optical properties of the product]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy], 2012, no. 37(296), pp. 90–92.

*The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-76-01090, <https://rscf.ru/project/23-76-01090/>.*

## Authors' information

**Levinskiy Vasiliy Nikolaevich** ✉ — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Energy Supply and Automation of Technological Processes, South Ural State Agrarian University, lv\_74rus@mail.ru

**Urazov Sergey Igorevich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Energy Supply and Automation of Technological Processes, South Ural State Agrarian University, eskaton@mail.ru

**Afon'kina Valentina Aleksandrovna** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Energy Supply and Automation of Technological Processes, South Ural State Agrarian University, afva82@mail.ru

Received 02.04.2024.

Approved after review 13.09.2024.

Accepted for publication 19.11.2024.

---

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОГО ПОСАДОЧНОГО МЕХАНИЗМА ДЛЯ СЕЯНЦЕВ С ЗАКРЫТОЙ КОРНЕВОЙ СИСТЕМОЙ В СРЕДЕ САПР С ПОЛНОРАЗМЕРНЫМ МАКЕТИРОВАНИЕМ СРЕДСТВАМИ 3D-ПЕЧАТИ

М.Н. Лысыч<sup>1</sup>✉, С.В. Малюков<sup>1</sup>, М.В. Шавков<sup>2</sup>, М.А. Гнусов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8

<sup>2</sup>ООО «Русгидроком (РГК)», Россия, 394040, г. Воронеж, ул. Мазлумова, д. 25

miklynea@yandex.ru

Приведено обоснование необходимости разработки и применения посадочных машин для саженцев с закрытой корневой системой. Проанализированы существующие методы моделирования кинематики и динамики посадочных аппаратов с использованием CAD- и CAE-систем, а также методы моделирования процессов взаимодействия рабочих органов посадочных машин с почвенной средой. Изложено описание общей концепции разрабатываемой посадочной машины для саженцев с закрытой корневой системы. Разработана имитационная модель посадочного механизма в программном комплексе CAD SolidWorks и CAE SolidWorks Motion. Исследован рабочий процесс посадочного механизма на виртуальном стенде, реализованном в этой же программной среде. Получена группа параметров, необходимых для оценки работоспособности посадочного механизма, в частности: моменты сил виртуальных двигателей привода посадочного аппарата и зарядного устройства; силы, возникающие на виртуальных пружинах посадочного конуса и стакана зарядного барабана; сила контакта кулачка с роликом; величина раскрытия посадочных конусов. Выполнено моделирование процесса взаимодействия посадочных конусов с почвенной средой методом дискретных элементов. Разработан полноразмерный макетный образец с использованием 3D-печати, позволивший подтвердить полученные в результате моделирования силовые характеристики по такому ключевому параметру, как крутящий момент, требующийся для привода посадочного аппарата и зарядного устройства. Подтверждена правильность выбранных в процессе проектирования кинематических параметров механизма.

**Ключевые слова:** посадочный аппарат, закрытая корневая система, имитационное моделирование, 3D CAD, MBD, DEM, 3D-печать

**Ссылка для цитирования:** Лысыч М.Н., Малюков С.В., Шавков М.В., Гнусов М.А. Исследование полуавтоматического посадочного механизма для сеянцев с закрытой корневой системой в среде САПР с полноразмерным макетированием средствами 3D-печати // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 144–161. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-144-161

В настоящее время в мире наблюдается устойчивая тенденция увеличения количества площадей лесовосстановления с применением сеянцев и саженцев с закрытой корневой системой (ЗКС), коснувшаяся и России. Однако несмотря на очевидные преимущества ЗКС, значительный спектр почвенно-климатических условий вызывает некоторые опасения эффективности широкого внедрения этой технологии. Количество питомников, способных выращивать посадочный материал в требуемых объемах и фактически при полном отсутствии средств механизации для посадки сеянцев и саженцев с ЗКС, пока недостаточно. Согласно правилам лесовосстановления в РФ к 2025 г. не

менее 30 % площадей искусственного и комбинированного лесовосстановления следует обеспечить посадкой сеянцев и саженцев с ЗКС, для чего ведется развитие соответствующей сети питомников [1–3].

В связи с этим актуальность приобрела разработка посадочных машин, способных обеспечить столь значительные объемы лесовосстановления. Рассмотрим конструкции посадочных машин с рабочими органами в виде раскрывающихся в почве конусов, получившие наибольшее распространение для посадки лесных и сельскохозяйственных растений с ЗКС. Исследованию подобных конструкций посвящено достаточно много работ зарубежных авторов [4–16]. В России это направление исследований пока не получило широкого развития [17].

Предлагаем оригинальную концепцию посадочной машины для сеянцев и саженцев с ЗКС, отличающуюся работоспособностью и стабильным процессом рядной посадки.

## Цель работы

Цель работы — определение кинематических и динамических характеристик посадочного механизма для саженцев с ЗКС методами имитационного моделирования и полноразмерного макетирования с использованием 3D-печати.

## Материалы и методы

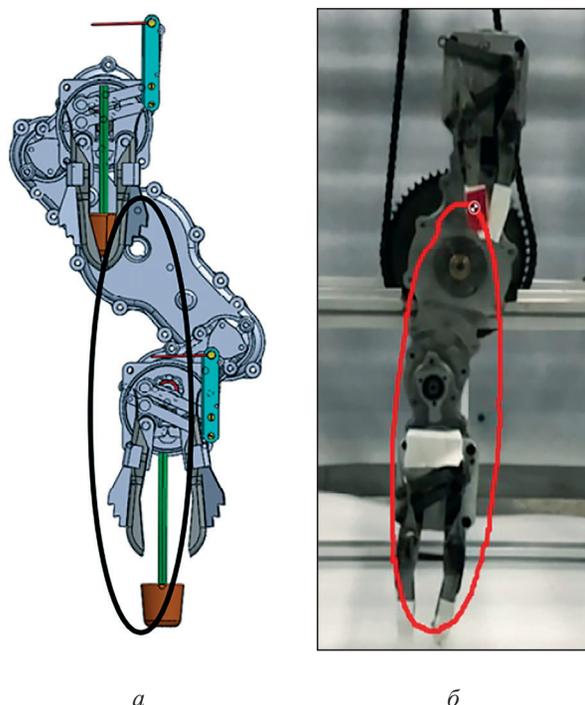
**Методы моделирования кинематики и динамики посадочных аппаратов с использованием CAD- и CAE-систем** (CAD — Computer-Aided Design — автоматизированная система проектирования; CAE — Computer-Aided Engineering — система обеспечения инженерных расчетов).

При проектировании многозвенных посадочных механизмов сложность вызывает их кинематическая составляющая. Для моделирования динамики многотельных систем (MBD — Multibody Dynamics — динамика многотельных систем) требуется применение 3D CAD-систем и CAE-программ. Этот подход в области разработки и испытания различных посадочных машин широко используется за рубежом.

В исследовании, посвященном оптимизации параметров многозвенного посадочного механизма полуавтоматической рассадопосадочной машины, было использовано специализированное MBD-приложение RecurDyn V8R5. Обладая расширенным функционалом, оно требует экспорта модели из 3D CAD через промежуточные форматы [18–20].

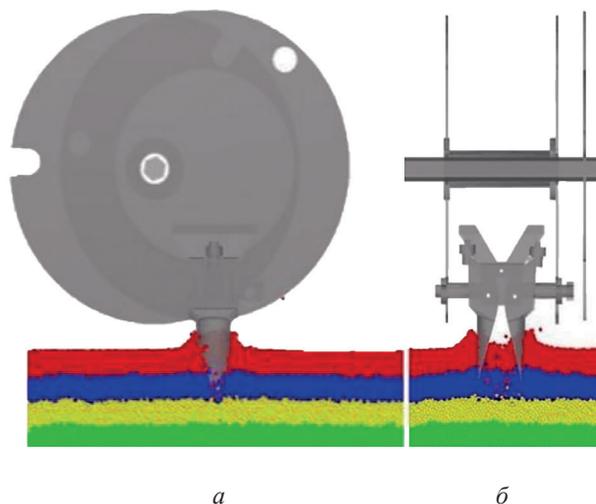
Достаточно много аналогичных исследований по обоснованию параметров посадочных механизмов выполнено с использованием MBD-приложения ADAMS, где также требуется экспорт модели из сторонних 3D CAD [21–24].

При исследовании кинематики конусного посадочного аппарата была использована связка 3D CAD SolidWorks и CAE SolidWorks Motion (рис. 1) [25–27]. Этот подход оказался одним из наиболее эффективных, поскольку дал возможность создать динамическую имитационную модель механизма, используя непосредственно геометрию и сопряжения из CAD-модели и исключая необходимость экспорта геометрии в промежуточные форматы с разрушением обратной связи CAE — CAD.



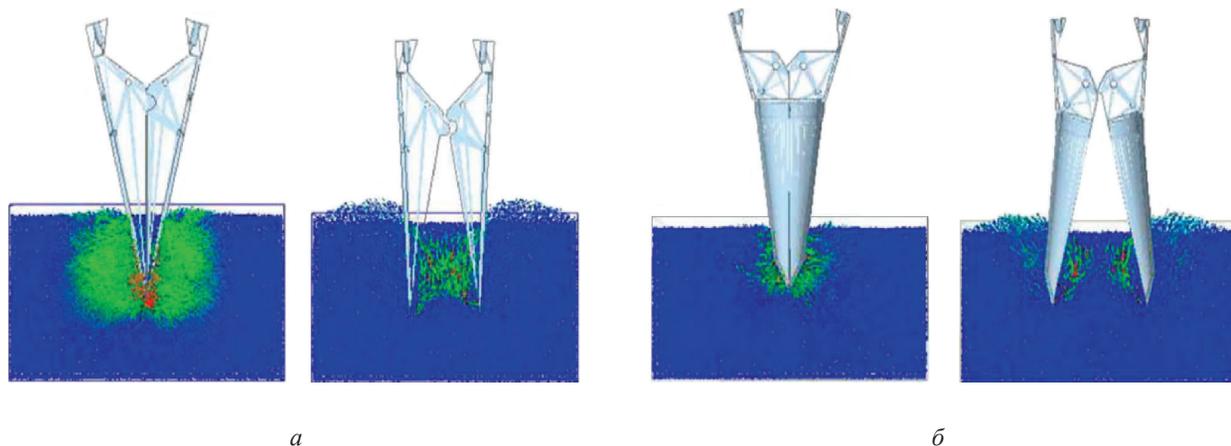
**Рис. 1.** Исследование кинематики посадочного механизма в программных комплексах 3D CAD SolidWorks, CAE SolidWorks Motion (а) и лабораторные исследования экспериментального образца (б) [26]

**Fig. 1.** Study of the kinematics of the planter mechanism in 3D CAD SolidWorks and CAE SolidWorks Motion (a) and laboratory studies of the experimental sample (b) [26]



**Рис. 2.** Моделирование процессов лункообразования посадочным механизмом [28]: а — раскрытие конуса в продольной плоскости; б — раскрытие конуса в поперечной плоскости

**Fig. 2.** Modeling of hole formation processes using a planting mechanism [28]: a — cone opening in the longitudinal plane; б — cone opening in the transverse plane



**Рис. 3.** Моделирование процессов внедрения посадочных конусов различных геометрических форм в почву [29]: *а* — четырехгранной; *б* — конической  
**Fig. 3.** Modeling the processes of introducing planting cones of various geometric shapes into the soil [29]: *a* — tetrahedral; *b* — conical

**Методы моделирования взаимодействия рабочих органов посадочных аппаратов с почвенной средой с использованием САД- и САЕ-систем.** Для моделирования взаимодействия посадочных аппаратов и рабочих органов других машин, которые непосредственно взаимодействуют с почвенной средой наиболее часто в настоящее время используется метод дискретных элементов (DEM — Discrete Element Method — метод дискретных элементов) [28, 29].

В исследовании, представленном в работе [28] посвященном изучению процессов лункообразования рабочими органами посадочной машины, была рассмотрена имитационная модель взаимодействия посадочного конуса с почвенной средой, реализованная с использованием DEM-методов (рис. 2). Для этого применили 3D-модель, разработанную в САД-системе Pro E, которая экспортировалась через промежуточный формат в программу EDEM 2018. Почвенный пласт формировался из четырех различно окрашенных слоев дискретных частиц для мониторинга почвенных смещений. Описание взаимного контакта посадочного конуса с почвой выполнялось с использованием физической модели Герца — Миндлина (без скольжения). Выполненная авторами экспериментальная проверка подтвердила достаточно высокую достоверность данных, полученных с помощью моделирования.

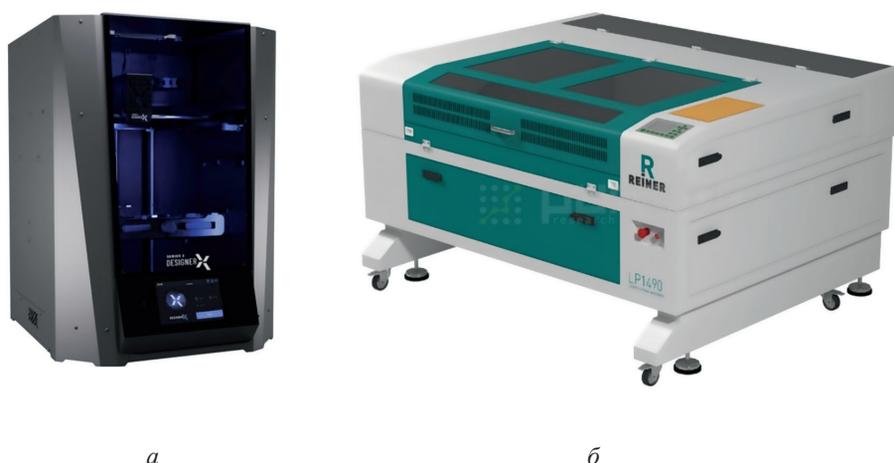
В работе [29] представлены модели процессов внедрения посадочных конусов различных геометрических форм высокоскоростной посадочной машины в почву (рис. 3). Модели конусов создавались в специализированном комплексе 3D CAD Solidworks, которые затем

экспортировались через промежуточный формат в программу EDEM. В качестве физической модели применялась модель Герца — Миндлина с соединяющим контактом. В отличие от других исследований для задания движения посадочных конусов использовалось совместное моделирование с приложением MBD RecurDyn. Данный подход хотя и является более трудоемким и требует наличия сразу двух расчетных программ, все же позволяет корректнее описать сложное движение исследуемого объекта с учетом его кинематики.

Лабораторный эксперимент, выполненный в рамках представленного исследования, показал незначительное расхождение с данными моделирования.

Интерес вызывают исследования, реализуемые DEM-методами, посвященные моделированию поведения брикета почвенного субстрата саженца при его взаимодействии с элементами посадочного механизма [30, 31].

**Полноразмерное макетирование с применением 3D-печати.** Все шире применяется 3D-печать в различных отраслях, в том числе сельском и лесном хозяйстве. Ярким примером эффективного использования 3D-печати в сельском хозяйстве является деятельность лаборатории перспективных материалов одного из структурных подразделений Федерального научно-исследовательского института (ВИМ). Лаборатория профессионально занимается созданием полноразмерных и масштабных макетов, полнофункциональных изделий, предназначенных для проведения комплексных научно-исследовательских испытаний [32, 33].



**Рис. 4.** Оборудование, используемое для изготовления полноразмерного макета: *а* — 3D-принтер Designer X Series 2; *б* — лазерный станок REINER LP1490-150W  
**Fig. 4.** Equipment used to make a full-size mock-up: *a* — 3D-printer Designer X Series 2; *б* — laser machine REINER LP1490-150W

В области лесного хозяйства технологии 3D-печати пока ограниченно применяются, в частности при создании масштабных макетов почвообрабатывающих орудий [34] и полноразмерных образцов высеивающих аппаратов [35].

Предлагаемая к рассмотрению конструкция посадочного аппарата имеет достаточно сложную кинематику и при этом размеры элементов, требующих использования 3D-печати, достаточно компактны и не превышают объем печати используемого принтера (200×200×200 мм). Это существенно облегчает процесс полноразмерного макетирования, исключая операции разбиения габаритных элементов на части с последующей их склейкой. Для изготовления габаритных деталей из листовых материалов эффективным признано применение станков для лазерной резки неметаллов (рис. 4).

## Результаты и обсуждение

### Общая концепция посадочной машины.

Перспективная машина для посадки семян и саженцев с ЗКС (рис. 5) состоит из рамы с навесным устройством 1, посадочной секции, включающей в себя кронштейн крепления 11 рамы посадочной секции 10, посадочного механизма 3, его кожухов 8, черенкового ножа с рыхлящими плоскорежущими крыльями 7, прикатывающей секции 6 с двумя пневматическими катками, опорных пневматических колес 9, цепной передачи 5, ящиков для посадочного материала 2 и кресла сажальщика 4.

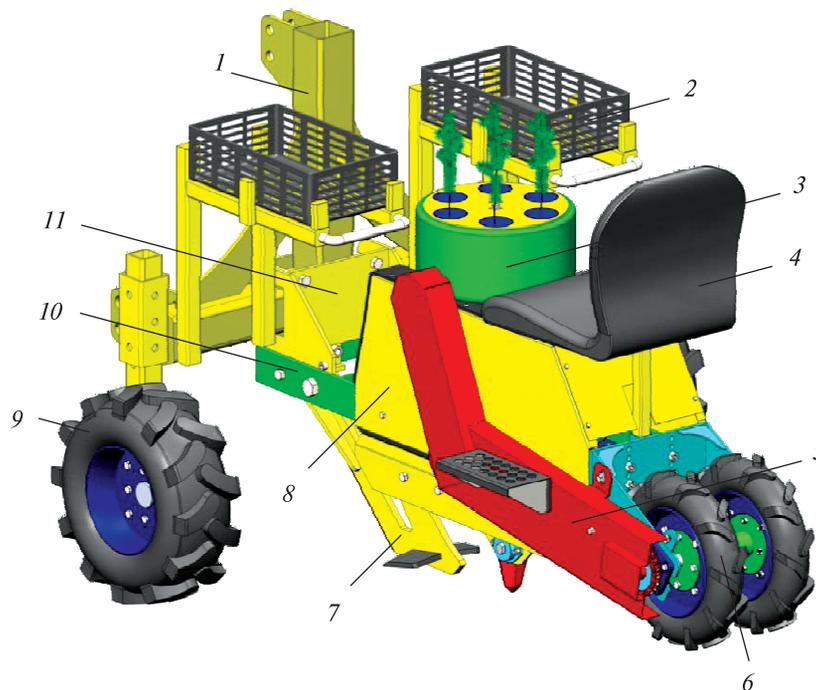
Посадочный механизм (см. рис. 5) включает в себя посадочный аппарат (рис. 6), со-

стоящий из рамы посадочной секции 8, дисков 9, поводков 3, неподвижного посадочного конуса 10, подвижного посадочного конуса 11, пружинного механизма закрывания 2, ролика 1, кулачка 4, подшипниковых опор поводков 7, подшипниковых опор дисков 6 и приводных звездочек 5.

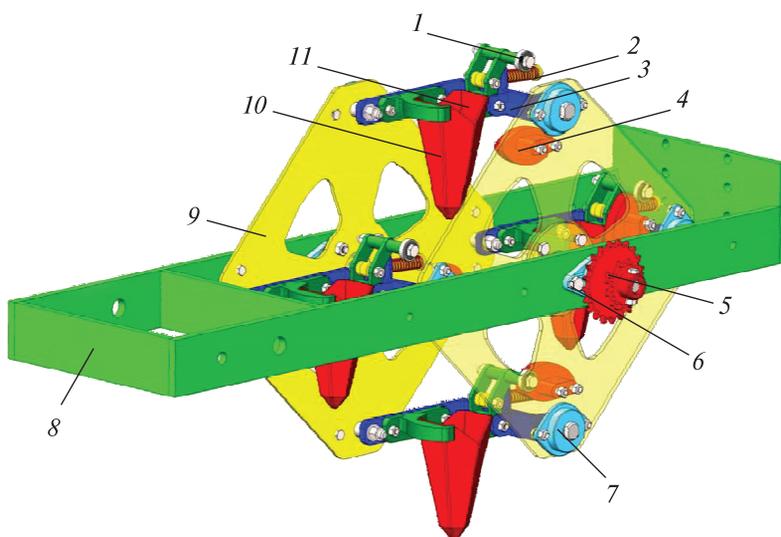
Кроме того, посадочный механизм (см. рис. 5) включает в себя зарядное устройство (рис. 7), состоящее из кронштейна зарядного устройства 7, зарядных стаканов 10 с крышками 9 и пружинами растяжения 1, направителя 8, сепаратора 2, кожуха 3, опорной пластины 4, углового редуктора 5 и приводной звездочки 6.

**Виртуальные исследования посадочного механизма.** Виртуальный стенд для исследования кинематических и динамических параметров посадочного аппарата представлен на рис. 8. Модель секции, используемая для виртуального эксперимента, была упрощена и стала включать в себя следующие основные элементы: раму 11, диски 8, поводки 10, неподвижный конус с кронштейном крепления 4, подвижный конус 3, ролик-размыкатель 1, кулачок 2, зарядный стакан с приводным механизмом 5, подпружиненную крышку 6, опорную пластину 7, саженец 9 и условную почву 12.

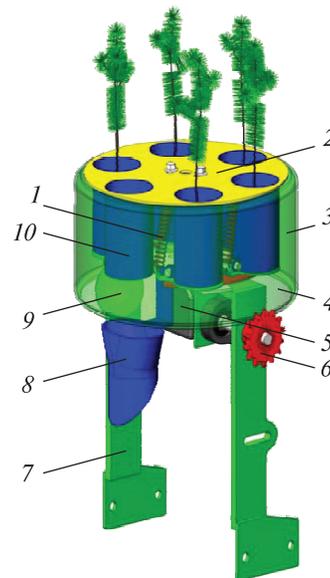
Для упрощения процедуры расчета модели и снижения вероятности возникновения ошибок были введены следующие упрощения: установлен только один посадочный конус в сборе, один кулачок, один зарядный стакан; из модели исключены все объекты, не воздействующие на кинематику, например крепежные элементы, подшипники и др. (табл. 1).



**Рис. 5.** Общий вид машины для посадки семян и саженцев с закрытой корневой системой  
**Fig. 5.** General view of the machine for planting seedlings with a closed root system



**Рис. 6.** Посадочный аппарат  
**Fig. 6.** Planter gear



**Рис. 7.** Зарядное устройство  
**Fig. 7.** Feeding device

Условно разобьем полный цикл движения посадочного аппарата на пять стадий (рис. 9):

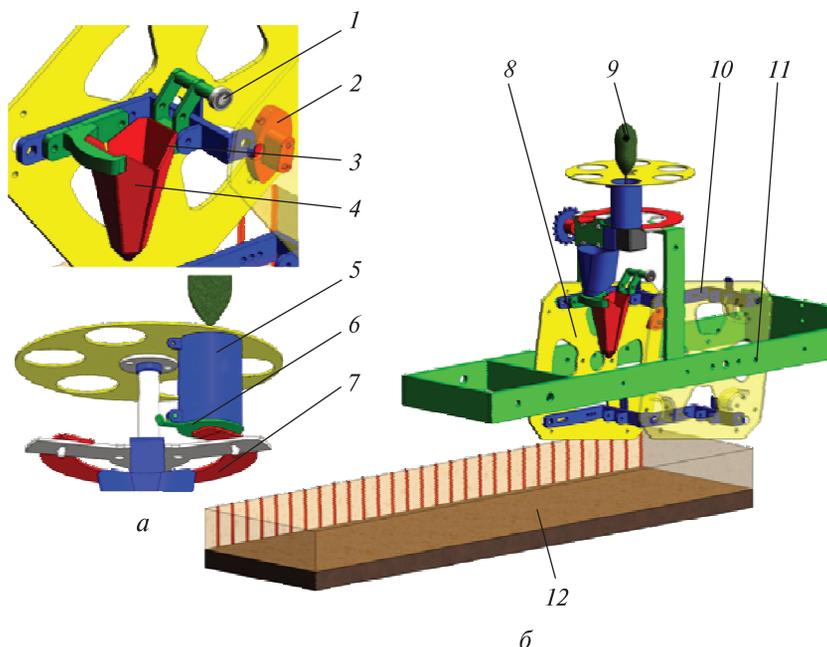
1 — 0...0,7 с: свободное опускание конуса (рис. 9, а);

2 — 0,7...1,2 с: падение саженца в посадочный конус (рис. 9, б);

3 — 1,2...3 с: свободное опускание саженца в конус (рис. 9, в);

4 — 3...5,2 с: раскрытие посадочного конуса (рис. 9, г);

5 — 5,2...6 с: свободный подъем конуса (рис. 9, д).

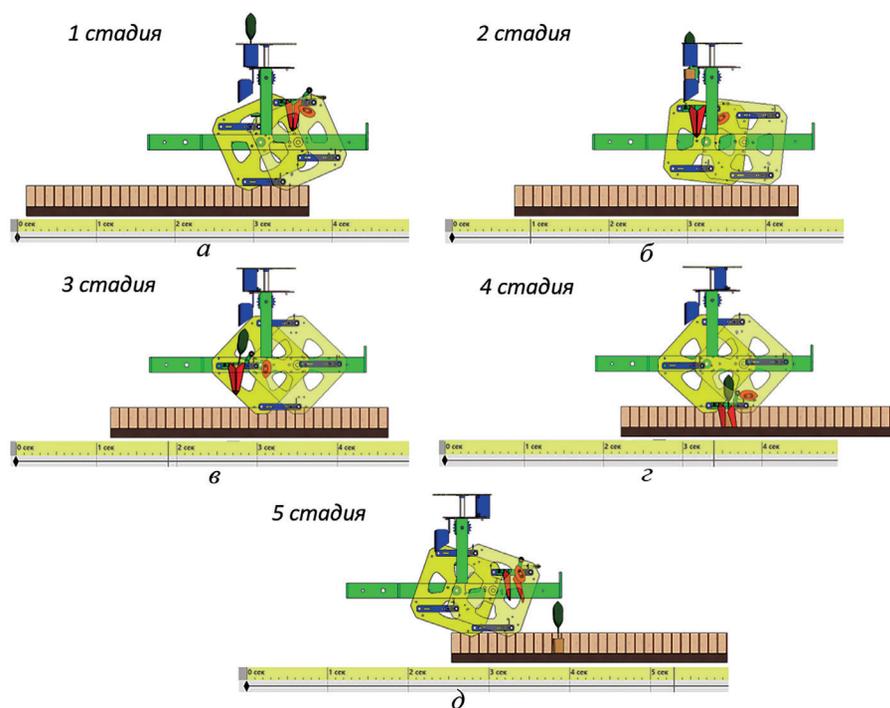


**Рис. 8.** Виртуальный стенд для исследования кинематических и динамических параметров посадочного механизма: *а* — рабочие органы; *б* — общий вид  
**Fig. 8.** Virtual stand for studying the kinematic and dynamic parameters of the planter mechanism: *a* — working bodies; *b* — general view

Т а б л и ц а 1

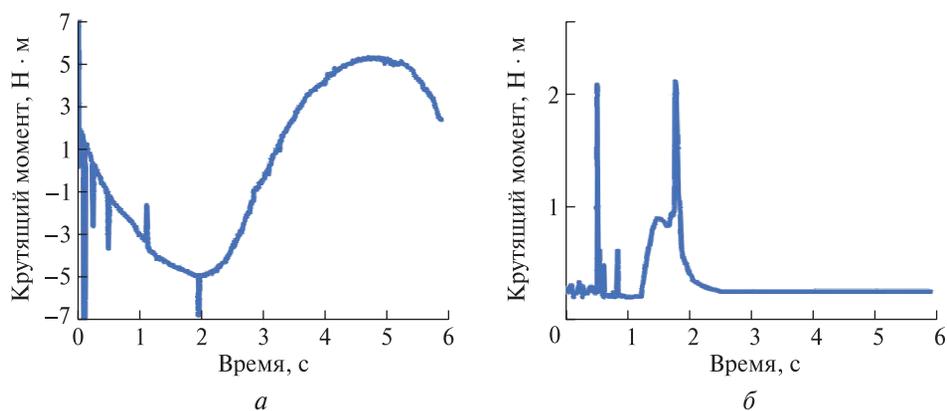
**Исходные параметры моделирования**  
**Initial simulation parameters**

Параметр	Единица измерения	Значение
<i>Общие</i>		
Поступательная скорость движения посадочного механизма	м/с	0,23
Угловая скорость движения посадочного устройства,	об./мин	10
Угловая скорость движения зарядного барабана	об./мин	7,5
Параметры 3D-контакта	–	Сталь–сталь
<i>Параметры сеянца с закрытой корневой системой</i>		
Масса сеянца	кг	0,11
Высота сеянца	мм	280
Максимальный диаметр сеянца	мм	60
<i>Параметры посадочного аппарата</i>		
Количество посадочных конусов	шт.	1
Масса подвижных частей	кг	25,66
Жесткость пружины	Н/м	500
Усилие предварительного натяжения	Н/м	14, 0
Коэффициент демпфирования	Н/(м/с)	200
<i>Параметры зарядного устройства</i>		
Количество зарядных стаканов	шт.	1
Масса подвижных частей	кг	1,66
Жесткость пружины стакана зарядного барабана	Н/м	180
Усилие предварительного натяжения пружины	Н	0,50
Коэффициент демпфирования	Н/(м/с)	90



**Рис. 9.** Рабочие стадии посадочного механизма: *a* — свободное опускание конуса; *б* — падение саженца в конус; *в* — свободное опускание саженца в конусе; *г* — раскрытие конуса; *д* — свободный подъем конуса

**Fig. 9.** Working stages of the planter mechanism: *a* — free lowering of the cone; *б* — seedling falling into a cone; *в* — free lowering of the seedling in the cone; *г* — cone opening; *д* — free rise of the cone



**Рис. 10.** Крутящие моменты сил виртуальных двигателей привода: *a* — посадочного аппарата; *б* — зарядного устройства

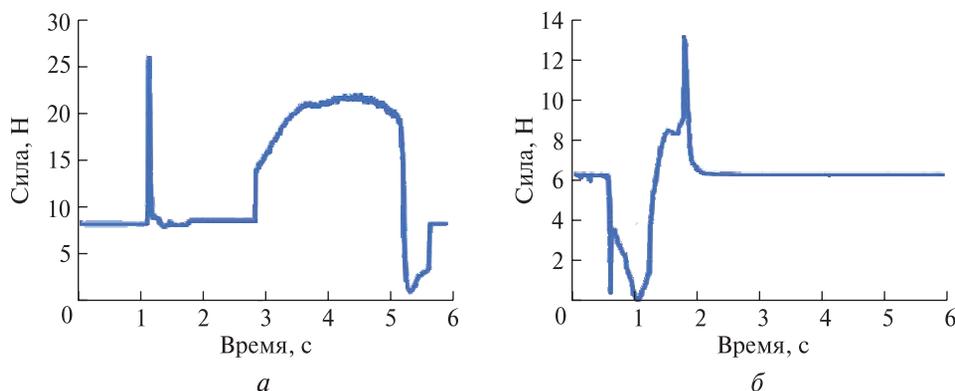
**Fig. 10.** Torques on the virtual motors of the drive: *a* — planter device; *б* — feeding device

На стадиях 3 и 4 в интервале 2,2...4,5 с происходит процесс взаимодействия посадочного конуса с грунтом, однако в настоящем исследовании этот процесс не моделировался.

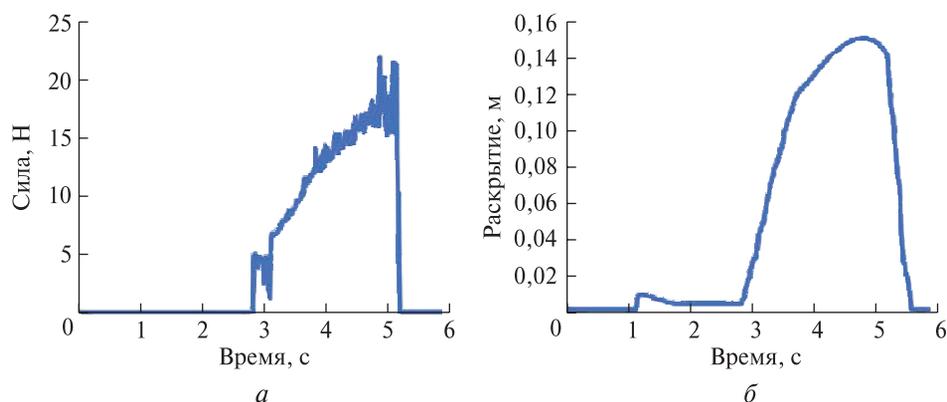
Методом моделирования был получен комплекс параметров, необходимых для оценки работоспособности посадочного механизма. На рис. 10 представлены крутящие моменты сил виртуальных двигателей, необходимые для

привода посадочного аппарата (*a*) и зарядного устройства (*б*).

Из рис. 10, *a*, видно, что максимальный крутящий момент на посадочном аппарате возникает практически при максимальном раскрытии посадочного конуса (4,8 с), т. е. непосредственно перед началом процесса его закрывания. Максимальное значение крутящего момента составляет 5,2 Н·м.



**Рис. 11.** Силы на пружинах посадочного конуса (*а*) и стакана зарядного барабана (*б*)  
**Fig. 11.** Forces on springs of the planter cone (*a*) and cell of the feeding device (*b*)



**Рис. 12.** Сила контакта кулачка и ролика (*а*) и величина раскрытия конусов (*б*)  
**Fig. 12.** Contact force of the cam and roller (*a*) and the amount of opening of the cones (*b*)

Максимальный крутящий момент на зарядном устройстве (рис. 10, *б*) достигает значения 2,2 Н·м во время начала раскрытия подпружиненной крышки зарядного стакана (0,7 с), а также ее закрытия (1,8 с).

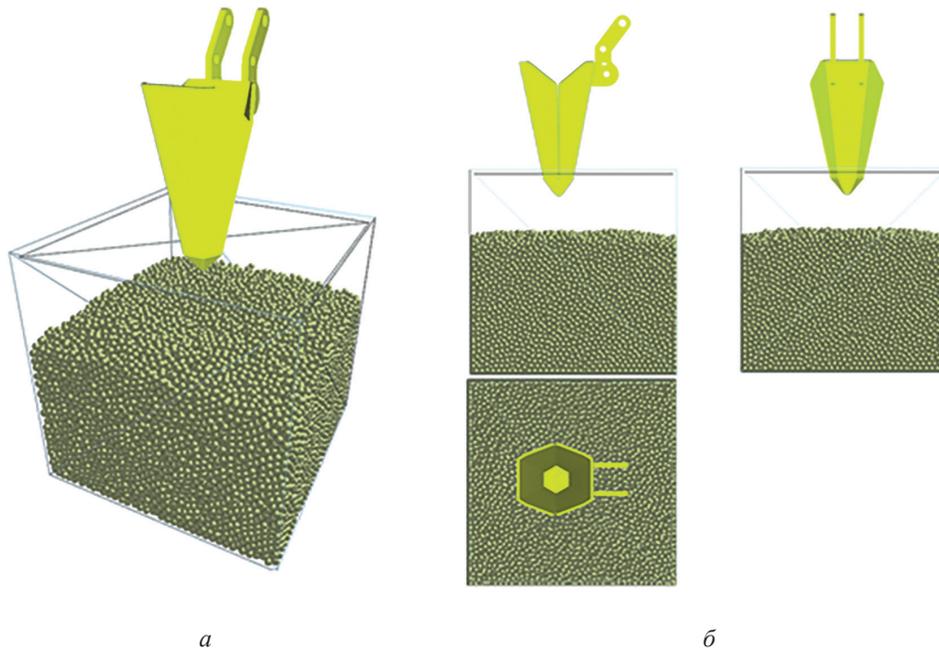
Из рис. 11, *а* видно, что максимальное усилие, создаваемое пружиной посадочного конуса, достигает 21,4 Н во время наибольшего раскрытия конуса (4,4 с). Также на 1,2 с наблюдался кратковременный скачок силы до 26,7 Н от удара саженца о посадочный конус, которым можно пренебречь.

Максимальное усилие на пружине отдельного стакана зарядного барабана (рис. 11, *б*) достигает 13,2 Н во время закрытия подпружиненной крышки (1,8 с).

Из рис. 12, *а* видно, что максимальная сила контакта кулачка и ролика составляет 21,9 Н. Она возникает непосредственно перед сходом кулачка с ролика (4,9 с). В это время также наблюдается максимальное раскрытие конуса, равное 0,15 м (рис. 12, *б*).

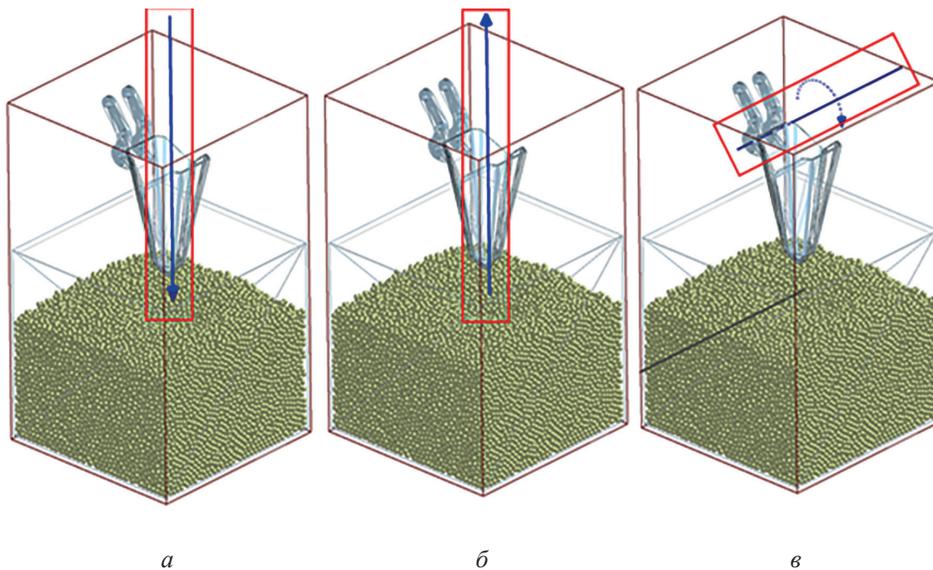
**Исследование взаимодействия посадочных конусов с почвой.** Для предварительного исследования сил, возникающих в посадочных конусах, воспользовались методом дискретных элементов. Представим основные параметры моделирования (табл. 2) и виртуальный стенд для исследования взаимодействия посадочного конуса с почвенной средой (рис. 13).

В имитационной модели использованы виртуальные силовые элементы. Это линейный вертикальный двигатель заглубления (рис. 14, *а*), обеспечивающий проникновение посадочного конуса на глубину 100 мм от поверхности почвы со скоростью 0,5 м/с. Линейный вертикальный двигатель выглубления осуществляющий обратный ход посадочного конуса также со скоростью 0,5 м/с (рис. 14, *б*). Угловой двигатель раскрытия подвижного полуконуса имеющий постоянную скорость 3,14 рад/с и служащий для имитации процесса экстракции саженца в нижней части траектории движения посадочного конуса (рис. 14, *в*).



**Рис. 13.** Виртуальный стенд для исследования взаимодействия посадочного конуса с почвенной средой: *a* — общий вид; *б* — проекционные виды

**Fig. 13.** Virtual stand for studying the interaction of a planting cone with the soil environment: *a* — general view; *б* — projection views



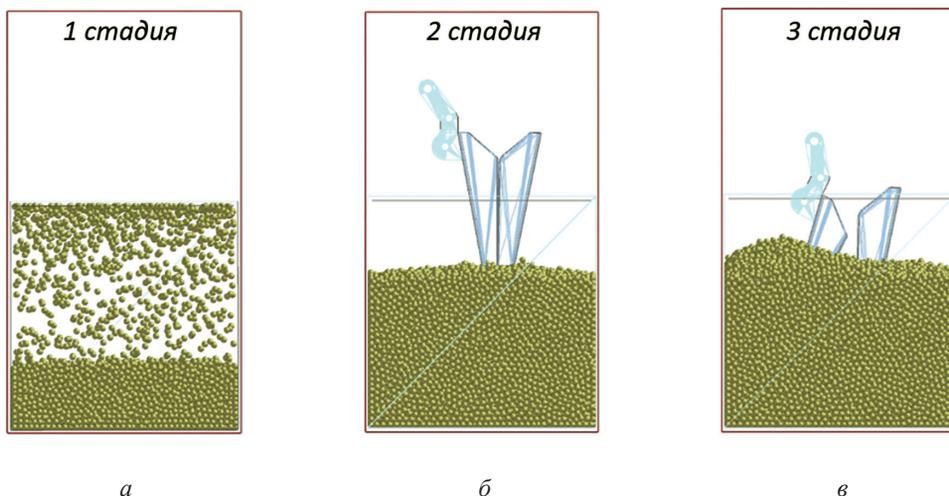
**Рис. 14.** Силовые элементы: *a* — линейный вертикальный двигатель заглубления; *б* — линейный вертикальный двигатель выглубления; *в* — угловой двигатель раскрытия полуконуса

**Fig. 14.** Power elements: *a* — linear vertical deepening motor; *б* — linear vertical excavation motor; *в* — angular semi-cone opening motor

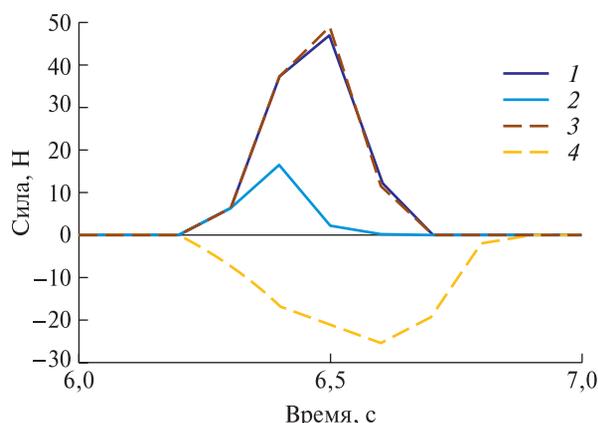
Условно разобьем виртуальный эксперимент на 3 стадии (рис. 15):

1 — 0...6 с: формирование почвенного пласта (рис 15, *a*);

2 — 6...6,5 с: заглубление посадочного конуса (рис. 15, *б*); 3 — 6,5...7 с: выглубление посадочного конуса с одновременным раскрытием полуконуса (рис. 15, *в*).



**Рис. 15.** Стадии моделирования: *a* — формирование почвенного пласта; *б* — заглубление посадочного конуса с раскрытием полуконуса  
**Fig. 15.** Modeling stages: *a* — formation of the soil layer; *б* — deepening of the planting cone; *в* — removing of the planting cone with opening of the half-cone



**Рис. 16.** Модель взаимодействия посадочного конуса с почвенной средой: 1 — вертикальная сила сопротивления почвы проникновению неподвижного полуконуса  $R_{zn}$ ; 2 — продольная сила сопротивления почвы проникновению неподвижного полуконуса  $R_{xn}$ ; 3 — вертикальная сила сопротивления почвы проникновению подвижного полуконуса  $R_{zm}$ ; 4 — продольная сила сопротивления почвы проникновению подвижного полуконуса  $R_{xm}$

**Fig. 16.** Results of modeling the interaction of the planting cone with the soil environment: 1 — vertical force of soil resistance to penetration of fixed semi-cone  $R_{zn}$ ; 2 — longitudinal force of soil resistance to penetration of fixed semi-cone  $R_{xn}$ ; 3 — vertical force of soil resistance to penetration of movable semi-cone  $R_{zm}$ ; 4 — longitudinal force of soil resistance to penetration of movable semi-cone  $R_{xm}$

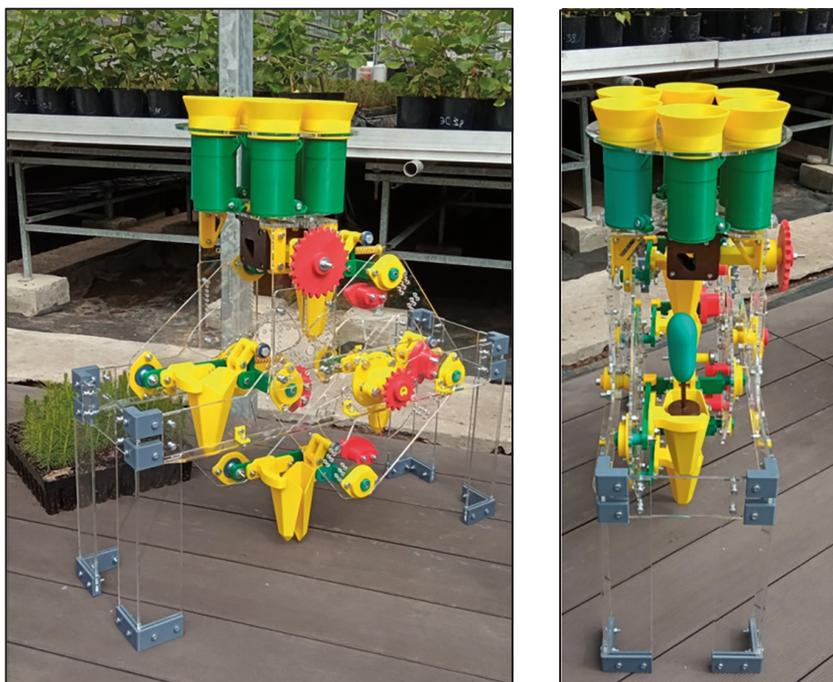
Из рис. 16 видно, что вертикальные силы сопротивления почвы проникновению посадочного конуса  $R_z$  для его подвижной  $R_{zm}$  и неподвижной  $R_{zn}$  частей фактически совпадают и составляют около 49 Н. В то же время продольные

Т а б л и ц а 2

**Исходные параметры моделирования**  
**Initial simulation parameters**

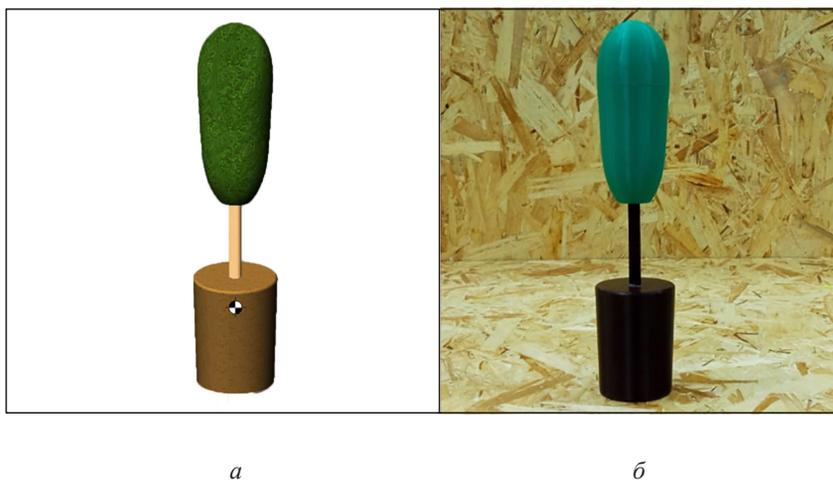
Параметр	Единица измерения	Значение
Форма дискретных частиц	—	Сферическая
Радиус дискретной частицы	мм	3,5
Масса частицы	кг	0,000448986
Количество дискретных частиц	шт.	40 000
Вертикальная скорость конуса	м/с	0,5
Угловая скорость раскрытия полуконуса	рад/с	3,14
Глубина проникновения	мм	100
Плотность твердой фазы почвы	кг/м <sup>3</sup>	2500
Объемная плотность почвенного пласта	кг/м <sup>3</sup>	1700
Размер формируемого почвенного пласта	мм	260×260×200

силы  $R_x$  для различных полуконусов противоположны по знаку и отличаются по значению. Так, для неподвижного полуконуса сила  $R_{xn}$  составляет 16,4 Н, для подвижного  $R_{xm}$  — 25,1 Н. Такое заметное различие объясняется дополнительным силовым воздействием на почву во время раскрытия подвижного полуконуса, однако оно не может повлиять ни на кинематику, ни на параметры пружин посадочного механизма.



**Рис. 17.** Создание полноразмерного макетного образца посадочного механизма с использованием 3D-печати

**Fig. 17.** Creation of a full-size mock-up of the planter mechanism using 3D-printing



**Рис. 18.** Саженец с закрытой корневой системой: *a* — 3D-модель; *б* — макетный образец

**Fig. 18.** Seedling with a closed root system: *a* — 3d model; *б* — full-size mock-up

**Создание полноразмерного макетного образца посадочного механизма с использованием 3D-печати.** Для экспериментальной проверки кинематических и динамических параметров посадочного механизма, а также оптимизации параметров механизма размыкания был создан полноразмерный макетный образец из неметаллических материалов (рис. 17). Его изготовление осуществлялось с использовани-

ем оборудования «Лаборатории быстрого прототипирования» Инжинирингового центра Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (ВГЛТУ). Для изготовления деталей сложной конфигурации применялась 3D-печать АБС-пластиком, обладающим приемлемым в данном случае сочетанием физико-механических и технологических свойств. Изготовление наиболее нагруженных



а



б

Рис. 19. Исследование требующегося крутящего момента: а — посадочного аппарата; б — зарядного барабана

Fig. 19. Investigation of the required torque: а — planter device; б — feeding device

Т а б л и ц а 3  
Дополнительные параметры согласно лабораторному эксперименту  
Additional lab experiment parameters

Параметр	Единица измерения	Значение
<i>Параметры пружины сжатия посадочного конуса</i>		
Диаметр наружный $D_1$	мм	12
Диаметр проволоки $D$	мм	1
Жесткость пружины $c$	Н/м	500
Свободная длина $L_0$	мм	80
Рабочий ход пружины $L_2...L_1$	мм	38...64
Усилие предварительного натяжения $F_1$	Н/м	8,08
Рабочая максимальная нагрузка $F_2$	Н	21,21
<i>Параметры пружины растяжения зарядного стакана</i>		
Диаметр наружный $D_1$	мм	8
Диаметр проволоки $D$	мм	0,8
Жесткость пружины $c$	Н/м	180
Свободная длина $L_0$	мм	70
Рабочий ход пружины $L_2...L_1$	мм	105...80
Усилие предварительного натяжения $F_1$	Н	0,59
Рабочая максимальная нагрузка $F_2$	Н	6,14

элементов, в частности зубчатых колес редуктора и звездочек цепной передачи, выполнялось с использованием специального инженерного пластика, наполненного углеродными волокна-

ми и обладающего повышенной механической прочностью. На станке для лазерной резки неметаллов изготовили листовые детали, такие как диски, опорная пластина, сепаратор посадочного барабана, элементы рамы и опорную конструкцию.

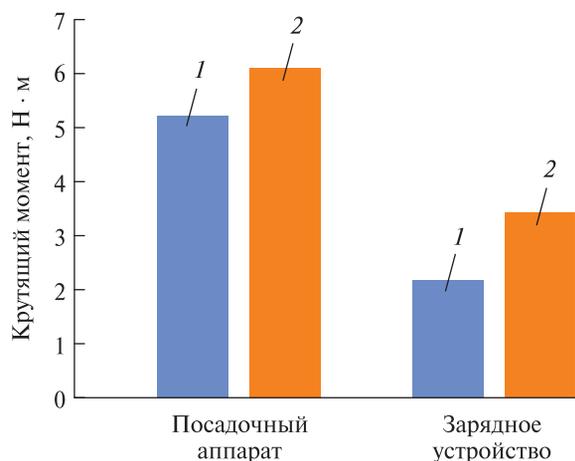
Кроме того, был изготовлен полноразмерный макет саженца с ЗКС с геометрическими и массоинерционными характеристиками, идентичными 3D-модели саженца, использованной при имитационном моделировании (рис. 18).

**Экспериментальные исследования полноразмерного макетного образца посадочного механизма.** Для исследования крутящего момента, требуемого для работы посадочного механизма без учета сил сопротивления почвы, был изготовлен шкив, устанавливаемый на приводной вал механизма (рис. 19, а). На шкив наматывался шнур и подвешивался груз. С постепенным увеличением веса груза определялся крутящий момент, необходимый для свободного поворота посадочного аппарата. Аналогично производилось исследование характеристик зарядного барабана (рис. 19, б).

При создании макета были использованы реальные пружины, соответственно, дополнительно рассчитывались их параметры (табл. 3).

В результате лабораторного эксперимента было установлено, что крутящий момент, требующийся для свободного поворота посадочного аппарата, составляет 6,12 Н·м, для зарядного устройства — 3,42 Н·м.

Таким образом, главным силовым параметром, измеряемым на полноразмерном макетном образце, являлся крутящий момент,



**Рис. 20.** Сравнение крутящих моментов на посадочном аппарате и зарядном устройстве, полученных в результате моделирования (1) и лабораторного эксперимента (2)

**Fig. 20.** Comparison of torques on the planter gear and the feeding device obtained as a result of simulation (1) and laboratory experiment (2)

требующийся для свободного поворота посадочного аппарата, а также для поворота зарядного устройства (рис. 20).

Для посадочного аппарата, по данным моделирования, крутящий момент составил 5,20 Н·м, а по результатам экспериментальной проверки — незначительно больше, т. е. 6,12 Н·м. Разница составила не более 17,7 %. Данное различие можно объяснить установкой в лабораторном эксперименте всех четырех посадочных конусов с пружинами. Поэтому ко времени схода ролика с кулачка текущего конуса, предшествующий ему конус уже начал свое раскрытие, что повышало общий крутящий момент.

Для зарядного устройства, по данным моделирования, крутящий момент составил 2,20 Н·м, а по результатам экспериментальной проверки был заметно больше — 3,42 Н·м. Разница уже является более существенной и составляет 55,5 %. Здесь различие вероятно, также, связано с тем, что в лабораторном эксперименте устанавливались все шесть зарядных стаканов с пружинами, что создавало дополнительную силу трения одновременно от пяти крышек об опорную пластину. К тому же, по-видимому, дополнительные силы сопротивления возникали в угловом редукторе макетного образца, через который осуществлялся привод зарядного устройства, в то время как при моделировании виртуальный двигатель прикладывался непосредственно к зарядному барабану, а силы трения в сопряжениях не учитывались.

## Выводы

Результаты моделирования рабочего процесса посадочного механизма, включающего в себя посадочный аппарат и зарядное устройство, показали его приемлемые силовые характеристики и в целом общую работоспособность предлагаемой конструкции. Созданный полно-размерный функциональный макетный образец посадочного механизма позволил подтвердить полученные в результате моделирования силовые характеристики по такому ключевому параметру как крутящий момент, требующийся для привода посадочного аппарата и зарядного устройства. Наглядно была подтверждена правильность выбранных в процессе проектирования кинематических параметров механизма. Доказана эффективность использования полноразмерного макетирования с применением 3D-печати для оценки кинематических и силовых параметров посадочных механизмов. В дальнейшем планируется получение экспериментальным путем силовых характеристик процесса проникновения посадочного конуса для проверки данных, полученных при моделировании. Предлагаемую концепцию посадочного аппарата после незначительной переработки конструкции можно адаптировать для решения широкого спектра задач, например посадки семенных корнеплодов таких культур, как сахарная свекла, морковь и др.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>*

## Список литературы

- [1] Оплетаев А.С., Жигулин Е.В., Залесов С.В. Опыт многоротационного выращивания контейнерного посадочного материала для искусственного лесовосстановления в теплицах с регулируемым микроклиматом // Хвойные бореальной зоны, 2023. Т. 41. № 2. С. 152–157. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-2-152-157
- [2] Трегубов О.В., Лактионов А.П., Мизин Ю.А., Комарова О.В., Пилипенко В.Н., Похваленко В.А. Опыт создания лесных культур с закрытой коревой системой в степной и лесостепной зонах юга Российской Федерации // Астраханский вестник экологического образования, 2022. № 5 (70). С. 203–211. DOI: 10.36698/2304-5957-2022-5-203-211
- [3] Исаков И.Ю., Михин В.И., Трегубов О.В., Сидоров Г.С., Попов А.В., Ахтямов А.Г. Полиморфизм и биоразнообразие лесообразующих пород в искусственных и естественных насаждениях центральной лесостепи. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, 2021. 156 с.

- [4] Habineza E., Ali M., Reza N., Chung S.-O. Vegetable transplanters and kinematic analysis of major mechanisms Onion transplanter View project // *Korean J. Agric. Sci.*, 2023, v. 50(1), pp. 113–129. DOI: 10.7744/kjoas.20230007
- [5] Karayel D., Çanakci M., Topakci M., Aktaş A., Aytem H., Kriauciuniene Z. Technical evaluation of transplanters' performance for potted seedlings // *Turkish J. Agric. For.*, 2023, v. 47, no. 1, pp. 116–123. DOI: 10.55730/1300-011X.3068
- [6] Khadatkar A., Mathur S.M., Gaikwad B.B. Automation in transplanting: A smart way of vegetable cultivation // *Current Science. Indian Academy of Sciences*, 2018, v. 115, no. 10, pp. 1884–1892. DOI: 10.18520/cs/v115/i10/1884-1892
- [7] Tylek P., Szewczyk G., Kormanek M., Walczyk J., Sowa J. M., Pietrzykowski M., Woś B., Kielbasa P., Juliszewski T., Tadeusiewicz R., Adamczyk F., Danielak M., Wojciechowski J., Szczepaniak J., Szychta M., Szulc, T. Design of a Planting Module for an Automatic Device for Forest Regeneration // *Croat. J. For. Eng.*, 2023, v. 44, no. 1, pp. 203–215. DOI: 10.5552/crojfe.2023.1722
- [8] Iqbal Z. Design of a Gear Driven Hopper Type Dribbling Mechanism for a 2.7 kW Two-row Pepper Transplanter // Thesis for the Degree of Master of Science, Chungnam National University. DOI: 10.13140/RG.2.2.31847.80807
- [9] Durga M.L., Rao A.S., Kumar A.A. Performance Evaluation of Single Row-Low Horse Power Tractor Operated Vegetable Transplanter // *Curr. J. Appl. Sci. Technol.*, 2020, v. 39, no. 44, pp. 37–44. DOI: 10.9734/cjast/2020/v39i4431149
- [10] Mitrache P.M., Ciupercă R., Sărăcin I. Kinematics of the Seedling Plant with Vertical Distributor and Buckets // *E3S Web Conf.*, 2021, v. 286, pp. 2–11. DOI: 10.1051/e3sconf/202128603012
- [11] Sun W., Zhang H., Simionescu P.A. Numerical Optimization and Experimental Validation of a Five-link Mechanism, Potato planter // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, 2021, v. 235, no. 23, pp. 6883–6892. DOI: 10.1177/09544062211004652
- [12] Han L.H., Mao H.P., Hu J.P., Kumi F. Development of a Riding-type Fully Automatic Transplanter for Vegetable Plug Seedlings // *Spanish J. Agric. Res.*, 2019, v. 17, no. 3. DOI: 10.5424/sjar/2019173-15358
- [13] Kumar G.V.P., Raheman H. Vegetable Transplanters for Use in Developing Countries Review // *Int. J. Veg. Sci.*, 2008, v. 14, no. 3, pp. 232–255. DOI: 10.1080/19315260802164921
- [14] Sun W., Simionescu P.A. Parameter Analysis and Field Tests of a Double Crank Multi-Rod under Plastic-Film Hill-Drop Mechanism Potato Planter // *Am. J. Potato Res.*, 2020, v. 97, no. 3, pp. 256–264. DOI: 10.1007/s12230-020-09773-5
- [15] Jin X., Li S., Yang X., Wu J., Liu Z., Liu H. Developments in Research on Seedling Auto-picking Device of Vegetable Transplanter // *Appl. Mech. Mater.*, 2013, v. 364, pp. 375–379. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.364.375
- [16] Jin X., Cheng Q., Zhao B., Ji J., Li M. Design and test of ZZYM-2 Potted Vegetable Seedlings Transplanting Machine // *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2020, v. 13, no. 1, pp. 101–110. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201301.5494
- [17] Бартенев И.И., Гаврин Д.С. Конструктивные особенности посадочных машин // *Лесотехнический журнал*, 2019. Т. 9. № 2. С. 147–155. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/16
- [18] Hwang S.J., Park J.H., Lee J.Y., Shim S.B., Nam J.S. Optimization of Main Link Lengths of Transplanting Device of Semi-Automatic Vegetable Transplanter // *Agron.*, 2020, v. 10, p. 1938. DOI: 10.3390/AGRONOMY10121938
- [19] Markumningsih S., Hwang S.-J., Kim J.-H., Jang M.-K., Shin C.-S., Nam J. Comparison of Consumed Power and Safety of Two Types of Semi-Automatic Vegetable Transplanter: Cam and Four-Bar Link // *Agriculture. MDPI AG*, 2023, v. 13, no. 3, p. 588. DOI: 10.3390/agriculture13030588
- [20] Chowdhury M., Ali M., Habineza E., Reza M.N., Kabir M.S.N., Lim S.-J., Choi I.-S., Chung, S.-O. Analysis of Rollover Characteristics of a 12 kW Automatic Onion Transplanter to Reduce Stability Hazards // *Agriculture. MDPI AG*, 2023, v. 13, no. 3, p. 652. DOI: 10.3390/agriculture13030652
- [21] Zhou M., Shan Y., Xue X., Yin D. Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings // *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2020, v. 13, no. 4, pp. 85–92. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201304.5404
- [22] Sun K., Ge R., Li T., Wang J. Design and Analysis of Vegetable Transplanter Based on Five-bar Mechanism // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2019, v. 692, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012029
- [23] Yu Y., Liu J., Ye B., Yu G., Jin X., Sun L., Tong J. Design and Experimental Research on Seedling Pick-Up Mechanism of Planetary Gear Train with Combined Non-circular Gear Transmission // *Chinese J. Mech. Eng. Springer Singapore*, 2019, v. 32, no. 1. DOI: 10.1186/s10033-019-0357-3
- [24] Shao Y., Liu Y., Xuan G., Hu Z., Han X., Wang Y., Chen B., Wang W. Design and Test of Multifunctional Vegetable Transplanting Machine // *IFAC-PapersOnLine. Elsevier Ltd*, 2019, v. 52, no. 30, pp. 92–97. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.503
- [25] Reza M. N., Islam M. N., Chowdhury M., Ali M., Islam S., Kiraga S., Lim S. J., Choi I. S., Chung S. O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter // *Machines. MDPI*, 2021, v. 9, no. 9. DOI: 10.3390/machines9090183
- [26] Iqbal M.Z., Islam M.N., Ali M., Kabir M.S.N., Park T., Kang T.G., Park K.S., Chung, S.O. Kinematic analysis of a hopper-type dibbling mechanism for a 2.6 kW two-row pepper transplanter // *J. Mech. Sci. Technol. Korean Society of Mechanical Engineers*, 2021, v. 35, no. 6, pp. 2605–2614. DOI: 10.1007/s12206-021-0531-2
- [27] Iqbal M. Z., Islam M. N., Chowdhury M., Islam S., Park T., Kim Y. J., Chung, S. O. Working speed analysis of the gear-driven dibbling mechanism of a 2.6 kw walking-type automatic pepper transplanter // *Machines*, 2021, v. 9, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.3390/machines9010006
- [28] Zeng F., Li X., Bai H., Cui J., Liu X., Zhang Y. Experimental Research and Analysis of Soil Disturbance Behavior during the Hole Drilling Process of a Hanging-Cup Transplanter by DEM // *Processes*, 2023, v. 11, no. 2, pp. 1–18. DOI: 10.3390/pr11020600

- [29] Yang Q., Zhang R., Jia C., Li Z., Zhu M., Addy M. Study of dynamic hole-forming performance of a cup-hanging planter on a high-speed seedling transplanter // *Front. Mech. Eng.*, 2022, v. 8, no. August, pp. 1–16. DOI: 10.3389/fmech.2022.896881
- [30] Bai H., Li X., Zeng F., Cui J., Zhang Y. Study on the Impact Damage Characteristics of Transplanting Seedlings Based on Pressure Distribution Measurement System // *Horticulturae*, 2022, v. 8, no. 11. DOI: 10.3390/horticulturae8111080
- [31] Cui J., Li X., Zeng F., Bai H., Zhang Y. Parameter Calibration and Optimization of a Discrete Element Model of Plug Seedling Pots Based on a Collision Impact Force // *Appl. Sci.*, 2023, v. 13, no. 10. DOI: 10.3390/app13106278
- [32] Катаев Ю.В., Гончарова Ю.А., Свиридов А.С., Тужилин С.П. Применение технологий 3D-печати и 3D-сканирования при изготовлении и ремонте сельскохозяйственной техники // *Техника и оборудование для села*, 2023. № 1. С. 34–38. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-1-34-38
- [33] Гончарова Ю.А. Реновация технических средств с использованием 3D-печати полимерных запасных частей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03. Москва, 2022. 188 с.
- [34] Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Боровенский В.Р. Использование технологий 3D-печати при проектировании почвообрабатывающих орудий // *Фундаментальные исследования*, 2016. № 11. С. 306–311.
- [35] Lysych M., Bukhtoyarov L., Druchinin D. Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs // *Inventions*, 2021, v. 8, no. 83. DOI: 10.3390/inventions6040083

## Сведения об авторах

**Лысыч Михаил Николаевич** <sup>✉</sup> — канд. техн. наук, доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», miklynea@yandex.ru

**Малюков Сергей Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», malyukovsergey@yandex.ru

**Шавков Михаил Викторович** — канд. техн. наук, руководитель отдела снабжения и логистики, ООО «Русгидроком (РГК)», shavkovmv@mail.ru

**Гнусов Максим Александрович** — канд. техн. наук, руководитель лаборатории лесного машиностроения Инжинирингового центра ВГЛТУ, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», mgnusov@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.03.2024.

Одобрено после рецензирования 08.11.2024.

Принята к публикации 27.11.2024.

# STUDY OF SEMI-AUTOMATIC PLANTING MECHANISM FOR SEEDLINGS WITH ROOT-BALLED TREE SYSTEM IN CAD WITH FULL-SIZE 3D-PRINTING TOOLS

M.N. Lysych<sup>1</sup>✉, S.V. Malyukov<sup>1</sup>, M.V. Shavkov<sup>2</sup>, M.A. Gnusov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev st., 394087, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Rushydrocom (RGK) LLC, 25, Mazlumova st., 394040, Voronezh, Russia

miklynea@yandex.ru

The necessity of developing and creating planting machines for seedlings with a root-balled tree system is substantiated. Existing methods for modeling the kinematics and dynamics of planting machines using CAD and CAE systems, as well as methods for modeling the processes of interaction between the working bodies of planting machines and the soil environment are analyzed. The general concept of the developed planter machine for seedlings with a root-balled tree system is described. A simulation model of the planter mechanism has been created in the 3D CAD SolidWorks software package and CAE SolidWorks Motion. The working process of the planter mechanism was studied on a virtual stand implemented in the same software. As a result of the simulation, a group of parameters necessary for assessing the performance of the planter mechanism was obtained. These are the moments of forces of the virtual motors of the planter gear drive and the feeding device, the forces arising on the virtual springs of the retainer cone and the feeding drum cell, as well as the values of the contact force of the cam with the roller and the size of the opening of the retainer cones. The process of interaction of retaining cones with the soil environment was simulated using the discrete element method. For experimental verification of the obtained parameters, a full-size mock-up sample was created using 3D-printing. It made possible to confirm the power characteristics obtained as a result of modeling for such a key parameter as the torque required to drive the planter gear and the feeding device. Also, the correctness of the kinematic parameters of the mechanism chosen during the design process was clearly confirmed.

**Keywords:** planter, closed root system, simulation, 3D CAD, MBD, DEM, 3D-printing

**Suggested citation:** Lysych M.N., Malyukov S.V., Shavkov M.V., Gnusov M.A. *Issledovanie poluavtomaticheskogo posadochnogo mekhanizma dlya seyantsev s zakrytoy kornevoy sistemoy v srede SAPR s polnorazmernym maketirovaniem sredstvami 3D-pechati* [Study of semi-automatic planting mechanism for seedlings with root-balled tree system in CAD with full-size 3D-printing tools]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 144–161. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-144-161

## References

- [1] Opletaev A.S., Zhigulin E.V., Zalesov S.V. *Opyt mnogorotatsionnogo vyrashchivaniya konteynernogo posadochnogo materiala dlya iskusstvennogo lesovosstanovleniya v teplitsakh s reguliruемым mikroklimatom* [Experience of multi-rotation cultivation of container planting material for artificial reforestation in greenhouses with a controlled microclimate]. *Khvoynye boreal'noy zony [Conifers of the boreal zone]*, 2023, v. 41, no. 2, pp. 152–157. DOI: 10.53374/1993-0135-2023-2-152-157
- [2] Tregubov O.V., Laktionov A.P., Mizin Yu.A., Komarova O.V., Pilipenko V.N., Pokhvalenko V.A. *Opyt sozdaniya lesnykh kul'tur s zakrytoy kornevoy sistemoy v stepnoy i lesostepnoy zonakh yuga Rossiyskoy Federatsii* [Experience of creating forest crops with a closed bark system in the steppe and forest-steppe zones of the south of the Russian Federation]. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya [Astrakhan Bulletin of Environmental Education]*, 2022, no. 5 (70), pp. 203–211. DOI 10.36698/2304-5957-2022-5-203-211
- [3] Isakov I.Yu., Mikhin V.I., Tregubov O.V., Sidorov G.S., Popov A.V., Akhtyamov A.G. *Polimorfizm i bioraznoobrazie lesoobrazuyushchikh porod v iskusstvennykh i estestvennykh nasazhdeniyakh tsentral'noy lesostepi* [Polymorphism and biodiversity of forest-forming species in artificial and natural plantations of the central forest-steppe]. Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2021. 156 p.
- [4] Habineza E., Ali M., Reza N., Chung S.-O. Vegetable transplanters and kinematic analysis of major mechanisms Onion transplanter View project. *Korean J. Agric. Sci.*, 2023, v. 50(1), pp. 113–129. DOI: 10.7744/kjoas.20230007
- [5] Karayel D., Çanakci M., Topakci M., Aktaş A., Aytem H., Kriauciuniene Z. Technical evaluation of transplanters' performance for potted seedlings. *Turkish J. Agric. For.*, 2023, v. 47, no. 1, pp. 116–123. DOI: 10.55730/1300-011X.3068
- [6] Khadatkar A., Mathur S.M., Gaikwad B.B. Automation in transplanting: A smart way of vegetable cultivation. *Current Science. Indian Academy of Sciences*, 2018, v. 115, no. 10, pp. 1884–1892. DOI: 10.18520/cs/v115/i10/1884-1892
- [7] Tylek P., Szewczyk G., Kormanek M., Walczyk J., Sowa J. M., Pietrzykowski M., Woś B., Kielbasa P., Juliszewski T., Tadeusiewicz R., Adamczyk F., Danielak M., Wojciechowski J., Szczepaniak J., Szychta M., Szulc, T. Design of a Planting Module for an Automatic Device for Forest Regeneration. *Croat. J. For. Eng.*, 2023, v. 44, no. 1, pp. 203–215. DOI: 10.5552/crojfe.2023.1722

- [8] Iqbal Z. Design of a Gear Driven Hopper Type Dibbling Mechanism for a 2.7 kW Two-row Pepper Transplanter. Thesis for the Degree of Master of Science, Chungnam National University. DOI: 10.13140/RG.2.2.31847.80807
- [9] Durga M.L., Rao A.S., Kumar A.A. Performance Evaluation of Single Row-Low Horse Power Tractor Operated Vegetable Transplanter. *Curr. J. Appl. Sci. Technol.*, 2020, v. 39, no. 44, pp. 37–44. DOI: 10.9734/cjast/2020/v39i4431149
- [10] Mitrache P.M., Ciupercă R., Sărăcin I. Kinematics of the Seedling Plant with Vertical Distributor and Buckets. *E3S Web Conf.*, 2021, v. 286, pp. 2–11. DOI:10.1051/e3sconf/202128603012
- [11] Sun W., Zhang H., Simionescu P.A. Numerical Optimization and Experimental Validation of a Five-link Mechanism, Potato planter. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, 2021, v. 235, no. 23, pp. 6883–6892. DOI: 10.1177/09544062211004652
- [12] Han L.H., Mao H.P., Hu J.P., Kumi F. Development of a Riding-type Fully Automatic Transplanter for Vegetable Plug Seedlings. *Spanish J. Agric. Res.*, 2019, v. 17, no. 3. DOI: 10.5424/sjar/2019173-15358
- [13] Kumar G.V.P., Raheman H. Vegetable Transplanters for Use in Developing Countriesa Review. *Int. J. Veg. Sci.*, 2008, v. 14, no. 3, pp. 232–255. DOI: 10.1080/19315260802164921
- [14] Sun W., Simionescu P.A. Parameter Analysis and Field Tests of a Double Crank Multi-Rod under Plastic-Film Hill-Drop Mechanism Potato Planter. *Am. J. Potato Res.*, 2020, v. 97, no. 3, pp. 256–264. DOI: 10.1007/s12230-020-09773-5
- [15] Jin X., Li S., Yang X., Wu J., Liu Z., Liu H. Developments in Research on Seedling Auto-picking Device of Vegetable Transplanter. *Appl. Mech. Mater.*, 2013, v. 364, pp. 375–379. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.364.375
- [16] Jin X., Cheng Q., Zhao B., Ji J., Li M. Design and test of 2ZYM-2 Potted Vegetable Seedlings Transplanting Machine. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2020, v. 13, no. 1, pp. 101–110. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201301.5494
- [17] Bartenev I.I., Gavrin D.S. *Konstruktivnye osobennosti posadochnykh mashin* [Design features of planting machines]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2019, v. 9, no. 2, pp. 147–155. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2019.2/16
- [18] Hwang S.J., Park J.H., Lee J.Y., Shim S.B., Nam J.S. Optimization of Main Link Lengths of Transplanting Device of Semi-Automatic Vegetable Transplanter. *Agron.*, 2020, v. 10, p. 1938. DOI: 10.3390/AGRONOMY10121938
- [19] Markummingsih S., Hwang S.-J., Kim J.-H., Jang M.-K., Shin C.-S., Nam J. Comparison of Consumed Power and Safety of Two Types of Semi-Automatic Vegetable Transplanter: Cam and Four-Bar Link. *Agriculture*. MDPI AG, 2023, v. 13, no. 3, p. 588. DOI: 10.3390/agriculture13030588
- [20] Chowdhury M., Ali M., Habineza E., Reza M.N., Kabir M.S.N., Lim S.-J., Choi I.-S., Chung, S.-O. Analysis of Rollover Characteristics of a 12 kW Automatic Onion Transplanter to Reduce Stability Hazards. *Agriculture*. MDPI AG, 2023, v. 13, no. 3, p. 652. DOI: 10.3390/agriculture13030652
- [21] Zhou M., Shan Y., Xue X., Yin D. Theoretical analysis and development of a mechanism with punching device for transplanting potted vegetable seedlings. *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, 2020, v. 13, no. 4, pp. 85–92. DOI: 10.25165/j.ijabe.20201304.5404
- [22] Sun K., Ge R., Li T., Wang J. Design and Analysis of Vegetable Transplanter Based on Five-bar Mechanism. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2019, v. 692, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012029
- [23] Yu Y., Liu J., Ye B., Yu G., Jin X., Sun L., Tong J. Design and Experimental Research on Seedling Pick-Up Mechanism of Planetary Gear Train with Combined Non-circular Gear Transmission. *Chinese J. Mech. Eng.* Springer Singapore, 2019, v. 32, no. 1. DOI: 10.1186/s10033-019-0357-3
- [24] Shao Y., Liu Y., Xuan G., Hu Z., Han X., Wang Y., Chen B., Wang W. Design and Test of Multifunctional Vegetable Transplanting Machine. *IFAC-PapersOnLine*. Elsevier Ltd, 2019, v. 52, no. 30, pp. 92–97. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.12.503
- [25] Reza M.N., Islam M.N., Chowdhury M., Ali M., Islam S., Kiraga S., Lim S.J., Choi I.S., Chung S.O. Kinematic analysis of a gear-driven rotary planting mechanism for a six-row self-propelled onion transplanter. *Machines*. MDPI, 2021, v. 9, no. 9. DOI: 10.3390/machines9090183
- [26] Iqbal M.Z., Islam M.N., Ali M., Kabir M.S.N., Park T., Kang T.G., Park K.S., Chung, S.O. Kinematic analysis of a hopper-type dibbling mechanism for a 2.6 kW two-row pepper transplanter. *J. Mech. Sci. Technol.* Korean Society of Mechanical Engineers, 2021, v. 35, no. 6, pp. 2605–2614. DOI: 10.1007/s12206-021-0531-2
- [27] Iqbal M.Z., Islam M.N., Chowdhury M., Islam S., Park T., Kim Y.J., Chung, S.O. Working speed analysis of the gear-driven dibbling mechanism of a 2.6 kw walking-type automatic pepper transplanter. *Machines*, 2021, v. 9, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.3390/machines9010006
- [28] Zeng F., Li X., Bai H., Cui J., Liu X., Zhang Y. Experimental Research and Analysis of Soil Disturbance Behavior during the Hole Drilling Process of a Hanging-Cup Transplanter by DEM. *Processes*, 2023, v. 11, no. 2, pp. 1–18. DOI: 10.3390/pr11020600
- [29] Yang Q., Zhang R., Jia C., Li Z., Zhu M., Addy M. Study of dynamic hole-forming performance of a cup-hanging planter on a high-speed seedling transplanter. *Front. Mech. Eng.*, 2022, v. 8, no. August, pp. 1–16. DOI: 10.3389/fmech.2022.896881
- [30] Bai H., Li X., Zeng F., Cui J., Zhang Y. Study on the Impact Damage Characteristics of Transplanting Seedlings Based on Pressure Distribution Measurement System. *Horticulturae*, 2022, v. 8, no. 11. DOI: 10.3390/horticulturae8111080
- [31] Cui J., Li X., Zeng F., Bai H., Zhang Y. Parameter Calibration and Optimization of a Discrete Element Model of Plug Seedling Pots Based on a Collision Impact Force. *Appl. Sci.*, 2023, v. 13, no. 10. DOI: 10.3390/app13106278
- [32] Kataev Yu.V., Goncharova Yu.A., Sviridov A.S., Tuzhilin S.P. *Primenenie tekhnologiiy 3D-pechati i 3D-skanirovaniya pri izgotovlenii i remonte sel'skokhozyaystvennoy tekhniki* [Application of 3D printing and 3D scanning technologies in the manufacture and repair of agricultural machinery]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* [Machinery and equipment for the village], 2023, no. 1, pp. 34–38. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-1-34-38

- [33] Goncharova Yu.A. *Renovatsiya tekhnicheskikh sredstv s ispol'zovaniem 3D-pechati polimernykh zapasnykh chastey* [Renovation of technical equipment using 3D printing of polymer spare parts]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.20.03. Moscow, 2022, 188 p.
- [34] Lysych M.N., Shabanov M.L., Borovenskiy V.R. *Ispol'zovanie tekhnologii 3D-pechati pri proektirovanii pochvoobrabatyvayushchikh orudiy* [The use of 3D printing technologies in the design of tillage implements]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2016, no. 11, pp. 306–311.
- [35] Lysych M., Bukhtoyarov L., Druchinin D. Design and Research Sowing Devices for Aerial Sowing of Forest Seeds with UAVs. *Inventions*, 2021, v. 8, no. 83. DOI: 10.3390/inventions6040083

*The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 22-79-10010, <https://rscf.ru/project/22-79-10010/>*

## Authors' information

**Lysych Mikhail Nikolaevich**  — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VGLTU), [miklynea@yandex.ru](mailto:miklynea@yandex.ru)

**Malyukov Sergey Vladimirovich** — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Forestry Mechanization and Machine Design, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VGLTU), [malyukovsergey@yandex.ru](mailto:malyukovsergey@yandex.ru)

**Shavkov Mikhail Viktorovich** — Cand. Sci. (Tech.), Head of Supply and Logistics Department, RusHydrocom (RGK) LLC, [shavkovmv@mail.ru](mailto:shavkovmv@mail.ru)

**Gnusov Maksim Aleksandrovich** — Cand. Sci. (Tech.), Head of the Forestry Engineering Laboratory of the Engineering Center VGLTU, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov (VGLTU), [mgnusov@yandex.ru](mailto:mgnusov@yandex.ru)

Received 28.03.2024.

Approved after review 08.11.2024.

Accepted for publication 27.11.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest

## ОЦЕНКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С ПОЛОТНОМ ПУТИ В КОНЦЕПЦИИ ПОДВИЖНОСТИ

А.И. Марковнина✉, В.В. Беляков, В.С. Макаров,  
У.Ш. Вахидов, А.А. Ключкин

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева», 603155, Россия,  
г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24

makvl2010@gmail.com

Рассмотрена методика расчета параметра подвижности транспортно-технологических машин по трем составляющим: техническим характеристикам машины, условиям движения на территории, режиму движения. Представлены технические характеристики транспортного средства, необходимые для определения первой составляющей, проведено их сравнение с условиями движения на конкретной территории. Приведены технические оценки вездеходов. Сделан теоретический вывод о типе вездехода, который может преодолевать разнообразные препятствия на выбранном участке.

**Ключевые слова:** подвижность, проходимость, технические характеристики, транспортно-технологическая машина

**Ссылка для цитирования:** Марковнина А.И., Беляков В.В., Макаров В.С., Вахидов У.Ш., Ключкин А.А. Оценка взаимодействия транспортного средства с полотном пути в концепции подвижности // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 162–171. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-162-171

**П**одвижность — это интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин (ТТМ), определяющее ее способность выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и техническому состоянию самой машины, то есть возможность машины противостоять внешним и внутренним факторам, препятствующим выполнению поставленной задачи [1, 2].

Проходимость — это эксплуатационное свойство, определяющее возможность движения автомобиля в ухудшенных дорожных условиях, в том числе по бездорожью, возможность преодолевать различные препятствия, которое относится к критическим условиям подвижности машины по мобильности [3]. На основе параметров ТТМ и дорожных условий осуществляется построение карты подвижности.

Управление ТТМ сводится к решению следующих задач:

- 1) поддержание скорости движения;
- 2) поддержание ориентации и курсовой устойчивости;
- 3) поддержание подвижности;
- 4) устранение критических ситуаций;
- 5) обеспечение жизнеспособности и безопасности.

Для построения карты подвижности [4–10] конкретной ТТМ можно оперировать 1-й, 2-й и 4-й задачами. Поддержание скорости движения включает в себя управление энергетической, силовой установками и органами торможения. Поддержание ориентации и курсовой устойчивости состоит из уровней управляемости, устойчивости и маневренности. Задача устранения критических ситуаций многогранна, для ее решения ТТМ следует обеспечить системами помощи водителю и поддержания проходимости [11].

### Цель работы

Цель работы — разработка методики расчета параметра подвижности, учитывающего одновременно технические характеристики ТТМ, особенности микрорельефа и физико-механические свойства материала полотна пути территории движения.

### Методика расчета показателя подвижности

Максимальный показатель подвижности фиксируется при движении вездехода в условиях стабильного опорного основания. Его рассчитывают при отсутствии влияния внешних факторов, т. е. по анализу характеристик

транспортного средства, без учета влияния физико-механических свойств материала полотна пути. Данный уровень будет считаться эффективной подвижностью рассматриваемого транспортного средства. Все другие случаи движения происходят в условиях нестабильного опорного основания при неэффективном уровне подвижности, когда снижается скорость движения, возрастает расход топлива и наблюдаются другие негативные последствия. При частичной потере подвижности влияние внешних факторов на движение незначительно и скорость движения останется близкой к максимально возможной или снизится несущественно. При критической потере подвижности скорость ТТМ будет близка к минимальной, создавая большой риск полной потери подвижности, когда ТТМ полностью теряет возможность двигаться.

Для определения параметра подвижности следует проанализировать возможность или невозможность проезда машины по рассматриваемой местности, которые подразделяются на три варианта движения транспортного средства:

1) движение не затруднено (с сохранением эффективной подвижности или с неэффективной подвижностью) [12–14];

2) замедлено (с неэффективной подвижностью, частичной потерей подвижности);

3) невозможно (с полной потерей подвижности).

При незатрудненном движении ТТМ проедет по участку без маневрирования и на скорости, близкой к максимальной. В случае замедленного движения для ТТМ может возникнуть необходимость притормаживания, маневрирования или понижения передачи. При попытке движения в третьем случае ТТМ застрянет вследствие недостаточного сцепления с полотном пути или машине будет нанесен ущерб по причине сложного микрорельефа, что сделает дальнейшее движение невозможным [15, 16, 28–36].

Для оценки подвижности машины относительно условий местности (территории) используют карты подвижности. Разделив карту местности на небольшие участки и рассчитав показатель подвижности для каждого из них, составляют общую карту подвижности определенной ТТМ на данной территории. Такая карта позволяет определить наиболее короткий и максимально быстрый маршрут.

Составление карт подвижности ТТМ на основании характеристик грунта отличается высокой трудоемкостью, так как предусматривает ручной труд в большом объеме. Системный анализ различных показателей, биоклиматические

схемы и статистические различия между отдельными элементами поверхности необходимы при определении по карте границ участков без проведения дополнительного мониторинга местности. Наряду с картами целесообразно использовать фотографии поверхности с растительностью, а также описания грунтов и их характеристики. Важно подключать к работе почвенные и геологические карты, которые могут представлять собой исходный материал для определения оптимальных маршрутов.

После определения геологически однородных участков выделяют поверхности, не составляющие препятствия при движении ТТМ, т. е. плоские и твердые. Это позволяет определить строение (профиль) труднопроходимых участков и изучить физико-механические свойства мягких грунтов, не учитывая профиль.

Определение показателя подвижности относится к решению задачи многокритериальной оптимизации и позволяет получить безразмерную величину

$$P = \lambda_m \pm \lambda_t \pm \lambda_p, \quad (1)$$

где  $\lambda_m$  — техническая оценка машины;

$\lambda_t$  — эксплуатационная оценка территории;

$\lambda_p$  — оценка режима движения.

Знак «±» означает, что в частных случаях рельеф территории и режим движения могут оказывать благоприятное (+) или негативное (–) влияние на подвижность ТТМ. Например, при движении в гору ТТМ может не хватить мощности или сцепления с грунтом, хотя при движении на спуск требуется меньшая мощность для проезда и ТТМ может съехать с горы под воздействием силы тяжести. При этом рассматривается только такой склон, угол наклона которого не приведет к опрокидыванию или повреждению транспортного средства.

Обобщенные критерии технической оценки машины  $\lambda_m$  рассчитываются как функция полезности [17, 18] по методу многокритериальной оценки

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n w_i Q_i, \quad (2)$$

где  $n$  — количество учитываемых технических характеристик;

$w_i$  — весовой коэффициент важности частного критерия (при этом  $\sum w_i = 1$ );

$Q_i$  — оценка частного критерия.

Технические характеристики ТТМ разнообразны, имеют различные единицы измерения и значения, отличающиеся по градации. Сравнивать между собой длину вездехода и мощность двигателя без предварительной

подготовки невозможно, поэтому все значения критериев приводятся к безразмерным нормированным значениям [19].

Предварительно значения частных критериев с помощью положительных линейных преобразований приводятся к единому безразмерному виду — шкале  $[\alpha, \beta]$ , где  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 1$ .

Максимизируются следующие показатели машины: грузоподъемность, дорожный просвет, колесная база, передний свес, максимальная скорость. Остальные показатели минимизируются. Например, чем больше грузоподъемность и скорость, тем эффективнее работа ТТМ, чем больше передний свес, тем больший уклон может преодолеть ТТМ. В то же время чем меньше полная масса, тем меньше нагрузка на оси и давление на грунт, чем меньше габаритные размеры, тем больше вероятность проезда по узкому коридору между дискретными препятствиями или по их краю [20]. Для критериев, которые максимизируются (т. е. тем лучше, чем значение выше), преобразование имеет вид

$$Q_i = \frac{Q_i - Q_i^-}{R_i} (\beta - \alpha) + \alpha,$$

а для критериев, которые минимизируются (тем лучше, чем значение критерия ниже) — вид

$$Q_i = \frac{Q_i^+ - Q_i}{R_i} (\beta - \alpha) + \alpha,$$

при этом  $R_i = Q_i^+ - Q_i^-$  — размах критерия  $Q_i$ , разница между максимальным и минимальным значениями.

После получения безразмерных величин применяется метод экспертных оценок — попарное сравнение критериев, по которому любые свойства любого объекта можно оценить по единой шкале [21]. В данной выборке нет деления критериев по группам, поскольку их мало. При большей выборке характеристик применяется деление критериев на группы: габаритные размеры, параметры двигателя, параметры движителя и др. В группах, в свою очередь, деление не требуется.

По итогу весовые оценки критериев выставляются для групп в целом и внутри каждой группы. Величина весов с таким делением становится меньше, но точность оценки, соответственно, и результатов расчетов, повышается.

Подставляя полученные данные в формулу (2), рассчитывается технический показатель транспортного средства, который отражает уровень эффективной подвижности.

Рассматривая параметр подвижности, как возможность ТТМ преодолевать препятствия при выполнении каких-либо задач (движения и маневрирования), нельзя рассматривать показатель, характеризующий рельеф территории, по которой движется ТТМ, как самостоятельный объект, в отрыве от характеристик ТТМ. Рельеф территории может иметь разную оценку по проходимости и подвижности для разных транспортных средств, в зависимости от геометрических и силовых характеристик.

При расчете комплексного показателя эксплуатационной оценки территории  $\lambda_t$  рассматриваются два вопроса: проедет ли транспортное средство по имеющимся сцепным свойствам (показателям опорной проходимости) и по габаритным (показателям профильной проходимости). По сцепным свойствам рассматриваются непосредственно сцепление с дорогой и вероятность пробуксовки. Геометрические показатели включают в себя следующие возможности ТТМ [22]:

- преодоление подъемов;
- преодоление спусков, движение вдоль склона (сопротивляемость перевороту);
- преодоление эскарпов, как при наезде на препятствие, так и при спуске с него;
- преодоление рвов, валов, как минимум не задевая препятствие элементами подвески;
- проезд дискретных препятствий — сбоку или между ними.

Рассмотрим методику расчета показателя территории движения. Для оценки предлагается использовать вероятностный подход.

Сначала охарактеризуем геометрические показатели. Оценка непроходимости территории представляет собой ответ на два вопроса: 1) с какой вероятностью ТТМ будет взаимодействовать с препятствием на данном участке; 2) с какой вероятностью препятствие сможет остановить ТТМ.

Вероятность взаимодействия ТТМ с препятствием определяется отношением площади препятствия к площади участка. Вероятность преодоления препятствия выражается отношением геометрического параметра препятствия к соответствующему параметру ТТМ. В итоговую формулу оценки подвижности ТТМ вносится значение, ухудшающее общую оценку автомобиля, а также числовая оценка микрорельефа участка, создающего сложности для движения, т. е. обуславливающего полную остановку ТТМ, что в результате будет означать полную потерю подвижности.

Окончательное значение покажет подвижность ТТМ на заданном участке территории в имеющихся условиях. Значение показателя

подвижности  $\Pi > 0$  будет свидетельствовать о наличии у машины возможностей для проезда,  $\Pi < 0$  — об остановке и невозможности преодолеть препятствие, т. е. о необходимости использования иного маршрута.

За эксплуатационную оценку территории  $\lambda_T$  можно принять оценку ее непроходимости выбранным вездеходом. Показатель  $\lambda_T$  можно рассчитать с помощью методов теории вероятностей и получить ответ на вопрос, с какой вероятностью вездеход остановится, перемещаясь по участку. В целом такой метод расчета применим для участка любой площади, однако чем больше будет участок, тем больше будет погрешность [23].

Устанавливается:

– событие  $A$  — вероятность остановки вездехода при проезде по препятствию или грунту с малой несущей способностью;

– событие  $B$  — вероятность попадания вездехода на препятствие или грунт с малой несущей способностью.

Предлагается два метода расчета показателя непроходимости участка территории конкретной машины.

**Метод I.** По теореме умножения вероятностей [24]. Вероятность произведения двух зависимых событий равна произведению вероятности одного из них и условной вероятности другого при условии, что первое событие произошло:

$$P(AB) = P(A)P(B/A) = P(B)P(A/B).$$

При этом

$$P(B) = P_{(\text{опоры})} + P_{(\text{препятствие})} - P_{(\text{опора} \cdot \text{препятствие})}$$

где  $P_{(\text{опоры})}$  — вероятность остановки вездехода вследствие свойств материала полотна пути;

$P_{(\text{препятствие})}$  — вероятность остановки вездехода при наезде на препятствие, геометрические особенности которого непреодолимы для выбранной техники.

Вероятности остановки из-за свойств материала полотна пути и при наезде на препятствие:

$$P_{(\text{опоры})} = \frac{S_{\text{оп}}}{S_{\text{уч}}};$$

$$P_{(\text{препятствия})} = \frac{S_{\text{преп}}}{S_{\text{уч}}},$$

где  $S_{\text{оп}}$  — площадь фрагмента участка с низкой несущей способностью (площадь нестабильной опоры);

$S_{\text{преп}}$  — площадь препятствия на участке;

$S_{\text{уч}}$  — площадь участка территории.

$$\begin{aligned} P(A) &= P(A_1 + A_2 + A_3 + A_4) = \\ &= P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) + P(A_4) - P(A_1A_2) - \\ &\quad - P(A_1A_3) - P(A_1A_4) - P(A_2A_3) - \\ &\quad - P(A_2A_4) - P(A_3A_4) + P(A_1A_2A_3) + \\ &\quad + P(A_1A_2A_4) + P(A_2A_3A_4) + P(A_1A_3A_4) - \\ &\quad - P(A_1A_2A_3A_4), \end{aligned}$$

где  $P(A_1)$ ,  $P(A_2)$ ,  $P(A_3)$ ,  $P(A_4)$  — вероятность непреодоления препятствия по высоте, углу наклона, ширине препятствия, расстоянию между препятствиями (при объезде дискретных препятствий на участке).

**Метод II.** По формуле полной вероятности [25]. Если событие  $A$  может произойти только при условии появления одного из событий  $H_1$ ,  $H_2$ , ...,  $H_n$ , называемых гипотезами, образующих полную группу событий, то вероятность события  $A$  равна сумме произведений вероятностей каждого из этих событий на условные вероятности события  $A$

$$P(A) = P(H_1)P(A/H_1) + P(H_2)P(A/H_2) + \dots + P(H_n)P(A/H_n); \quad (3)$$

$$P(H_1) + P(H_2) + \dots + P(H_n) = 1.$$

Для такого расчета в рассматриваемых условиях выдвигаются следующие гипотезы:

–  $H_1$  — наезд на устойчивое твердое препятствие (влияет только геометрия);

–  $H_2$  — езда по ровному участку с устойчивой твердой поверхностью (влияют только физико-механические свойства грунта);

–  $H_3$  — наезд на хрупкое неустойчивое препятствие (влияют и геометрия, и физико-механические свойства грунта);

–  $H_4$  — езда по ровному участку с неустойчивой нетвердой поверхностью (влияет только физико-механические свойства грунта).

Указанные гипотезы охватывают все возможные варианты движения. При этом гипотезы  $H_2$  и  $H_4$  можно объединить, поскольку они обозначают одно и то же — проезд по ровному участку, причем и в том, и в другом случае на движение влияют только физико-механические свойства поверхности движения, отличается только величина воздействия на возможность проезда. Соответственно, формула полной вероятности примет вид

$$P(A) = P(H_1)P(A/H_1) + P(H_2)P(A/H_2) + P(H_3)P(A/H_3),$$

где  $P(H_1)$ ,  $P(H_2)$ ,  $P(H_3)$  — вероятность проезда соответственно: по препятствию с хорошим грунтом, по ровному участку с любым грунтом, по препятствию с плохим грунтом;

$P(A/H_1)$  — вероятность остановки вездехода вследствие геометрических особенностей рельефа и ТТМ;

$P(A/H_2)$  — вероятность остановки вездехода из-за особенностей сцеплений шин с опорой;

$P(A/H_3)$  — вероятность остановки вездехода при совместном влиянии геометрических и сцепных особенностей рельефа и грунта.

Описанные вероятности рассчитываются по формулам:

$$H_n = \frac{S_{\text{ф.уч}}}{S_{\text{уч}}};$$

$$P(A/H_1) = P(A_1 + A_2 + A_3 + A_4);$$

$$P(A/H_2) = P(K) + P(C\sigma) - P(KC\sigma);$$

$$P(A/H_3) = P(A/H_1) + P(A/H_2) - P(A/H_1 \times A/H_2),$$

где  $S_{\text{ф.уч}}$  — площадь рассматриваемого фрагмента участка (ровный или имеется препятствие);

$S_{\text{уч}}$  — площадь всего рассматриваемого участка;

$P(A_1)$ ,  $P(A_2)$ ,  $P(A_3)$ ,  $P(A_4)$  — вероятность преодоления препятствия: по высоте, углу наклона, ширине препятствия, расстоянию между препятствиями (при объезде дискретных препятствий на участке);

$P(K)$  — вероятность машины завязнуть в грунте;

$P(C\sigma)$  — вероятность забуксовать из-за недостаточного коэффициента сцепления.

Последние две вероятности рассчитываются следующим образом:

$$P(K) = \frac{h_{\text{кол}}}{h_{\text{клир}}};$$

$$P(C\sigma) = \frac{\varphi_{\text{б}}}{\varphi_{\text{сц}}},$$

где  $h_{\text{кол}}$  — высота колеи;

$h_{\text{клир}}$  — дорожный просвет машины;

$\varphi_{\text{б}}$  — коэффициент буксования;

$\varphi_{\text{сц}}$  — коэффициент сцепления.

Вероятности преодоления являются отношениями характеристик микрорельефа территории к геометрическим параметрам вездехода, а именно

$$P(A_1) = \frac{h_{\text{т}}}{h_{\text{ш}}},$$

где  $h_{\text{т}}$  — высота препятствия на местности;

$h_{\text{ш}}$  — максимально возможная высота препятствия для преодоления вездеходом;

$$P(A_2) = \frac{\alpha_{\text{т}}}{\alpha_{\text{м}}},$$

где  $\alpha_{\text{т}}$  — угол наклона препятствия;

$\alpha_{\text{м}}$  — максимально возможный преодолимый угол (угол съезда или въезда машины);

$$P(A_3) = \frac{b_{\text{т}}}{b_{\text{м}}},$$

где  $b_{\text{т}}$  — ширина (длина) препятствия;

$b_{\text{м}}$  — максимальная ширина препятствия, которое возможно преодолеть на выбранной машине;

$$P(A_4) = \frac{l_{\text{м}}}{l_0},$$

где  $l_{\text{м}}$  — ширина вездехода (габаритный коридор);

$l_0$  — расстояние между дискретными препятствиями.

Каждый из приведенных выше параметров описывает частный случай препятствия:  $P(A_1)$  — прямые углы, эскарпы, высокие препятствия;  $P(A_2)$  — холмы, бугры, овраги и прочие препятствия с плавно изменяющимся рельефом;  $P(A_3)$  — рвы, дискретные препятствия, ямы;  $P(A_4)$  — движение в случае, когда препятствие невозможно преодолеть путем прямого проезда и возникает необходимость маневрирования, например в лесу.

После получения оценки непроходимости территории и оценки уровня эффективной подвижности получаем значение, характеризующее возможность проезда вездехода по выбранному участку. Если значение  $> 0$  — вездеход проедет, если  $< 0$  — потеряет возможность дальнейшего продвижения.

Для того чтобы понять, насколько быстро вездеход сможет преодолеть участок, находится отношение значения подвижности к значению эффективной подвижности

$$P_v = \frac{\lambda_{\text{м}}}{\Pi},$$

где  $P_v$  — оценка подвижности по скорости;

$\lambda_{\text{м}}$  — техническая оценка машины;

$\Pi$  — показатель подвижности ТТМ.

Если итоговое значение  $P_v$  составляет от 0,75 до 0,99, вездеход может преодолеть участок на скорости, близкой к максимально возможной; если от 0,3 до 0,75 — движение частично затруднено; от 0,15 до 0,3 — движение затруднено в значительной степени; от 0,01 до 0,15 — движение граничит с риском полной потери подвижности ТТМ.

Т а б л и ц а 1

**Вероятность увидеть препятствие,  $P_{\text{увид}}$  [26]**Probability of seeing an obstacle,  $P_{\text{увид}}$  [26]

Ограниченная видимость, %	Недостаточная видимость, %				
	1	25	50	75	99
1	1,00	0,75	0,50	0,25	0,01
25	0,75	0,56	0,38	0,19	0,01
50	0,50	0,38	0,25	0,13	0,01
75	0,25	0,19	0,13	0,06	0,01
99	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Третья составляющая формулы (1) оценки подвижности  $\lambda_p$  начинает влиять на показатель П в случае возникновения критической ситуации — потеря подвижности, повреждение техники. Расчет оценки режима движения теоретически можно выполнить по формуле полной вероятности (3) с полным описанием всех возможных случаев потери подвижности.

Расчет оценки режима движения можно сделать по формуле полезности аналогично формуле (2) с учетом того, что в наибольшей степени повлияет на выбор режима движения и сможет повысить параметр подвижности. При расчете оценки режима движения рассматриваются две составляющие: устройства повышения проходимости и рациональность водителя (выбор передачи, скорости, маршрута в зависимости от визуальной оценки препятствия — коэффициента адекватности оценки обстановки).

Формула принимает вид:

$$\lambda_p = w_{\text{устр}} Q_{\text{устр}} + w_v Q_v;$$

$$w_{\text{устр}} + w_v = 1,$$

где  $w_{\text{устр}}$  — весовой коэффициент влияния установленных на транспортное средство дополнительных устройств повышения проходимости;

$Q_{\text{устр}}$  — оценка влияния установленных на транспортное средство дополнительных устройств повышения проходимости;

$w_v$  — весовой коэффициент влияния выбора водителя;

$Q_v$  — оценка влияния выбора водителя.

Соотношение величин  $w_{\text{устр}}$  и  $w_v$  находится методом экспертных оценок.

Т а б л и ц а 2

**Вероятность верно отреагировать на препятствие,  $P_{\text{реакт}}$  [27]**Probability of reacting correctly to the obstacle,  $P_{\text{реакт}}$  [27]

Возраст, лет	Стаж, опытность, % от возраста			
	1	20	40	60
20	0,40	0,60	0,79	0,99
35	0,33	0,55	0,73	0,92
50	0,27	0,46	0,65	0,84
60 и более	0,20	0,39	0,58	0,77

Значение  $Q_v$  зависит от психофизиологических параметров водителя, осуществляющего управление автомобилем. На стиль вождения и рациональность выбора пути будут влиять: возраст водителя, стаж вождения (в том числе и стаж вождения по труднопроходимой местности), состояние здоровья, соблюдение режима труда и отдыха, иные показатели, влияющие на физическое и психологическое здоровье. На возможность выбора пути и нужного режима движения влияет также видимость препятствий (табл. 1, 2).

В итоге вероятность рационально отреагировать на препятствие включает в себя вероятность увидеть препятствие и верно оценить обстановку

$$Q_v = P_{\text{увид}} P_{\text{реакт}}$$

где  $P_{\text{увид}}$  — вероятность увидеть препятствие;  
 $P_{\text{реакт}}$  — вероятность верно отреагировать на препятствие.

**Выводы**

Предложенный выше подход позволяет в кратчайшие сроки реализовать проверку работоспособности и отладку автоматизированных систем прокладки рациональных маршрутов следования в процессе лесозаготовительных работ. Дальнейшее развитие описанной выше концепции заключается в:

– масштабировании исследования на натуральных объектах для оценки работоспособности методик выбора кратчайшего маршрута при максимальной производительности;

– исследовании возможности применения методики расчета показателя подвижности на различных типах лесозаготовительных машин;

– оценке экологического воздействия лесозаготовительной машины на уплотнение грунта лесосеки.

## Список литературы

- [1] Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Бухтояров Л.Д., Малюков С.В., Дручинин Д.Ю. Определение динамических нагрузок в трансмиссии гусеничной лесозаготовительной машины при преодолении препятствий // Лесотехнический журнал, 2017. Т. 7. № 1 (25). С. 185–196.
- [2] Беляков В.В., Беляев А.М., Бушуева М.Е., Вахидов У.Ш. Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 2013. № 3 (100). С. 145–175.
- [3] Автоматические и интеллектуальные системы транспортных средств. Автомобили и тракторы, многоцелевые колесные и гусеничные машины, наземные транспортно-технологические комплексы, мобильные роботы и планетоходы / под ред. В. Белякова, Л. Палковича. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 2012. 475 с.
- [4] Hubacek M., Almasiova L., Brenova M., Bures M., Mertova E. Assessing quality of soil maps and possibilities of their use for computing vehicle mobility // 23rd Central European Conf. on Central Europe Area in View of Current Geography, Brno, 2016, pp. 99–110. <https://doi.org/10.5817/CZ.MUNI.P210-8314-2016>
- [5] McCullough M., Jayakumar P., Dasch J., Gorsich D. The Next Generation NATO Reference mobility model development // J. of Terramechanics, 2017, v. 73, pp. 49–60.
- [6] Bekker M. Theory of land locomotion. University of Michigan Press, 1960, 520 p.
- [7] Bradbury M., Dasch J., Gonzalez R., Hodges H., Jain A., Iagnemma K., Letherwood M.D., McCullough M., Priddy J., Wojtysiak B., Wong J.Y., Jayakumar P., Hoenlinger M. Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM) // Final Report by NATO Exploratory Team ET-148, 2016, 231 p.
- [8] Wong J., Jayakumar P., Toma E., Preston-Thomas J. Comparison of simulation models NRMM and NTPVM for assessing military tracked vehicle cross-country performance // J. of Terramechanics, 2018, v. 80, pp. 31–48.
- [9] McCullough M., Jayakumar P., Dasch J.M., Gorsich D. The Next Generation NATO Reference mobility model development // J. of Terramechanics, 2017, v. 73, pp. 49–60.
- [10] Rybansky M., Hofmann A., Hubáček M., Kovarik V., Talhofer V. The impact of terrain on cross-country mobility geographic factors and their characteristics // 18th Int. Conf. of the Int. Society for Terrain-Vehicle Systems, ISTVS 2014, Seoul, Korea, 2014, 6 p.
- [11] Костин И.М., Фасхиев Х.А. Обеспечение конкурентоспособности грузовых автомобилей на этапе разработки. Набережные Челны: Изд-во КамПИ, 2001. 349 с.
- [12] Узлов В.А., Шишков Г.И., Щербаков В.В. Основные физические параметры снежного покрова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. № 1 (103). С. 119–129.
- [13] Беляев А.М. Разработка методики расчета подвижности и эффективности шасси мобильных автономных комплексов для движения в береговой зоне: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. Нижний Новгород, 2021. 164 с.
- [14] Зезюлин Д.В. Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. Нижний Новгород, 2013. 218 с.
- [15] Вершинин А.В., Ерасов И.А., Левшунов Л.С., Янкович А.В. Влияние неравномерности скорости резания мерзлого грунта подпочной машины на энергоемкость его разрушения // Современные проблемы науки и образования, 2014. № 6. С. 264.
- [16] Affleck R.T., Melloh R.A., Shoop S.A. Cross-country mobility on various snow conditions for validation of a virtual terrain // J. of Terramechanics, 2009, v. 46, pp. 203–210.
- [17] Горелов В.А. Научные методы повышения безопасности и энергоэффективности движения многоосных колесных транспортных комплексов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. Москва, 2012. 336 с.
- [18] Барахтанов Л.В., Ершов В.И., Куляшов А.П., Рукавишников С.В. Снегоходные машины. Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. 191 с.
- [19] Постников В.М., Спиридонов С.Б. Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // Наука и образование, 2015. № 6. С. 267–287 DOI: 10.7463/0615.0780334
- [20] Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. М.: Университетская лавка, Логос, 2008. 392 с.
- [21] Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств. М.: Машиностроение, 1982. 284 с.
- [22] Папунин А.В. Методика расчета, выбора и оценка основных параметров движителя многоосной колесной машины при преодолении разрушаемых препятствий: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. Нижний Новгород, Изд-во Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева, 2019. 175 с.
- [23] Бухарин Н.А., Бронштейн Я.И., Буянов В.М., Веркевич О.И., Голяк В.К., Доброхотов Е.А., Чепурный В.Д. Проходимость автомобиля. М.: Воениздат, 1959. 310 с.
- [24] Трофимова Е.А., Кисляк Н.В., Гилев Д.В. Теория вероятностей и математическая статистика / под ред. Е.А. Трофимовой. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2018. 160 с.
- [25] Тюрин Ю.Н., Макаров А.А., Высоцкий И.Р., Яценко И.В. Теория вероятностей и статистика. М.: МЦНМО, АО «Московские учебники», 2004. 256 с.
- [26] Мишуринов В.М., Романов А.Н. Надежность водителя и безопасность движения. М.: Транспорт, 1990. 167 с.
- [27] Воронцова Ю., Ермолаев В.В. Психологические особенности внимания в неравновесных психических состояниях: типология профессиональных водителей // Человеческий капитал, 2021. № 9(153). С. 112–126.
- [28] Зимель Г.В. Теория автомобиля. М.: Воениздат, 1957. 455 с.
- [29] Мамити Г.И., Плиев С.Х. Проходимость колесной машины. Владикавказ: МАВР, 2013. 134 с.
- [30] Чудаков Е.А. Теория автомобиля. М.: МАШГИЗ, 1950. 344 с.
- [31] Платонов В.Ф., Леиашвили Г.Р. Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины. М.: Машиностроение, 1986. 294 с.
- [32] Бочаров Н.Ф., Цитович И.С., Полунгян А.А., Семенов В.М., Цыбин В.С., Желлов Л.Ф. Конструирование и расчет колесных машин высокой проходимости

- сти / под общ. ред. Н.Ф. Бочарова, И.С. Цитовича. М.: Машиностроение, 1983. 303 с.
- [33] Саблин С.Ю., Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Прокопец В.С., Брюховецкий А.Н., Голубев М.И. Технико-экономическое обоснование элементов плана лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 3. С. 111–117. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-111-117
- [34] Платонов В.Ф. Полноприводные автомобили. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
- [35] Скородумов А.И. Учебник сержанта мотострелковых войск. М.: Воениздат, 2003. 308 с.
- [36] Математическая модель комплексной оценки подвижности машин высокой проходимости // SAE Prepr., s. a., № 740426, 24 p. URL: [https://btvt.narod.ru/4/mat\\_proxod.htm](https://btvt.narod.ru/4/mat_proxod.htm) (дата обращения 05.04.2024).

## Сведения об авторах

**Марковнина Алина Ивановна** <sup>✉</sup> — ассистент, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», [a.markovnina@nntu.ru](mailto:a.markovnina@nntu.ru)

**Беляков Владимир Викторович** — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», [belyakov@nntu.ru](mailto:belyakov@nntu.ru)

**Макаров Владимир Сергеевич** — д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», [vladimir.makarov@nntu.ru](mailto:vladimir.makarov@nntu.ru)

**Вахидов Умар Шахидович** — д-р техн. наук, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», [vahidov@nntu.ru](mailto:vahidov@nntu.ru)

**Клюшкин Антон Алексеевич** — магистр, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», [aak-nntu@yandex.ru](mailto:aak-nntu@yandex.ru)

Поступила в редакцию 12.03.2024.

Одобрено после рецензирования 01.11.2024.

Принята к публикации 27.11.2024.

## ESTIMATION OF INTERACTION BETWEEN VEHICLE AND ROAD BED IN CONCEPT OF MOVEMENT

**A.I. Markovnina** <sup>✉</sup>, **V.V. Belyakov**, **V.S. Makarov**,  
**U.Sh. Vahidov**, **A.A. Klyushkin**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, 24, Minin st., 603155, Nizhny Novgorod, Russia  
[makvl2010@gmail.com](mailto:makvl2010@gmail.com)

The methodology of calculation of mobility parameter of transport-technological machines according to three components is considered, as technical characteristics of the machine, traffic conditions on the territory, traffic mode. The technical characteristics of the vehicle necessary for determination of the first component are presented, their comparison with conditions of movement on a specific territory is carried out. Technical evaluations of all-terrain vehicles are given. A theoretical conclusion is made about the type of all-terrain vehicle that can overcome a variety of obstacles in the selected area.

**Keywords:** mobility, cross-country ability, technical characteristics, transport-technological machine

**Suggested citation:** Markovnina A.I., Belyakov V.V., Makarov V.S., Vakhidov U.Sh., Klyushkin A.A. *Otsenka vzaimodeystviya transportnogo sredstva s polotnom puti v kontseptsii podvizhnosti* [Estimation of interaction between vehicle and road bed in concept of movement]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 162–171. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-162-171

## References

- [1] Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Bukhtoyarov L.D., Malyukov S.V., Druchinin D.Yu. *Opreделение dinamicheskikh nagruzok v transmssii gusenichnoy lesozagotovitel'noy mashiny pri preodolenii prepyatstviy* [Determination of dynamic loads in the transmission of a tracked logging machine when overcoming obstacles]. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering J.]*, 2017, v. 7, no. 1 (25), pp. 185–196.

- [2] Belyakov V.V., Belyaev A.M., Bushueva M.E., Vakhidov U.Sh. *Kontseptsiya podvizhnosti nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin* [The concept of mobility of ground transport and technological machines]. Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev], 2013, no. 3 (100), pp. 145–175.
- [3] *Avtomaticheskije i intellektual'nye sistemy transportnykh sredstv. Avtomobili i traktory, mnogotselevye kolesnye i gusenichnye mashiny, nazemnye transportno-tekhnologicheskie komplekсы, mobil'nye roboty i planetokhody* [Automatic and intelligent systems of vehicles. Automobiles and tractors, multi-purpose wheeled and tracked vehicles, ground transport and technological complexes, mobile robots and rovers]. Eds. V. Belyakov, L. Palkovich. Nizhny Novgorod: R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 2012, 475 p.
- [4] Hubacek M., Almasiova L., Brenova M., Bures M., Mertova E. Assessing quality of soil maps and possibilities of their use for computing vehicle mobility. 23rd Central European Conf. on Central Europe Area in View of Current Geography, Brno, 2016, pp. 99–110. <https://doi.org/10.5817/CZ.MUNI.P210-8314-2016>
- [5] McCullough M., Jayakumar P., Dasch J., Gorsich D. The Next Generation NATO Reference mobility model development. *J. of Terramechanics*, 2017, v. 73, pp. 49–60.
- [6] Bekker M. *Theory of land locomotion*. University of Michigan Press, 1960, 520 p.
- [7] Bradbury M., Dasch J., Gonzalez R., Hodges H., Jain A., Iagnemma K., Letherwood M.D., McCullough M., Priddy J., Wojtyasiak B., Wong J.Y., Jayakumar P., Hoenlinger M. Next-Generation NATO Reference Mobility Model (NG-NRMM). Final Report by NATO Exploratory Team ET-148, 2016, 231 p.
- [8] Wong J., Jayakumar P., Toma E., Preston-Thomas J. Comparison of simulation models NRMM and NTVPM for assessing military tracked vehicle cross-country performance. *J. of Terramechanics*, 2018, v. 80, pp. 31–48.
- [9] McCullough M., Jayakumar P., Dasch J.M., Gorsich D. The Next Generation NATO Reference mobility model development. *J. of Terramechanics*, 2017, v. 73, pp. 49–60.
- [10] Rybansky M., Hofmann A., Hubáček M., Kovarik V., Talhofer V. The impact of terrain on cross-country mobility geographic factors and their characteristics. 18th Int. Conf. of the Int. Society for Terrain-Vehicle Systems, ISTVS 2014, Seoul, Korea, 2014, 6 p.
- [11] Kostin I.M., Faskhiev Kh.A. *Obespechenie konkurentosposobnosti gruzovykh avtomobiley na etape razrabotki* [Ensuring the competitiveness of trucks at the development stage]. Naberezhnye Chelny: KamPI, 2001, 349 p.
- [12] Uzlov V.A., Shishkov G.I., Shcherbakov V.V. *Osnovnye fizicheskie parametry snezhnogo pokrova* [Main physical parameters of snow cover]. Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva [Proceedings of R.E. Alekseev NSTU], 2014, no. 1 (103), pp. 119–129.
- [13] Belyaev A.M. *Razrabotka metodiki rascheta podvizhnosti i effektivnosti shassi mobil'nykh avtonomnykh kompleksov dlya dvizheniya v beregovoy zone* [Development of a methodology for calculating the mobility and efficiency of the chassis of mobile autonomous complexes for movement in the coastal zone]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). 05.05.03. Nizhny Novgorod, 2021, 164 p.
- [14] Zezyulin D.V. *Razrabotka metodiki vybora konstruktsionnykh parametrov dvizhiteley, obespechivayushchikh effektivnost' dvizheniya kolesnykh mashin po snegu* [Development of a methodology for selecting the design parameters of propellers that ensure the efficiency of movement of wheeled vehicles on snow]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). 05.05.03. Nizhny Novgorod, 2013, 218 p.
- [15] Vershinin A.V., Erasov I.A., Levshunov L.S., Yankovich A.V. *Vliyaniye neravnomernosti skorosti rezaniya merzlogo grunta podkopochnoy mashiny na energoemkost' ego razrusheniya* [The influence of uneven cutting speed of frozen soil by a digging machine on the energy intensity of its destruction]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2014, no. 6, p. 264.
- [16] Affleck R.T., Melloh R.A., Shoop S.A. Cross-country mobility on various snow conditions for validation of a virtual terrain. *J. of Terramechanics*, 2009, v. 46, pp. 203–210.
- [17] Gorelov V.A. *Nauchnye metody povysheniya bezopasnosti i energoeffektivnosti dvizheniya mnogoosnykh kolesnykh transportnykh kompleksov* [Scientific methods for improving the safety and energy efficiency of multi-axle wheeled transport systems]. Dis. Dr. Sci. (Tech.). 05.05.03. Moscow, 2012, 336 p.
- [18] Barakhtanov L.V., Ershov V.I., Kulyashov A.P., Rukavishnikov S.V. *Snegokhodnye mashiny* [Snowmobiles]. Gorky: Volga-Vyatka Book Publishing House, 1986, 191 p.
- [19] Postnikov V.M., Spiridonov S.B. *Metody vybora vesovykh koeffitsientov lokal'nykh kriteriev* [Methods for selecting weighting coefficients of local criteria]. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2015, no. 6, pp. 267–287. DOI: 10.7463/0615.0780334
- [20] Larichev O.I. *Teoriya i metody prinyatiya resheniy* [Theory and Methods of Decision Making]. Moscow: University Shop, Logos, 2008, 392 p.
- [21] Wong J. *Teoriya nazemnykh transportnykh sredstv* [Theory of Land Vehicles]. Moscow: Mechanical Engineering, 1982, 284 p.
- [22] Papunin A.V. *Metodika rascheta, vybora i otsenka osnovnykh parametrov dvizhitelya mnogoosnoy kolesnoy mashiny pri preodolenii razrushaemykh prepyatstviy* [Methodology for Calculating, Selecting, and Evaluating the Main Parameters of a Multi-Axle Wheeled Vehicle Propeller When Overcoming Destructible Obstacles]. Dis. Cand. Sci. (Tech.). 05.05.03. Nizhny Novgorod, R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, 2019, 175 p.
- [23] Bukharin N.A., Bronshteyn Ya.I., Buyanov V.M., Verkevich O.I., Golyak V.K., Dobrokhotov E.A., Chepurnyy V.D. *Prokhodimost' avtomobilya* [Vehicle Cross-Country Performance]. Moscow: Military Publishing House of the USSR Ministry of Defense, 1959, 310 p.
- [24] Trofimova E.A., Kislyak N.V., Gilev D.V. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika* [Probability Theory and Mathematical Statistics]. Ed. E.A. Trofimova. Yekaterinburg: UrFU Publishing House, 2018, 160 p.
- [25] Tyurin Yu.N., Makarov A.A., Vysotskiy I.R., Yashchenko I.V. *Teoriya veroyatnostey i statistika* [Probability Theory and Statistics]. Moscow: MCNO, JSC «Moscow Textbooks», 2004, 256 p.

- [26] Mishurin V.M., Romanov A.N. *Nadezhnost' voditelya i bezopasnost' dvizheniya* [Driver Reliability and Traffic Safety]. Moscow: Transport, 1990, 167 p.
- [27] Vorontsova Yu., Ermolaev V.V. *Psikhologicheskie osobennosti vnimaniya v neravnovesnykh psikhicheskikh sostoyaniyakh: tipologiya professional'nykh voditeley* [Psychological Features of Attention in Nonequilibrium Mental States: Typology of Professional Drivers]. *Chelovecheskiy kapital* [Human Capital], 2021, no. 9(153), pp. 112–126.
- [28] Zimelev G.V. *Teoriya avtomobilya* [Theory of the Automobile]. Moscow: Voenizdat, 1957, 455 p.
- [29] Mamiti G.I., Pliev S.Kh. *Prokhozimost' kolesnoy mashiny* [Cross-country ability of a wheeled vehicle]. Vladikavkaz: MAVR, 2013, 134 p.
- [30] Chudakov E.A. *Teoriya avtomobilya* [Theory of the Automobile]. Moscow: Mashgiz, 1950, 344 p.
- [31] Platonov V.F., Leishvili G.R. *Gusenichnye i kolesnye transportno-tyagovye mashiny* [Tracked and Wheeled Transport and Traction Machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 294 p.
- [32] Bocharov N.F., Tsitovich I.S., Polungyan A.A., Semenov V.M., Tsybin V.S., Zheglov L.F. *Konstruirovaniye i raschet kolesnykh mashin vysokoy prokhozimosti* [Design and calculation of wheeled vehicles with high cross-country ability]. Eds. N.F. Bocharov, I.S. Tsitovich. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 303 p.
- [33] Sablin S.Yu., Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Prokopets V.S., Bryukhovetskiy A.N., Golubev M.I. *Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovaniye elementov plana lesovoznykh avtomobil'nykh dorog* [Feasibility study of logging road elements plan]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 111–117. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-3-111-117
- [34] Platonov V.F. *Polnoprivodnye avtomobili* [All-wheel drive vehicles]. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 279 p.
- [35] Skorodumov A.I. *Uchebnyk serzhanta motostrelkovykh voysk* [Textbook of a sergeant of motorized rifle troops]. Moscow: Voenizdat, 2003, 308 p.
- [36] *Matematicheskaya model' kompleksnoy otsenki podvizhnosti mashin vysokoy prokhozimosti* [Mathematical model of a comprehensive assessment of the mobility of cross-country vehicles]. SAE Prepr., s. a., No. 740426, 24 p. Available at: [https://btvt.narod.ru/4/mat\\_proxod.htm](https://btvt.narod.ru/4/mat_proxod.htm) (accessed 05.04.2024).

## Authors' information

**Markovna Alina Ivanovna** ✉ — Assistant, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, [a.markovna@nntu.ru](mailto:a.markovna@nntu.ru)

**Belyakov Vladimir Viktorovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, [belyakov@nntu.ru](mailto:belyakov@nntu.ru)

**Makarov Vladimir Sergeevich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, [makvl2010@gmail.com](mailto:makvl2010@gmail.com)

**Vakhidov Umar Shakhidovich** — Dr. Sci. (Tech.), Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, [vahidov@nntu.ru](mailto:vahidov@nntu.ru)

**Klyushkin Anton Alekseevich** — student, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, [aak-nntu@yandex.ru](mailto:aak-nntu@yandex.ru)

Received 12.03.2024.

Approved after review 01.11.2024.

Accepted for publication 27.11.2024.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СЕРВИСНЫМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ И ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В.В. Сиваков<sup>1</sup>, А.Н. Заикин<sup>1✉</sup>, С.С. Грядунов<sup>2</sup>, В.В. Никитин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», Россия, 241037, г. Брянск, пр-т Станке Димитрова, д. 3

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», Россия, 241035, г. Брянск, б-р 50 лет Октября, д. 7

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

zaikin.anatolij@yandex.ru

Проведен анализ развития систем управления сервисным обслуживанием машин. Представлены современные системы, позволяющие осуществлять мониторинг состояния узлов и агрегатов машин, а также прогнозировать изменения их состояния: управление системой технического сервиса, ориентированное на надежность; предотвращение рисков; ремонт по фактическому состоянию. Рассмотрена эволюция подхода к диагностированию машин от эпизодического контроля к постоянному мониторингу их параметров, а также получению оперативной информации о производственных данных конкретных машин. Установлено, что ведущие западные производители лесозаготовительных машин используют технические решения по мониторингу технического состояния машин и их производственных показателей. Выявлено, что в условиях лесозаготовительных предприятий может быть использована техника разных производителей, что не позволяет эффективно использовать полученную с сервера производителя информацию о работе машин. В целях повышения эффективности использования систем мониторинга состояния машин предложено применить единую систему управления предприятием на базе стандартов ERP. Для достижения независимости от иностранного программного обеспечения целесообразно применение отечественной системы 1С, позволяющей расширить ее возможности за счет включения блока управления производственной безопасностью.

**Ключевые слова:** система технического обслуживания и ремонта, лесозаготовительные машины, программное обеспечение, цифровизация сервисного обслуживания

**Ссылка для цитирования:** Сиваков В.В., Заикин А.Н., Грядунов С.С., Никитин В.В. Совершенствование управления сервисным обслуживанием сельскохозяйственной и лесозаготовительной техники // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 1. С. 172–186. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-172-186

В настоящее время эффективное ведение производственной деятельности невозможно без использования современных высокопроизводительных машин, обладающих развитой системой управления как отдельными узлами и механизмами, так и машинами в целом. Постоянный процесс совершенствования управления машинами связан с необходимостью оптимального приспособления к выполняемым ими операциям, повышением их надежности, снижением затрат на эксплуатацию, а также с сервисным обслуживанием.

Проблема совершенствования процесса управления сервисным обслуживанием машин, включающая в себя комплекс мероприятий по диагностированию, сервисному обслуживанию и ремонту машин, в том числе сельскохозяй-

ственной, лесозаготовительной и строительно-дорожного назначения, относится к актуальным задачам вследствие наличия определенных сложностей при управлении, обуславливающих проведение большого числа мероприятий по регулярному сервисному обслуживанию и ремонту.

Управление сервисным обслуживанием машин на предприятиях осуществляется, как правило, в соответствии с системой планово-предупредительного сервисного обслуживания и ремонта, в которой заблаговременно планируются мероприятия по сервисному обслуживанию и ремонту узлов и агрегатов машин. Эти мероприятия привязываются преимущественно к пробегу машины или нормо-часам ее работы, что позволяет планировать дальнейшее применение машин в производственном процессе в целях выполнения ими

поставленных производством задач, а также загрузку сервисных мощностей предприятия для проведения сервисного обслуживания и ремонта. Однако такая система не лишена недостатков, к основным из которых следует отнести отсутствие учета реального состояния узла или агрегата, поэтому были разработаны и некоторые другие, например планово-диагностический ремонт при плановом периодическом обслуживании (согласно графикам, как при планово-предупредительном ремонте) и система контроля технического состояния оборудования методами технического диагностирования [1–3].

Эти разработки позволили в ходе сервисного обслуживания определять состояние контролируемого узла или механизма и планировать проведение регулировок или ремонтов.

Кроме того, в настоящее время разработаны и применяются другие системы планирования технического обслуживания и ремонта инженерных систем, в частности:

- обеспечивающие совершенствование управления системой технического сервиса и ориентированные на надежность (RCM — Reliability Centered Maintenance — методология планирования технического обслуживания и ремонта инженерных систем) [4], что позволяет поддерживать необходимый уровень работоспособности машин (ГОСТ Р 27.606–2013. Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание, ориентированное на безотказность);

- гарантирующие предотвращение рисков (RBI — Risk-based Inspection — методология принятия решений для оптимизации планов инспекций) [5], основанное на простой и ясной методике, изложенной в стандарте API 580 (American Petroleum Institute) и использующей наглядный инструмент — матрицу рисков, позволяющий планировать диагностику, обслуживание и ремонт машин и оборудования, обосновывать бюджеты и устанавливать их цели, анализировать критические данные оборудования, определять и характеризовать механизмы деградации узлов и агрегатов, оценивать последствия, вероятности и риски по следующим категориям: экономика, персонал, экология, репутация, снижать вероятность незапланированного простоя, повышать безопасность и надежность производства и одновременно сокращать расходы;

- осуществляющие ремонт по фактическому состоянию [6, 7], основанный на методах оперативного контроля параметрической надежности, который позволяет прогнозировать надежность машин, выявлять потенциальные

поломки и их предупреждать, проводить сервисное обслуживание и ремонт машин с учетом их фактического состояния [8, 9].

Таким образом, большинство число систем в области организации сервисного обслуживания и ремонта машин [10] свидетельствует о продолжающемся поиске путей его совершенствования, что сохраняет актуальность при эксплуатации техники вдали от ремонтной базы предприятия. В этом случае целесообразно использовать систему ремонта по фактическому состоянию, для которой требуется широкое внедрение в конструкцию машин цифровых диагностических систем [11] и соответствующего оборудования для качественного выполнения сервисного обслуживания и ремонтов на базе цифровых технологий [12, 13].

В настоящей работе рассмотрены вопросы совершенствования управления сервисным обслуживанием сельскохозяйственной и лесозаготовительной техники с помощью ее цифровизации, а также программные продукты, применяемые для управления техническим сервисом машин на предприятии, выполнен анализ работы систем диагностирования и возможность их интеграции в систему управления.

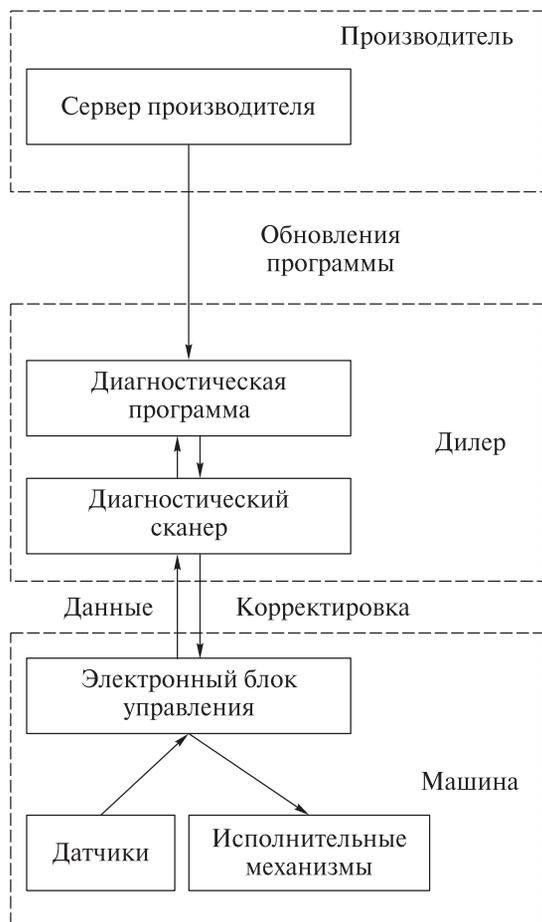
## Цель работы

Цель работы — оценка применимости современных цифровых технологий для управления сервисным обслуживанием сельскохозяйственной и лесозаготовительной техники и повышения эффективности деятельности предприятий, ее эксплуатирующих.

## Материалы и методы

Задача поддержания работоспособности сельскохозяйственной и лесозаготовительной техники на предприятии осложнена необходимостью учета множества факторов, которые определяются разнообразными условиями работы, реальным техническим состоянием машин, наличием свободных сервисных мощностей, квалифицированных механиков, запасных частей и материалов [14, 15], и требует значительных управленческих ресурсов для управления ситуацией.

Проблема управления сервисным обслуживанием машин состоит в том, что непосредственно управление не является самоцелью, главная цель в данном случае — создание системы, позволяющей гарантированно обеспечивать выполнение производственных планов



**Рис. 1.** Исходная система диагностирования машин  
**Fig. 1.** Initial machine diagnostics system

организации при одновременном снижении затрат, осуществляемой организацией для достижения высокого уровня надежности применяемых ею машин.

Учитывая, что основным объектом управления при лесозаготовительных работах служат производственные операции, связанные с валкой деревьев, их трелевкой, обрезкой сучьев, погрузкой и вывозкой из леса, важным становится выполнение подразделениями и бригадами производственных заданий с использованием машин различного типа, работающих с разной производительностью. Например, производительность валочно-пакетирующей машины в 2–3 раза больше производительности трелевочной. В связи с этим при формировании комплектов лесозаготовительных машин практически невозможно подобрать такой их количественный состав, при котором объемы выработок на всех операциях при различных условиях эксплуатации были бы равны, тем более что объемы выработки машин в течение времени их работы изменяются [16]. Кроме того, необходимо учитывать, что машины требуют проведения перио-

дического сервисного обслуживания и ремонта, что увеличивает их простои, а следовательно, снижает производительность.

Для оценки и учета реального состояния машин при оперативном планировании и управлении их работой в целях обеспечения их максимальной выработки важное значение приобретает постоянный мониторинг и прогнозирование изменений контролируемых узлов и агрегатов.

Рассматривая историю внедрения систем диагностирования в машинах следует отметить, что вначале они были оборудованы такими системами диагностирования, которые позволяли отслеживать состояние узлов и агрегатов. В случае выхода контролируемого параметра за пределы допустимых значений системы реагировали на происшедшие изменения, сохраняя код ошибки в памяти блока управления и сигнализируя водителю. Такой подход был реализован согласно требованиям стандартов OBD и OBD-II (On-board diagnostics — диагностические стандарты 1988 г. и 1996 г.), разработанных SAE (Society of Automotive Engineers — Американская ассоциация автомобильных инженеров) и введенных в действие в США. Считывание кодов неисправностей (DTC — Diagnostic Trouble Codes) могло проводиться в режиме самодиагностики машины или при подключении диагностического сканера на сервисном предприятии (как правило, это был официальный дилер производителя). Диагностирование заключалось в следующем. Сканер подключали к диагностическому разъему, шло считывание кодов неисправностей из блока управления, далее происходил опрос имеющихся датчиков, обработка полученной информации, корректировка программного кода блока управления при необходимости проводилась дилером. Новую информацию, процедуры диагностики и корректировки программного обеспечения необходимо было периодически получать при обновлении диагностической программы, устанавливаемой на компьютер дилера (рис. 1).

Информация о неисправностях в работе узлов и агрегатов машины доходила до дилера с опозданием, лишь во время очередного технического обслуживания, когда владелец приезжал на техстанцию. К производителю машин информация поступала с еще большим опозданием. Машина могла выйти из строя внезапно, вдали от дилерского предприятия, что вело к дополнительным простоям техники, росту издержек на ремонт, отдаляло определение причины неисправностей и разработку инструкции для дилеров по ее эффективному устранению.

Совершенствование элементной базы электроники и увеличение скорости передачи информации позволили производителям машин создать электронные системы, управляющие работой многих узлов и агрегатов, а также осуществлять мониторинг технического состояния машин и оборудования. При этом диагностика происходила на базе дилера с подключением диагностического сканера. Вся информация передавалась на сервер производителя машин, сохраняясь в его базе данных и обрабатывалась. Корректирующие параметры передавались через диагностический сканер и записывались в блок управления машины. Дилер в этом случае выступал посредником, который организовывал сеанс связи с сервером изготовителя и блоком управления машины (рис. 2).

Однако и эта система диагностирования обладала недостатками, к основным из которых можно отнести периодический контроль состояния узлов и агрегатов машины (как правило, при прохождении сервисного обслуживания на дилерском предприятии), что могло спровоцировать выход из строя узла или механизма машины и простой машины задолго до проведения планового сервисного обслуживания. Это снижало эффективность использования не только любой отдельной машины, но и производительность предприятия в целом.

В настоящее время развитие информационных технологий обусловило значительное ускорение и упрощение процесса передачи информации благодаря созданию мобильных сетей последнего поколения. Технология Интернета вещей (IoT) делает обычное устройство «умным», интегрируя в его конструкцию блок управления с коммуникационным интерфейсом, обеспечивающим удаленную связь с таким устройством в режиме реального времени [17].

Дальнейший прогресс привел к разработке концепции цифровых двойников, т. е. электронной копии реальных физических объектов, получающих информацию о состоянии контролируемых узлов и агрегатов непрерывно, практически в режиме реального времени. Это изменило возможность контроля технического состояния машин [18–20].

Современная концепция диагностирования машин и оборудования, особенно промышленного назначения, к которым относится сельскохозяйственная, лесозаготовительная, дорожно-строительная и другая техника, предполагает постоянный ее мониторинг. При этом диагностическая информация с машин посредством использования телекоммуникационного оборудования в автоматическом режиме отправляется на сервер производителя, сохраняется в

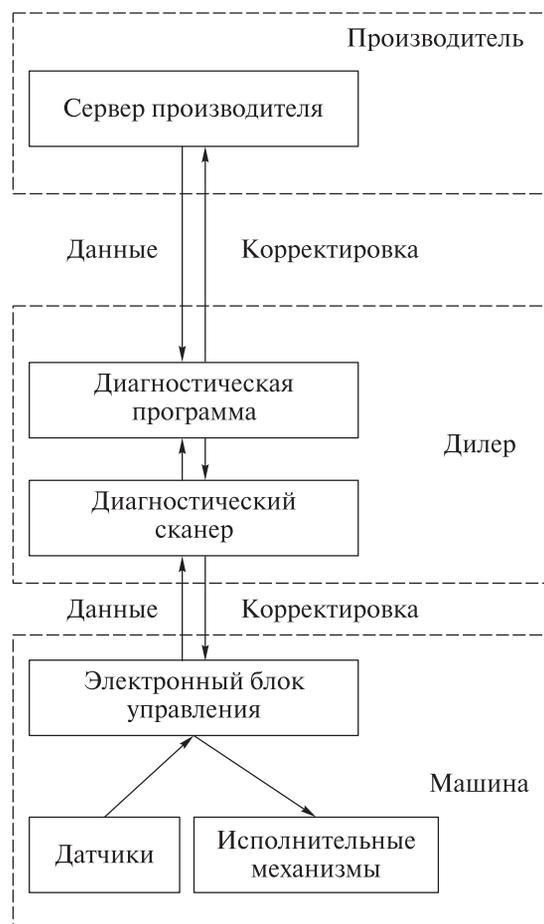


Рис. 2. Скорректированная система диагностирования машин

Fig. 2. Adjusted machine diagnostics system

базе данных, обрабатывается, и на основании предиктивной аналитики прогнозируется изменение ее состояния. Официальный дилер имеет доступ к этой информации, по согласованию с владельцем машины может осуществлять ее удаленный мониторинг и корректировку (рис. 3) через соответствующее программное обеспечение. Владелец машины также может получить доступ к информации по своей машине (как правило, через доступ на сайте производителя или же посредством специального программного обеспечения). Благодаря постоянному обмену данными между электронным блоком управления и заводом-изготовителем есть возможность дистанционно диагностировать и устранять различные неисправности. На практике такая схема в настоящее время реализуется компанией Tesla, каждый автомобиль которой имеет свой цифровой двойник. Помимо возможности удаленной диагностики собранная информация позволяет выявлять узлы и детали, которым необходима доработка, обучать искусственный интеллект, применяемый в автопилотах компании.



Рис. 3. Современная система диагностирования машин  
 Fig. 3. Modern machine diagnostics system

Цифровизация деятельности сельскохозяйственных [21–24], лесозаготовительных [25, 26], строительных и других предприятий [27–29], направленная как на производственную, так и финансово-управленческую деятельность, способствует эффективному планированию и управлению всеми производственными процессами, в том числе сервисным обслуживанием техники.

Область деятельности предприятия обуславливает специфику управления системой сервисного обслуживания и ремонта. Так, строительные, дорожные, автотранспортные, лесозаготовительные, сельскохозяйственные предприятия широко используют машины вдали от стационарной сервисной базы предприятия. Проведение мероприятий по их сервисному обслуживанию, в том числе ежесменному, а также по внеплановому ремонту приходится выполнять не на самом предприятии — по причине возникновения сложностей и дополнительных затрат на транспортировку машин, — а непосредственно на месте выполнения машинами работ или на временной стоянке машин. Это обстоятельство вследствие слабого контроля за проводимыми мероприятиями, затруднениям обеспечения качественного ремонта может привести к снижению качества их обслуживания или невыполнению отдельных видов работ, поскольку при этом имеется недостаток в необходимом оборудовании и квалифицированных сотрудниках сервисной службы.

## Результаты и обсуждение

Ведущие мировые производители сельскохозяйственной (New Holland (CNH Industrial), John Deere (Deere & Company) и др.) и лесозаготовительной техники (Ponsse (Ponsse Plc.), John Deere (Deere & Company), Komatsu (Komatsu Ltd.)) [25, 26] для мониторинга и управления своей техникой разработали и широко применяют собственные программные продукты (рис. 4). Например, управление сервисным обслуживанием машин компании Ponsse Plc. осуществляется на основе программы Fleet Manager, которая позволяет интегрировать в единое информационное пространство компании технику Ponsse Plc. и управлять всем парком для достижения высоких финансовых показателей на основе сбора отчетных данных посредством инструмента Data API, электронного каталога запчастей Ponsse Parts Online, размещенного в сети интернет и позволяющего оперативно подбирать необходимые запчасти и заказывать их у ближайшего дилера, и активного руководства Active Manual, позволяющего получить информацию о машине, ее характеристиках, особенностях конструкции и настройках в нужный момент времени в любом месте.

Компания Komatsu Ltd организовала этот процесс с помощью веб-системы MaxiFleet, что позволило получить доступ к дилерскому каталогу запчастей Komatsu ESS. При этом

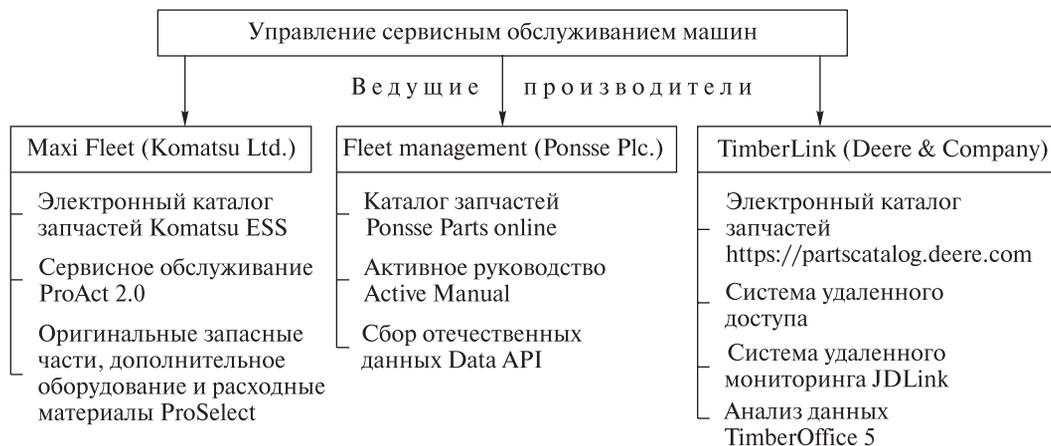


Рис. 4. Программное обеспечение для управления сервисным обслуживанием техники ведущими мировыми производителями лесозаготовительной техники

Fig. 4. Equipment maintenance management software from the world’s leading logging machinery manufacturers

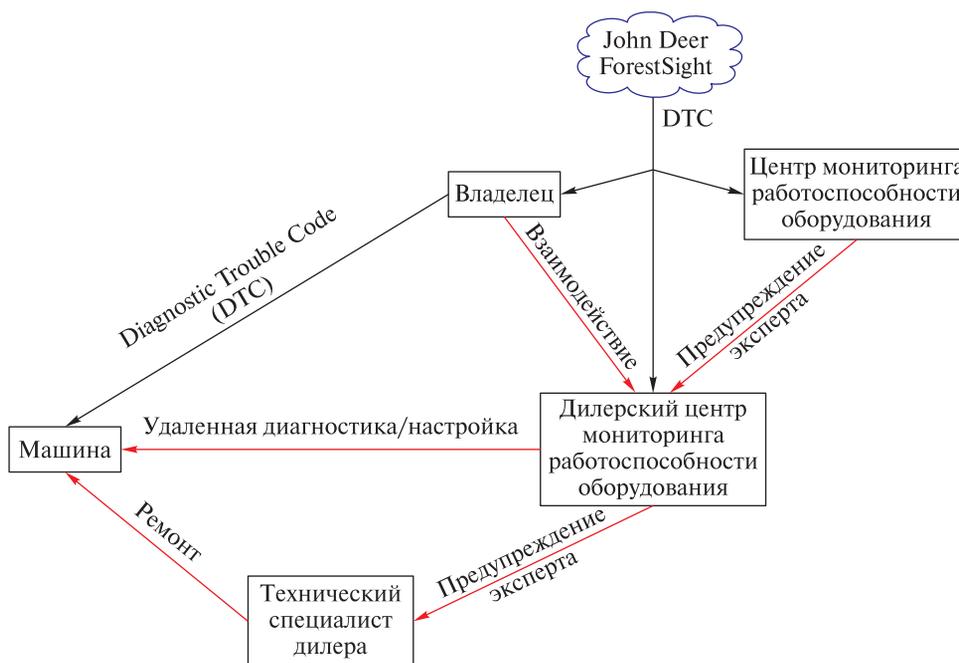


Рис. 5. Система диагностирования машин компании Deere & Company

Fig. 5. John Deere machine diagnostic system example

появилась возможность осуществлять поиск любых запасных частей, получать доступ к покомпонентным схемам узлов, руководствам пользователей, иметь программы сервисного обслуживания в новой концепции — ProAct 2.0, которая обеспечивает всеми услугами по обслуживанию техники по фиксированным низким ценам, по фактически отработанным моточасам машины. С помощью программного обеспечения ProSelect используются оригинальные запасные части, дополнительное оборудование

и расходные материалы, разработанные специально для машин Komatsu.

Компания Deere & Company применяет приложение TimberLink, позволяющее осуществлять управление как лесозаготовительной, так и сельскохозяйственной техникой на основе электронного каталога запчастей, доступного на официальном сайте компании. С помощью системы удаленного доступа и мониторинга на базе системы JDLink быстро выполняется удаленная диагностика всей линейки машин,

выпускаемой компанией — харвестеров, форвардеров, трелевочных тракторов, лесопогрузчиков, валочно-пакетирующих машин. Получаемые с машин данные обрабатываются посредством специализированного программного обеспечения TimberOffice 5, а в режиме online контролируются такие параметры занятых в работе машин, как объем готовой продукции, производительность, временные затраты, уровень потребления топлива, размеры и типы обрабатываемых стволов и т. д. Наглядно отмечаются отклонения от планов производства, производительности, потребления топлива отдельных единиц техники. Оператор может запросить детализированный анализ по любой из машин, фиксирующий, на что конкретно и как были использованы ресурсы и время.

Практически все производители разработали и предоставляют доступ к своим электронным каталогам запчастей, электронным руководствам к машинам, обеспечивая поиск ближайших дилеров и организацию связи с ними. Организован сбор данных о состоянии машин, их производительности с отправкой либо в специализированную программу компании (Komatsu Ltd., Deere & Company) или же в используемую предприятием ERP-систему (Enterprise Resource Planning — программный комплекс для управления компанией) (Ponsse Plc.). Дальнейшим развитием электронных систем компании Deere & Company является организация удаленного доступа к машинам и их удаленная диагностика с помощью системы JDLink (рис. 5) с хранением информации по каждой машине на сервере производителя и организацией доступа к ней владельца и дилера, осуществляющего планирование сервисного обслуживания и ремонта техники. Данное решение применяется для всего ассортимента выпускаемой техники (сельскохозяйственной, лесозаготовительной, строительной и т. д.).

Условия работы сельскохозяйственной и лесозаготовительной техники достаточно сильно отличаются по возможности организации непрерывной связи машины с сервером компании. Сельскохозяйственная техника, как правило, работает в зоне покрытия мобильной связи, а лесозаготовительная — вдали от населенных пунктов и базовых станций (ретрансляторов), т. е. в условиях недостаточного покрытия мобильной связи. Отсюда возникает необходимость использования устройств хранения информации с последующей ее передачей на сервер или применения ретрансляторов, на что потребуются дополнительные затраты. В качестве ретрансляторов могут выступать, например, беспилотные летательные аппараты,

воздушные шары, передвижные (мобильные) базовые станции.

Передачу информации от лесозаготовительных машин, работающих на лесосеке, можно организовать с помощью установки Wi-Fi беспроводных модулей связи [30]. Для повышения точности позиционирования машин в этом случае рекомендуется применять анализ видимости цифровой модели поверхности (DSM — Digital Surface Model — трехмерное изображение рельефа со всеми расположенными объектами) [31], позволяющий повысить автономность работы машин.

Российской компанией «Интелтех» разработан терминал независимой и безопасной сети передачи данных для дронов и наземных объектов, который функционирует на базе самоорганизующейся сети типа mesh, без привязки к сетям сотовой связи и интернету. Устройство собирает данные с 16 различных датчиков и отправляет их на смартфон или компьютер через Wi-Fi или Bluetooth. Терминал передает показания телеметрии, текстовые сообщения размером до 256 байт и определяет координаты объектов по GPS и ГЛОНАСС в режиме реального времени. Площадь покрытия на открытой местности — до 28 км<sup>2</sup>; для его работы требуется около 200 мВт энергии. Терминал работает на литийионных аккумуляторах или подзаряжается от внешнего устройства.

Таким образом, данные, отправляемые с отдельных машин, хранятся в облачной среде и далее предоставляются информационным системам владельца машин.

Эффективное управление техническим состоянием парка машин во многом определяет конкурентоспособность предприятия. Например, как показали результаты исследования техники лесхозов Республики Башкортостан [32], те лесхозы, в которых было хорошо организовано ремонтное хозяйство и своевременно проводилось сервисное обслуживание и ремонт техники, обеспечивали высокие объемы заготавливаемой древесины и были лидерами среди лесозаготовительных организаций региона.

Однако в современных условиях недостаточно составить график прохождения сервисного обслуживания и ремонта техники, важно учитывать специфику производства. Если техника работает вдали от собственной ремонтной базы и появляется необходимость своевременного проведения требующихся технических мероприятий и их учета, а также контроля выполнения запланированных регулировок и ремонтов, планирования потребности в материалах и запасных частях, согласования с сервисными службами и выполнения производственных

**Программное обеспечение для управления сервисным обслуживанием и ремонтом**  
**Maintenance and repair management software**

Программное обеспечение	Системы управления активами предприятия (EAM)	Автоматизированные системы управления техническим обслуживанием (CMMS)	Системы предиктивного технического обслуживания (PdM)	Системы надёжно-ориентированного технического обслуживания (RCM)	Системы управления выездным сервисным обслуживанием (FSM)
1С:ТОИР	+	+	+	+	-
1С:RCM Управление надёжностью	-	-	+	+	-
Галактика: EAM	+	+	-	+	-
IBM Maximo Application Suite	+	-	+	+	+
SAP Predictive Maintenance and Service	+	-	-	-	-
SAP Asset Intelligence Network	+	-	-	-	-
Oracle Enterprise Asset Management	+	-	-	-	-



**Рис. 6.** Классификация систем управления техническим сервисом  
**Fig. 6.** Classification of technical service management systems

заданий. Повысить эффективность используемой техники при минимальных затратах можно только благодаря широкому внедрению цифровых технологий, в частности использованию программных продуктов для управления процессом сервисного обслуживания и ремонта на предприятии [33], которые встроены в еди-

ную систему управления предприятием на базе стандартов ERP.

В настоящее время управление процессом сервисного обслуживания и ремонта техники, интегрированное в систему управления предприятием, может быть организовано на базе следующих пяти классов программного обеспечения:

1) системы управления активами предприятия (EAM — Enterprise Asset Management), дающие возможность управлять используемыми в работе активами, при этом центром методологии управления являются сами активы и их техническая информация;

2) автоматизированные системы управления техническим обслуживанием (CMMS — Computerized Maintenance Management System), ориентированные на планирование и контроль активов и связанных с этим затратами на выполнение работ по техническому обслуживанию с конечной целью продления срока службы актива при минимальных затратах;

3) системы предиктивного технического обслуживания (PdM — Predictive Maintenance Systems), контролирующие техническое состояние оборудования в режиме реального времени (с помощью датчиков, размещенных на оборудовании) и планирования технического обслуживания на основе полученных данных о состоянии активов;

4) системы надежности-ориентированного технического обслуживания (RCM — Reliability-Centered Maintenance), управляющие техническим обслуживанием и ремонтом на базе программ сервисного обслуживания и ремонта, оптимизируемых с точки зрения эффективности и сокращения рисков технической эксплуатации;

5) системы управления выездным сервисным обслуживанием (FSM — Field Service Management), осуществляющие координацию операций выездных специалистов в рамках работ по сервисному обслуживанию.

Учитывая результаты исследований, представленные в работе [34], в качестве единой российской системы управления предприятием класса ERP можно применять следующую систему: 1С: Предприятие (с интеграцией систем управления техническим обслуживанием и ремонтом — 1С:ТОИР, 1С:RCM Управление надежностью) или Галактика (с интеграцией систем управления техническим обслуживанием и ремонтом Галактика: EAM). Пригодными могут быть зарубежные системы, в частности IBM (IBM Maximo Application Suite); SAP (SAP Predictive Maintenance and Service, SAP Asset Intelligence Network); Oracle (Oracle Enterprise Asset Management).

Указанные системы многофункциональны, обеспечивают эффективное управление сервисным обслуживанием и ремонтом (таблица).

В настоящее время на фоне ограничений работы иностранного программного обеспечения и достижения технологического суверенитета страны целесообразно применять отечественные решения, не подверженные политическим

рискам и дающие возможность развития отечественным компаниям.

Дополнительным аргументом в пользу выбора 1С в качестве основной системы является возможность интеграции информационных систем управления производственной безопасностью [35], в частности: 1С: Охрана труда [36] и 1С: Производственная безопасность (рис. 6). Охрана труда [37] позволяет повысить эффективность контроля соблюдения работниками предприятия техники безопасности, снизить количество случаев производственного травматизма за счет автоматизации контроля, в том числе с использованием видеокамер, фиксирующих происходящее, и программ искусственного интеллекта, самостоятельно определяющих факт нарушения на видеоизображении.

Развертывание систем класса ERP, а также систем управления сервисным обслуживанием и многих других можно выполнить с помощью облачных технологий или собственного сервера предприятия. При этом важно учесть возможность локального накопления информации о состоянии машины, выполненных операциях сервисного обслуживания и ремонта и последующую передачу в систему при появлении такой возможности [38–43].

## Выводы

Анализ состояния применения информационных технологий в области совершенствования управления работой лесозаготовительных машин и их сервисного обслуживания показал, что с целью своевременного и качественного сервисного обслуживания машин необходим учет не только производственных показателей их работы, но и постоянный мониторинг технического состояния деталей и узлов.

В условиях лесозаготовительных предприятий в связи с использованием машин разных производителей, необходимо применять единую систему управления предприятием, основанную на стандарте ERP. Для обеспечения технологической независимости от иностранного программного обеспечения в качестве такой системы целесообразно использовать отечественную систему 1С, позволяющую расширить ее возможности за счет включения блока управления производственной безопасностью.

## Список литературы

- [1] Безуглов А.Е., Кислицына О.А. Ключевые показатели эффективности при проведении технического обслуживания и ремонта оборудования // Вопросы инновационной экономики, 2019. Т. 9. № 4. С. 1501–1514. DOI: 10.18334/vinec.9.4.41208

- [2] Pomogaev V.M., Redreev G.V. Information support in the system of maintenance and repair of mobile machines in agriculture // *Vestnik Omsk SAU*, 2022, no. 2(46), 1, pp. 145–152. DOI: 10.48136/2222-0364\_2022\_2\_145
- [3] Иовлев Г.А. Мировая практика организации технического сервиса // *Агропродовольственная политика России*, 2018. № 4(76). С. 49–53.
- [4] Тугенгольд А.К., Волошин Р.Н., Юсупов А.Р., Круглова Т.Н. Техническое обслуживание технологических машин на базе цифровизации // *Вестник Донского государственного технического университета*, 2019. Т. 19. № 1. С. 74–80. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80
- [5] Завьялов А.П. Диагностическое обслуживание оборудования и трубопроводов нефтегазовых производств при риск-ориентированном подходе к эксплуатации // *Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса*. 2020. № 3(117). С.79–81. DOI: 10.33285/1999-6934-2020-3(117)-79-81
- [6] Левин В.М., Гужов Н.П., Боярова Д. А. К вопросу об эффективности управления ремонтами электрооборудования нефтедобычи со стратегией по техническому состоянию // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, 2022. Т. 24. № 1. С. 39–51. DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51
- [7] Гончаров А.Б., Тулинов А.Б., Перепечай Б.А., Гончаров А.А. Методы организации системы технического обслуживания и ремонта оборудования с целью обеспечения его безотказной работы // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*, 2017. № 2. С. 35–40.
- [8] Варнаков Д.В., Варнаков В.В., Дежаткин М.Е. Оптимизация системы технического сервиса путем внедрения обслуживания по фактическому состоянию машин // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*, 2017. № 2 (38). С. 168–173. DOI: 10.18286/1816-4501-2017-2-168-173
- [9] Дидманидзе О.Н., Варнаков Д.В. Результаты разработки метода и системы оперативного контроля и прогнозирования параметрической надежности в специальных эксплуатационных режимах // *Международный технико-экономический журнал*, 2013. № 4. С. 71–79.
- [10] Sivakov V., Zaikin A., Borovaya K. Improving service agricultural and forestry machinery // *Bio Web of Conferences: IV International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure for Sustainable Development (AEGISD-IV 2024)*, Tashkent, Uzbekistan, 28–30 марта 2024 года, v. 105. Les Ulis: EDP Sciences. Web of Conferences, 2024, p. 01005. DOI: 10.1051/bioconf/202410501005
- [11] Семькина А.С., Загородний Н.А. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта карьерного автомобильного транспорта // *Мир транспорта и технологических машин*, 2022. № 3–4(78). С. 35–41. DOI:10.33979/2073-7432-2022-4(78)-3-35-41
- [12] Pulyaev N.N., Kurilenko A.V., Shakzada U.N. Digitalization in modern service stations // *Science without borders*, 2021, no. 4 (56), pp. 57–61.
- [13] Чемшикова Ю.М., Король С.А., Бургунутдинов А.М., Кунгурова Е.А., Бурмистрова О.Н. Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства. СПб.: Издательский дом «Сциентиа», 2024. 54 с.
- [14] Тесовский А.Ю. Пути повышения качества технического обслуживания и ремонта оборудования и машин лесозаготовок и лесного хозяйства на местах эксплуатации // *Строительные и дорожные машины*, 2017. № 5. С. 40–41.
- [15] Прохоров В.Ю., Червоноокая С.М., Комяков А.Н., Евдокимов Ю.М. Состояние техники и вопросы импортозамещения запасных частей и деталей с учетом геополитических изменений на отечественном рынке // *Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии*, 2023. № 4. С. 181–186.
- [16] Халилов С.Н., Загидуллина Л.И. Сравнительный анализ лесозаготовительной техники и перспективы проектирования многофункциональных универсальных машин // *Научные исследования и разработки молодых ученых*, 2023. С. 246–252.
- [17] Kolberg D., Zühlke D. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies // *IFAC-Papers On Line*, 2015, no. 48(3), pp. 1870–1875. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359
- [18] Pliuta M., Pop E., Caramihai S., Moisescu M. A Digital Twin Generic Architecture for Data-Driven Cyber-Physical Production Systems // *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, pp.71–82. DOI: 10.1007/978-3-031-24291-5\_6
- [19] Krenczyk D. Digital Twins of Production Systems Based on Discrete Simulation and Machine Learning Algorithms // *18th Int. Conf. on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2023)*, pp. 57–66. DOI: 10.1007/978-3-031-42536-3\_6
- [20] Shvedenko V., Mozokhin A. Concept of digital twins at life cycle stages of production systems // *Scientific and Technical J. of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, v. 20, pp. 815–827. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827
- [21] Катаев Ю.В., Градов Е.А., Тишанинов И.А. Контроль технического состояния сельскохозяйственной техники через онлайн-мониторинг параметров // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*, 2022, no. 1. С. 14–19. DOI: 10.33920/sel-10-2201-03
- [22] Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intelligent system for diagnosing the parameters of the technical condition of tractors // *Agricultural Engineering*, 2021, no. 2, pp. 45–50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
- [23] Чутчева Ю.В., Коротких Ю.С., Кирица А.А. Цифровые трансформации в сельском хозяйстве // *Агроинженерия*, 2021. № 5 (105). С. 53–58. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-5-53-58
- [24] Коротченя В.М., Личман Г.И., Смирнов И.Г. Цифровизация технологических процессов в растениеводстве России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*, 2019. № 13(1). С. 14–20. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-13-1-14-20>
- [25] Заикин А.Н., Сиваков В.В., Никитин В.В., Брионес А.А. Программное обеспечение в лесном хозяйстве и при лесозаготовках // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2023. Т. 27. № 4. С. 172–184. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-172-184
- [26] Саханов В.В., Фитчин А.А. Проблемы лесного машиностроения и направления их разрешения // *Современные машины, оборудование и IT-решения*

- лесопромышленного комплекса: теория и практика: Матер. Всерос. науч.-практ. конф., Воронеж, 17 июня 2021 г. Воронеж: Изд-во ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 2021. С. 130–135.
- [27] Гурский А.С., Ивашко В.С. Использование транспортной телематики и дистанционной диагностики для совершенствования технического обслуживания и ремонта транспортных средств // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2020. Т. 65. № 3. С. 375–383. DOI: 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383
- [28] Kurniawan R., Kholik H. Usulan Perawatan Mesin Stitching Dengan Metode Reliability Centered Maintenance // Jurnal Teknik Industri, 2017, v. 16(2), pp. 83–91. DOI: 10.22219/JTIUMM.Vol16.No2.83-91
- [29] Восковых К.А. Особенности цифровизации в строительной отрасли как важный фактор ее устойчивого развития // Бюллетень науки и практики, 2021. Т. 7. № 12. С. 169–174. DOI: 10.33619/2414-2948/73/23
- [30] Kim G.-H., Kim K.-D., Lee H.-S., Choi Y., Mun H.-S., Oh J.-H., Shin B.-S. Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester // J. of Biosystems Engineering, 2021, v. 46. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2
- [31] Lopatin E., Väättäin K., Kukko A., Kaartinen H., Huypä J., Holmström E., Sikanen L., Nuutinen Y., Routa J. Unlocking Digitalization in Forest Operations with Viewshed Analysis to Improve GNSS Positioning Accuracy // Forests, 2023, v. 14(4), p. 689. DOI: 14. 689. 10.3390/f14040689
- [32] Быков В.В., Голубев М.И. Обновление парка машин в лесном комплексе импортной лесозаготовительной техникой // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XIII Междунар. науч.-практ. интернет-конф. п. Правдинский, Московская обл., 08–10 июня 2021 г. Правдинский: Изд-во Российского научно-исследовательского института информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2021. С. 505–509.
- [33] Янюк Ю.В., Капелюш К.В. Автоматизация базы данных запасных частей и агрегатов лесозаготовительной техники // Ремонт. Восстановление. Модернизация, 2021. № 4. С. 40–44.
- [34] Попиков П.И., Евсикова Н.Ю., Камалова Н.С., Фурсов С.К. Системный подход к проблеме обоснования модернизации лесозаготовительных машин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика, 2015. Т. 3. № 2–2 (13–2). С. 296–300.
- [35] Рубинская А.В., Мохирев А.П., Пузырева О.К., Керющенко А.А. Разработка мероприятий по охране окружающей среды при лесозаготовительном процессе // Лесотехнический журнал, 2017. Т. 7. № 2 (26). С. 105–114.
- [36] Автоматизация производственной безопасности и охраны труда. URL: <https://www.ot-soft.ru> (дата обращения 06.08.2023).
- [37] IC: Производственная безопасность. Охрана труда. URL: [https://solutions.ic.ru/catalog/ehs\\_ocsaf/features](https://solutions.ic.ru/catalog/ehs_ocsaf/features) (дата обращения 06.08.2023).
- [38] Gölzer P., Fritzsche A. Data-driven operations management: organisational implications of the digital transformation in industrial practice. Production Planning and Control, 2017, v. 28(16), pp. 1332–1343. DOI: 10.1080/09537287.2017.1375148
- [39] Gupta U., Bansal A., Singh S. Application of Failure Mode Effect Analysis for Improved Scheduling in Maintenance of Machines // Int. J. of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2020, v. 9, pp. 895–899. DOI: 10.35940/E3025.049620
- [40] Apatenko A.S., Sevryugina N.S. Accounting of Random Processes when Adjusting the Overhaul Life of Machines for Reclamation // E3S Web of Conf., 13, Rostov-on-Don, 26–28 February 2020, p. 05011. DOI: 10.1051/e3sconf/202017505011
- [41] Apatenko A.S., Sevryugina N.S. Methods of Recruiting of Mobile Repair Services and Maintenance of Machines Performing Reclamation Works // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering: Int. Scientific Conf. Interstroy-meh, 2019, ISM, 2019, Kazan, 12–13 September 2019. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020, p. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012037
- [42] Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Failure Risk Control Method in Providing Technical Safety of Transportation Engineering Vehicle Operation for Reclamation Work // Engineering for Rural Development, 19, Jelgava, 20–22 May, 2020. Jelgava, 2020, pp. 591–597. DOI 10.22616/ERDev.2020.19.TF132
- [43] Sevryugina N., Apatenko A., Revyako S. Theory of the Technological Machinery State Recognition by the Criterion of Recourse Uncertainly // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, 20–22 October 2020. Rostov-on-Don, 2020, p. 012083. DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012083

## Сведения об авторах

**Сиваков Владимир Викторович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Транспортно-технологические машины и сервис», ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», sv@bgtu.ru

**Заикин Анатолий Николаевич** — д-р. тех. наук, профессор кафедры «Транспортно-технологические машины и сервис», ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет», zaikin.anatolij@yandex.ru

**Грядунув Сергей Семенович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение», ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», gryadunowcc@mail.ru

**Никитин Владимир Валентинович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технология и оборудование лесопромышленного производства», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (Мытищинский филиал), nikitinvv@bmstu.ru

Поступила в редакцию 30.05.2024.

Одобрено после рецензирования 31.10.2024.

Принята к публикации 27.11.2024.

## SERVICE MAINTENANCE MANAGEMENT IMPROVEMENT OF AGRICULTURAL AND FORESTRY EQUIPMENT

V.V. Sivakov<sup>1</sup>, A.N. Zaikin<sup>1✉</sup>, S.S. Gryadunov<sup>2</sup>, V.V. Nikitin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bryansk State University of Engineering and Technology, 3, Stanke Dimitrova av., 241037, Bryansk, Russia

<sup>2</sup>Bryansk State Technical University, 7, October 50 year Anniversary Blvd, 241035, Bryansk, Russia

<sup>3</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

zaikin.anatolij@yandex.ru

The development of machine maintenance service management systems is analysed. Modern systems allowing to monitor the condition of machine units and assemblies, as well as to forecast changes in their condition are presented: reliability-oriented maintenance service system management; risk prevention; repair according to actual condition. The evolution of the approach to diagnostics of machines from episodic control to permanent monitoring of their parameters, as well as obtaining operational information on production data of specific machines is considered. It is established that the leading western manufacturers of logging machines use technical solutions for monitoring the technical condition of machines and their production indicators. It has been revealed that in the conditions of logging enterprises machinery of different manufacturers can be used, which does not allow to effectively use the information on machine operation received from the manufacturer's server. In order to improve the efficiency of machine condition monitoring systems it is proposed to apply a unified enterprise management system based on ERP standards. In order to achieve independence from foreign software it is advisable to use domestic 1C system, which allows to expand its capabilities by including the block of industrial safety management.

**Keywords:** maintenance and repair system, logging machines, software, digitalisation of service maintenance

**Suggested citation:** Sivakov V.V., Zaikin A.N., Gryadunov S.S., Nikitin V.V. *Sovershenstvovaniye upravleniya servisnym obsluzhivaniyem sel'skokhozyaystvennoy i lesozagotovitel'noy tekhniki* [Service maintenance management improvement of agricultural and forestry equipment]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 1, pp. 172–186. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-172-186

## References

- [1] Bezuglov A.E., Kislitsyna O.A. *Klyuchevye pokazateli effektivnosti pri provedenii tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya* [Key performance indicators for equipment maintenance and repair]. *Voprosy innovatsionnoy ekonomiki* [Issues of Innovative Economics], 2019, v. 9, no. 4, pp. 1501–1514. DOI: 10.18334/vinec.9.4.41208
- [2] Pomogaev V.M., Redreev G.V. Information support in the system of maintenance and repair of mobile machines in agriculture. *Vestnik Omsk SAU*, 2022, no. 2(46), 1 pp. 45–152. DOI: 10.48136/2222-0364\_2022\_2\_145

- [3] Iovlev G.A. *Mirovaya praktika organizatsii tekhnicheskogo servisa* [World practice of organizing technical service]. [Agro-food policy of Russia], 2018, no. 4(76), pp. 49–53.
- [4] Tugengold A.K., Voloshin R.N., Yusupov A.R., Kruglova T.N. [Maintenance of technological machines based on digitalization]. *Agroproduktivnost' i politika Rossii* [Bulletin of the Don State Technical University], 2019, v. 19, no. 1, pp. 74–80. DOI: 10.23947/1992-5980-2019-19-1-74-80
- [5] Zav'yalov A.P. *Diagnosticheskoe obsluzhivanie oborudovaniya i truboprovodov neftegazovykh proizvodstv pri risk-orientirovannom podkhode k ekspluatatsii* [Diagnostic maintenance of equipment and pipelines of oil and gas production facilities with a risk-oriented approach to operation]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* [Equipment and technologies for the oil and gas complex], 2020, no. 3 (117), pp. 79–81. DOI: 10.33285/1999-6934-2020-3 (117)-79-81
- [6] Levin V.M., Guzhov N.P., Boyarova D.A. *K voprosu ob effektivnosti upravleniya remontami elektrooborudovaniya nefteedobychi so strategiyey po tekhnicheskomu sostoyaniyu* [On the issue of effectiveness of the oil production electrical equipment repairs management with a strategy for technical condition]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2022, t. 24, no. 1, pp. 39–51. DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-1-39-51
- [7] Goncharov A.B., Tulinov A.B., Perepechay B.A., Goncharov A.A. *Metody organizatsii sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya s tsel'yu obespecheniya ego bezotkaznoy raboty* [Methods of organizing the system of technical maintenance and repair of equipment in order to ensure its trouble-free operation]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Restoration. Modernization], 2017, no. 2, pp. 35–40.
- [8] Varnakov D.V., Varnakov V.V., Dezhatkina M.E. *Optimizatsiya sistemy tekhnicheskogo servisa putem vnedreniya obsluzhivaniya po fakticheskomu sostoyaniyu mashin* [Optimization of the technical service system by introducing maintenance based on the actual condition of machines]. *Vestnik Ul'yanovskoy GSKhA* [Bulletin of the Ulyanovsk State Agricultural Academy], 2017, no. 2 (38), pp. 168–173. DOI: 10.18286/1816-4501-2017-2-168-173
- [9] Didmanidze O.N., Varnakov D.V. *Rezultaty razrabotki metoda i sistemy operativnogo kontrolya i prognozirovaniya parametricheskoy nadezhnosti v spetsial'nykh ekspluatatsionnykh rezhimakh* [Results of the development of the method and system of operational control and forecasting of parametric reliability in special operating modes]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskyy zhurnal* [International Technical and Economic J.], 2013, no. 4, pp. 71–79.
- [10] Sivakov V., Zaikin A., Borovaya K. *Improving service agricultural and forestry machinery*. Bio Web of Conferences: IV International Conference on Agricultural Engineering and Green Infrastructure for Sustainable Development (AEGISD-IV 2024), Tashkent, Uzbekistan, 28–30 марта 2024 года, v. 105. Les Ulis: EDP Sciences. Web of Conferences, 2024, p. 01005. DOI: 10.1051/bioconf/202410501005
- [11] Semykina A.S., Zagorodniy N.A. *Sovershenstvovanie sistemy tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta kar'ernogo avtomobil'nogo transporta* [Improving the system of technical maintenance and repair of quarry motor transport]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin* [World of transport and technological machines], 2022, no. 3–4(78), pp. 35–41. DOI:10.33979/2073-7432-2022-4(78)-3-35-41
- [12] Pulyaev N.N., Kurilenko A.V., Shakzada U.N. *Digitalization in modern service stations*. *Science without borders*, 2021, no. 4 (56), pp. 57–61.
- [13] Chemshikova Yu.M., Korol' S.A., Burgonutdinov A.M., Kungurova E.A., Burmistrova O.N. *Tekhnologiya i mashiny lesozagotovok i lesnogo khozyaystva* [Technology and machines for logging and forestry]. St. Petersburg: Publishing House «Scientia», 2024, p. 54.
- [14] Tesovskiy A.Yu. *Puti povysheniya kachestva tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya i mashin lesozagotovok i lesnogo khozyaystva na mestakh ekspluatatsii* [Ways to improve the quality of technical maintenance and repair of logging and forestry equipment and machines at the sites of operation]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines], 2017, no. 5, pp. 40–41.
- [15] Prokhorov V.Yu., Chervonookaya S.M., Komyakov A.N., Evdokimov Yu.M. *Sostoyanie tekhniki i voprosy importozameshcheniya zapasnykh chastey i detaley s uchetom geopoliticheskikh izmeneniy na otechestvennom rynke* [The state of technology and issues of import substitution of spare parts and components taking into account geopolitical changes in the domestic market]. *Konkurentosposobnost' v global'nom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii* [Competitiveness in the global world: economics, science, technology], 2023, no. 4, pp. 181–186.
- [16] Khalilov S.N., Zagidullina L.I. *Sravnitel'nyy analiz lesozagotovitel'noy tekhniki i perspektivy proektirovaniya mnogofunktional'nykh universal'nykh mashin* [Comparative analysis of logging equipment and prospects for the design of multifunctional universal machines]. *Nauchnye issledovaniya i razrabotki molodykh uchenykh* [Scientific research and development of young scientists], 2023, pp. 246–252.
- [17] Kolberg D., Zühlke D. *Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies*. *IFAC-Papers On Line*, 2015, no. 48(3), pp. 1870–1875. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.359
- [18] Iliuta M., Pop E., Caramihai S., Moisescu M. *A Digital Twin Generic Architecture for Data-Driven Cyber-Physical Production Systems. Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, pp.71–82. DOI: 10.1007/978-3-031-24291-5\_6
- [19] Krenczyk D. *Digital Twins of Production Systems Based on Discrete Simulation and Machine Learning Algorithms*. 18th Int. Conf. on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (SOCO 2023), pp. 57–66. DOI: 10.1007/978-3-031-42536-3\_6
- [20] Shvedenko V., Mozokhin A. *Concept of digital twins at life cycle stages of production systems*. *Scientific and Technical J. of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, v. 20, pp. 815–827. DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-6-815-827
- [21] Kataev Yu.V., Gradov E.A., Tishaninov I.A. *Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya sel'skokhozyaystvennoy tekhniki cherez onlayn-monitoring parametrov* [Monitoring the technical condition of agricultural machinery through online

- monitoring of parameters]. Sel'skokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont [Agricultural machinery: maintenance and repair], 2022, no. 1, pp. 14–19. DOI: 10.33920/sel-10-2201-03
- [22] Erokhin M.N., Dorokhov A.S., Kataev Yu.V. Intelligent system for diagnosing the parameters of the technical condition of tractors. *Agricultural Engineering*, 2021, no. 2, pp. 45–50. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-2-45-50>
- [23] Chutcheva Yu.V., Korotkikh Yu.S., Kiritsa A.A. *Tsifrovye transformatsii v sel'skom khozyaystve* [Digital transformations in agriculture]. *Agroinzheneriya* [Agroinzheneriya], 2021, no. 5 (105), pp. 53–58. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-5-53-58
- [24] Korotchenya V.M., Lichman G.I., Smirnov I.G. *Tsifrovizatsiya tekhnologicheskikh protsessov v rastenievodstve Rossii* [Digitalization of technological processes in crop production in Russia]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* [Agricultural machinery and technologies], 2019, no. 13(1), pp. 14–20. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2018-13-1-14-20>
- [25] Zaikin A.N., Sivakov V.V., Nikitin V.V., Briones A.A. *Programmnoye obespechenie v lesnom khozyaystve i pri lesozagotovkakh* [Software in forestry and logging]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 172–184. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-172-184
- [26] Sakhanov V.V., Fitchin A.A. *Problemy lesnogo mashinostroeniya i napravleniya ikh razresheniya* [Problems of forestry engineering and directions for their resolution]. *Sovremennyye mashiny, oborudovanie i IT-resheniya lesopromyshlennogo kompleksa: teoriya i praktika: mater. Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern machines, equipment and IT solutions for the forestry complex: theory and practice: Mater. All-Russian scientific and practical conference], Voronezh, June 17, 2021. Voronezh: VSTU named after G.F. Morozov, 2021, pp. 130–135.
- [27] Gurskiy A.S., Ivashko V.S. *Ispol'zovanie transportnoy telematiki i distantsionnoy diagnostiki dlya sovershenstvovaniya tekhnicheskogo obsluzhivaniya i remonta transportnykh sredstv* [Use of transport telematics and remote diagnostics to improve the maintenance and repair of vehicles]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of physical and technical sciences], 2020, v. 65, no. 3, pp. 375–383. DOI: 10.29235/1561-8358-2020-65-3-375-383
- [28] Kurmiawan R., Kholik H. Usulan Perawatan Mesin Stitching Dengan Metode Reliability Centered Maintenance. *Jurnal Teknik Industri*, 2017, v. 16(2), pp. 83–91. DOI: 10.22219/JTIUMM. Vol.16, no.2, pp.83–91.
- [29] Voskovykh K.A. *Osobennosti tsifrovizatsii v stroitel'noy otrasli kak vazhnyy faktor ee ustoychivogo razvitiya* [Features of digitalization in the construction industry as an important factor in its sustainable development]. *Byulleten' nauki i praktiki* [Bulletin of Science and Practice], 2021, v. 7, no. 12, pp. 169–174. DOI: 10.33619/2414-2948/73/23
- [30] Kim G.-H., Kim K.-D., Lee H.-S., Choi Y., Mun H.-S., Oh J.-H., Shin B.-S. Development of Wi-Fi-Based Teleoperation System for Forest Harvester. *J. of Biosystems Engineering*, 2021, v. 46. DOI: 10.1007/s42853-021-00100-2
- [31] Lopatin E., Väättäinen K., Kukko A., Kaartinen H., Hyyppä J., Holmström E., Sikanen L., Nuutinen Y., Routa J. Unlocking Digitalization in Forest Operations with Viewshed Analysis to Improve GNSS Positioning Accuracy. *Forests*, 2023, v. 14(4), p. 689. DOI: 14. 689. 10.3390/f14040689
- [32] Bykov V.V., Golubev M.I. *Obnovlenie parka mashin v lesnom komplekse importnoy lesozagotovitel'noy tekhniki* [Updating the machine fleet in the forestry complex with imported logging equipment]. *Nauchno-informatsionnoye obespechenie innovatsionnogo razvitiya APK: Mater. XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy internet-konferentsii* [Scientific and information support for innovative development of the agro-industrial complex: Proc. XIII International Scientific and Practical Internet Conference]. P. Pravdinsky, Moscow Region, June 08–10, 2021. Pravdinsky: Russian Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of the Agro-Industrial Complex, 2021, pp. 505–509.
- [33] Yanyuk Yu.V., Kapelyush K.V. *Avtomatizatsiya bazy dannykh zapasnykh chastey i agregatov lesozagotovitel'noy tekhniki* [Automation of the database of spare parts and units of logging equipment]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya* [Repair. Restoration. Modernization], 2021, no. 4, pp. 40–44.
- [34] Popikov P.I., Evsikova N.Yu., Kamalova N.S., Fursov S.K. *Sistemnyy podkhod k probleme obosnovaniya modernizatsii lesozagotovitel'nykh mashin* [Systems approach to the problem of justifying the modernization of logging machines]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika* [Current areas of scientific research in the 21st century: theory and practice], 2015, v. 3, no. 2–2 (13–2), pp. 296–300.
- [35] Rubinskaya A.V., Mokhirev A.P., Puzyreva O.K., Keryushchenko A.A. *Razrabotka meropriyatiy po okhrane okruzhayushchey sredy pri lesozagotovitel'nom protsesse* [Development of measures to protect the environment in the logging process]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2017, v. 7, no. 2 (26), pp. 105–114.
- [36] *Avtomatizatsiya proizvodstvennoy bezopasnosti i okhrany truda* [Automation of industrial safety and labor protection]. Available at: <https://www.ot-soft.ru> (accessed 06.08.2023).
- [37] *IS: Proizvodstvennaya bezopasnost'. Okhrana truda* [IC: Industrial Safety. Occupational safety]. Available at: [https://solutions.1c.ru/catalog/ehs\\_ocsaf/features](https://solutions.1c.ru/catalog/ehs_ocsaf/features) (accessed 06.08.2023).
- [38] Gözler P., Fritzsche A. Data-driven operations management: organisational implications of the digital transformation in industrial practice. *Production Planning and Control*, 2017, v. 28(16), pp. 1332–1343. DOI: 10.1080/09537287.2017.1375148
- [39] Gupta U., Bansal A., Singh S. Application of Failure Mode Effect Analysis for Improved Scheduling in Maintenance of Machines. *International J. of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2020, v. 9, pp. 895–899. DOI: 10.35940/E3025.049620
- [40] Apatenko A.S., Sevryugina N.S. Accounting of Random Processes when Adjusting the Overhaul Life of Machines for Reclamation. *E3S Web of Conferences*, 13, Rostov-on-Don, 26–28 February 2020, p. 05011. DOI: 10.1051/e3sconf/202017505011
- [41] Apatenko A.S., Sevryugina N.S. Methods of Recruiting of Mobile Repair Services and Maintenance of Machines Performing Reclamation Works. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific*

- Conference Interstroyem, 2019, ISM, 2019, Kazan, 12–13 September 2019. Kazan: Institute of Physics Publishing, 2020, p. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012037
- [42] Sevryugina N.S., Apatenko A.S. Failure Risk Control Method in Providing Technical Safety of Transportation Engineering Vehicle Operation for Reclamation Work. Engineering for Rural Development, 19, Jelgava, 20–22 May, 2020. Jelgava, 2020, pp. 591–597. DOI 10.22616/ERDev.2020.19.TF132
- [43] Sevryugina N., Apatenko A., Revyako S. Theory of the Technological Machinery State Recognition by the Criterion of Recourse Uncertainty. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, 20–22 October 2020. Rostov-on-Don, 2020, p. 012083. DOI 10.1088/1757-899X/1001/1/012083

## Authors' information

**Sivakov Vladimir Viktorovich** — Cand. Sci. (Tech.), Senior Lecturer, Department of Transport and Technological Machinery and Service, Bryansk State University of Engineering and Technology, sv@bgitu.ru

**Zaikin Anatolij Nikolaevich** ✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Department of Transport and Technological Machinery and Service, Bryansk State University of Engineering and Technology, zaikin.anatolij@yandex.ru

**Gryadunov Sergey Semenovich** — Cand. Sci. (Tech.), Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Bryansk State Technical University, grydunowcc@mail.ru

**Nikitin Vladimir Valentinovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor, Department of Technology and Equipment of Forest Industry, Bauman Moscow State Technical University, Myititschi Branch, nikitinvv@bmstu.ru

Received 30.05.2024.

Approved after review 31.10.2024.

Accepted for publication 27.11.2024.

---

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest