

# ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал  
№ 5 ' 2017 Том 21

## Главный редактор

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

## Редакционный совет журнала

**Артамонов Дмитрий Владимирович**, проф., д-р техн. наук,  
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. Королева,  
Москва

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

**Драпалюк Михаил Валентинович**, профессор, д-р техн. наук,  
проректор по науке и инновациям ФГБОУ ВПО «ВГЛТА»,  
Воронеж

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

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

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

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

**Исаев Александр Сергеевич**, академик РАН, Международный  
институт леса, Москва

**Карелайнен Тимо**, проф., Университет Восточной Финляндии  
г. Йюэнсуу, Лесной НИИ «Метла», Финляндия

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

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

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

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

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

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

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

**Кротт Макс**, проф., специализация «Лесная политика»,  
Георг-Аугуст-Университет, Геттинген

**Леонтьев Александр Иванович**, академик РАН, проф.,  
д-р техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

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

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

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

**Моисеев Николай Александрович**, академик РАН, проф.,  
д-р с.-х. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

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

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

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

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

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

**Стрекалов Александр Федорович**, канд. техн. наук, РКК  
«Энергия», ЗАО «ЗЭМ», Королев

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

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

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

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

**Шадрин Анатолий Александрович**, проф., д-р техн. наук,  
академик РАЕН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
Москва

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

Ответственный секретарь Расава Елена Александровна

Редактор Л.В. Забродина  
Перевод М.А. Карпухина  
Электронная версия Е.В. Жукова

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, 1  
(498) 687-41-33,  
les-vest@mgul.ac.ru

Дата выхода в свет 25.10.2017.

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 13,25 п. л.

Цена свободная

# LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal  
№ 5 ' 2017 Vol. 21

## 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

**Drapalyuk Mikhail Valentinovich**, professor, Dr.Sci.(Tech.), Vice-Rector for Science and Innovation Voronezh State Academy of Forestry, 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

**Zalesov Sergey Veniaminovich**, professor, the Dr.Sci.(Agricultural), USFEU, Ekaterinburg

**Zaprudnov Vyacheslav Il'ich**, professor, Dr.Sci.(Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Ivankin Andrey Nikolaevich**, professor, Dr.Sci.(Chemical), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Isaev Aleksandr Sergeevich**, academician of the Russian Academy of Sciences, International institute of the wood, Moscow

**Karjalainen Timo**, professor, university of East Finland Joensuu, forest scientific research institute «Metla», Finland

**Kiryukhin Dmitriy Pavlovich**, Dr.Sci.(Chemical), IPCC RAS, Chernogolovka

**Klassen Nikolay Vladimirovich**, Ph.D.(Phys.-Math.), ISSP RAS, Chernogolovka

**Kozhukhov Nikolay Ivanovich**, professor, academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sci.(Econ.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Kozlov Aleksandr Il'ich**, Ph.D.(Tech), Scientific Secretary of the Board of «NPO IT», Korolev

**Komarov Evgeniy Gennadievich**, professor, Dr.Sci.(Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Korol'kov Anatoliy Vladimirovich**, professor, Dr.Sci.(Phys.-Math.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**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

**Krott Maks**, professor of Forest polity specialization, George-August-Universität, Goettingen

**Leont'ev Aleksandr Ivanovich**, academician of the Russian Academy of Sciences, professor, Dr.Sci.(Tech.), BMSTU, Moscow

**Lipatkin Vladimir Aleksandrovich**, professor, Ph.D.(Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Martynyuk Aleksandr Aleksandrovich**, Dr.Sci.(Agricultural), VNIILM, Moscow

**Melekhov Vladimir Ivanovich**, professor, Dr.Sci.(Tech.), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, NARFU, Arkhangelsk

**Moiseev Nikolay Aleksandrovich**, professor, Dr.Sci. (Agricultural) academician of the Russian Academy of Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**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

**Poleshchuk Ol'ga Mitrofanovna**, professor, Dr.Sci.(Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Rodin Sergey Anatol'evich**, professor, the Dr.Sci.(Agricultural), ARRISMF, Moscow

**Rykunin Stanislav Nikolaevich**, professor, Dr.Sci.(Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Strekalov Aleksandr Fedorovich**, Ph.D.(Tech.), Rocket and space corporation «ENERGIA», Korolev

**Teodoronskiy Vladimir Sergeevich**, professor, Dr.Sci.(Agricultural), 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 TSNIMASH, Korolev

**Fedotov Gennadiy Nikolaevich**, Dr.Sci.(Biol.), Lomonosov Moscow State University, Moscow

**Chubinskiy Anatoliy Nikolaevich**, professor, Dr.Sci.(Tech.), Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg

**Shadrin Anatoliy Aleksandrovich**, professor, Dr.Sci.(Tech.), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

**Shimkovich Dmitriy Grigor'evich**, professor, Dr.Sci.(Tech.), OOO «Kudesnik», Moscow

Assistant Editor Raseva Elena Aleksandrovna

Editor L.V. Zabrodina

Translation by M.A. Karpushina

Electronic version E.V. Zhukova

## 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 25.10.2017.  
Circulation 600 copies  
Order №  
Volume 13,25 p. p.  
Price free

# СОДЕРЖАНИЕ

## ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

**Шегельман И.Р., Будник П.В., Паничев Г.П.**

Оптимизация комплекса лесозаготовительных машин для сортиментной технологии с применением теории очередей ..... 5

**Тетерина М.А.**

Экспериментальное исследование факторов синхронизации машин в системе для заготовки сортиментов в условиях лиственного хозяйства при работе с сортировкой ..... 12

**Мохирев А.П., Керющенко А.А.**

Методика формирования технологической цепочки заготовки деловой и энергетической древесины ..... 17

**Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю.**

Применение экономико-математических методов для определения областей использования видов покрытий ..... 23

## ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

**Стороженко В.Г., Чеботарева В.В., Чеботарев П.А.**

Структура древостоев дуба естественного и искусственного происхождения при различных методах ухода в процессе их формирования в зоне лесостепи (на примере древостоев Теллермановского опытного лесничества ИЛАН РАН) ..... 33

**Перепечина Ю.И., Глушенков О.И., Глушенков И.С.**

Анализ динамики основных показателей лесного фонда на арендованных участках лесов ..... 39

**Филимонова Е.И., Лукина Н.В., Глазырина М.А., Шишаева О.С., Веселкин Д.В.**

Морфологические особенности самосева *Pinus sylvestris* L. на зарастающих лесом золоотвалах на Среднем Урале ..... 45

**Мигунова Е.С.**

Лесная типология Г.Ф. Морозова — А.А. Крюденера — П.С. Погребняка — теоретическая основа лесоводства ..... 52

## ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

**Кольниченко Г.И., Тарлаков Я.В., Сиротов А.В.**

Биоэнерготехнологии и лесопромышленный комплекс ..... 64

**Ермоченков М.Г., Евстигнеев А.Г.**

Теплопроводность термически модифицированной древесины ..... 69

**Челышева И.Н., Плотников Н.П., Афанасьева Н.А.**

Совершенствование технологии получения древесных композиционных материалов ..... 75

**Запруднов В.И., Карпачёв С.П.**

Технология изготовления трехслойных монолитных конструкций с теплоизоляционным слоем из древесно-цементного материала ..... 83

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Полуэктов Н.П., Усатов И.И., Царьгородцев Ю.П., Евстигнеев А.Г., Амеликин О.О.**

Исследование магнетрона с полым катодом, работающего в режиме мощных импульсов ..... 89

## КОНФЕРЕНЦИИ

**Шалаев В.С., Тепляков В.К.**

Результаты Юбилейного конгресса ИЮФРО 2017 года ..... 96

# CONTENTS

## FOREST ENGINEERING

**Shegel'man I.R., Budnik P.V., Panichev G.P.**

Optimization of forest machines complex for assortment technology using queuing theory ..... 5

**Teterina M.A.**

Experimental investigation of machines synchronization factors in the system for logging  
in deciduous species facilities situations when working with sorting ..... 12

**Mokhirev A.P., Keryushchenko A.A.**

Method of forming process chain blank business and energy wood ..... 17

**Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Mikova E.Yu.**

The use of economic-mathematical methods to identify areas of use of types of coatings ..... 23

## FORESTRY

**Storozhenko V.G., Chebotareva V.V., Chebotarev P.A.**

Structure of oak stands of natural and man-planted Origin after different methods  
of tending in processes of their formation in the forest steppe zone (case study of stands  
in the territory of tellerman experimental forest district under  
the institute of forest sciences, RAS) ..... 33

**Perepechina Yu.I., Glushenkov O.I., Glushenkov I.S.**

Analysis of dynamics of the main indicators of the forest fund in leased forest areas ..... 39

**Filimonova E.I., Lukina N.V., Glazyrina M.A., Shishaeva O.S., Veselkin D.V.**

The morphological peculiarities of *Pinus sylvestris* L. seedfall  
in overgrown forest ash dumps in the Middle Urals ..... 45

**Migunova E.S.**

Forest typology by G.F. Morozov — A.A. Kryudener — P.S. Pogrebnyak  
is theoretical basis of forestry ..... 52

## WOOD PROCESSING AND CHEMICAL TECHNOLOGY

**Kol'nichenko G.I., Tarlakov Ya.V., Sirotov A.V.**

Bioenergetic technologies and forest industry complex ..... 64

**Ermochenkov M.G., Evstigneev A.G.**

Heat conductivity of thermally modified wood ..... 69

**Chelysheva I.N., Plotnikov N.P., Afanasyeva N.A.**

Improvement of technology of wood composite materials ..... 75

**Zaprudnov V.I., Karpachev S.P.**

Technology of manufacture of three-layer monolithic structures with thermal  
insulating layer wood-cement material ..... 83

## METHODS OF RESEARCH

**Poluektov N.P., Usatov I.I., Tsar'gorodtsev Yu.P., Evstigneev A.G., Amel'kin O.O.**

Study of a hollow cathode magnetron, operating  
in the regime of powerful pulses ..... 89

## CONFERENCE

**Shalaev V.S., Teplyakov V.K.**

Results of the anniversary iufro world congress 2017 ..... 96



## ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН ДЛЯ СОРТИМЕНТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ОЧЕРЕДЕЙ

И.Р. Шегельман<sup>1</sup>, П.В. Будник<sup>1</sup>, Г.П. Паничев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Петрозаводский государственный университет, 185910, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр-т. Ленина, д. 33

<sup>2</sup> Департамент Союза лесопромышленников и лесозэкспортеров России, 101990, Москва, Армянский пер., д. 9/1

shegelman@onego.ru

Современный технологический процесс заготовки древесины является сложной системой как в техническом, так и в организационном отношении. Сегодня исследования таких систем, повышение их эффективности немислимы без предварительного использования методов математического моделирования. В работе представлена методика анализа технологического процесса заготовки сортиментов, основанная на применении теории очередей. Приведена адаптированная модель массового обслуживания, характеризующая процесс заготовки сортиментов с использованием комплекса машин, включающего харвестеры и форвардеры. Процесс рассмотрен как G/G/c-система массового обслуживания с групповым поступлением, где в качестве заявки выступает пачка сортиментов, состоящая из N числа сортиментов. Даны результаты экспериментальной проверки модели, подтверждающие ее адекватность. Эксперимент проводился на лесосеке, расположенной в Пряжинском районе Республики Карелия. Проведен анализ эффективности рассматриваемого комплекса и даны рекомендации по его оптимизации. Так, в условиях исследуемой лесосеки на практике существенно повысить эффективность работы комплекса путем регулировки работы (сокращение времени выполнения операций, и равномерность операций) отдельных машин не представляется возможным. В то же время изменение числа машин позволяет достичь значительных изменений в эффективности работы. Наиболее оптимальным комплексом машин для условий лесосеки, где были проведены эксперименты, является комплекс в составе двух харвестеров и двух форвардеров.

**Ключевые слова:** теория очередей, лесозаготовки, комплекс лесозаготовительных машин, моделирование

**Ссылка для цитирования:** Шегельман И.Р., Будник П.В., Паничев Г.П. Оптимизация комплекса лесозаготовительных машин для сортиментной технологии с применением теории очередей // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 5–11. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-5-11

Современный технологический процесс заготовки древесины является сложной системой как в техническом, так и в организационном отношении. Например, в европейской части России и, в частности, в Республике Карелия широко распространена сортиментная технология с использованием харвестера и форвардера. Сегодня исследования таких систем, повышение их эффективности немислимы без предварительного использования методов математического моделирования.

Методы математического моделирования широко применяются для анализа и совершенствования лесозаготовительных работ исследователями Петрозаводского государственного университета. Здесь можно отметить работы А.В. Воронина с соавт. [1], И.Р. Шегельмана [2], В.Н. Андреева, Ю.Ю. Герасимова [3] и др.

На практике большое число разнообразных систем лесозаготовительных машин и используемых методов математического моделирования приводит к проблеме выбора подходящего метода для анализа протекающих технологических процессов. В связи с этим необходимо выработать универсальный подход. В качестве одного из таких подходов авторы предлагают использовать теорию очередей.

Методы теории очередей получили довольно широкое распространение в машиностроении,

легкой промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте и в других отраслях народного хозяйства [4–6], при этом решаются такие задачи, как: определение оптимального обеспечения запасными частями и агрегатами; исследование и оптимизация операций; анализ конвейерных и поточных производств; обоснование размеров запасов сырья или продукции, а также управление этими запасами; календарное планирование производства; анализ систем погрузки подвижных составов; исследование потоков транспортных средств и пешеходов; исследование процессов деревообработки; анализ и оптимизация лесозаготовительных технологических процессов.

В Петрозаводском государственном университете ведутся работы по приложению методов теории очередей к анализу и совершенствованию лесозаготовительных технологических процессов [7–9], при этом в максимальной степени используются хорошо разработанные вероятностные модели, адаптированные под исследуемые процессы.

### Цель и методика исследований

Цель данной работы — определение оптимального комплекта лесозаготовительных машин, обеспечивающих максимальную производительность лесозаготовительной техники с учетом вероятностного характера выполняемых ими операций.

Для достижения поставленной цели была составлена модель массового обслуживания. В ее основу положена работа Guy L. Curry и Richard M. Feldman [10]. Приведем краткое описание модели, позволяющей проанализировать процесс заготовки сортиментов с использованием харвестеров и форвардеров. Подробное описание вероятностных моделей, лежащих в основе приводимых формул, можно найти в указанной выше работе [10].

Технологический процесс заготовки сортиментов с использованием харвестеров и форвардеров рассматривается нами как  $G/G/c$ -система массового обслуживания с групповым поступлением, где в качестве заявки, выступает пачка сортиментов, состоящая из  $N$  числа сортиментов.

Интенсивность входного потока  $\lambda_i(B)$  определяет работу харвестера. Величина  $\lambda_i(B)$  характеризует среднее число пачек сортиментов, вырабатываемых в единицу времени  $i$ -м харвестером. Заявка считается поступившей, как только получено  $N$  число сортиментов. Величина  $N$  является целочисленной и случайной величиной с произвольным распределением. При поступлении в систему заявка либо поступает на обслуживание, либо, если обслуживающее устройство (форвардер) занято, считается находящейся в накопителе (волоке).

Интенсивность обслуживания  $\mu_j(B)$  характеризует работу форвардера и определяется как среднее число заявок, обслуживаемых в единицу времени  $j$ -м форвардером.

В случае работы  $m$  числа харвестеров интенсивность входного потока характеризует среднее число сортиментов, выпиливаемых всеми харвестерами в единицу времени, т. е. рассматривается как сумма  $m$  независимых потоков с общей интенсивностью

$$\lambda(I) = \sum_{i=1}^m \lambda_i(I), \quad (1)$$

где  $m$  — число харвестеров;  $\lambda_i(I)$  — среднее число сортиментов, выпиливаемых  $i$ -м харвестером в единицу времени.

Величины  $\lambda(I)$  и  $\lambda(B)$  связаны выражением  $\lambda(B) = \lambda(I)/E[N]$ , где  $E[N]$  — среднее число сортиментов в пачке.

Моделирование направлено на определение таких величин, как средняя длина цикла  $E[CT_s]$ , среднее число заявок в системе  $E[WIP]$ , коэффициент загрузки  $u(B)$ , среднее время пребывания заявки в очереди  $E[T_q(B)]$ , среднее число заявок в очереди  $E[WIP_q]$ .

Для системы массового обслуживания с групповым поступлением величина  $E[CT_s]$  определяется следующим образом:

$$E[CT_s] = E[D] + E[T_q(B)] + E[T_s(B)], \quad (2)$$

где  $E[D]$  — среднее время выпиливания всеми харвестерами пачки сортиментов (время формирования заявки);

$E[T_q(B)]$  — среднее время пребывания заявки в очереди;

$E[T_s(B)]$  — среднее время обслуживания заявки.

Величина  $E[D]$  определяется с помощью тождества Вальда

$$E[D] = E[T_a(I)], \quad (3)$$

где  $E[T_a(I)] = 1/\lambda(I)$  — среднее время между моментами выпиливания сортиментов с учетом работы всех харвестеров.

Среднее время, проведенное пачкой сортиментов в очереди при работе нескольких форвардеров, находят по формуле

$$E[CT_q] = \left( \frac{C_a^2(B) + C_s^2(B)}{2} \right) \times \left( \frac{u(B)^{\sqrt{2c+2}-1}}{c(1-u(B))} \right) E[T_s(B)], \quad (4)$$

где  $C_a^2(B)$  — квадрат коэффициента вариации времени выпиливания пачки сортиментов всеми харвестерами;

$C_s^2(B)$  — квадрат коэффициента вариации времени обслуживания пачки форвардером;

$u(B)$  — коэффициент загрузки;

$c$  — число обслуживающих устройств (количество форвардеров).

Коэффициент загрузки при работе нескольких форвардеров определяется зависимостью

$$u(B) = \lambda(I) / (\mu(B)E[N]c). \quad (5)$$

Квадрат коэффициента вариации времени выпиливания пачки сортиментов всеми харвестерами

$$C_a^2(B) = \sum_{i=1}^m \frac{\lambda_i(B)}{\lambda(B)} C_{a,i}^2(B), \quad (6)$$

где  $\lambda_i(B)$  — среднее число пачек сортиментов, выпиливаемых  $i$ -м харвестером за единицу времени;

$C_{a,i}^2(B)$  — квадрат коэффициента вариации времени выпиливания пачки сортиментов  $i$ -м харвестером.

Величины  $\lambda_i(I)$  и  $\lambda_i(B)$  связаны выражением

$$\lambda_i(B) = \lambda_i(I) / E[N].$$

Величина  $\lambda_i(I)$  рассчитывается согласно формуле

$$\lambda_i(I) = 1 / E[T_{a,i}(I)], \quad (7)$$

где  $E[T_{a,i}(I)]$  — среднее время выпиливания сортимента  $i$ -м харвестером.

Величина  $C_{a,i}^2(B)$  определяется по формуле

$$C_{a,i}^2(B) = \frac{C^2[T_{a,i}(I)]}{E[N]} + C^2[N], \quad (8)$$

где  $C^2[T_{a,i}(I)]$  — квадрат коэффициента вариации времени выпиливания  $i$ -м харвестером одного сортимента;

$C^2[N]$  — квадрат коэффициента вариации числа сортиментов, помещающихся на платформе форвардера.

Величина  $C^2[T_{a,i}(I)]$  определяется выражением

$$C^2[T_{a,i}(I)] = V[T_{a,i}(I)] / E[T_{a,i}(I)]^2, \quad (9)$$

где  $V[T_{a,i}(I)]$  — дисперсия времени выпиливания сортимента  $i$ -м харвестером.

Значение  $C_s^2(B)$  определяется как средневзвешенная величина

$$C_s^2(B) = \sum_{j=1}^c \frac{\mu_j(B)}{\mu(B)} C_{s,j}^2(B), \quad (10)$$

где  $\mu_j(B)$  — среднее число пачек сортиментов, обслуживаемых  $j$ -м форвардером за единицу времени;

$\mu(B)$  — суммарная интенсивность потока обслуживания;

$C_{s,j}^2(B)$  — квадрат коэффициента вариации времени обслуживания пачки  $j$ -м форвардером.

При работе  $c$  числа форвардеров суммарная интенсивность обслуживания

$$\mu(B) = \sum_{j=1}^c \mu_j(B). \quad (11)$$

Значение величины  $C_{s,j}^2(B)$  определяется следующим выражением:

$$C_{s,j}^2(B) = V[T_{s,j}(B)] / E[T_{s,j}(B)]^2, \quad (12)$$

где  $V[T_{s,j}(B)]$  — дисперсия времени обслуживания пачки сортиментов  $j$ -м форвардером;

$E[T_{s,j}(B)]$  — среднее время обслуживания пачки сортиментов  $j$ -м форвардером.

При работе  $c$  числа форвардеров величину  $E[T_s(B)]$  можно определить как среднее арифметическое

$$E[T_s(B)] = \sum_{i=j}^c E[T_{s,j}(B)] / c. \quad (13)$$

Величины, необходимые для расчета по описанной модели, определяются по результатам статистической обработки данных, полученных путем хронометражных наблюдений за работой лесозаготовительных машин.

Для проверки модели были проведены экспериментальные исследования. Эксперимент прово-

дился на лесосеке, расположенной в Пряжинском районе Республики Карелия. Основанием для выбора лесосеки являлась ее типичность для южного региона Республики Карелия.

Анализ экспериментальных данных показал, что средняя длина цикла, полученная по эмпирическим данным, составляет 93 % от средней длины цикла, рассчитанной по описанной модели. Таким образом, модель подтверждается экспериментальными данными.

Важными расчетными характеристиками модели являются: средняя длина цикла  $E[CT_s]$ , коэффициент загрузки  $u(B)$ , среднее время пребывания заявки (пачки сортиментов) в очереди  $E[T_q(B)]$ , среднее число заявок в системе  $E[WIP]$ , среднее число заявок в очереди  $E[WIP_q]$ . Поясним практический смысл этих величин.

Величина  $E[T_q(B)]$  характеризует время, которое в среднем поступившая в систему заявка ждет обслуживания. При снижении данной величины повышается равномерность работы системы и, в общем случае, производительность.

Средняя длина цикла ( $E[CT_s]$ ) состоит из трех компонентов: времени формирования заявки, времени, проведенного заявкой в очереди, и времени обслуживания заявки. Чем меньше это величина, тем быстрее готовый сортимент оказывается в штабеле на погрузочной площадке (верхнем складе). При снижении величины  $E[CT_s]$  и неизменности средних характеристик пачки сортиментов ( $E[N]$  и  $C^2[N]$ ) можно говорить о повышении производительности работы комплекса лесозаготовительных машин.

Важной величиной является коэффициент загрузки  $u(B)$ , показывающий степень загруженности обслуживающего устройства (форвардера). По значению величины  $u(B)$  можно судить о загрузке обслуживающего устройства и времени его простоя. Так, при  $u(B) > 1$  форвардер перегружен, при  $u(B) < 1$  форвардер недогружен, при этом лесозаготовительная машина будет простаивать долю времени, равную  $1 - u(B)$ . Важно отметить, что величина очереди нелинейно возрастает при приближении  $u(B)$  к единице. Это является одной из основных причин, приводящих к перегрузке системы.

Величина  $E[WIP]$  характеризует объем сортиментов, находящихся на лесосеке. Одна единица величины  $E[WIP]$  составляет  $10 \text{ м}^3$  сортиментов. Данный объем равен объему сортиментов, помещающихся на платформе форвардера John Deere 1110D Eco III.

## Результаты и обсуждение

Для получения рекомендаций по оптимизации комплекса лесозаготовительных машин проследим, как влияет на значение расчетных величин

изменение некоторых параметров работы комплекса.

Разброс (дисперсия) времени поступления сортиментов и времени обслуживания пачки сортиментов определяются в модели величинами  $C^2[T_a(I)]$ ,  $C^2_s(B)$ . Их уменьшение указывает на повышение равномерности работы машин. Нетрудно заметить, что зависимость между величинами  $C^2[T_a(I)]$ ,  $C^2_s(B)$  и расчетными величинами  $E[CT_s]$ ,  $E[T_q(B)]$ ,  $E[WIP]$  имеет линейный характер. При увеличении первых вторые также возрастают. При уменьшении величины  $C^2_s(B)$  на 10 % величины  $E[CT_s]$  и  $E[WIP]$  уменьшаются на 0,31 %, а  $E[T_q(B)]$  — на 4,78 %, при этом коэффициент загрузки остается неизменным. В целом анализ показал, что изменение равномерности работы машин в довольно широком интервале (изменения величин  $C^2[T_a(I)]$  и  $C^2_s(B)$  до 100 % при неизменной величине  $E[T_a(I)]$ ) не оказывает существенного влияния на эффективность работы системы (комплекса машин).

Более существенно на расчетные величины влияет изменение среднего времени между моментами выпиливания сортиментов  $E[T_a(I)]$ . На рис. 1 приведены графики зависимостей расчетных величин от изменения  $E[T_a(I)]$ .

Анализ показал, что уменьшение среднего времени между моментами выпиливания сортиментов  $E[T_a(I)]$  в пределах 20 % позволяет несколько сократить среднюю длину цикла  $E[CT_s]$  и среднее время пребывания заявки (пачки сортиментов) в очереди  $E[T_q(B)]$  при незначительном снижении коэффициента загрузки  $u(B)$ . Уменьшение величины  $E[T_a(I)]$  более чем на 20 % приводит к перегрузке форвардера, так как  $u(B) > 1$ . При

этом время увеличение среднего времени между моментами выпиливания сортиментов приводит к возрастанию средней длины цикла и уменьшению коэффициент загрузки.

Изменение величины  $E[T_a(I)]$  может оказать существенное воздействие на эффективность работы рассматриваемого комплекса. Однако на практике данная величина зависит от природно-производственных условий, что тяжело поддается управлению.

В значительной степени на расчетные величины влияет математическое ожидание (среднее выборочное) времени обслуживания пачки сортиментов  $E[T_s(B)]$ . На рис. 2 приведены графики их зависимостей от изменения величины  $E[T_s(B)]$ .

Как видно из рис. 2, уменьшение  $E[T_s(B)]$  приводит к снижению расчетных величин. Так, при снижении  $E[T_s(B)]$  на 10 % величины  $E[CT_s]$  и  $E[WIP]$  уменьшаются на 6 %, а  $E[T_q(B)]$  на 36 %,  $u(B)$  на 10 %. Следует также отметить, что увеличение математического ожидания времени обслуживания пачки сортиментов более чем на 30 % приведет к перегрузке форвардера  $u(B) > 1$ .

Одновременное увеличение  $E[T_s(B)]$  на 10 % с уменьшением величины  $E[T_a(I)]$  на 10 % приводит к ощутимому увеличению расчетных величин, а именно,  $E[CT_s]$  на 13 %,  $E[T_q(B)]$  на 227 %,  $E[WIP]$  на 26 %,  $u(B)$  на 22 %. При осуществлении обратного действия расчетные величины уменьшаются на 2, 50, 11 и 18 % соответственно.

Таким образом, в данной ситуации существенно повысить эффективность работы комплекса машин путем регулирования их работы (изменяя величины  $E[T_a(I)]$ ,  $E[T_s(B)]$ ,  $C^2[T_a(I)]$ ,  $C^2_s(B)$ ) не представляется возможным.

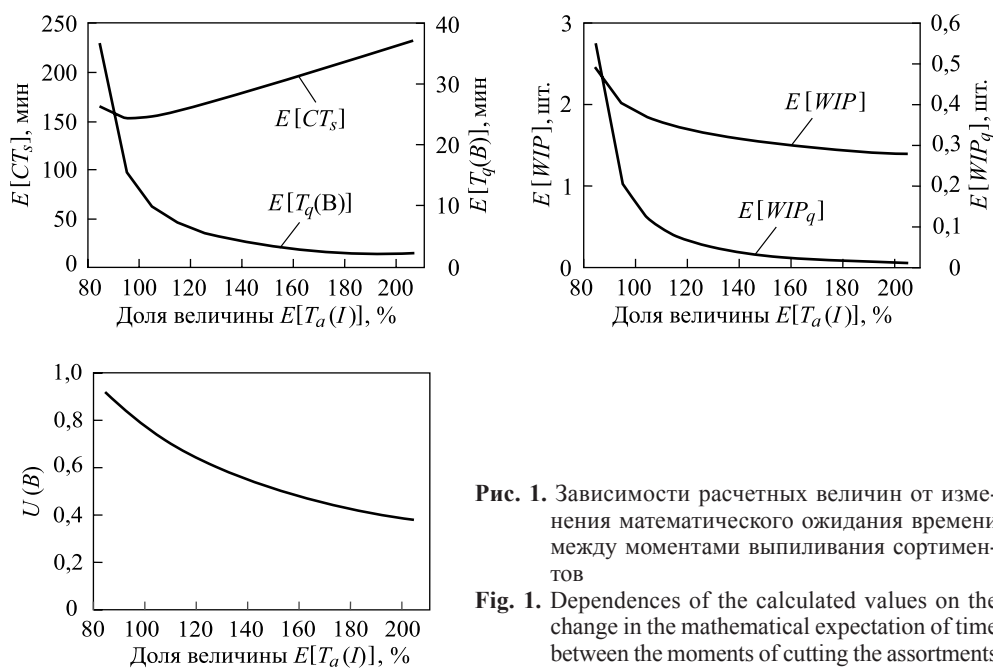


Рис. 1. Зависимости расчетных величин от изменения математического ожидания времени между моментами выпиливания сортиментов

Fig. 1. Dependences of the calculated values on the change in the mathematical expectation of time between the moments of cutting the assortments

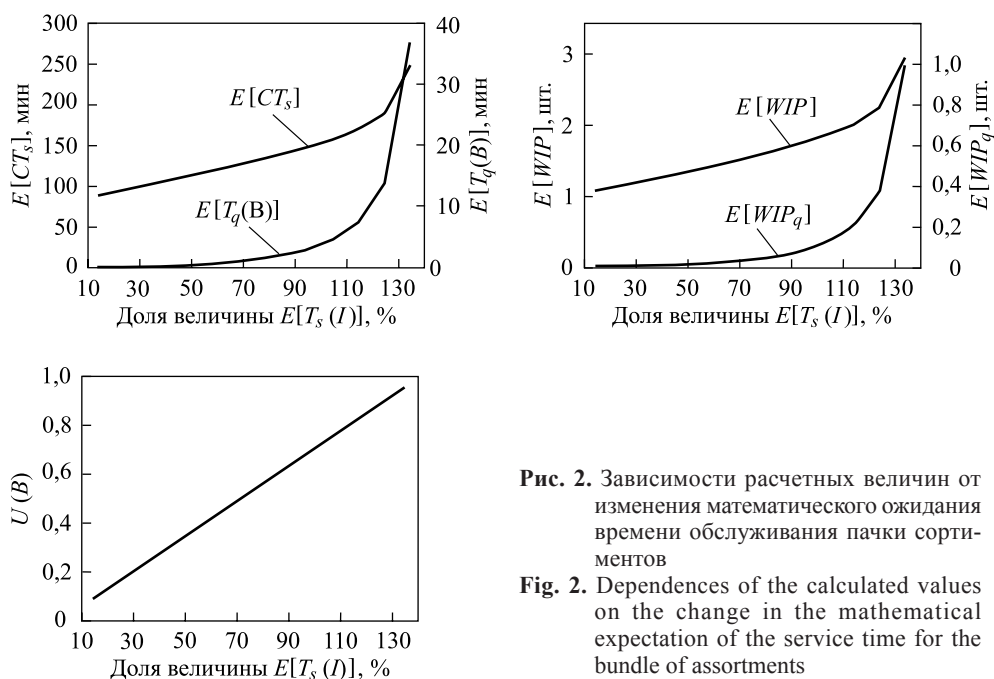


Рис. 2. Зависимости расчетных величин от изменения математического ожидания времени обслуживания пачки сортиментов

Fig. 2. Dependences of the calculated values on the change in the mathematical expectation of the service time for the bundle of assortments

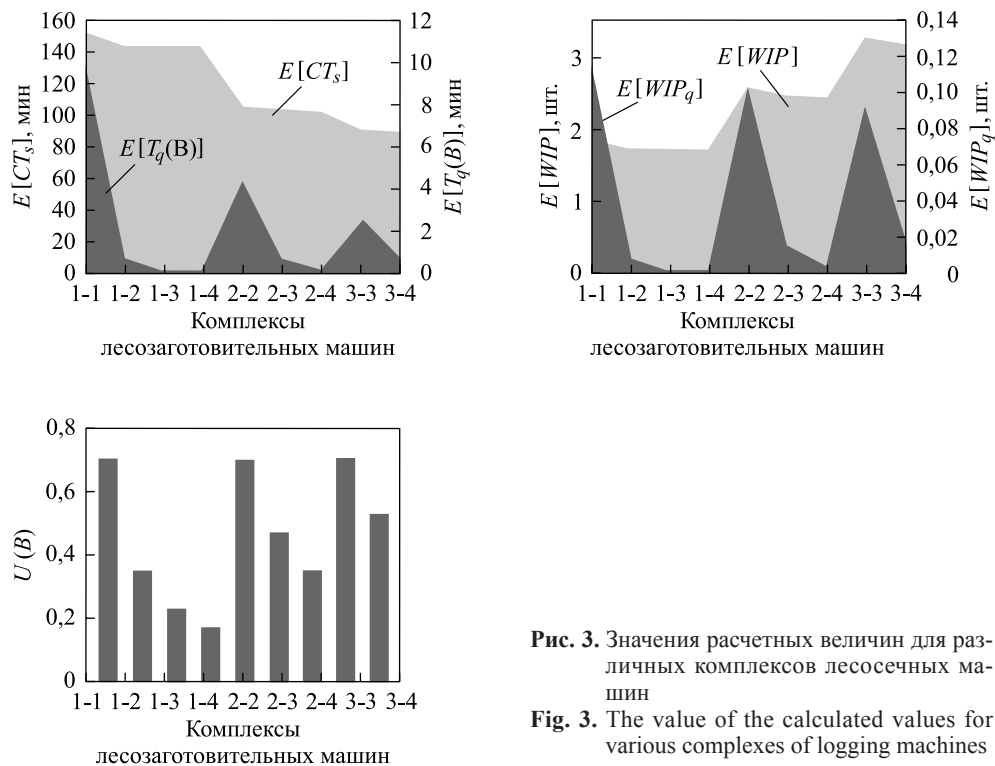


Рис. 3. Значения расчетных величин для различных комплексов лесосечных машин

Fig. 3. The value of the calculated values for various complexes of logging machines

Проследим, как будут изменяться расчетные величины в зависимости от изменения числа работающих лесосечных машин (рис. 3). Для пояснения отметим, что запись на осях абсцисс «1–2» означает, что комплекс включает один харвестер и два форвардера, запись «2–2» — два харвестера и два форвардера и т. д.

### Выводы

Увеличение числа форвардеров, работающих в комплексе с одним харвестером, приводит к снижению средней длины цикла  $E[CT_s]$  и среднего времени пребывания заявки (пачки сортиментов) в очереди  $E[T_q(B)]$ . Однако в этом случае значи-



тельно снижается и коэффициент загрузки  $u(B)$ . На практике это приведет к простоям форвардеров. Для принятия решения в таком случае необходимо проводить дополнительные экономические расчеты.

Кратное увеличение интенсивности входного потока, что соответствует параллельной работе нескольких харвестеров, также приводит к снижению расчетных величин. Однако в этом случае наблюдаются более высокие значения коэффициента загрузки. Из графиков, приведенных на рис. 3, видно, что использование комплексов 2–2 и 3–3 приводит к снижению расчетных величин  $E[CT_s]$ ,  $E[T_q(B)]$  в сравнении с комплексом 1–1, причем коэффициент загрузки остается неизменным. На основании этого можно говорить об их более эффективной работе. Такое повышение эффективности объясняется тем, что при работе в одном комплексе происходит компенсация неравномерности работы отдельных лесозаготовительных машин.

Если учитывать небольшие размеры лесосеки (эксплуатационная площадь 19,5 га; среднее расстояние транспортировки форвардером 200 м), на которой проводились эксперименты, то наиболее оптимальным комплексом, по мнению авторов, мог бы быть комплекс в составе двух форвардеров и двух харвестеров. Это обусловлено тем, что применение большого числа лесосечных машин на данной лесосеке затруднительно ввиду сложности организации одновременной их работы и соблюдения техники безопасности.

При увеличении числа машин в комплексе увеличивается объем сортиментов, одновременно находящихся на лесосеке (вдоль волоков), что также необходимо принимать в расчет. Например, при работе одного харвестера и одного форвардера величина  $E[WIP]$  составляет 1,84 шт., что равноценно 18,4 м<sup>3</sup> сортиментов. При увеличении числа машин в комплексе до трех харвестеров и че-

тырех форвардеров значение  $E[WIP]$  повышается практически в два раза и уже составляет 3,19 шт., т. е. 31,9 м<sup>3</sup> сортиментов находится вдоль волоков на лесосеке.

Отметим также, что комплексы 2–1, 3–2 и 3–3 не рекомендуется использовать, так как в этом случае коэффициент загрузки превышает единицу.

Таким образом, на основании разработанной модели оптимальным комплексом машин для сортиментной заготовки леса в рассмотренных условиях является комплекс, включающий два харвестера и два форвардера.

## Список литературы

- [1] Воронин А.В., Кузнецов В.А., Шегельман И.Р., Щеголева Л.В. Теория и практика принятия оптимальных решений для предприятий лесопромышленного комплекса. Петрозаводск: ПетрГУ, 2008. 220 с.
- [2] Шегельман И.Р. Вывозка леса автопоездами. Спб.: ПРОФИКС, 2008. 3004 с.
- [3] Андреев В.Н., Герасимов Ю.Ю. Повышение качества и надежности манипуляторного технологического оборудования лесных машин при проектировании. Ч. 1. Петрозаводск: ПетрГУ, 1995. 119 с.
- [4] Кокс Д., Смит У. Теория очередей. М.: Мир, 1966. 336 с.
- [5] Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М.: Советское радио, 1970. 520 с.
- [6] Прахбу Н. Методы теории массового обслуживания и управления запасами. М.: Машиностроение, 1969. 356 с.
- [7] Морозов Е.В., Шегельман И.Р., Будник П.В. Вероятностно-статистический анализ процесса заготовки сортиментов // Перспективы науки, 2011. № 7 (22). С. 183–186.
- [8] Shegelman I., Budnik P., Morozov E. Optimization of a forest harvesting set based on the Queueing Theory: Case study from Karelia // Lesn. Cas. For. J., 2015, no. 61, pp. 211–220.
- [9] Будник П.В. Обоснование технологических решений, повышающих эффективность заготовки сортиментов и лесосечных отходов, на основе функционально-технологического анализа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. 2011. 22 с.
- [10] Curry G.L., Feldman R.M. Manufacturing systems modeling and Analysis. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.

## Сведения об авторах

**Шегельман Илья Романович** — д-р техн. наук, профессор, руководитель Инжинирингового центра Петрозаводского государственного университета, shegelman@onego.ru

**Будник Павел Владимирович** — канд. техн. наук, руководитель сектора патентования Инжинирингового центра Петрозаводского государственного университета, budnikpavel@yandex.ru

**Паничев Геннадий Павлович** — начальник департамента Союза лесопромышленников и лесозаготовителей России, g.panichev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.05.2017 г.



# OPTIMIZATION OF FOREST MACHINES COMPLEX FOR ASSORTMENT TECHNOLOGY USING QUEUING THEORY

I.R. Shegel'man<sup>1</sup>, P.V. Budnik<sup>1</sup>, G.P. Panichev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Petrozavodsk State University (PetrSU), 33, Lenin Str., Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

<sup>2</sup> Union of Timber Manufacturers and Exporters of Russia, 101990, Moscow, Armenian trans., 9/1/1

shegelman@onego.ru

Modern technological process of logging is a complex system both technically and organizationally. Today the study of such systems to improve their efficiency is impossible without the use of mathematical modeling. The paper presents a method for analyzing the process workpiece assortments based on the use of the queueing theory. An adapted queueing model is showed in the article. The model characterizes the process of harvesting logs using complex machines as a part of a harvester and a forwarder. The process is considered as the G/G/c queueing system with batch arrival, where the application performs a pack assortments consisting of N number of assortments. The results of experimental verification of the model are given. The results confirm the model. The experiment was conducted in the cutting area, located in the Republic of Karelia Pryazha region. There was conducted the analysis of the effectiveness of this complex and recommendations for optimization. So in the studied cutting area it is not possible to significantly improve the efficiency of the complex by adjusting the operation (short-time operations and uniformity) of particular machines. At the same time change in the number of machines can achieve a significant change in performance. The optimal conditions for the complex machines cutting area where the experiments were conducted, is a complex of two harvesters and two forwarders.

**Keywords:** queueing theory, logging, complex harvesting machines, modeling

**Suggested citation:** Shegel'man I.R., Budnik P.V., Panichev G.P. *Optimizatsiya kompleksa lesozagotovitel'nykh mashin dlya sortimentnoy tekhnologii s primeneniem teorii ocheredey* [Optimization of complex forest machines for assortment technology using queueing theory]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 5–11. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-5-11

## References

- [1] Voronin A.V., Kuznetsov V.A., Shegel'man I.R., Shchegoleva L.V. *Teoriya i praktika prinyatiya optimal'nykh resheniy dlya predpriyatiy lesopromyshlennogo kompleksa* [Theory and practice of optimal solutions for the timber industry enterprises]. Petrozavodsk: PetrGU Publ., 2008, 220 p.
- [2] Shegel'man I.R., Skrypnik V.I., Kuznets A.V., Pladov A.V. *Vyvozka lesa avtopoezdami* [Extraction of forest trains]. St. Petersburg: PROFIKS Publ., 2008. 304 p.
- [3] Andreev V.N., Gerasimov Yu.Yu. *Povyshenie kachestva i nadezhnosti manipulyatornogo tekhnologicheskogo oborudovaniya lesnykh mashin pri proektirovani* [Improving the quality and reliability of the manipulator of the process equipment in the design of forest machines]. Petrozavodsk: PetrGU Publ., 1995, 119 p.
- [4] Koks D., Smit U. *Teoriya ocheredey* [Queueing theory]. Moscow: Mir Publ., 1966, 336 p.
- [5] Saati T.L. *Elementy teorii massovogo obsluzhivaniya i ee prilozheniya* [Elements of queueing theory and its applications]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1970, 520 p.
- [6] Prakhbu N. *Metody teorii massovogo obsluzhivaniya i upravleniya zapasami* [The methods of queueing theory and inventory control]. Moscow: Mashinostroenie, Publ. 1969, 356 p.
- [7] Morozov E.V., Shegel'man I.R., Budnik P.V. *Veroyatnostno-statisticheskiy analiz protsessa zagotovki sortimentov* [Probabilistic and statistical analysis of the procurement process assortments] *Perspektivy nauki* [Prospects of Science], 2011, no. 7(22), pp. 183–186.
- [8] Shegelman I., Budnik P., Morozov E. Optimization of a forest harvesting set based on the Queueing Theory. Case study from Karelia. *Lesn. Cas. For. J.*, 2015, v. 61, pp. 211–220.
- [9] Budnik P.V. *Obosnovanie tekhnologicheskikh resheniy, povyshayushchikh effektivnost' zagotovki sortimentov i lesosechnykh otkhodov, na osnove funktsional'no-tekhnologicheskogo analiza* [Justification of technological solutions to improve the efficiency of assortments and harvesting forest residues, based on the functional and technological analysis. Diss. kand. tehn. nauk]. Petrozavodsk, 2011, 22 p.
- [10] Curry Guy L., Feldman Richard M. *Manufacturing systems modeling and Analysis*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

## Author's information

**Shegel'man Il'ya Romanovich** — Dr. Sci. (Tech.), Prof., Petrozavodsk State University (PetrSU), shegelman@onego.ru

**Budnik Pavel Vladimirovich** — Cand. Sci. (Tech.), Petrozavodsk State University (PetrSU), budnikpavel@yandex.ru

**Panichev Gennadiy Pavlovich** — Head of Department of Union of Timber Manufacturers and Exporters of Russia, g.panichev@mail.ru

Received 11.05.2017

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ СИНХРОНИЗАЦИИ МАШИН В СИСТЕМЕ ДЛЯ ЗАГОТОВКИ СОРТИМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ЛИСТВЕННОГО ХОЗЯЙСТВА ПРИ РАБОТЕ С СОРТИРОВКОЙ

М.А. Тетерина

Уральский государственный лесотехнический университет, 620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, д. 37

tetatet-marya@mail.ru

Представлены результаты эксперимента по оценке факторов синхронизации машин в системе «харвестер — форвардер» при заготовке лиственных сортиментов. Эксперимент проведен в марте 2014 г. на базе арендуемых лесных участков и парка машин (харвестер John Deer 1470D и форвардер Komatsu 830.3) ООО «Лестех». Эксперимент выполнен на основе центрального ротатбельного композиционного плана. В ходе эксперимента зафиксированы простои харвестера. Средний процент простоев харвестера составил 76,21. По результатам дисперсионного анализа установлено, что в условиях лиственного древостоя такие факторы синхронизации машин, как рейсовая нагрузка транспортной машины и расстояние трелевки, являются статистически значимыми: уровень значимости при оценке по критерию Фишера не превышает 0,27 %. Изложенное подтверждено также результатами оценки эффектов факторов эксперимента на основе *t*-критерия и оценки параметров модели регрессии для стандартизованных и исходных значений уровней факторов. Соответствующие данным результатам значения коэффициента детерминации и скорректированного коэффициента детерминации составили соответственно  $R^2 = 0,9956$  и  $R^2_{кор} = 0,99011$ , что свидетельствует о высокой дисперсии, обусловленной выбранной экспериментальной моделью. Представлена полученная на основании данных результатов зависимость отклика эксперимента (доля простоев машин в системе) от упомянутых факторов, которая проиллюстрирована трехмерным и контурным графиками. Степень соответствия полученной зависимости экспериментальным данным продемонстрирована на диаграмме рассеяния наблюдаемых и предсказанных значений отклика. Достоверность результатов дисперсионного анализа подтверждена нормальным вероятностным графиком остатков. Даны рекомендации по снижению простоев харвестера в рассматриваемых условиях.

**Ключевые слова:** синхронизация, эксперимент, рейсовая нагрузка, расстояние трелевки, лиственное хозяйство, дисперсионный анализ, регрессионное уравнение

**Ссылка для цитирования:** Тетерина М.А. Экспериментальное исследование факторов синхронизации машин в системе для заготовки сортиментов в условиях лиственного хозяйства при работе с сортировкой // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 12–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-12-16

Синхронизация машин в системах заготовки сортиментов [1] обеспечивается соответствующими значениями интенсивности операций технологического процесса [2, 3], которые определяются природно-производственными условиями, в том числе таксационными характеристиками древостоя, такими, например, как породный состав. Экспериментальные исследования, проведенные в условиях хвойных древостоев [4, 5], свидетельствуют о значительных простоях харвестеров и возможности их снижения за счет управления рейсовыми нагрузками форвардеров и расстояниями трелевки [6, 7]. Для оценки процента простоев и исследования факторов синхронизации машин при заготовке лиственных сортиментов при наличии операции сортировки по породам выполнен соответствующий эксперимент.

### Цель и методика исследований

Эксперимент проведен с участием магистранта Д.О. Погудина в марте 2014 г. на территории Зенковского участкового лесничества ГКУ СО «Алапаевское лесничество» на базе арендуемых лесных участков (квартал 264, выдел 2, площадь 7 га)

и парка машин (харвестер John Deer 1470D и форвардер Komatsu 830.3) ООО «Лестех» в следующих природно-производственных условиях: способ рубки — санитарная, вид рубки — главное пользование, способ трелевки — в сортиментах, хозяйство мягколиственное, состав древостоя ББЗЕ1К+С, высота 20 м, диаметр 20 см. Технологическая схема разработки лесосеки представлена на рис. 1.

### Результаты исследований

Результаты эксперимента, выполненного на основе центрального ротатбельного композиционного плана [8], представлены в табл. 1. В ходе эксперимента установлено, что в условиях лиственного хозяйства при работе с подсортировкой простаивает харвестер.

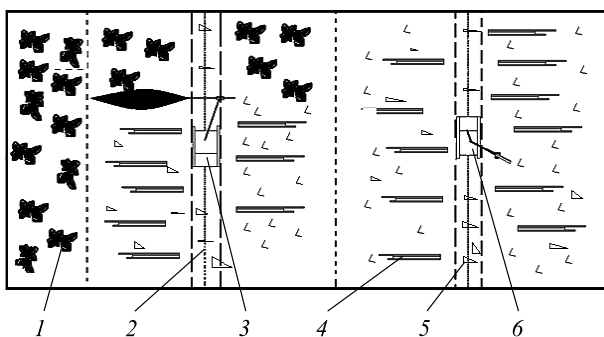
Для анализа зависимости между откликом (процент простоев машин,  $P$ ) и факторами (расстояние трелевки  $L$ , м и рейсовая нагрузка форвардера  $Q$ , шт.) эксперимента использована модель второго порядка с оценкой главных эффектов и эффектов взаимодействия. Результаты дисперсионного анализа [8] экспериментальных

Таблица 1

**Результаты эксперимента по оценке факторов синхронизации лесозаготовительных машин**  
The results of an experiment assessing the factors of the synchronization of harvesters

Рейсовая нагрузка форвардера $Q$ , шт.	Расстояние трелевки $L$ , м	Процент простоев машин, $P$
75	724	0,736
75	774	0,760
90	724	0,812
90	774	0,744
72	749	0,785
94	749	0,845
83	714	0,729
83	784	0,700
83	749	0,760
83	749	0,750

данных (табл. 2) подтверждают адекватность выбранной экспериментальной модели и свидетельствуют о том, что все исследуемые эффекты являются статистически значимыми: уровень значимости при оценке по критерию Фишера не превышает 0,27 %.



**Рис. 1.** Схема разработки лесосеки: 1 — растущий лес; 2 — волок; 3 — харвестер; 4 — сортименты; 5 — порубочные остатки; 6 — форвардер  
**Fig. 1.** Scheme for the yarding of the cutting area: 1 — growing forest; 2 — fiber; 3 — harvester; 4 — assortments; 5 — felling remains; 6 — forwarder

Достоверность результатов дисперсионного анализа подтверждается нормальным вероятностным графиком остатков (рис. 2). Из графика видно, что наблюдаемые и ожидаемые нормальные значения остатков после их упорядочивания по возрастанию укладываются на прямую, следовательно, соблюдается предположение нормальности распределения остатков, на котором основаны оценки параметров дисперсионного анализа.

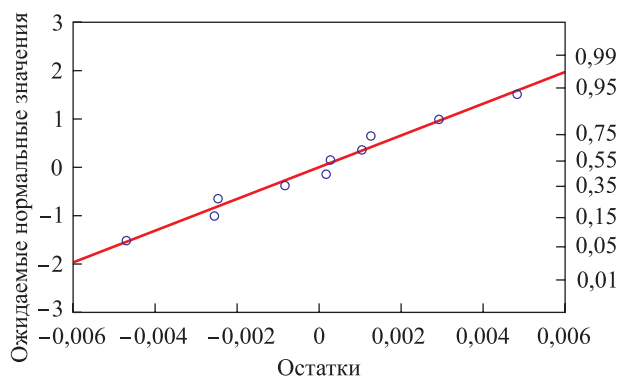
Результаты оценки эффектов факторов эксперимента на основе  $t$ -критерия и соответствующие

Таблица 2

**Дисперсионный анализ данных эксперимента**

Results of variance analysis of experimental data

Исследуемый эффект	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средние квадраты отклонений	Критерий Фишера $F$	Уровень значимости $\alpha$
Линейный эффект рейсовой нагрузки $Q$	0,002062	1	0,002062	117,2485	0,000413
Квадратичный эффект рейсовой нагрузки $Q^2$	0,004201	1	0,004201	238,8947	0,000102
Линейный эффект расстояния $L$	0,000769	1	0,000769	43,7324	0,002711
Квадратичный эффект расстояния $L^2$	0,001747	1	0,001747	99,3790	0,000569
Эффект взаимодействия расстояния и рейсовой нагрузки $Q-L$	0,002128	1	0,002128	121,0141	0,000388
Ошибка	0,000070	4	0,000018	—	—
Сумма квадратов отклонений	0,016002	9	—	—	—



**Рис. 2.** Нормальный вероятностный график остатков  
**Fig. 2.** The normal probability chart of the residues

результаты оценки параметров модели регрессии [8] для стандартизированных значений уровней факторов (табл. 3) подтверждают их высокую значимость. Соответствующие данным результатам значения коэффициента детерминации  $R^2 = 0,9956$  и скорректированного коэффициента детерминации  $R^2_{кор} = 0,99011$  свидетельствуют о высокой дисперсии, обусловленной выбранной экспериментальной моделью.

В соответствии с результатами оценки параметров модели регрессии для исходных значений

Т а б л и ц а 3

**Оценка эффектов факторов эксперимента и параметров модели регрессии  
для стандартизированных значений уровней факторов**  
The results of the evaluation of the effects of experimental factors and the parameters of the regression model  
for standardized values of factor levels

Параметр	Эффект	Стандартная ошибка оценки	t-критерий (число степе- ней свободы $df=4$ )	Уровень значи- мости $\alpha$	Стандартизиро- ванный коэффи- циент регрессион- ного уравнения	Стандартная ошибка оценки
Свободный член	0,753539	0,002959	254,6185	0,000000	0,753539	0,002959
$Q$	0,031590	0,002917	10,8281	0,000413	0,015795	0,001459
$Q^2$	0,056995	0,003688	15,4562	0,000102	0,028498	0,001844
$L$	-0,019729	0,002983	-6,6130	0,002711	-0,009864	0,001492
$L^2$	-0,039978	0,004010	-9,9689	0,000569	-0,019989	0,002005
$QL$	-0,046079	0,004189	-11,0006	0,000388	-0,023039	0,002094

Т а б л и ц а 4

**Оценка параметров модели регрессии для исходных значений уровней факторов**  
The results of estimating the parameters of the regression model for the initial values of the factor levels

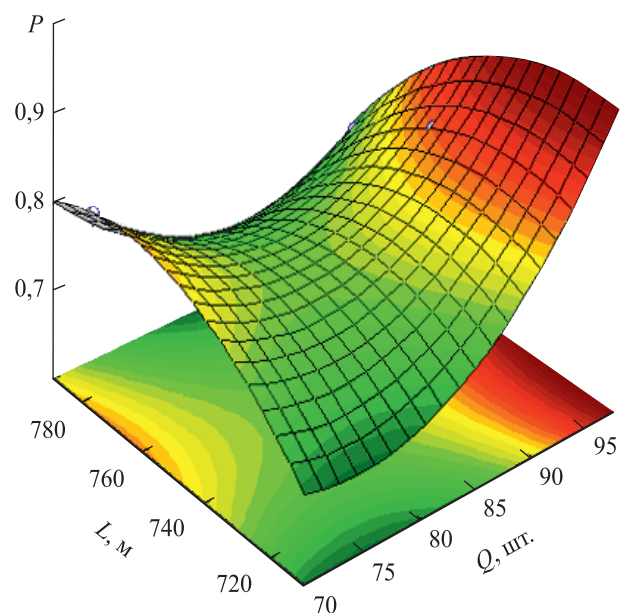
Параметр	Коэффициент регрессионного уравнения	Стандартная ошибка оценки	t-критерий (число степе- ней свободы $df=4$ )	Уровень значимости $\alpha$	Нижняя грани- ца доверитель- ного интервала ( $\alpha = 0,95\%$ )	Верхняя грани- ца доверитель- ного интервала ( $\alpha = 0,95\%$ )
Свободный член	-21,2115	2,028571	-10,4564	0,000473	-26,8438	-15,5793
$Q$	0,0105	0,009972	1,0577	0,349833	-0,0171	0,0382
$Q^2$	0,0005	0,000033	15,4562	0,000102	0,0004	0,0006
$L$	0,0577	0,004894	11,7794	0,000297	0,0441	0,0712
$L^2$	-0,00003	0,000003	-9,9689	0,000569	-0,0000	-0,0000
$QL$	-0,00012	0,000011	-11,0006	0,000388	-0,0002	-0,0001

уровней факторов (табл. 4) зависимость отклика эксперимента от факторов в рассматриваемых условиях описывается следующим выражением

$$P(Q, L) = -21,212 + 0,011Q + 0,0005Q^2 + 0,058L - 0,00003L^2 - 0,00012QL. \quad (1)$$

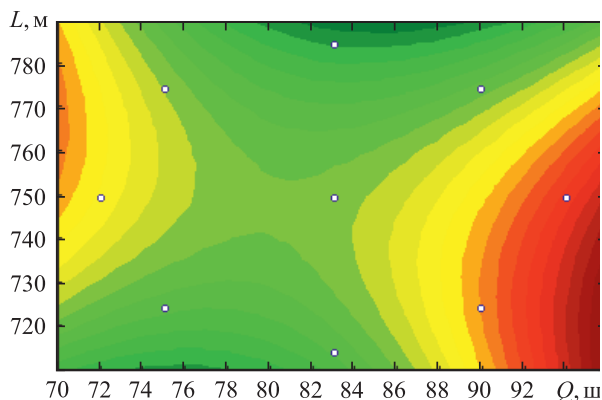
Коэффициенты представленной модели регрессии высоко значимы, за исключением коэффициента линейной зависимости между процентом простоев системы и рейсовой нагрузкой, который значим на уровне 0,3498. Изложенное соответствует сущности исследуемого процесса и согласуется с используемой для теоретических исследований моделью массового обслуживания [9, 10], в которой вероятность простоев системы описывается нелинейной зависимостью от рейсовой нагрузки.

Полученная экспериментальная зависимость (1) проиллюстрирована трехмерным и контурным графиками поверхности отклика (рис. 3, 4). Достаточно высокая степень соответствия зависимости (1) экспериментальным данным продемон-



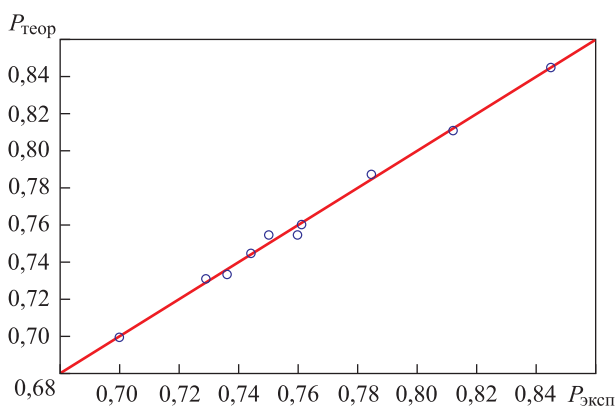
**Рис. 3.** График поверхности отклика эксперимента  
**Fig. 3.** Graph of the response surface of the experiment





**Рис. 4.** Контурный график поверхности отклика эксперимента

**Fig. 4.** Contour plot of the response surface of the experiment



**Рис. 5.** Диаграмма рассеивания ожидаемых (предсказанных)  $P_{теор}$  и экспериментальных  $P_{эксп}$  значений вероятности простоев системы

**Fig. 5.** Diagram of dispersion of expected (predicted) and the experimental values of the probability of downtime of the system

стрирована на диаграмме рассеивания [8] наблюдаемых и предсказанных значений вероятности простоев (рис. 5), точки которой располагаются близко к прямой линии.

### Выводы и рекомендации

1. В качестве факторов синхронизации машин при заготовке листовых сортиментов при работе с сортировкой могут рассматриваться рейсовая нагрузка транспортной машины и расстояние трелевки — указанные факторы по результатам дисперсионного анализа определены как статистически значимые.

### Сведения об авторах

**Тетерина Мария Александровна** — канд. техн. наук, доцент Уральского государственного лесотехнического университета, tetatet-marya@mail.ru

2. В ходе эксперимента по оценке синхронизации машин для заготовки сортиментов в условиях листового хозяйства при работе с сортировкой зафиксированы простои харвестера, средняя величина простоев 76,21 %.

3. Для снижения простоев харвестера в рассматриваемых условиях могут быть рекомендованы следующие мероприятия:

- изменение схемы разработки лесосеки с целью снижения среднего расстояния трелевки;
- изменение способа работы харвестера, например, использование технологии с сохранением подроста;
- использование форвардера с большей грузоподъемностью.

### Список литературы

- [1] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Синхронизация обрабатывающе-транспортных систем заготовки и первичной обработки древесины. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. 201 с.
- [2] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Управление схемами работы машин в обрабатывающе-транспортных лесозаготовительных системах // Вестник МГУЛ — Лесной Вестник, 2010. № 6. С. 78–82.
- [3] Тетерина М.А. Экологически щадящие, ресурсосберегающие транспортно-обрабатывающие системы: управление схемами работы машин // Фундаментальные исследования, 2011. № 8. Ч. 1. С. 178–184.
- [4] Якимович С.Б., Тетерина М.А., Груздев В.В. Опыт-но-промышленная оценка эффективности нового способа заготовки сортиментов // Вестник МГУЛ — Лесной Вестник, 2013. № 1 (92). С. 192–196.
- [5] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Экспериментальная оценка синхронизации обрабатывающе-транспортной системы «харвестер–форвардер» // Вестник МГУЛ — Лесной Вестник, 2008. № 4. С. 48–51.
- [6] Тетерина М.А. Постановка и решение задачи оптимизации параметров обрабатывающе-транспортной системы «харвестер–форвардер» // Известия СПбГЛТА, 2008. Вып. 183. С. 100–107.
- [7] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Оптимизация рейсовой нагрузки форвардера // Известия СПбГЛТА, 2007. Вып. 180. С. 126–132.
- [8] Боровиков В.П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. СПб.: Питер, 2001. 656 с.
- [9] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Моделирование стохастических обрабатывающе-транспортных систем с переменными запасами // Вестник МГУЛ — Лесной Вестник, 2007. № 6. С. 71–77.
- [10] Якимович С.Б., Тетерина М.А. Рейсовая нагрузка лесозаготовительных машин // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2006. № 6. С. 95–97.

Статья поступила в редакцию 19.04.2017 г.

# EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MACHINES SYNCHRONIZATION FACTORS IN THE SYSTEM FOR LOGGING IN DECIDUOUS SPECIES FACILITIES SITUATIONS WHEN WORKING WITH SORTING

**M.A. Teterina**

Ural State Forest Engineering University, Sibirsky tract, 37, Ekaterinburg, Russia, 620100

tetatet-marya@mail.ru

The article presents the results of experiment to estimate machines synchronization factors in the «harvester — forwarder» system within deciduous logging. The experiment was carried out in March 2014 on a basis of rented forest areas and machines park (harvester John Deer 1470D и forwarder Komatsu 830.3) of LLC «Lestech». The experiment was performed on the basis of central rotatable composite plan. During the experiment there were recorded harvester downtimes. The average percentage of harvester downtime amounted to 76,21 %. According to the results of a variance analysis it is estimated that such machines synchronization factors as transport machine regular load and skidding distance are statistically significant: the level of significance when evaluating the Fisher test is limited to 0,27 %. It was also confirmed by the results of the evaluation of effects of factors of the experiment on a basis of t-criterion and by the results of the evaluation regression model parameters for standardized and original values of the factor levels. Corresponding to this results values of coefficient of determination and adjust coefficient of determination had amounted accordingly  $R^2 = 0,9956$  и  $R^2_{cor} = 0,99011$ , that indicates a high rate of variance explained on the basis of selected experimental model. The article presents the obtained on the basis of these results dependence of response of the experiment (the share of machine idle time in system) from the factors, which illustrated three-dimensional and contour plots. The degree of conformity obtained according to the experimental data is demonstrated on the scatter plot of the observed and predicted values of the response. The reliability of the results of analysis of variance confirmed a normal probability graph of the residues. Recommendations to reduce downtime of the harvester under these conditions are given.

**Keywords:** synchronization, experiment, regular load, skidding distance, deciduous facilities, variance analysis, regression equation

**Suggested citation:** Teterina M.A. *Ekspperimental'noe issledovanie faktorov sinkhronizatsii mashin v sisteme dlya zagotovki sortimentov v usloviyakh listvennogo khozyaystva pri rabote s sortirovkoj* [Experimental investigation of machines synchronization factors in the system for logging under deciduous facilities situations when working with sorting]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 12–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-12-16

## References

- [1] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Sinkhronizatsiya obrabatyvayushche-transportnykh sistem zagotovki i pervichnoy obrabotki drevesyiny* [Processing-transporting systems of harvesting and primary wood processing synchronization] Yoshkar-Ola, 2011, 201 p.
- [2] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Upravlenie skhemami raboty mashin v obrabatyvayushche-transportnykh lesozagotovitel'nykh sistemakh* [Machines working schemes control in transporting-processing forest harvesting systems] Moscow state forest university bulletin – *Lesnoy vestnik*, 2010, no. 6, pp. 78–82.
- [3] Teterina M.A. *Ekologicheski shchadyashchie, resursosberegayushchie transportno-obrabatyvayushchie sistemy: upravlenie skhemami raboty mashin* [Ecologically sparing, recourse saving transporting-processing systems: machines working schemes control] Fundamental'nye issledovaniya [Fundamental research] Penza: RAE, 2011, no. 8, t. 1, pp. 178–184.
- [4] Yakimovich S.B., Teterina M.A., Gruzdev V.V. *Opytno-promyshlennaya otsenka effektivnosti novogo sposoba zagotovki sortimentov* [Experimental-industrial estimation of new round timber logging method efficiency] Moscow state forest university bulletin – *Lesnoy vestnik*, 2013, no. 1(92), pp. 192–196.
- [5] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Ekspperimental'naya otsenka sinkhronizatsii obrabatyvayushche-transportnoy sistemy «kharvester–forwarder»* [Experimental estimation of processing-transporting system «harvester–forwarder» synchronization] Moscow state forest university bulletin – *Lesnoy vestnik*, 2008, no. 4, pp. 48–51.
- [6] Teterina M.A. *Postanovka i reshenie zadachi optimizatsii parametrov obraba-tyvayushche-transportnoy sistemy «kharvester–forwarder»* [Setting and decision of processing-transporting system «harvester–forwarder» parameters optimization proposition] *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii. Stat'i molodykh uchenykh, podgotovlennye na osnove dokladov* [Proceedings of the St. Petersburg forestry Academy. Articles of young scientists, prepared on the basis of reports], 2008, v. 183, no. 14, pp. 100–107.
- [7] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Optimizatsiya reysovoy nagruzki forwardera* [Forwarder scheduled loading optimization] *Izvestiya SPbGLTA* [Proceedings of St. Petersburg state forestry engineering Academy], 2007, iss. 180, pp. 126–132.
- [8] Borovikov V.P. *Statistika: iskusstvo analiza dannykh na komp'yutere* [Statistica: the art of data analysis on the computer. For experts] SPb.: Piter, 2001, 656 p.
- [9] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Modelirovanie stokhasticheskikh obrabatyvayushche-transportnykh sistem s peremeshchaemyimi zapasami* [Modelling of stochastic processing-transporting systems with transporting stock] Moscow state forest university bulletin – *Lesnoy vestnik*, 2007, no. 6, pp. 71–77.
- [10] Yakimovich S.B., Teterina M.A. *Reysovaya nagruzka lesozagotovitel'nykh mashin* [Regular load of logging machines] Moscow state forest university bulletin — *Lesnoy vestnik*, 2006, no. 6, pp. 95–97.

## Author's information

**Teterina Mariya Aleksandrovna** — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof., Ural State Forest Engineering University, tetatet-marya@mail.ru

Received 19.04.2017



## МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕПОЧКИ ЗАГОТОВКИ ДЕЛОВОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ДРЕВЕСИНЫ

А.П. Мохирев, А.А. Керющенко

Сибирский государственный университет, Лесосибирский филиал, 662543, Красноярский край, г. Лесосибирск, ул. Победы, д. 29

ale-mokhirev@yandex.ru

Россия — крупнейшая лесопромышленная держава. В России успешно заготавливают и из нее экспортируют деловую древесину и пиломатериалы. Однако древесное сырье — это не только деловая древесина, но и отходы лесозаготовок, которые в настоящее время либо утилизируются производителями, либо остаются гнить на лесосеке. На сегодняшний день проблема комплексного использования древесины является наиболее актуальной в лесной отрасли. Вторичные древесные ресурсы могут использоваться в качестве сырья для производства технологической или топливной щепы, брикетов, пеллет, удобрений, масел, экстрактов и другой товарной продукции технологического или энергетического назначения. Существуют несколько способов заготовки и переработки деловой и энергетической древесины в зависимости от технологической цепочки, объемов заготавливаемой древесины, участка заготовки и удаленности предприятия от лесосеки. Чтобы сформировать наиболее эффективную технологическую цепочку для заготовки деловой и энергетической древесины, разработана методика формирования заготовки древесины исходя из состава товарной продукции, ее объема, вида и развитости транспортной инфраструктуры конкретного предприятия. Благодаря этой методике можно наладить экономически и технологически эффективное производство на отдельном предприятии даже при малом объеме заготавливаемой лесной продукции. Грамотно сформированная технологическая цепочка заготовки деловой и энергетической древесины позволяет оптимально распределить имеющиеся производственные мощности, повысить объем заготавливаемой лесной продукции и осуществить рациональное природопользование в рамках лесозаготовительного предприятия.

**Ключевые слова:** технология лесозаготовок, технологическая цепочка лесозаготовок, биоэнергетика, методика формирования, деловая древесина, энергетическая древесина

**Ссылка для цитирования:** Мохирев А.П., Керющенко А.А. Методика формирования технологической цепочки заготовки деловой и энергетической древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 17–22. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-17-22

Россия является крупнейшей лесопромышленной страной мира со сложившимся мощным лесохимическим комплексом, который включает в себя заготовку, механическую обработку и химическую переработку древесины. Эксплуатация лесного фонда представляет собой большой комплекс работ в области лесного хозяйства, тесно взаимодействующего с другими отраслями; она является завершающей фазой лесопользования. Главная задача лесной промышленности — получение максимальной прибыли с одного кубометра заготовленной древесины.

Для лесной промышленности характерны:

1) заготовка древесины на небольшой площади лесного фонда;

2) разделение производства (лесозаготовительное производство, лесопильные предприятия, целлюлозно-бумажные и фанерные комбинаты).

Каждое предприятие лесной промышленности имеет свои особенности сырьевой базы, структуры и организации производства, технологии, влияющие на направление и пути повышения эффективности производства, его экономические показатели и методы достижения этой эффективности.

Эффективность производства зависит от техники, технологии и организации процесса лесозаготовительных работ. Неправильно построенный

процесс, недостаточно обоснованные способы компоновки и размещения оборудования приводят к отрицательным последствиям, а это, в свою очередь, приводит к увеличению себестоимости продукции.

Древесная биомасса может использоваться в виде деловой или энергетической древесины. Твердое древесное топливо потребляется в виде колотых дров, топливной щепы, брикетов и топливных гранул. В европейских странах наиболее перспективным видом древесного биотоплива для котельных и мини-ТЭС, которые располагаются недалеко от источников древесного сырья, является топливная щепа. Стоимость энергии, получаемой при потреблении щепы, значительно ниже, чем при потреблении брикетов и гранул [1–4].

Наиболее перспективным направлением использования низкосортного сырья и древесных отходов является производство технологической щепы для целлюлозно-бумажной промышленности, а также производство древесноволокнистых и древесно-стружечных плит [5, 6].

В последнее время лесозаготовители стали задумываться о более эффективном, рациональном и безотходном производстве. В связи с этим стало развиваться использование древесных отходов и топливной древесины в энергетических целях [7].

Выделяют следующие виды энергетической древесины:

1) отходы древесины, которые образуются на разных уровнях деревообработки — на лесосеках, лесоперерабатывающих, мебельных и других предприятиях;

2) отходы древесины, бывшей в употреблении (любые отходы древесины, которые выбрасываются на свалку или иным способом выводятся из эксплуатации);

3) быстрорастущая энергетическая древесина (определенные породы ивы и тополя).

В последние годы в данной сфере особое внимание уделяется анализу и формированию рынка поставщиков и потребителей энергетической биомассы, древесной щепы, пеллетов и брикетов [8].

В рамках научных и прикладных разработок, связанных с повышением конкурентоспособности энергетической биомассы по сравнению с традиционными видами топлива, важнейшее место занимает снижение затрат на заготовку, транспортировку и хранение энергетической биомассы, повышение ее эксплуатационных характеристик.

Лесосечные отходы — это полноценное биоэнергетическое сырье. Они образуются на первой стадии заготовки леса в лесу, на лесосеке, на этапе очистки деревьев от сучьев.

В зависимости от технологии лесозаготовок лесосечные отходы образуются непосредственно у трелевочного волокна в виде сплошных полос или куч (при сортиментной технологии с использованием харвестера) либо на верхнем складе (если трелевка осуществляется деревьями, а обрезка сучьев и раскряжевка происходит на погрузочном пункте).

## Цель и методы работы

Для эффективной заготовки и переработки древесины и древесных отходов очень важно сформировать правильную технологическую цепочку для конкретного предприятия и определенных условий лесозаготовки.

Вопросом формирования технологической цепочки заготовки и транспортировки деловой и энергетической древесины занимались многие исследователи. Л.В. Щеголева [9] предлагает методику формирования технологических цепочек, увязывающих подпроцессы заготовки, поставки и переработки топливной древесины и биомассы отходов лесозаготовок в качестве вторичных ресурсов для предприятий теплоэнергетики. В работе [10] рассмотрены технологические цепочки и системы машин, позволяющие заготавливать древесную биомассу и получать из нее топливную щепу при сплошнолесосечной сортиментной заготовке. И.Р. Шегельманом предложены методики формирования сквозных технологических процессов —

от заготовки сырья до переработки его на готовую продукцию [11, 12].

При освоении новых участков лесного фонда возникает необходимость в формировании технологической цепочки и системы лесозаготовительных машин.

Технологическая цепочка рассматривается как последовательно взаимосвязанные технологические операции, в результате которых производится определенный состав товарной продукции требуемого объема.

Состав технологической цепочки зависит от вида и объема требуемой товарной продукции. В соответствии с местом выполнения основных операций технологический процесс лесозаготовок может быть разделен на три стадии: лесосечные работы, транспортировка и лесоскладские работы. Состав и содержание операций каждой стадии зависит в основном от способа вывозки. Так, при вывозке деревьев на лесосеке выполняют три операции: валку, трелевку и погрузку леса. При вывозке сортиментов на лесосеке выполняют также операции раскряжевки хлыстов, сортировки и штабелевки.

На стадии лесозаготовительного процесса возможно получение различной товарной продукции. Деревья как вид продукции образуются после процесса валки. Они могут поступать на предприятия, где происходит первичная обработка древесины. В советское время, при повышении комплексного использования древесины, реализация древесины деревьями была широко распространена. Реализация в хлыстах предполагает раскряжевку у потребителя. При этом сучья и ветки в большинстве случаев утилизируются как отходы. На сегодняшний день наиболее распространенный вид товарной продукции лесозаготовительных предприятий — деловой сортимент. Видов деловых сортиментов очень много: пиловочник, шпальный кряж, рудничная стойка и т. п. Для местного населения лесозаготовительные предприятия часто реализуют дровяную древесину в виде сортиментов, чураков или поленьев. Также на стадии лесозаготовительного производства можно реализовать обработанную или переработанную древесину. К ней относят пиломатериал, щепу различного назначения, пихтовое масло, удобрения, витаминную муку и т. п. Однако переработка древесины в лесозаготовительном производстве в России, особенно в Сибири, не распространена. При хорошо развитой переработке вторичных древесных ресурсов в регионе появляется возможность реализовывать порубочные остатки древесины (сучья, ветки, откомлевку, вершины и т. п.). Однако в настоящее время данный вид продукции является только потенциальным [13].

По степени переработки древесины и по виду выпускаемой продукции технологические цепочки можно разделить на группы цепочек с получением [14]:

— технологической продукции в виде круглых лесоматериалов (деревья, хлысты, деловые сортименты);

— технологической продукции в виде короткомерных лесоматериалов (чураки, обломки стволов, сучья, ветки, откомлевка, пни);

— технологической продукции в виде сыпучих лесоматериалов (технологическая щепа, хвоя, кора);

— энергетической продукции в виде круглых лесоматериалов (деревья, хлысты, дровяные сортименты);

— энергетической продукции в виде короткомерных лесоматериалов (чураки, обломки стволов, сучья, ветки, откомлевка, пни, брикетированные лесосечные отходы);

— энергетической продукции в виде сыпучих лесоматериалов (топливная щепа, топливные гранулы).

Операции заготовки деловой и энергетической древесины при различных видах продукции могут происходить на разных участках [10].

При осуществлении лесозаготовок в лесу выделяются три участка работы: 1) участок валки леса, 2) участок леса между участком валки и лесной дорогой, 3) лесопогрузочный пункт.

На участке валки леса происходит сама валка, возможны также обрезка сучьев и раскряжевка (в зависимости от выбранной системы машин и технологии лесозаготовок), при использовании мобильной рубительной машины происходит переработка древесины в щепу. На погрузочном пункте размещаются оборудование, производственные и бытовые помещения, штабеля древесины, которые готовят к вывозке. Если установить рубительную машину, здесь возможна переработка лесосечных отходов в щепу, а при канадской технологии — обрезка сучьев и раскряжевка хлыстов. На нижнем складе древесина подвергается первичной обработке. Здесь также возможны обрезка сучьев, раскряжевка и переработка отходов в щепу в зависимости от выбранной технологии лесозаготовок [15].

Выделяют следующие наиболее перспективные технологии переработки лесосечных остатков на щепу:

а) доставка пакетов порубочных остатков к потребителю, при этом непосредственно производство щепы осуществляется у потребителя, применяется рубительная машина;

б) производство щепы из порубочных остатков на лесопогрузочном пункте с помощью передвижной рубительной машины и доставка потребителю готовой щепы;

в) производство щепы на лесном складе с помощью рубительной машины.

Для первой технологии применяется специальная машина для пакетирования порубочных остатков, которая оснащена манипулятором и специальным устройством пакетирования. С помощью манипулятора оператор подбирает порубочные остатки и поднимает их на подающий стол устройства пакетирования, где происходит уплотнение и обвязывание отходов, а также формируются компактные пакеты. Используют также машины с устройством непрерывного пакетирования и с устройством дискретного действия. Недостаток данной технологии — ее высокая стоимость. Преимущество ее в том, что других специальных машин не требуются.

Для производства щепы на лесопогрузочном пункте сначала собирают порубочные остатки на лесосеке и вывозят их на погрузочный пункт к работающей рубительной машине. Деревья доставляют трелевочным трактором на погрузочный пункт, где процессор обрезает сучья и вершины, затем порубочные остатки загружают в рубительную машину и перерабатывают на щепу. Далее щепу перегружают в специальные щеповозы и отвозят потребителю [16].

Для третьей технологии используется стационарная или передвижная рубительная машина, которая находится на лесном складе. При данном варианте существует возможность доставки деревьев на лесной склад, где после обрезки сучьев производится переработка порубочных остатков в щепу. Порубочные остатки могут доставляться на склад и отдельно. Далее их перерабатывают с помощью рубительной машины и отправляют потребителю.

Технология на базе мобильных рубительных машин используется для производства топливной щепы на лесосеке и в пунктах ее примыкания к автодорогам, на верхних и нижних лесных складах. Мобильные рубительные машины могут быть установлены также на складе у потребителя.

Если предприятие производит большой объем топливной щепы, экономически эффективнее будет установить стационарную рубительную машину [17].

Для тех предприятий, где большое расстояние вывозки и применяется скандинавская технология, рекомендуется порубочные остатки перерабатывать прямо на лесосеке. При хлыстовой технологии переработку остатков можно проводить на лесопогрузочном пункте или на лесном складе.

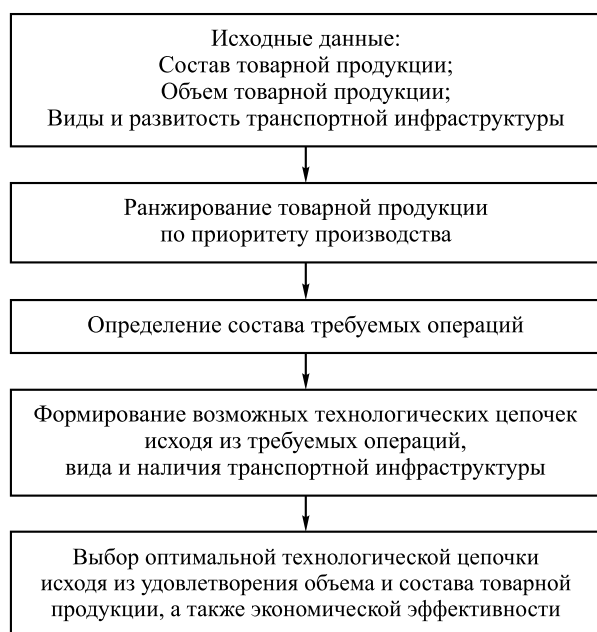
Переработка дровяной древесины и отходов лесозаготовок подразумевает формирование специальных технологических цепочек, которые включают в себя производство деловой древесины и древесины энергетического назначения.

Эти технологические цепочки будут иметь разветвляющийся характер и содержать операции по сбору, доставке, измельчению древесных отходов и топливной древесины с последующим ее использованием в энергетических целях [18].

### Разработанная методика формирования технологической цепочки заготовки деловой и энергетической древесины

Предлагается методика формирования технологической цепочки заготовки деловой и энергетической древесины, представленная на рисунке. Исходные данные — состав и объем портфеля заказов, т. е. той товарной продукции, которую планируется продать. Это факторы, которые влияют на состав требуемых операций и технологическую цепочку. Кроме того, на технологическую цепочку влияют вид и наличие транспортной инфраструктуры. От нее зависит способ транспортировки древесины (автомобильный, водный, железнодорожный).

Первый шаг при формировании технологической цепочки — это ранжирование товарной продукции по приоритету производства. Ранжирование определяет вид продукции, имеющий наибольшую значимость. Затем определяется состав основных операций, требующихся для получения всего состава товарной продукции. Третий шаг заключается в формировании всех возможных



Методика формирования технологической цепочки заготовки и транспортировки древесины  
Technique of forming a technological chain of harvesting and transporting wood

вариантов технологических цепочек исходя из состава операций. При этом возможно добавление вспомогательных операций. Последний шаг — выбор оптимального состава и объема портфеля заказов и экономической эффективности.

В настоящее время порубочные остатки практически не используются, они утилизируются на лесосеках. Но некоторые предприятия уже применяют технологии переработки древесных отходов в своем производстве. Переработка лесосечных отходов помогает оптимизировать производство и получить дополнительную прибыль [19].

### Результаты и обсуждение

Существует несколько путей повышения конкурентоспособности энергетической биомассы [20, 21]:

1. Изучение особенностей энергетической биомассы как вида сырья для заготовки и промышленного использования в качестве альтернативного энергетического сырья.
2. Повышение эксплуатационных характеристик энергетической биомассы, среди которых особое место занимает производство топливной щепы, топливных брикетов, пеллетов и торрефикация древесины.
3. Создание эффективных машин и оборудования для заготовки, транспортировки и использования энергетической биомассы.
4. Анализ и формирование рынка поставщиков и потребителей энергетической биомассы.
5. Формирование рынка производителей машин и оборудования для заготовки, транспортировки и использования энергетической биомассы.
6. Обоснование параметров и режимов работы соответствующих машин и оборудования.
7. Государственное стимулирование промышленного использования энергетической биомассы.

Предложенная методика позволяет оценить рациональность технологических цепочек в рамках региона с точки зрения их бюджетной эффективности.

### Выводы

В последнее время предприятия начинают заботиться не только о заготовке леса, но и об окружающей среде. Поэтому возникает потребность переработки лесосечных отходов. Переработка позволит улучшить экологические показатели лесопромышленного производства и снизить расходы на утилизацию отходов.

Актуальной задачей на сегодняшний день является улучшение использования древесной биомассы, вовлечение в переработку низкокачественной, малоценной древесины, порубочных остатков, отходов лесозаготовок и переработки древесины.



Комплексное использование древесного сырья в нашей стране должно стать главным аспектом развития лесопромышленного производства в условиях устойчивого природопользования и охраны окружающей среды.

Формирование эффективной технологической цепочки лесозаготовительного процесса является важнейшим звеном в развитии политики ресурсосбережения, рационального природопользования, комплексного использования природных ресурсов.

*Исследования проведены при поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности».*

## Список литературы

- [1] Передерий С. Щепка как твердое биотопливо в Европе // ЛесПромИнформ, 2010. № 5. С. 132–135.
- [2] Оценка эффективности производства топливной щепы на лесном терминале / А.А. Селивестров, Ю.Ю. Герасимов, Ю.В. Суханов, В.С. Сюнев, В.К. Катаров // Тракторы и сельхозмашины, 2012. № 8. С. 25–27.
- [3] Harvesting alternatives and cost factors of delimited energy wood / J. Heikkilä, J.V. Tantu, J. Lindblad, M. Sirén, A. Asikainen // Metsanduslikud Laitila, Uurimused — Forestry Studies, 2006, no. 45, pp. 49–56.
- [4] Forest energy procurement — state of the art in Finland and Sweden / J. Routa, A. Asikainen, R. Björheden, J. Laitila, D. Röser // WIREs Energy and Environment, 2013, no. 2 (6), pp. 602–613.
- [5] Карпачев С.П. Биоэнергетика: сбор и пакетирование лесосечных отходов // Лесопромышленник, 2006. № 5. URL: <http://www.lesopromyshlennik.ru/bioenergia/bio.html>
- [6] Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса как фактор устойчивого природопользования // Инженерный вестник Дона, 2015. Т. 36. № 2. С. 81.
- [7] Определение энергоемкости продуктов лесопользования в рамках методики оценки экологической эффективности лесопользования / И.В. Григорьев, Е.Г. Хитров, А.И. Никифорова, О.И. Григорьева, О.А. Куницкая // Вестник Тамбовского университета. Сер.: Естественные и технические науки, 2014. Т. 19. № 5. С. 1499–1502.
- [8] Shegelman I., Budnik P., Morozov E. Optimization of a forest harvesting set based on the Queueing Theory: Case study from Karelia // Lesn. Cas. For. J., 2015, no. 61, pp. 211–220.
- [9] Шеголева Л.В. Методика формирования технологических цепочек, включающих производство щепы энергетического назначения // Resources and Technology, 2010. № 8. С. 169–171.
- [10] Суханов Ю.В., Герасимов Ю.Ю., Селивестров А.А., Соколов А.П. Технологические цепочки и системы машин для сбора и переработки древесной биомассы в топливную щепу при сплошнолесосечной заготовке сортиментов // Системы. Методы. Технологии, 2011. № 12. С. 101–107.
- [11] Шегельман И.Р. Формирование сквозных технологий лесопромышленных производств: научные и практические аспекты // Глобальный научный потенциал, 2013. № 8. С. 119–122.
- [12] Шегельман И.Р., Будник П.В. Классификация сквозных технологий заготовки биомассы дерева // Перспективы науки, 2012. № 4 (31). С. 90–92.
- [13] Куницкая О.А., Григорьев И.В. Переработка низкопарной древесины: проблемы и перспективы // Энергия: экономика, техника, экология, 2015. № 9. С. 70–75.
- [14] Mokhiev A.P., Aksenov N.V. Classification of technological processes of logging // Инженерный вестник Дона, 2016. № 3. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2016/3668>
- [15] Väättäin K. Wood fuel procurement methods and logistics in Finland // Wood fuel production for small scale use. Eberswalde: University Eberswalde, 2007, pp. 28.
- [16] Suhanov Yu.V., Seliverstov A.A., Gerasimov Yu.Yu. Efficiency of Forest Chip Supply Systems in Northwest Russia // Advanced Materials Research, 2013, v. 740, pp. 799–804. URL: [www.scientific.net/AMR.740.799](http://www.scientific.net/AMR.740.799)
- [17] Gerasimov Y., Senko S., Karjalainen T. Nordic forest energy solutions in the Republic of Karelia // Forests, 2013, no. 4, pp. 945–967.
- [18] Heift R. Wykorzystanie odpadów pochodzenia roslirmego do celow energetycznych // Recyklaceodpadu. Ostrava: VSB TU, 2000, pp. 165–173.
- [19] Мохирев А.П. Моделирование процесса работы машины для сортировки и транспортировки порубочных остатков на лесосеке // Системы. Методы. Технологии, 2016. № 1 (29). С. 89–94.
- [20] Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia // Biomass and Bioenergy, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.
- [21] Estimation of Energy Wood Potential in Europe / T. Karjalainen, A. Asikainen, J. Ilavsky, R. Zamboni, K.-E. Hotari, D. Röser // Working Papers of the Finnish Forest Research Institute, 2004. Helsinki: Metla, 43 p.

## Сведения об авторах

**Мохирев Александр Петрович** — канд. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет, Лесосибирский филиал, [ale-mokhiev@yandex.ru](mailto:ale-mokhiev@yandex.ru)

**Керющенко Александра Анатольевна** — магистрант, Сибирский государственный университет, Лесосибирский филиал, [aleksa\\_ice@mail.ru](mailto:aleksa_ice@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 08.10.2017 г.

## METHOD OF FORMING PROCESS CHAIN BLANK BUSINESS AND ENERGY WOOD

A.P. Mokhirev, A.A. Keryushchenko

Siberian State Technological University, Lesosibirskiy branch, 662543, Krasnoyarsk region, Lesosibirsk, Victory Str., 29  
ale-mokhirev@yandex.ru

Currently Russia is one of the largest countries in the world in the timber industry. It successfully harvested and exported timber and lumber, but the wood raw material means not only commercial timber, but also logging waste that is currently disposed of either by producers or left to rot in the cutting area. To date, the problem of complex use of wood is the most important in the timber industry. Secondary timber resources can be used as a raw material for the technology, fuel chips, briquettes and pellets, fertilizers, oils, extracts, and other marketable products or process energy purposes. There are several ways of harvesting and processing logging and energy wood, depending on the process chain, the volume of harvested timber and the remoteness of the enterprise from the cutting area. In order to form the most effective process chain for the procurement timber and energy wood there was developed a method of forming timber. It comes from the commodity output, its volume, type and development of transport infrastructure of a particular company. Thanks to this procedure it may create economically and technologically efficient production chain for a particular enterprise even with a small volume wood products or use in the development of regional or federal programs for the development of the timber industry. A correctly formed process chain of timber and energy wood makes the most efficient to distribute the available production capacity, increase the volume wood products and enables environmental management for logging companies.

**Keywords:** timber industry, harvesting technology, bio-energy, the method of formation, timber, energy wood

**Suggested citation:** Mokhirev A.P., Keryushchenko A.A. *Metodika formirovaniya tekhnologicheskoy tsepochnki zagotovki delovoy i energeticheskoy drevesiny* [Method of forming process chain blank business and energy wood]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 17–22. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-17-22

### References

- [1] Perederiy S. *Shehepa kak tverdoe biotopливо v Evrope* [Chips as solid biofuels in Europe]. *LesPromInform*, 2010, no. 5, pp. 132–135.
- [2] Selivestrov A.A., Gerasimov Yu.Yu., Sukhanov Yu.V., Syunev V.S., Katarov V.K. *Otsenka effektivnosti proizvodstva toplivnoy shechepy na lesnom terminale* [Evaluation of the efficiency of production of fuel chips in the forest terminal]. *Tractors and agricultural machinery*, 2012, no. 8, pp. 25–27.
- [3] Heikkilä J., Tantt J.V., Lindblad J., Sirén M., Asikainen A. Harvesting alternatives and cost factors of delimbed energy wood. *Metsandusliikud Laitila, Uurimused — Forestry Studies*, 2006, no. 45, pp. 49–56.
- [4] Routa J., Asikainen A., Björheden R., Laitila J., Röser D. Forest energy procurement — state of the art in Finland and Sweden. *WIREs Energy and Environment*, 2013, no. 2 (6), pp. 602–613.
- [5] Karpachev S.P. *Bioenergetika: sbor i pakirovanie lesosechnykh otkhodov* [Bioenergy: collection and packaging of logging wastes]. *Lesopromyshlennik* [Timber merchant], 2006, no. 5. Available at: <http://www.lesopromyshlennik.ru/bioenergia/bio.html>
- [6] Mokhirev A.P., Bezrukikh Yu.A., Medvedev S.O. *Pererabotka drevesnykh otkhodov predpriyatiy lesopromyshlennogo kompleksa kak faktor ustoychivogo prirodopol'zovaniya* [Processing of wood wastes of enterprises of the timber industry complex as a factor of sustainable nature use]. *Engineering Bulletin of the Don*, 2015, v. 36, no. 2, p. 81.
- [7] Grigor'ev I.V., Khitrov E.G., Nikiforova A.I., Grigor'eva O.I., Kunitskaya O.A. *Opreделение energoemkosti produktov lesopol'zovaniya v ramkakh metodiki otsenki ekologicheskoy effektivnosti lesopol'zovaniya* [Determination of energy intensity of forest products in the framework of the methodology for assessing the ecological efficiency of forest management] *Bulletin of Tambov University. Ser. Natural and Technical Sciences*, 2014, v. 1.
- [8] Shegelman I., Budnik P., Morozov E. Optimization of a forest harvesting set based on the Queueing Theory: Case study from Karelia. *Lesn. Cas. For. J.*, 2015, no. 61, pp. 211–220.
- [9] Shchegoleva L.V. *Metodika formirovaniya tekhnologicheskikh tsepochek, vlyuchayushchikh proizvodstvo shechepy energeticheskogo naznacheniya* [Technique of the formation of technological chains, including the production of chips for energy use] *Resources and Technology*, 2010, no. 8, pp. 169–171.
- [10] Sukhanov Yu.V., Gerasimov Yu.Yu., Selivestrov A.A., Sokolov A.P. *Tekhnologicheskie tsepochnki i sistemy mashin dlya sbora i pererabotki drevesnoy biomassy v toplivnyuyu shechepu pri sploshnolesosechnoy zagotovke sortimentov* [Technological chains and systems of machines for harvesting and processing woody biomass into fuel chips in the case of continuous harvesting of assortments] *Sistemy. Methods. Technology*, 2011, no. 12, pp. 101–107.
- [11] Shegel'man I.R. *Formirovanie skvoznykh tekhnologiy lesopromyshlennykh proizvodstv: nauchnye i prakticheskie aspekty* [Formation of end-to-end technologies of timber industry: scientific and practical aspects]. *Global Scientific Potential*, 2013, no. 8, pp. 119–122.
- [12] Shegel'man I.R., Budnik P.V. *Klassifikatsiya skvoznykh tekhnologiy zagotovki biomassy dereva* [Classification of end-to-end technologies for the harvesting of tree biomass]. *Perspectives of Science*, 2012, no. 4 (31), pp. 90–92.
- [13] Kunitskaya O.A., Grigor'ev I.V. *Pererabotka nizkotovarnoy drevesiny: problemy i perspektivy* [Processing of low-value timber: problems and prospects] *Energy: Economics. Technology. Ecology*, 2015, no. 9, pp. 70–75.
- [14] Mokhirev A.P., Aksenov N.V. Classification of technological processes of logging. *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2016, v. 3. Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2016/3668>
- [15] Väätäinen K. Wood fuel procurement methods and logistics in Finland. Wood fuel production for small scale use. Eberswalde: University Eberswalde, 2007, pp. 28.
- [16] Suhanov Yu.V., Selivestrov A.A., Gerasimov Yu.Yu. Efficiency of Forest Chip Supply Systems in Northwest Russia. *Advanced Materials Research*, 2013, v. 740, pp. 799–804. Available at: [www.scientific.net/AMR.740.799](http://www.scientific.net/AMR.740.799)
- [17] Gerasimov Y., Senko S., Karjalainen T. Nordic forest energy solutions in the Republic of Karelia. *Forests*, 2013, no. 4, pp. 945–967.
- [18] Heift R. *Wykorzystanie odpadov pochodzenia roslinnego do celow energetycznych // Recyklaceo padu*. Ostrava: VSB TU, 2000, pp. 165–173.
- [19] Mokhirev A.P. *Modelirovanie protsessy raboty mashiny dlya sortirovki i transportirovki porubochnykh ostatkov na lesoseke* [Modeling of the process of the machine for sorting and transportation of felling residues in the felling area] *Sistemy. Methods. Technology*, 2016, no. 1 (29), pp. 89–94.
- [20] Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia. *Biomass and Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.
- [21] Karjalainen T., Asikainen A., Ilavsky J., Zamboni R., Hotari K.-E., Röser D. Estimation of Energy Wood Potential in Europe. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute, 2004. Helsinki: Metla, 43 p.

### Author's information

**Mokhirev Aleksandr Petrovich** — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof., Siberian State Technological University, Lesosibirskiy branch, ale-mokhirev@yandex.ru

**Keryushchenko Aleksandra Anatol'evna** — graduate student, Siberian State Technological University, Lesosibirskiy branch, aleksa\_ice@mail.ru

Received 08.10.2017



## ПРИМЕНЕНИЕ ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИДОВ ПОКРЫТИЙ

А.В. Скрыпников<sup>1</sup>, В.Г. Козлов<sup>2</sup>, Д.В. Ломакин<sup>3</sup>, Е.Ю. Микова<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I»

<sup>3</sup> ФГКОУ ВО «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации»

<sup>4</sup> Сыктывкарский лесной институт (филиал) ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»

skrypnikovvsafe@mail.ru

Разработана и проанализована экономико-математическая модель определения областей использования видов покрытий, логистическая структура которой учитывает взаимоотношение следующих элементов процесса: лесовозной дороги; транспортных средств; складов горюче-смазочных материалов; ремонтно-газонального хозяйства. Объектом исследования являлась подсистема дорога — автомобиль. Метод изучения — имитационное и компьютерное моделирование областей использования видов покрытий, позволяющее провести сравнительное исследование гравийного, железобетонного, черногравийного и асфальтобетонного покрытий автомобильных дорог. Разработана экономико-математическая модель определения областей использования видов покрытий, логистическая структура которой учитывает все взаимоотношения элементов процесса. Предусмотрен поиск области применения неравнопрочной проезжей части дороги для черногравийного и асфальтобетонного покрытий. В связи с ростом осевых нагрузок автотранспортных средств расширяется область применения дорожных покрытий жесткого типа — колеиных и железобетонных, следовательно, увеличивается расстояние подвозки песка, а это сокращает область применения покрытий жесткого типа. Выявлено расширение области применения асфальтобетонных покрытий вследствие увеличения расчетного срока службы дороги, что объясняется уменьшением амортизационных отчислений, в том числе на реновацию, а также повышением удельного веса эксплуатационных показателей автопоездов, включая увеличение их пробега до списания. С помощью разработанной экономико-математической модели могут быть установлены области безусловного применения и буферные области, где граничащие виды покрытий взаимозаменяемы по технико-экономическим показателям.

**Ключевые слова:** лесовозная дорога, автопоезд, осевая нагрузка, дорожное покрытие, экономико-математическая модель, приведенные затраты

**Ссылка для цитирования:** Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Применение экономико-математических методов для определения областей использования видов покрытий // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 23–32.

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-23-32

Знание областей применения типов и видов покрытий лесовозных автомобильных дорог круглогодичного и летнего действия в зависимости от факторов, влияющих на их прочностные характеристики, имеет важное значение для проектировщиков, так как исключает многовариантность проработок, сокращает время на их выбор и расчет [1, 2].

Действующие и разрабатываемые в настоящее время нормативные документы по проектированию дорог содержат лишь общие рекомендации по применению типов и видов дорожных покрытий, привязанных в основном к категориям дорог с широким диапазоном показателей интенсивности движения или грузооборота без указания других факторов, которые также оказывают значительное влияние на выбор вида дорожного покрытия. Помимо грузооборота (интенсивности движения), на экономическую целесообразность применения типов и видов покрытий влияют следующие факторы: категория местности (грун-

тово-гидрологические и рельефные условия); состав движения транспортных средств (типы автопоездов, осевые нагрузки); наличие или дальность подвозки основных дорожно-строительных материалов; срок службы дороги [3].

Цель работы — учет вышеперечисленных факторов, отражающих наиболее часто встречающиеся конкретные условия проектирования дорог (таблица). Для решения поставленной задачи была создана экономико-математическая модель.

### Информационная база модели

Информационной базой для разработки модели послужили: обоснование эксплуатационных показателей транспортных средств; разработка математических моделей тягача, полуприцепа и прицепа; обоснование стоимости строительства, ремонта и содержания дорог; обоснование затрат на непроеизводственную сферу.

За целевую функцию принята разность приведенных затрат в виде

Т а б л и ц а

Подлежащие учету условия проектирования автомобильных дорог  
Conditions for motorway engineering to be considered

Фактор	Обозначение	Область исследований (диапазон значений фактора)
Категория местности		1, 2, 3
Осевая нагрузка, тс		Группа Б: 5,5–6
		Группа А: 7,5–10
		а также 11; 12; 12,75
Объем производства лесообрабатывающих предприятий, тыс. м <sup>3</sup>	<i>A</i>	50–1500
Грузообороты дорог, тыс. м <sup>3</sup>	<i>Q</i>	50–1500
Расстояние подвозки гравия, км	<i>L</i>	1–150
Расстояние подвозки песка, км	<i>LP</i>	1–50
Срок службы дороги, лет	<i>ТД</i>	3–50
Территориальный район с набором коэффициентов удорожания	—	Три характерных района с малыми, средними и большими значениями коэффициентов удорожания
Мощность двигателя, л.с.	<i>N</i>	210–500
Габаритная ширина, м	<i>GH</i>	2,5–4
Количество прицепных составов, шт	—	1

$$\begin{aligned}
 \Delta(C + EK)_{\xi G \eta_i \eta_j} = & \frac{E \left( 1 + \frac{1}{ТД + E} \right)}{Q} \left[ КД(\eta_i, \bar{M}_{\xi}, G, ТД, \bar{K}\bar{R}, GA, L, LP, Q, \bar{P}) \right] \\
 & - \left[ КД(\eta_j, \bar{M}_{\xi}, G, ТД, \bar{K}\bar{R}, GA, L, LP, Q, \bar{P}) \right] + \frac{C_{\eta_i}(\bar{K}\bar{R}, Q, GA, G_1, G_2)}{Q} - \frac{C_{\eta_j}(\bar{K}\bar{R}, Q, GA, G_1, G_2)}{Q} + \\
 & + \frac{2(1 + J_1)CG}{G_1} \times \left[ \frac{1}{LG(\eta_i)} - \frac{1}{LG(\eta_j)} \right] + \frac{\sum_{n=1}^3 C_n(\eta_i, G, \bar{T}\bar{B}, K_1) - \sum_{n=1}^3 C_n(\eta_j, G, \bar{T}\bar{B}, K_1)}{G_1} \frac{CZ}{G_1} \times \\
 & \times \left[ \frac{1}{V_1(\eta_i, \xi, G)} + \frac{1}{V_2(\eta_i, \xi, G)} - \frac{1}{V_1(\eta_j, \xi, G)} - \frac{1}{V_2(\eta_j, \xi, G)} \right] + \frac{2E(KG)(TG)}{G_1} \left[ \frac{1}{LG(\eta_i)} - \frac{1}{LG(\eta_j)} \right] + \Delta\Phi,
 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $E$  — нормативный коэффициент экономической эффективности;

$\eta_i, \eta_j$  — индекс вида покрытия;

$КД$  — стоимость строительства одного километра дороги;

$\bar{M}_{\xi}$  — вектор коэффициентов, зависящих от категории местности;

$\bar{K}\bar{R}$  — вектор районных коэффициентов удорожания;

$\bar{P}$  — вектор поправочных коэффициентов при неравнопрочных покрытиях;

$C_{\eta_i}, C_{\eta_j}$  — годовые затраты на ремонт и содержание дорог;

$G_1$  — грузоподъемность автопоезда;

$G_2$  — снаряженная масса автопоезда;

$J_1$  — доля затрат на капитальный ремонт от цены автопоезда;

$CG$  — цена рассматриваемого автопоезда с осевой нагрузкой  $G$ ;

$LG(L)$  — массив амортизационных пробегов по типам покрытий для рассматриваемого автопоезда;

$\sum_{n=1}^3 C_n$  — суммарные затраты на техническое

обслуживание и текущий ремонт, горюче-смазочные материалы и шины, отнесенные к одному километру пробега в двух направлениях;

$\bar{T}\bar{B}$  — вектор значений районно-климатических факторов;

$K_1$  — вектор коэффициентов, зависящих от вида покрытия, типа подвижного состава и размеров предприятия;

$CZ$  — часовая заработная плата водителя с учетом всех надбавок;

$TG$  — срок службы транспортного средства;

$\Delta\Phi$  — изменение приведенных затрат по складам горюче-смазочных материалов (ГСМ) на 1 м<sup>3</sup>/км.

## Результаты и обсуждение

Результаты анализа позволяют решить три основные задачи:

– выявить и определить уровень значимости параметров процесса, а также степень их влияния на устойчивость границ областей применения видов покрытий;

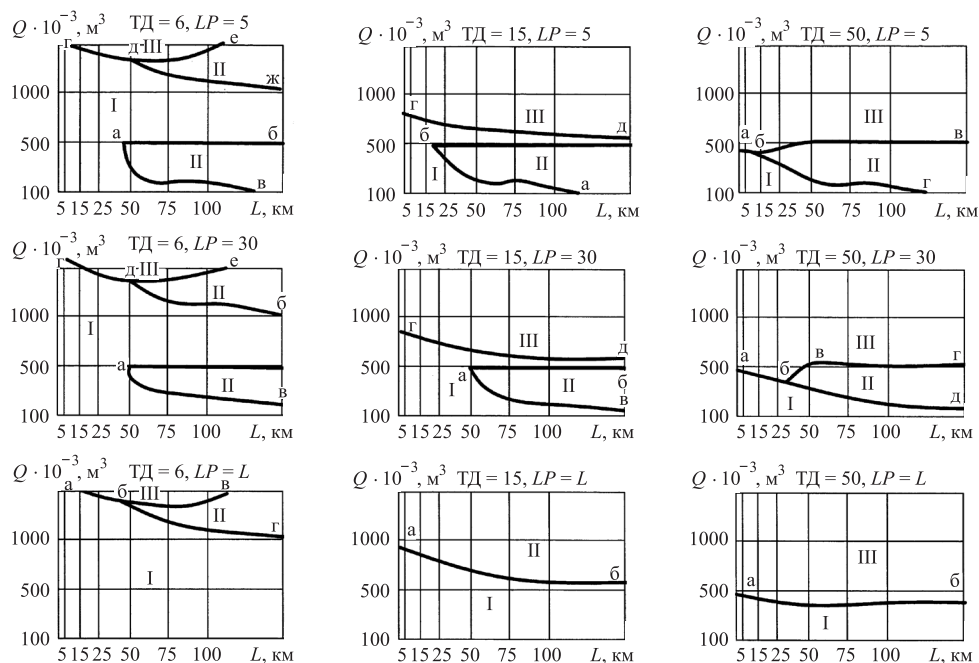
– получить качественную информацию, позволяющую уменьшить размерность моделей при определении оптимальных технологических процессов;

– определить области применения рассмотренных видов покрытий для последующего использования при проектировании лесовозных автомобильных дорог [4].

В связи с отсутствием достаточного количества строительных материалов в ряде основных лесозаготовительных районов расстояние их подвозки варьировалось до от 5 до 150 км. Существование разветвленной сети дорог с различным сроком службы, а также собирательный характер грузопотоков потребовали анализа срока службы дороги в широких пределах. Необходимость оценки общего объема производства на лесоперерабатывающем предприятии вызвана учетом затрат на ремонтно-гаражное хозяйство и склады ГСМ. На основании из опыта применения гравийной и песчаной подушки и экспертных оценок специалистов [2] для железобетонных покрытий принято при  $Q > 500$  тыс. м<sup>3</sup> гравийная подушка, при  $Q \leq 500$  тыс. м<sup>3</sup> — песчаная. Объем производства составляет 150...1500 тыс. м<sup>3</sup> [5].

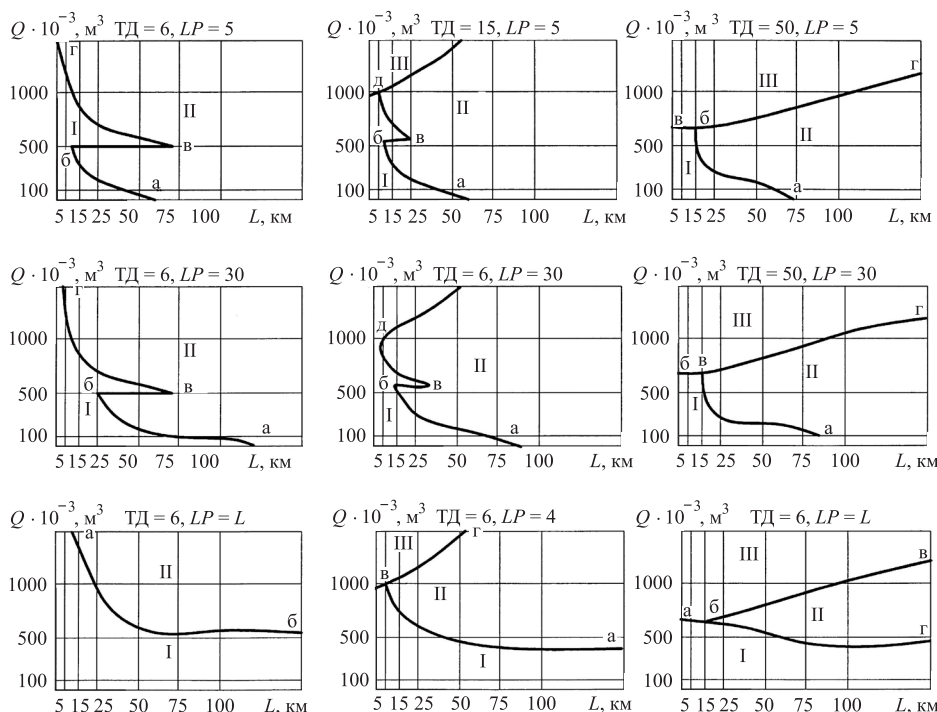
Установлено, что для массового анализа наибольшего объема производства границы применения видов покрытий достаточно устойчивы (сдвиг в пределах 25 тыс. м<sup>3</sup> по грузообороту) [1]. Чтобы определить степень влияния территориального района, характеризуемого набором коэффициентов удорожания, с помощью разработанной модели проведено исследование для трех типичных районов с малыми, средними и большими значениями коэффициентов удорожания. Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что при решении поставленной задачи влияние территориального района незначительно и им можно пренебречь. Оценка влияния категории местности показала, что при второй и третьей категории местности результаты сопоставимы [6]. Отмечены отклонения для небольшого количества расчетных точек, не превышает 25 тыс. м<sup>3</sup>. Результаты полученные для первой категории местности, существенно отличаются от таковых для второй и третьей категории.

Увеличение расстояния подвозки песка при  $Q \leq 500$  приводит к увеличению затрат на строительство дорог с железобетонным покрытием [7]. Рис. 1–3 демонстрирует влияние этого параметра на расположение границ на примере трех автопоездов — «Урал», КамАЗ, МАЗ. В рабочем интервале изменения  $LP$  получено достаточно устойчивое положение границ при всех вари-

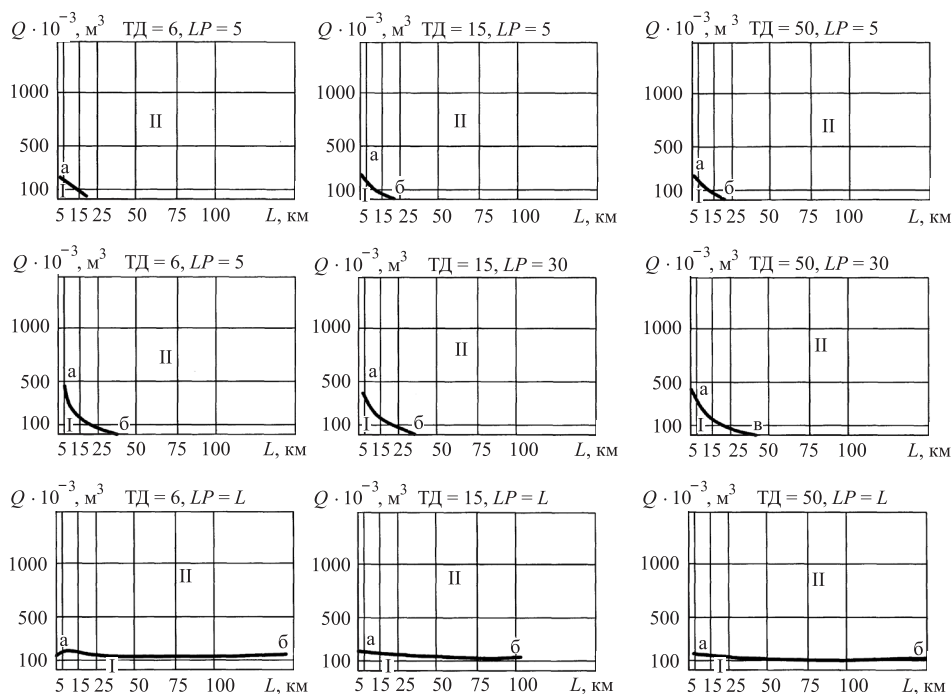


**Рис. 1.** Влияние расстояния подвозки песка на области применения видов покрытий при  $\xi = 1$  для автопоезда «Урал-43204-1112-40», область применения: I — гравийного покрытия; II — железобетонного покрытия; III — асфальтобетона; а–г — участки строгих границ областей применения видов покрытий

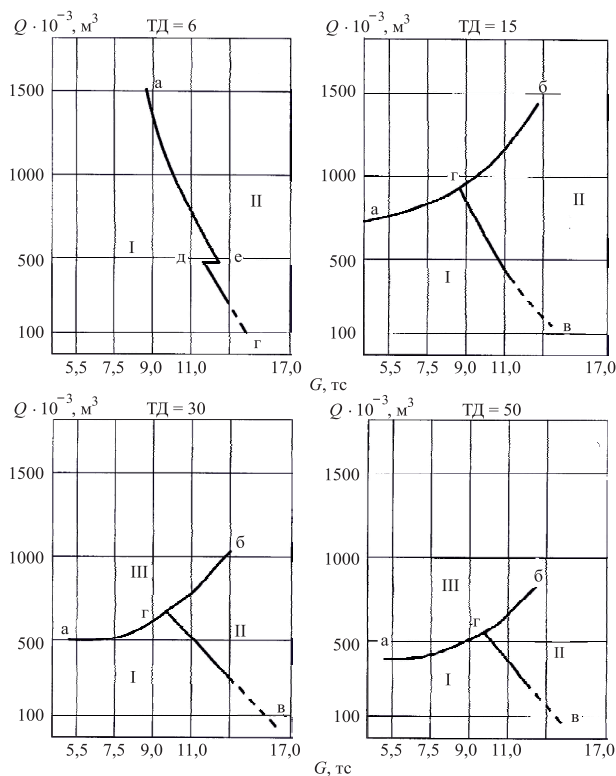
**Fig. 1.** Influence of the sand transport distance on the area of application of the types of coatings with  $\xi = 1$  for a tractor-trailer train Ural-43204-1112-40, field of application: I — gravel cover; II — reinforced concrete covering; III — asphalt-concrete; а–г — areas of specific boundaries of application areas of coating types



**Рис. 2.** Влияние расстояния подвозки песка на области применения видов покрытий при  $\xi = 1$  для автопоезда КамАЗ-53212+ГКВ-8352, область применения: I — гравийного покрытия; II — железобетонного покрытия; III — асфальтобетона; а-г — участки строгих границ областей применения видов покрытий  
**Fig. 2.** Influence of the distance of sand transport on the area of application of coating types at  $\xi = 1$  for a tractor-trailer train KamAZ-53212+GKB-8352, field of application: I — gravel cover; II — reinforced concrete covering; III — asphalt concrete; а-г — areas of specific boundaries of application areas of coating types



**Рис. 3.** Влияние расстояния подвозки песка на области применения видов покрытий при  $\xi = 1$  для автопоезда МАЗ-6312V9-420-012, область применения: I — гравийного покрытия; II — железобетонного покрытия; III — асфальтобетона; а-г — участки строгих границ областей применения видов покрытий  
**Fig. 3.** Influence of the distance of sand transport on the area of application of coating types with  $\xi = 1$  for a tractor-trailer train MAZ-6312V9-420-012, field of application: I — gravel cover; II — reinforced concrete covering; III — asphalt concrete; а-г — areas of strict boundaries of application areas of coating types

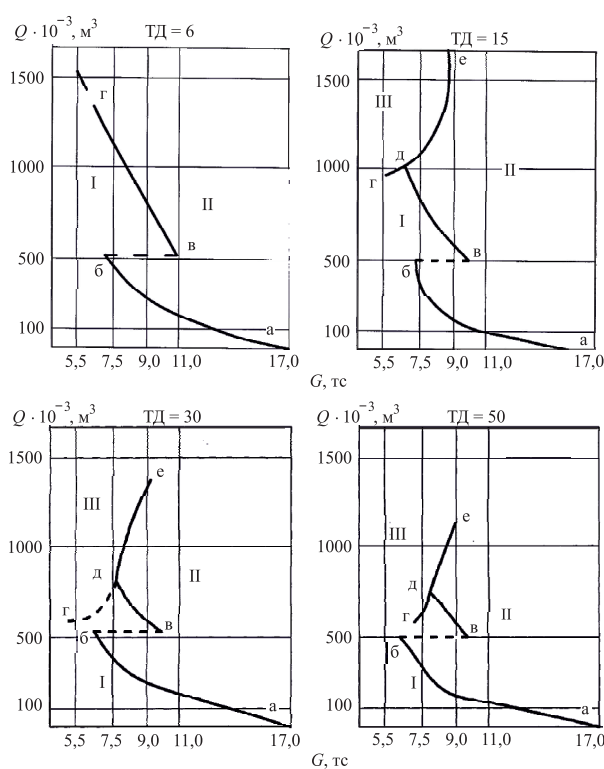


**Рис. 4.** Влияние осевых нагрузок на области применения видов покрытий при  $\xi = 1$ ,  $L = 5$  для автопоезда «Урал-43204-1112-40», область применения: I — гравийного покрытия; II — железобетонного покрытия; III — асфальтобетона; а-г — участки строгих границ областей применения видов покрытий; - - - - экстраполяция границ областей применения видов покрытий

**Fig. 4.** Influence of axial loads on the field of application of types of coatings for  $\xi = 1$ ,  $L = 5$  for Ural-43204-1112-40 tractor-trailer train, application area: I — gravel cover; II — reinforced concrete covering; III — asphalt concrete; а-г — areas of strict boundaries of application areas of coatings; - - - - extrapolation of the boundaries of application areas of coating types

антах сроков службы дороги [8]. На рис. 4, 5 представлены зависимости области применения видов покрытий для первой категории местности от осевых нагрузок и грузооборота в порядке нарастания сроков службы дороги и расстояний подвозки гравия для тягача.

На рис. 6–8 представлены зависимости области применения видов покрытий от срока службы дороги по типам лесовозных автопоездов для разных категорий местности [2]. С увеличением срока службы и расстояния подвозки гравия возрастает область применения асфальтобетонного и железобетонного покрытий. У автопоездов с более высокими осевыми нагрузками больше область применения железобетонного покрытия. На рис. 9–10 представлены зависимости области применения видов покрытий от расстояния под-



**Рис. 5.** Влияние осевых нагрузок на области применения видов покрытий при  $\xi = 1$ ,  $L = 25$  для автопоезда КамАЗ-53215, область применения: I — гравийного покрытия; II — железобетонного покрытия; III — асфальтобетона; а-г — участки строгих границ областей применения видов покрытий; - - - - экстраполяция границ областей применения видов покрытий

**Fig. 5.** Influence of axial loads on the field of application of types of coatings with  $\xi = 1$ ,  $L = 25$  for KamAZ-53215 tractor-trailer train, field of application: I — gravel cover; II — reinforced concrete covering; III — asphalt concrete; а-г — areas of specific boundaries of application areas of coatings; - - - - extrapolation of the boundaries of application areas of coating types

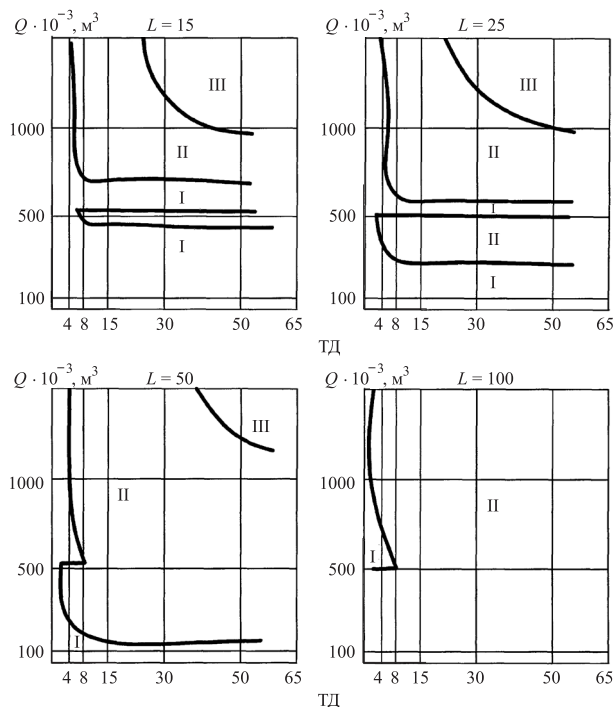
возки гравия по типам лесовозных автопоездов для разных категорий местности. С увеличением расстояния подвозки гравия растут области применения асфальтобетонного и железобетонного покрытий [4, 9, 10].

### Выводы

1. Установлены и обоснованы области применения различных видов покрытий лесовозных дорог. Полученные материалы позволяют определить наиболее эффективные в определенных условиях виды покрытий. Доказана целесообразность применения качественных видов покрытий на лесовозных дорогах.

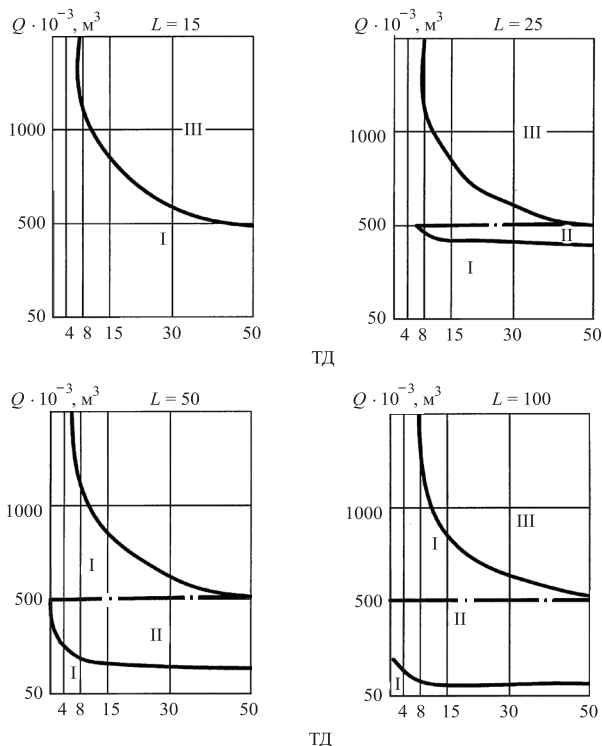
2. Для дорог с покрытием из битумо-минеральных смесей практически не нашлось области применения черногравийному покрытию. Грузо-





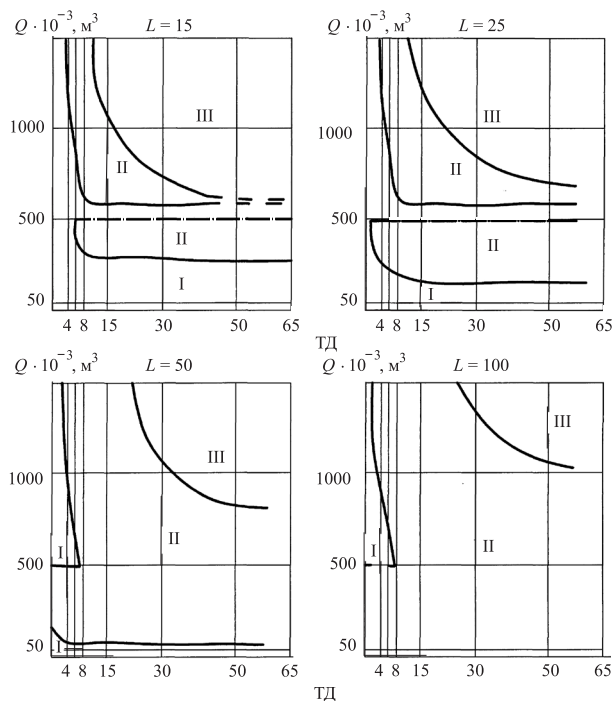
**Рис. 6.** Влияние срока службы дороги на области применения видов покрытий при  $\xi = 1$  и  $LP = 50$  для автопоезда МАЗ-6312В9-420-012, область применения: I — гравийного покрытия; II — железобетонного покрытия; III — асфальтобетона

**Fig. 6.** Influence of road service life on the area of application of the types of coatings with  $\xi = 1$  and  $LP = 50$  for the MAZ-6312V9-420-012 tractor-trailer train, application area: I — gravel cover; II — reinforced concrete covering; III — asphalt concrete



**Рис. 7.** Влияние срока службы дороги на области применения видов покрытий при  $\xi = 3$  и  $LP = 15$  для автопоезда «Урал-43204-1112-40», область применения: I — гравийного покрытия; II — железобетонного покрытия; III — асфальтобетона; — · — граница скачкообразного перехода с железобетонного покрытия на гравийное или асфальтобетонное при грузообороте  $Q = 500$ , после которого вместо песчаной начинают применять гравийную (щебеночную) подушку

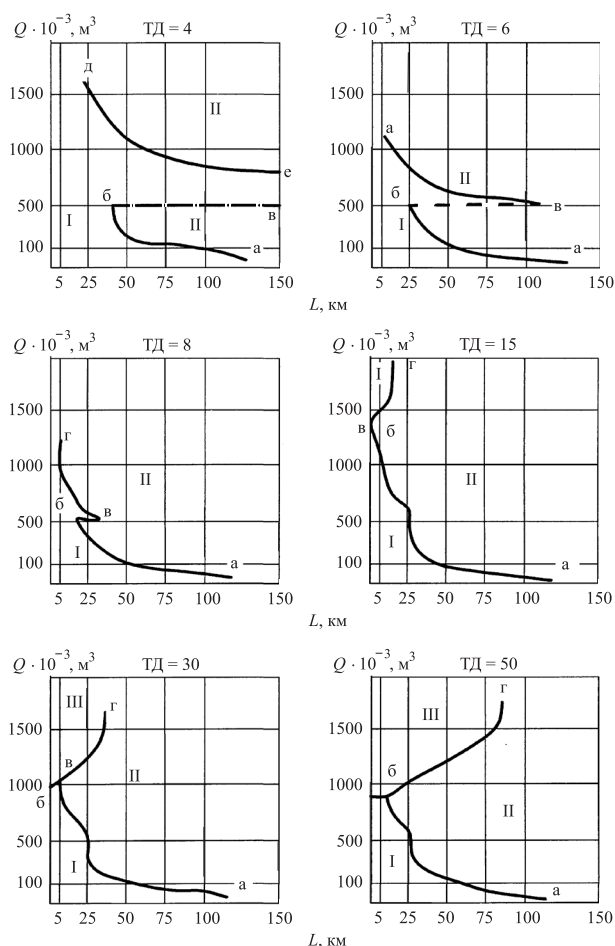
**Fig. 7.** Influence of road service life on the area of application of types of coatings for  $\xi = 3$  and  $LP = 15$  for the Урал-43204-1112-40 tractor-trailer train, application area: I — gravel cover; II — reinforced concrete covering; III — asphalt concrete; — · — the boundary of the jump transition from reinforced concrete to gravel or asphalt concrete at a turnover of  $Q = 500$ , after which gravel (shingle) bedding is used



**Рис. 8.** Влияние срока службы дороги на области применения видов покрытий  $\xi = 3$  и  $LP = 15$  для автопоезда КамАЗ-53212+ГКБ-8352, область применения: I — гравийного покрытия; II — железобетонного покрытия; III — асфальтобетона; - - - экстраполяция границ областей применения видов покрытий; — · — граница скачкообразного перехода с железобетонного покрытия на гравийное или асфальтобетонное при грузообороте  $Q = 500$ , после которого вместо песчаной начинают применять гравийную (щебеночную) подушку

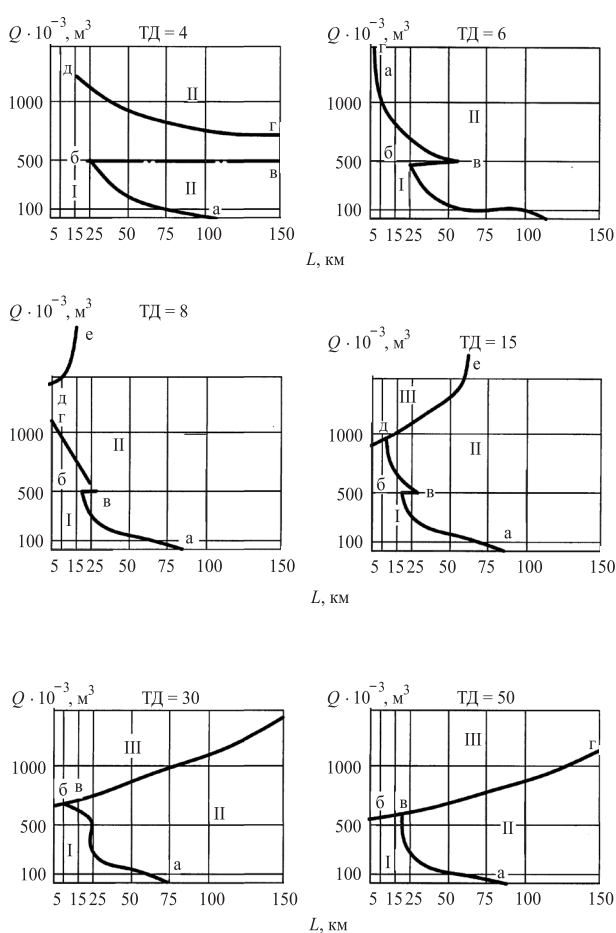
**Fig. 8.** Influence of road service life on the area of application of types of coatings  $\xi = 3$  and  $LP = 15$  for the KamAZ-53212 +GKB-8352 trailer, application area: I — gravel cover; II — reinforced concrete covering; III — asphalt concrete; - - - extrapolation of the boundaries of application areas of coatings; — · — the boundary of the jump transition from reinforced concrete to gravel or asphalt concrete at a turnover of  $Q = 500$ , after which gravel (shingle) bedding is used





**Рис. 9.** Влияние срока службы дороги на области применения видов покрытий при  $\xi = 1$  и  $LP = 30$  для автопоезда МАЗ-6312В9+ГКБ-9383, область применения: I — гравийного покрытия; II — железобетонного покрытия; III — асфальтобетона; а-г — участки строгих границ областей применения видов покрытий; - - - - экстраполяция границ областей применения видов покрытий; — · — граница скачкообразного перехода с железобетонного покрытия на гравийное или асфальтобетонное при грузообороте  $Q = 500$ , после которого вместо песчаной начинают применять гравийную (щебеночную) подушку

**Fig. 9.** Influence of road service life on the area of application of the types of coatings with  $\xi = 1$  and  $LP = 30$  for the MAZ-6312B9+GKB-9383 tractor-trailer train, application area: I — gravel cover; II — reinforced concrete covering; III — asphalt concrete; a-d — areas of specific boundaries of application areas of coatings; - - - - extrapolation of the boundaries of application areas of coatings; — · — the boundary of the jump transition from reinforced concrete to gravel or asphalt concrete at a turnover of  $Q = 500$ , after which gravel (shingle) bedding is used



**Рис. 10.** Влияние срока службы дороги на области применения видов покрытий при  $\xi = 1$  и  $LP = 30$  для автопоезда «Урал-43204-1112-40», область применения: I — гравийного покрытия; II — железобетонного покрытия; III — асфальтобетона; а-г — участки строгих границ областей применения видов покрытий; — · — граница скачкообразного перехода с железобетонного покрытия на гравийное или асфальтобетонное при грузообороте  $Q = 500$ , после которого вместо песчаной начинают применять гравийную (щебеночную) подушку

**Fig. 10.** Influence of road service life on the area of application of types of coatings for  $\xi = 1$  and  $LP = 30$  for the Ural-43204-1112-40 tractor-trailer train, application area: I — gravel cover; II — reinforced concrete covering; III — asphalt concrete; a-d — areas of specific boundaries of application areas of coatings; — · — the boundary of the jump transition from reinforced concrete to gravel or asphalt concrete at a turnover of  $Q = 500$ , after which gravel (shingle) bedding is used

оборот на черногравийных дорогах не превышал 25 тыс. м<sup>3</sup>, что объясняется некоторым ухудшением эксплуатационных показателей данного покрытия по сравнению с асфальтобетонным.

3. Выявлены большие области применения железобетонного покрытия, что говорит о перспективности использования покрытий жесткого типа на лесовозных дорогах. В дальнейшем, с введением в рассмотрение цементобетонного покрытия, следует ожидать, что найденные области применимости покрытия жесткого типа расщелятся по конструктивным вариантам.

4. Разработана экономико-математическая модель, в логистической структуре которой учитываются взаимоотношения следующих элементов процесса: дороги, транспорта, складов ГСМ, ремонтно-гаражного хозяйства. Модель дает возможность провести сравнительное исследование гравийного, железобетонного, черногравийного и асфальтобетонного покрытий. Предусмотрен поиск области применения неравнопрочной проезжей части дороги для черногравийного и асфальтобетонного покрытий.

5. С помощью разработанной модели (см. формулу (1)) могут быть установлены области безусловного применения и буферные области, где граничащие виды покрытий взаимозаменяемы по технико-экономическим показателям.

## Список литературы

- [1] Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Кондрашова Е.В., Арутюнян А.Ю. Результаты исследования колеобразования на грунтовых усах лесовозных дорог // Вестник МГУЛ — Лесной вестник. 2016. Т. 20. № 2. С. 159–166.
- [2] Козлов В.Г., Кондрашова Е.В., Скрыпников А.В., Скворцова Т.В. Моделирование транспортного потока на лесовозных автомобильных дорогах // Современные проблемы науки и образования, 2015. № 1–1. С. 432.
- [3] Ковалев Н.С., Ромасев В.И., Князев В.А. Снижение скользкости покрытий при зимнем содержании автомобильных дорог // Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития: Сб. тр. науч.-практ. конф., Одесса, 1–15 октября 2005 г. Одесса: Внешнеэкономический сервис, 2005. С. 53–57.
- [4] Логачев В.Н. Повышение транспортно-эксплуатационных качеств лесовозных автомобильных дорог в условиях ограниченных ресурсов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. М.: МГУЛ, 2015. 187 с.
- [5] Ковалев Н.С., Быкова Я.А. Исследование усталостной долговечности асфальтобетона с углеродсодержащим материалом при циклическом динамическом нагружении // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура. 2008. № 12. С. 62–66.
- [6] Козлов В.Г., Журавлев И.Н., Кондрашова Е.В., Умаров М.М. Математическая модель статистической идентификации информационного обеспечения автомобильного транспорта // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий, 2016. № 1 (67). С. 45–51.
- [7] Самодуров С.И., Маслов С.М., Ковалев Н.С. О долговечности битумошлаковых покрытий автомобильных дорог // Известия высших учебных заведений. Строительство. 1976. № 8. С. 147–151.
- [8] Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Ломакин Д.В., Логойда В.С. Методологическое обоснование особенностей проектирования трассы по методу опорных элементов // Фундаментальные исследования, 2016. № 12–1. С. 62–68.
- [9] Никитин В.В., Козлов В.Г., Арутюнян А.Ю., Умаров М.М. Имитационная модель функционирования лесовозной автомобильной дороги // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2016. Т. 20. № 2. С. 167–172.
- [10] Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision // Journal of Engineering and Applied Sciences, 2017, v. 12, no. 2.
- [11] Козлов В.Г., Кондрашова Е.В., Заболотная А.А., Скворцова Т.В. Модернизация имитационной системы процесса функционирования автомобильных дорог с использованием информационных технологий // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 433.
- [12] Подольский В.П., Ковалев Н.С., Яковлев Е.В., Слепцова О.В. Исследование возможности применения металлизированных углеродных волокон в качестве структурирующей добавки в дорожный асфальтобетон // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. Строительство и архитектура, 2013. № 4 (32). С. 62–69.

## Сведения об авторах

**Скрыпников Алексей Васильевич** — д-р техн. наук, профессор, декан факультета «Управление и информатика в технологических системах» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», skrypnikovvsafe@mail.ru

**Козлов Вячеслав Геннадиевич** — канд. техн. наук, доцент, заместитель декана по научной работе агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», vya-kozlov@yandex.ru

**Ломакин Дмитрий Валерьевич** — преподаватель ФГКОУ ВО «Воронежский институт Министрства внутренних дел Российской Федерации», atommic93dv@mail.ru

**Микова Елена Юрьевна** — преподаватель кафедры «Дорожное, промышленное и гражданское строительство» Сыктывкарского лесного института (филиал) ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Leencha@ya.ru

Статья поступила в редакцию 22.08.2017 г.

## THE USE OF ECONOMIC-MATHEMATICAL METHODS TO IDENTIFY AREAS OF USE OF TYPES OF COATINGS

A.V. Skrypnikov<sup>1</sup>, V.G. Kozlov<sup>2</sup>, D.V. Lomakin<sup>3</sup>, E.Yu. Mikova<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh

<sup>2</sup> Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

<sup>3</sup> Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia

<sup>4</sup> Syktyvkar Forest Institute (branch) of the Federal State Budget Education Institution of Higher Education «St. Petersburg State Forestry University named after SM Kirov»

skrypnikovvsafe@mail.ru

The article is devoted to the development and analysis of mathematical models for determining the use of coatings, logistic structure which takes into account the relationship of the following elements of the process such as forest roads; vehicles; fuel storage; repair garage services. The object of the study was a subsystem of the «road-car». Method of the study was simulation and computer modeling applications of the types of coatings that allow to conduct a comparative study for gravel, concrete, black gravel and asphalt pavement, and also included a search scope of unequal carriageway for cerographical and asphalt coverings. In connection with the increase in axial loads of vehicles expanding the scope of the rigid pavement type such as furrow and concrete tracks and therefore, increased distance of sand haulage, in its turn, reduces the field of application of coatings and rigid type. The results of the research was the increase in the lifetime of a road leading to a change in the direction of increasing the field of application of asphalt coatings, which in turn is explained by a decrease in depreciation, including the renovation and increase in the weight of operational indexes of truck trailer, including an increase in their mileage to disposal. Developed economic-mathematical model of definition of fields of use of coatings, logistic structure which takes into account all the relationship of the elements of the process, gives the opportunity to conduct a comparative study for gravel, concrete, black gravel and asphalt covering of roads. Using the developed mathematical model can be set region unconditional application, and the buffer region where bordering kinds of coverings interchangeable on techno-economic indicators.

**Keywords:** forest roads, road train, axle load, road surface, mathematical model, given costs

**Suggested citation:** Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Mikova E.Yu. *Primenenie ekonomiko-matematicheskikh metodov dlya opredeleniya oblastey ispol'zovaniya vidov pokrytiy* [The use of economic-mathematical methods to identify areas of use of types of coatings] *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 23–32. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-23-32

### References

- [1] Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Kondrashova E.V., Arutyunyan A.Yu. *Rezultaty issledovaniya koleeobrazovaniya na gruntovykh usakh lesovoznykh dorog* [Results of the study of the rutting on the earth's mustache of forest roads] *Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik*, 2016, t. 20, no. 2, pp. 159–166.
- [2] Kozlov V.G., Kondrashova E.V., Skrypnikov A.V., Skvortsova T.V. *Modelirovanie transportnogo potoka na lesovoznykh avtomobil'nykh dorogakh* [Modeling of the traffic flow on logging highways] *Modern problems of science and education*, 2015, no. 1–1, p. 432.
- [3] Kovalev N.S., Romasev V.I., Knyazev V.A. *Snizhenie skol'zkosti pokrytiy pri zimnem soderzhanii avtomobil'nykh dorog* [Decrease in the slipperiness of coatings in the winter maintenance of highways] *Scientific research and their practical application. Current state and ways of development. Scientific-practical. Conf., Sat. sci. Tr., Odessa, October 1–15, 2005* Odessa: Vneshklassamservice, 2005. pp. 53–57.
- [4] Logachev V.N. *Povyshenie transportno-eksploatatsionnykh kachestv lesovoznykh avtomobil'nykh dorog v usloviyakh ogranichennykh resursov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Increase of transport-operational qualities of forest roads in conditions of limited resources: dis. ... Cand. Sci. (Tech.)]. 05.21.01. Moscow: MGUL, 2015. 187 p.
- [5] Kovalev N.S., Bykova Ya.A. *Issledovanie ustalostnoy dolgovechnosti asfal'tobetona s ugle rodsoderzhashchim materialom pri tsiklicheskom dinamicheskom nagruzhenii* [Investigation of fatigue life of asphalt concrete with carbon-containing material under cyclic dynamic loading] *Bulletin of Volgograd State Architectural and Construction University. Series: Construction and architecture*, 2008, no. 12, pp. 62–66.
- [6] Kozlov V.G., Zhuravlev I.N., Kondrashova E.V., Umarov M.M. *Matematicheskaya model' statisticheskoy identifikatsii informatsionnogo obespecheniya avtomobil'nogo transporta* [Mathematical model of statistical identification of information support of motor transport] *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2016, no. 1 (67), pp. 45–51.
- [7] Samodurov S.I., Maslov S.M., Kovalev N.S. *O dolgovechnosti bitumoshlakovykh pokrytiy avtomobil'nykh dorog* [On the durability of bitumen-slag coatings of highways] *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Building*, 1976, no. 8, pp. 147–151.
- [8] Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Lomakin D.V., Logoyda V.S. *Metodologicheskoe obosnovanie osobennostey proektirovaniya trassy po metodu opornykh elementov* [Methodological substantiation of the features of the design of the route using the method of support elements] *Fundamental Research*, 2016, no. 12–1, pp. 62–68.
- [9] Nikitin V.V., Kozlov V.G., Arutyunyan A.Yu., Umarov M.M. *Imitatsionnaya model' funktsionirovaniya lesovoznoy avtomobil'noy dorogi* [Simulation model of the functioning of the timber road highway] *Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik*, 2016, t. 20, no. 2, pp. 167–172.
- [10] Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. *Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Information Provision. Journal of Engineering and Applied Sciences*, January 2017, v. 12, no. 2.
- [11] Kozlov V.G., Kondrashova E.V., Zabolotnaya A.A., Skvortsova T.V. *Modernizatsiya imitatsionnoy sistemy protsessa funktsionirovaniya avtomobil'nykh dorog s ispol'zovaniem informatsionnykh tekhnologiy* [Modernization of the simulation

system of the process of functioning of motor roads using information technologies] Modern problems of science and education, 2015, no. 1–1, p. 433.

- [12] Podol'skiy V.P., Kovalev N.S., Yakovlev E.V., Sleptsova O.V. *Issledovanie vozmozhnosti primeneniya metallizirovannykh uglerodnykh volokon v kachestve strukturiruyushchey dobavki v dorozhnyy asfal'tobeton* [Investigation of the possibility of using metallized carbon fibers as a structuring additive in road asphalt concrete] Scientific Herald of the Voronezh State Architectural and Construction University. Construction and architecture, 2013, no. 4 (32), pp. 62–69.

## Author's information

**Skrypnikov Aleksey Vasil'evich** — D-r Sci. (Tech.), Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies, skrypnikovvsafe@mail.ru

**Kozlov Vyacheslav Gennadievich** — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Professor, Voronezh State Agricultural University named after Emperor Peter I, vya-kozlov@yandex.ru

**Lomakin Dmitriy Valer'evich** — lecturer, Voronezh Institute of the Ministry of internal Affairs of the Russian Federation, atommic93dv@mail.ru

**Mikova Elena Yur'evna** — lecturer, Syktyvkar Forest Institute (branch) of the «St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov», Leencha@ya.ru

Received 22.08.2017

## СТРУКТУРА ДРЕВОСТОЕВ ДУБА ЕСТЕСТВЕННОГО И ИСКУССТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ УХОДА В ПРОЦЕССЕ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ В ЗОНЕ ЛЕСОСТЕПИ (на примере древостоев Теллермановского опытного лесничества ИЛАН РАН)

В.Г. Стороженко<sup>1</sup>, В.В. Чеботарева<sup>2</sup>, П.А. Чеботарев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт лесоведения РАН, 141030, Московская обл., Одинцовский р-н, с. Успенское, ул. Советская, д. 21

<sup>2</sup> Филиал Института лесоведения РАН «Теллермановское опытное лесничество», 397206, Воронежская обл., Грибановский р-н, пос. Теллермановский, ул. Корнаковского, д. 12

lesoved@mail.ru

Изучена вертикальная структура дубовых и смешанных с дубом насаждений южной лесостепи в коренных для дуба нагорных условиях произрастания различного происхождения, естественного и искусственного, при разной интенсивности проведенных в них лесохозяйственных уходов и без таковых. В коренных нагорных дубравах Теллермановского опытного лесничества ИЛАН РАН (Воронежская обл.) заложены 4 постоянные пробные площади: в древостое естественного происхождения с выборкой деревьев подчиненных ярусов (возраст дуба 280 лет) и в древостое без лесохозяйственных уходов (90 лет); в древостое, полученном от поросли пней после рубки спелого древостоя с неполным количеством рубок ухода (80 лет); в дубовых культурах с полным количеством рубок ухода (78 лет). Проведен анализ лесоводственных характеристик древостоев. Определены количественные и объемные показатели деревьев по ярусам древостоев. В старовозрастных дубовых древостоях естественного происхождения с выборочной рубкой других пород деревья дуба в возрасте 240...280 лет при малом их количестве составляют первый ярус и доминируют по запасу. Древостои, возникшие на вырубках из естественного порослевого возобновления от пней без рубок ухода, не имеют в своем составе деревьев дуба. Древостои такого же происхождения, но с рубками ухода за порослью дуба имеют в составе до 6 единиц дуба в первом ярусе. Дубовые культуры с полным циклом рубок ухода могут иметь до 10 единиц дуба в составе первого яруса. Для сохранения в зоне лесостепи лесов с преобладанием дуба как коренной породы необходимо формировать искусственные древостои с сокращенным сроком создания насаждений по интенсивной технологии, разработанной в Теллермановском опытном лесничестве ИЛАН РАН.

**Ключевые слова:** зона лесостепи, дубовые древостои, структура древостоев, рубки ухода, воспроизводство дубовых лесов

**Ссылка для цитирования:** Стороженко В.Г., Чеботарева В.В., Чеботарев П.А. Структура древостоев дуба естественного и искусственного происхождения при различных методах ухода в процессе их формирования в зоне лесостепи (на примере древостоев Теллермановского опытного лесничества ИЛАН РАН) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 33–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-33-38

Леса Теллермановского опытного лесничества ИЛАН РАН, согласно лесорастительному районированию территории России, входят в зону лесостепи, в которой дуб черешчатый испокон веков являлся коренной, доминирующей в составе древостоев породой [1]. Но в последние полвека на площади его коренного произрастания нарастающими темпами идет экспансия сопутствующих ему лиственных пород — ясеня обыкновенного, кленов остролистного, полевого и татарского, липы мелколистной, вяза гладкого. Во многом этому способствует не направленное на сохранение дуба ведение лесного хозяйства с недостаточно тщательно проводимыми мероприятиями по воспроизводству дуба на вырубках, часто с упором на порослевое его возобновление. Но в то же время огромное значение в процессах трансформации древостоев дуба в смешанные лиственные леса с минимальным участием дуба в составе формирующихся естественных и искусственных древостоев имеют факторы естественной конкуренции пород как в корневой сфере растущего древостоя,

так и в травяно-кустарничковом ярусе, когда в напочвенном покрове прогрессирует преобладание видов, образующих сплошное затенение для светолюбивых всходов дуба.

Цель настоящей работы — изучение вертикальной структуры дубовых и смешанных с дубом древостоев в коренных для дуба нагорных условиях произрастания различного происхождения, естественного и искусственного, при разной интенсивности проведенных в них лесохозяйственных уходов и без таковых.

### Объекты и методика исследований

Леса Теллермановского опытного лесничества имеют в своем составе дубовые и смешанные с дубом насаждения, отличающиеся друг от друга по лесоводственным характеристикам: по происхождению, составу пород, полноте, срокам и интенсивности лесохозяйственных мер ухода за культурами, что позволяет рассматривать их как уникальный полигон для изучения различных



процессов в древостоях естественного и искусственного происхождения.

Для анализа выбраны древостои различного происхождения на четырех постоянных пробных площадях с разной интенсивностью проведения лесохозяйственных мероприятий. В кв. 15 постоянная пробная площадь заложена в перестойном дубовом древостое естественного происхождения, в котором в конце XIX в. проводилась приисковая рубка с выборкой второго яруса лиственных деревьев и оставлением дуба на корню. В кв. 14 постоянная пробная площадь заложена в древостое, созданном посадкой на площади вырубке с неполным количеством уходов (два прореживания и две проходные рубки). В кв. 60 пробная площадь заложена в древостое, сформировавшиеся естественным путем на вырубке спелого древостоя с проведением двух прореживаний. В кв. 5 пробная площадь заложена в культурах дуба с полным циклом проведения рубок ухода в послевоенный период (осветление, прочистки, прореживания, проходная рубка).

В насаждениях всех пробных площадей проводили: сплошной пересчет деревьев с измерением диаметра, отнесением их к определенному положению в вертикальной структуре древостоя (ярус древостоя); определение состояния по визуальной балльной оценке кроны [2], развитию вторичных крон и замене ими первичных.

Подсчитывали состав, количество и расположение подроста всех пород, состав напочвенного

покрова. Объемы деревьев исчисляли исходя из сортиментных и товарных таблиц объемов деревьев по второму разряду высот [3].

Для определения состава и интенсивности проведенных лесохозяйственных мероприятий использовали материалы лесоустройства 1938 и 2012 г. [4, 5]. Полученные сведения позволили описать вертикальную структуру древостоев по вариациям происхождения и мерам формирования состава насаждений для получения выводов об участии дуба в составе древостоев с различными лесоводственными параметрами и различной интенсивностью лесохозяйственных уходов.

### Проведение эксперимента и обсуждение результатов

Экспериментальными исследованиями научных сотрудников ИЛАН РАН, проводящими свои работы в Теллермановском опытном лесничестве, и инженерами лесного хозяйства Теллермановского опытного лесничества определены прогрессирующие тенденции деградации деревьев дуба и трансформации дубовых древостоев в лиственные без участия дуба в составе насаждений [6–8]. Доказана невозможность получения дубового древостоя из порослевого возобновления дубовых пней, оставшихся после рубок спелых смешанных с дубом древостоев, описан процесс деградации первичных крон и замена их вторичными у деревьев дуба и других пород в составе древостоев. Определена насущная необ-

Т а б л и ц а 1

#### Характеристики дубовых и смешанных с дубом древостоев различного происхождения на постоянных пробных площадях

##### Characteristics of oak and oak mixed forest of different origin in permanent trial plots

Квартал Выделенная площадь	Лесоводственные характеристики древостоев								
	Происхождение Возраст дуба	Состав по запасу Состав по числу деревьев	Тип леса	Пол- нота	Бони- тет	Под- рост	Подле- сок	Покров	Мероприя- тия
15 1	Естественное 220–240	6Д2Кло1Яо1Лп + Клп, Вз 3Кло3Яс2Клп1Лп1Вз + Д	Дсн	0,2 0,7	II	Клп, Яс, Д, Клт	Лщ, Кло, Вз, Яс, бер	Сн, коп, ос.в, кр	Приисковая рубка XIX в
14 1	Естественное 80	4Я3Д2Кло1Лп + ВЗ 4Кло3Яс2Д1Лп + ВЗ	Дсн	0,5 0,7	III	Кло, Яс, Клп, Лп	Лщ, Кло, Клп, Рб	Сн, коп, ос.в, лан	2 прорежи- вания, 2 проходные рубки
60 2	Естественное 90	4Яс4Лп2Кл + Д + ВЗ 4Кл3Яс3Лп + Клп, Д, ВЗ	Дсн	0,7	II	Кло, Яс, Клп, Лп	Лщ, Яс, Кло, Клп	Сн, коп, ос.в, кр	2 прорежи- вания
5 2	Культурное 78	6Д3Я1Кл + Лп, ВЗ 4Д3 Яс2Кло1Лп + Клп, ВЗ	Дсн	0,7	III	Кло, Яс, Клп, Лп,	Лщ, Яс, бер, Кло, Клп	Сн, коп, ос.в, лан	Все рубки ухода

*Примечания:* Дсн — дубрава снытьевая; Кло — клен остролистный; Клп — клен полевой; Клт — клен татарский; сн — сныть; коп — копытен; ос.в — осока волосистая; кр — крапива; лан — ландыш; бер — бересклет бородавчатый; Яо — ясень обыкновенный; ВЗ — Вяз; Лп — липа; Д — дуб; Лщ — лещина; Я — ясень; Рб — рябина; Ил — ильм.

ходимость искусственного воспроизводства дубовых лесов на площадях рубок спелых древостоев, предложен интенсивный метод выращивания дубовых древостоев, обеспечивающий получение высококотоварных, высокополнотных дубовых насаждений различного назначения. Тем не менее процесс формирования вертикальной структуры древостоев различного происхождения требует более тщательного исследования. В табл. 1 представлены характеристики насаждений, послуживших объектом изучения.

Анализ древостоев по формуле запаса и по числу деревьев в составе насаждений (см. табл. 1) позволяет выделить два варианта формирования структуры древостоя в зависимости от происхождения: 1) древостой естественного коренного происхождения — от пней после проведенных рубок спелых древостоев; 2) древостой искусственного происхождения, созданный посевом желудей по площадям вырубок. В табл. 2 приведены результаты расчетов элементов структуры изучаемых древостоев по породному составу и ярусам древостоев: показатели количества объема и среднего диаметра деревьев по ярусам, а также средний ярус породы в древостое.

В кв. 15 дубовая часть древостоя естественного происхождения сохранилась еще с петровских времен. Состав других пород изменялся незначительно, и, по данным лесоустройства 1938 г. формула состава имела вид  $6Д2Ос2Яс + Лп, Кл$ . За последующие 70 лет осина полностью выпала. Важно также отметить, что древостои, на площадях рубок которых сформированы насаждения в кв. 14, 60 и 5, имели состав, аналогичный составу 1938 г.

В настоящее время старовозрастные дубы постепенно выпадают, но оставшиеся деревья дуба, входящие в первый ярус древостоя, имеют огромные размеры, достигающие в отдельных случаях 1,2...1,5 м в диаметре на высоте 1,3 м, высоты 30...32 м и запаса до 15 м<sup>3</sup>. Несколько таких деревьев выводят дуб на первое место в формуле древостоя по запасу и составляют первый ярус древостоя.

Деревья других пород, превосходящие дуб по количеству (ясень, клен остролистный и полевой, липа, вяз), также могут достигать первого яруса, но по запасу они значительно уступают немногочисленным деревьям дуба. Этих деревьев больше в подчиненных ярусах, в сумме по запасу дуб превосходит их почти в 1,5 раза, что отражено в формуле состава (см. табл. 1).

Древостой в кв. 5 представляет собой культуры дуба, созданные посевом желудей в 1938 г. В насаждении проводился полный цикл мероприятий по уходу (осветление, прочистки, прореживания, проходные рубки) для получения хозяйственно

ценной дубовой древесины. В послевоенные годы лесохозяйственные работы проводились с особой тщательностью, в результате чего сформирован дубовый древостой с первым ярусом из дуба, составляющего по запасу 6 единиц в формуле состава древостоя и с количеством стволов 236 шт. на 1 га только в первом ярусе насаждения. Лиственные породы по запасу только в плюсе, но по числу деревьев они в формуле состава превосходят дуб в 2,5 раза (см. табл. 2). Таким образом, при тщательном соблюдении правил ухода за созданными культурами дуба можно добиться выращивания почти чистых дубовых древостоев с хорошими лесоводственными и хозяйственными показателями.

Древостой в кв. 14 и 60 возникли естественным путем на площадях рубок спелых смешанных с дубом древостоев. Древостой в кв. 14 создавался в 1910 г. по методу Г.А. Корнаковского [9] из семенного и порослевого возобновления после рубки древостоя от пней дуба со значительным его участием в составе насаждения. За порослевым возобновлением проводился не полный по составу работ уход: в 1951 и 1958 гг. проведены два прореживания, в 1964 и 2008 гг. — проходные рубки. В 1938 г. в возрасте 28 лет формула по массе древостоя имела вид  $5Д2Ил1Лп1Яс$ . В настоящее время сформирован смешанный с дубом древостой с близким по запасу и числу деревьев составом в формуле древостоя (см. табл. 1). В дальнейшем с увеличением возраста древостоя дуб должен постепенно увеличивать свое присутствие в формуле состава, а по числу деревьев оставаться в прежнем количестве, при этом возможно уменьшение его количества за счет естественного отпада. Таким образом, опыт Корнаковского показал, что при значительном участии дуба в составе вырубаемого спелого древостоя и ухода за естественным возобновлением, в том числе от пней на лесосеке, можно сформировать дубовое насаждение со значительным присутствием дуба в составе древостоя. Однако метод Корнаковского, наряду с положительным экономическим эффектом (исключаются дорогостоящие посадки или посевы), имеет и существенные недостатки. Повторяющиеся ротации получения естественного дубового древостоя через порослевое возобновление снижают производительность последующих поколений дубового леса, что приводит в постепенной деградации дубовой формации. Можно также отметить отсутствие стабильного плодоношения дубрав в последние десятилетия — даже в урожайные годы в нагорной дубраве в сомкнутом насаждении плодоносят лишь единичные деревья.

Древостой в кв. 60 сформировался естественным путем на площади вырубки спелого древо-

Таблица 2

**Распределение некоторых таксационных показателей древесных пород по ярусам изучаемых древостоев (все показатели рассчитаны для участков пробных площадей)**  
**The distribution of some taxation indicators of tree species within the tiers of the studied stands**

Но- мер квар- тала: проб- ная пло- щадь S, га	По- ка- за- тель	Древесная порода																							
		Дуб черешчатый				Ясень обыкновенный				Клен остролистный				Клен полевой				Липа				Вяз гладкий			
		Ярус																							
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Кв. 15 в. 1; S = 0,2	Кд	5	3	—	1	14	14	11	—	12	9	14	16	—	5	12	15	5	5	1	1	—	—	4	7
	Ид	72,2	2,2	—	0,03	10,7	3,6	2,5	—	16,9	2,2	0,8	0,6	—	2,3	1,1	0,4	6,3	3,2	0,06	0,04	—	—	0,3	0,3
	Дс	114,0	27,0	—	8,0	29,0	18,4	14,0	—	40,6	18,0	10,0	9,8	—	24,6	14,3	8,3	38,8	27,2	14,0	10,0	—	—	12,7	9,4
	Яс	1,4				1,9				2,7				3,3				1,8				3,6			
Кв. 14 в. 1; S = 0,5	Кд	41	5	—	—	59	22	—	—	32	63	18	7	—	—	—	—	19	20	—	—	—	10	5	—
	Ид	59,6	2,5	—	—	60,5	8,6	—	—	20,3	23,3	1,2	0,2	—	—	—	—	13,9	7,1	—	—	—	2,9	0,9	—
	Дс	36,7	22,8	—	—	27,6	18,2	—	—	27,3	14,8	10,8	8,0	—	—	—	—	31,3	21,2	—	—	—	21,4	16,4	—
	Яс	1,1				1,3				2,0				—				1,5				3,0			
Кв. 60 в. 2; S = 0,3	Кд	1	—	—	—	43	8	1	1	8	22	20	13	1	—	4	7	34	13	6	—	—	—	—	—
	Ид	2,1	—	—	—	45,4	4,9	0,08	0,03	6,9	12,7	3,4	0,4	0,7	—	0,6	0,2	41,6	8,5	1,7	—	—	—	—	—
	Дс	44,0	—	—	—	33,3	19,0	12,0	8,0	31,0	25,6	15,4	8,3	34,0	—	15,5	8,3	36,1	27,2	18,7	—	—	—	—	—
	Яс	1,0				1,2				2,6				3,4				1,5				—			
Кв. 5 в. 2; S = 0,16	Кд	39	19	11	2	23	14	12	4	1	4	7	22	—	1	—	14	—	6	11	3	—	4	2	3
	Ид	38,3	6,2	1,5	0,14	16,4	3,5	1,1	0,2	1,9	0,6	0,6	0,7	—	0,3	—	0,59	—	1,8	1,5	0,3	—	1,2	0,3	0,13
	Дс	30,7	19,0	13,3	10,5	27,0	16,4	13,0	10,5	43,0	16,3	12,0	8,5	—	20,0	—	10,0	—	19,3	14,0	10,6	—	18,6	14,0	8,0
	Яс	1,6				1,9				2,2				3,8				2,8				2,9			

Примечания: Кд — количество деревьев по ярусам; Ид — объемы деревьев по ярусам; Дс — средний диаметр деревьев по ярусам; Яс — средний ярус породы в древостое.

стоя с незначительным участием дуба в составе, без каких-либо уходов за порослевым возобновлением дуба от пней с двумя прореживаниями. В настоящее время приспевающий древостой оформился в листовенное насаждение без участия дуба. Породный состав как по запасу, так и по числу деревьев практически выровнялся. Выжил единственный дуб, расположенный в хорошо освещенном месте возле дороги. Попытка формирования древостоя без проведения каких-либо мероприятий по уходу за порослевым естественным возобновлением от пней (по варианту кв. 60) наглядно показывает невозможность получения дубового древостоя естественным путем на вырубках спелых лесов без создания на них искусственных древостоев с проведением всего цикла лесохозяйственных уходов за создаваемыми культурами.

Анализ данных средних значений диаметров деревьев всех пород в древостоях по ярусам показывает превосходство средних показателей диаметра дуба над всеми породами во всех выбранных для анализа древостоях.

Из данных табл. 2 следует превосходство деревьев дуба черешчатого по показаниям среднего яруса во всех изучаемых древостоях как естественного, так и искусственного происхождения. Далее в возрастающем порядке по абсолютным

цифровым значениям, но в порядке снижения ярусности в древостоях идут ясень обыкновенный, липа сердцевидная, клен остролистный, вяз гладкий и клен полевой.

В Теллермановском опытном лесничестве ИЛАН РАН разработан и с успехом применяется интенсивный метод создания культур дуба путем посева желудей с сокращенным сроком рубок ухода. В результате получают дубовый древостой с участием до 10 единиц дуба в формуле состава, а к возрасту спелости — высокополнотные, высокотоварные дубовые насаждения [7, 10]. Данный метод представляет собой непрерывный цикл агротехнических и лесохозяйственных мер ухода без разделения их на виды ухода до смыкания дубового полога к возрасту 15 лет. Этот цикл включает 6 этапов:

1. Первый агротехнический уход проводится через две недели после посева желудей.

2. Сразу по окончании агроухода проводится сплошной механизированный уход (мехуход) в междурядьях.

3. В это же лето комплекс работ проводится еще дважды.

4. В последующие три года в течение вегетационного периода проводится по три агроухода в рядах и по три механизированных ухода в междурядьях.

5. В следующие четыре года агро- и мехуходы проводятся дважды в сезон вегетации.

6. Начиная с девятого года посадки в первые три года механизированный уход в междурядьях проводится один раз в сезон, в последующие годы — через год.

К 15–16 годам роста культур происходит их смыкание не только в рядах, но и в междурядьях. Формируются молодняки с 8–10 единицами дуба в составе, в которых никакие сопутствующие породы не могут с ним конкурировать.

## Выводы

В регионах коренного произрастания дуба в лесах дубовых формаций с помощью различных методов ведения лесного хозяйства воспроизводят леса с различным участием дуба в составе создаваемых древостоев.

При воспроизводстве древостоев естественным путем от пней, оставшихся на лесосеках после проведенных рубок спелых древостоев, и при неполных по составу рубках ухода в процессе роста древостоев формируются листовенные насаждения с незначительным по числу деревьев участием дуба в формуле создаваемого древостоя или без его участия, а, напротив, с большим участием по массе и числу деревьев, других пород входящих в первый ярус древостоя.

При создании искусственных древостоев с полным набором рубок ухода в процессе роста древостоев можно сформировать дубовые насаждения со значительным по массе и числу деревьев участием дуба в составе древостоев, отвечающие статусу дубовых формаций, с довольно большой вариабельностью участия дуба и ясеня по ярусам древостоя и деревьями других пород в подчиненных ярусах.

Применяя метод Корнаковского — создание дубовых древостоев от пней прошлых рубок с тщательным проведением всех приемов ухода, — можно получить дубовый древостой со значительным участием дуба в составе первого яруса наряду с другими породами (ясенем и кленом).

В Теллермановском опытном лесничестве ИЛАН РАН разработан и с успехом использу-

ется интенсивный метод создания культур дуба путем желудей с сокращенным и непрерывным циклом агротехнических и лесохозяйственных мер ухода без разделения их на виды ухода до смыкания дубового полога к возрасту 15 лет. Предлагаемый метод позволяет гарантированно получать к возрасту спелости высокополнотные, высокотоварные дубовые насаждения с участием до 10 единиц дуба в составе древостоев.

## Список литературы

- [1] Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. М.: Наука, 1973. 203 с.
- [2] Правила санитарной безопасности в лесах. Утверждены Приказом Минприроды России от 24.12.2013. № 613.
- [3] Анучин Н.П. Сортиментные и товарные таблицы для лесов центральных и южных районов Европейской части РСФСР. М.: ВНИИЛМ, 1987. 128 с.
- [4] Таксационное описание Борисоглебского лесничества // Материалы лесоустройства. Воронеж: Управление лесоохраны и лесонасаждений Воронежско-Курское. 1938. 244 с.
- [5] Сидоренко С.И. Таксационное описание Теллермановского опытного участкового лесничества ИЛАН РАН // Матер. лесоустройства: в 2 т. Т. 2. Воронеж: Воронеж-леспроект, 2012. 228 с.
- [6] Стороженко В.Г., Коткова В.М., Чеботарев П.А. Динамика трансформации коренных дубрав и дереворазрушающие базидиальные грибы Теллермановского леса (Воронежская область) // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2014. № 4. Т. 18. С. 77–85.
- [7] Чеботарев П.А., Чеботарева В.В. Формирование искусственных дубовых древостоев в регионах лесостепной зоны Европейской части России // Матер. межрегиональной науч. конф. «Флора и растительность Центрального Черноземья». Курский государственный ун-т, 05.04.2014. Курск, 2014. С. 174–179.
- [8] Чеботарев П.А., Чеботарева В.В., Стороженко В.Г. Структура и состояние древостоев в дубравах Теллермановского опытного лесничества // Лесоведение, 2016. № 5. С. 375–382.
- [9] Корнаковский Г.А. О возобновлении дубовых насаждений в Теллермановской роще // Лесопромышленный вестник, 1904. № 43, 44, 46. С. 649–707.
- [10] Чеботарева В.В., Чеботарев П.А., Стороженко В.Г. Деградация дубовых лесов России и пути их восстановления // Матер. VI Междунар. конф. «21 век: фундаментальная наука и технологии», North Charleston: CreateSpace, USA. Т. 1. 2015. С. 1–4.

## Сведения об авторах

**Стороженко Владимир Григорьевич** — д-р биол. наук, Институт лесоведения РАН, lesoved@mail.ru

**Чеботарева Валентина Васильевна** — директор филиала Института лесоведения РАН «Теллермановское опытное лесничество», chebotareva@ilan.ras.ru

**Чеботарев Павел Анатольевич** — заместитель директора филиала Института лесоведения РАН «Теллермановское опытное лесничество», tol@icmail.ru

Статья поступила в редакцию 13.04.2017 г.



# STRUCTURE OF OAK STANDS OF NATURAL AND MAN-PLANTED ORIGIN AFTER DIFFERENT METHODS OF TENDING IN PROCESSES OF THEIR FORMATION IN THE FOREST STEPPE ZONE (CASE STUDY OF STANDS IN THE TERRITORY OF TELLERMAN EXPERIMENTAL FOREST DISTRICT UNDER THE INSTITUTE OF FOREST SCIENCES, RAS)

V.G. Storozhenko<sup>1</sup>, V.V. Chebotareva<sup>2</sup>, P.A. Chebotarev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Forest Science Institute RAS, 141030, Moscow prov., Odintsovski reg., vil. Uspensroye, str. Sovetsraya, 21

<sup>2</sup> Branch of Forest Science Institute RAS of Tellerman experimental forest service, 397206, Voronez prov., Gribovski reg., set. Tellermanovski, str. Kornakovskogo, 12

lesoved@mail.ru

The aim of work is to study a vertical structure of oak stands and forests mixed with oak species located in the zone of Southern forest steppe. The research was made in the highland conditions which are native for oak. Studies of oak plantations of different origins both natural and man-planted ones were conducted after silvicultural operations of different intensity and on sites where no silvicultural work was conducted. There are four permanent test sites in the indigenous high-land oak forests of Tellerman experimental forest district (Voronezh region) under the Institute of Forest Sciences, Russian Academy of Sciences: indigenous forest stand of natural origin where selective fellings (the oak age is 280 years old); coppice forest where no silvicultural works were conducted (the oak age is 90 years old); coppice forest where an incomplete number of improvement fellings were done (the oak age is 80 years old); oak species growing on the site where a complete number of improvement fellings were done (the oak age is 78 years old). The analysis of forests silvicultural characteristics has been done. The author estimated indices of trees quantity and volumes ranged by stands stories. In the territory of Quarter 15 the oak trees of 240–280 years old make the first layer and though small in number they dominate in their volume. The trees stands located in the territory of Quarter 60, which was formed in the clear cutting site out of natural coppice shoots and where improvement felling was not conducted, do not have oak trees in its composition. Trees stands located in the territory of Quarter 14 are of the same origin but undergone improvement felling to manage oak coppice and have up to six oak trees in the first layer composition. Oak species of Quarter 5, which undergone the full cycle of improvement fellings, may have up to ten oak trees in the first layer composition. In order to preserve forests with oak trees domination as native species in the forest steppe area, it is required to form man-made plantations using an intensive technology of the shortened term of plantations formation. This technology was developed at Tellerman experimental forest district under the Institute of Forest Sciences, Russian Academy of Sciences.

**Keywords:** forest steppe zone, oak trees stands, vertical structure of stands, improvement fellings, regeneration of oak forests

**Suggested citation:** Storozhenko V.G., Chebotareva V.V., Chebotarev P.A. *Struktura drevostoev duba estestvennogo i iskusstvennogo protikhzhdeniya pri razlichnykh metodakh ukhoda v protsesse ikh formirovaniya v zone lesostepi (na primere drevostoev Tellermanovskogo opytного lesnichestva ILAN RAN)* [Structure of oak stands of natural and man-planted Origin after different methods of tending in processes of their formation in the forest steppe zone (case study of stands on the territory of Tellerman experimental forest district under the institute of forest sciences, RAS)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 33–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-33-38

## References

- [1] Kurnayev S.F. *Lesorastitelnoye rayonirovaniye SSSR* [The areas of grow forests]. Moscow: Nauka, 1973, 203 p.
- [2] *Pravila sanitarnoy bezopasnosti v lesash* [Regulations of sanitary security in forests]. Prikaz Minpriorodi Rossii ot 24.12.2013, 23 p.
- [3] Anuchin N.P., Uspenskiy V.V., Moiseenko F.P., Agliullin F.B., Nikitin K.E., Sokolov P.A., Gurov A.F. *Sortimentniye i tovarniye tablitsi dlya lesov tsentralnykh i juzhnykh rayonov Evropeyskoy chasty RSFSR* [Assortment and commercial tables for the forests of central and south regions of European part of RSFSR]. Moscow, 1987, 128 p.
- [4] *Tsaksionnoye opisaniye Borisoglebskogo lesnichestva* [Forest mensurational description of Borisoglebsk forest district] Materiali lesoustroystva. Upravlenie lesokhrany i lesonasazhdeniy Voronezhskoe-Kurskoe, 1938, 244 p.
- [5] *Sidorenko S.I. Tsaksionnoye opisaniye Tellermanovskogo opitного lesnichestva ILAN RAN* [Forest mensurational description of Tellerman experimental forest district]. Materiali lesoustroystva v 2 t. Voronezh: Voronezhlesproekt Publ., 2012, t. 2, 228 p.
- [6] Storozhenko V.G., Kotkova V.M., Chebotarev P.A. *Dinamika transformatsii korennykh dubrav i derevorazrushayushie bazidialnie gribi Tellermanovskogo lesa (Voronezhskaya oblast)*. [Dynamics of the indigenous oak forests' transformation and wood-destroying fungi of the Tellerman forest (Voronezh region)]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2014, no. 4, t. 18, pp. 77–85.
- [7] Chebotarev P.A., Chebotareva V.V. *Formirovaniye iskusstvennykh dubovykh drevostoev v regionakh lesostepnoy zoni Evropeyskoy chasty Rossii* [Forming of artificial oak forests in to regions forest-steppe zone of European part of Russia]. Materials of science Conf. «Flora and vegetation of Central Chernozem zone». Kursk, 2014, pp. 174–179.
- [8] Chebotareva V.V., Chebotarev P.A., Storozhenko V.G. *Struktura i sostoyaniye drevostoyev v dubravakh Tellermanovskogo opitного lesnichestva* [The structure and condition of forests of Tellerman experimental forestry]. Lesovedeniye, 2016, no. 5, pp. 375–382.
- [9] Kornakovskiy G.A. *O vozobnovlenii dubovykh nasazhdeniy v Tellermanovskoy rosche* [About of restoration culture of oak in Tellerman forest]. Lesopromishlenniy vestnik, 1904, no. 43, 44, 46, pp. 649–707.
- [10] Chebotareva V.V., Chebotarev P.A., Storozhenko V.G. *Degradatsiya dubovykh lesov Rossii i puti ikh vosstanovleniya* [Degradation of oak forests of Russia and ways their restoration]. VI International Conf. «21 century: fundamental science and technology», North Charlston, USA, Publish Centr «Akademicheskii», 2015, t. 1, pp. 1–4.

## Author's information

**Storozhenko Vladimir Grigoryevich** — Dr. Sci. (Biol.), Forest Science Institute RAS, lesoved@mail.ru

**Chebotareva Valentina Vasilyevna** — Director of Branch of Forest Science Institute RAS Tellerman Experimental Forest Service, chebotareva@ilan.ras.ru.

**Chebotarev Pavel Anatolyevich** — Assistance of Director Branch of Forest Science Institute RAS of Tellerman Experimental Forest Service, tol@icmail.ru

Received 13.04.2017

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЕСНОГО ФОНДА НА АРЕНДОВАННЫХ УЧАСТКАХ ЛЕСОВ

Ю.И. Перепечина<sup>1</sup>, О.И. Глушенков<sup>2</sup>, И.С. Глушенков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Брянский государственный инженерно-технологический университет, 241037, г. Брянск, пр-т Станке Димитрова, д. 3

<sup>2</sup> Филиал «Заплеспроект» ФГУП «Рослесифорг», 241021, г. Брянск, ул. Никитина, д. 14

mail@bgita.ru

Приведены сведения о динамике основных характеристик лесов за 1983–2013 гг. Проанализированы изменения в результате хозяйственной деятельности арендаторов в 2003–2013 гг. Сделан обоснованный вывод об улучшении породной структуры лесов за счет целенаправленного воспроизводства лесов, проведен анализ использования расчетной лесосеки.

**Ключевые слова:** лесоустройство, арендатор, лесные культуры сосны, лесные культуры ели, лесные культуры дуба, дубовые древостои, лесоустроительная инструкция, запас древесины, расчетная лесосека, естественное возобновление

**Ссылка для цитирования:** Перепечина Ю.И., Глушенков О.И., Глушенков И.С. Анализ динамики основных показателей лесного фонда на арендованных участках лесов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 39–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-39-44

При регулярном плановом лесоустройстве до введения в действие Лесного кодекса 2006 г. регулярно проводился анализ ведения лесного хозяйства за прошедший ревизионный период (10–15 лет) [1]. Основой анализа являлось сопоставление основных характеристик лесов по данным прошлого и настоящего лесоустройства. В проекте организации и ведения лесного хозяйства, который разрабатывали по результатам проведенного лесоустройства, этому вопросу посвящался специальный раздел.

При проведении планового государственного лесоустройства в характеристику лесного фонда включался раздел «Состояние и динамика лесного фонда» [2], в котором рассматривались распределение по категориям земель и породная структура — основные показатели, характеризующие уровень ведения лесного хозяйства. Аналогичный анализ имело место при авторском надзоре. Плановое государственное лесоустройство перестало проводиться в связи с вводом в действие Лесного кодекса (2006 г.) [1]. В настоящее время таксация лесов осуществляется на отдельных лесных участках за счет средств арендаторов, поэтому проанализировать эффективность ведения лесного хозяйства не представляется возможным.

В 2013 г. по заказам арендаторов филиал «Заплеспроект» ФГУП «Рослесифорг» провел таксацию лесов и разработал проект освоения лесов в Брасовском лесничестве Брянской области на территории площадью 34,8 тыс. га.

Лесным законодательством предусмотрено, что арендатор должен надлежащим образом исполнять договор аренды лесного участка. По истечении срока действия договора арендатор имеет преимущественное право на заключение договора аренды на новый срок (Лесной кодекс, ст. 72, п. 5).

Однако в законодательных и нормативных документах нет критериев, по которым определяется «надлежащее исполнение договора аренды». По нашему мнению, основными критериями при оценке работы арендатора на лесном участке являются улучшение распределения лесного фонда по категориям земель и улучшение породной структуры лесов. Срок аренды анализируемых лесных участков истекает в 2018 г., и арендодателю придется решать проблему «надлежащего исполнения договора аренды».

До введения в действие Лесного кодекса как управленческие, так и хозяйственные функции (охрана и защита лесов, воспроизводство лесов) выполнял Брасовский лесхоз. С 2008 г. мероприятия по охране, защите и воспроизводству лесов выполнялись арендаторами наряду с заготовкой древесины. Таким образом, первую половину ревизионного периода (2003–2007 гг.) мероприятия по ведению лесного хозяйства осуществляло ФГУ «Брасовский лесхоз», а вторую половину (2008–2013 гг.) — арендаторы. Перечень изменений площади лесного фонда по основным категориям земель за 1993–2013 гг. приведено в табл. 1.

### Цель работы

Сравним основные характеристики лесов по данным лесоустройства 2003 и 2013 г. Анализируя динамику земель лесного фонда по категориям, следует отметить, что их распределение осталось стабильным с небольшими положительными тенденциями — в частности, доля лесных культур увеличилась с 26,7 % в 1993 г. до 32 % в 2013 г. Площадь несомкнувшихся лесных культур составляет 3 % от общей площади, площадь вырубок уменьшилась с 0,8 до 0,6 %.

Т а б л и ц а 1

**Изменения площади лесного фонда по основным категориям земель**  
**Change in the area of the forest fund by main categories of land**

Категория земель	1993 г.		2003 г.		2013 г.	
	Площадь, тыс. га	%	Площадь, тыс. га	%	Площадь, тыс. га	%
Общая площадь	34,0	100	34,3	100	35,0	100
Лесные земли	32,4	95,3	32,9	95,8	33,6	96,0
Покрытые лесной растительностью, в том числе:	30,8	90,5	31,4	91,7	32,2	92,0
лесные культуры	9,1	26,7	10,4	30,5	11,2	32,0
несомкнувшиеся лесные культуры	1,2	3,5	1,0	3,0	1,1	3,1
Не покрытые лесной растительностью, в том числе:	0,4	1,2	0,4	1,1	0,3	0,8
вырубки	0,3	0,8	0,3	0,9	0,2	0,6
Нелесные земли	1,5	4,7	1,4	4,2	1,4	4,0

Научный интерес представляет динамика породной структуры лесов, так как это — показатель целенаправленности ведения лесного хозяйства. По имеющимся в «Заплеспроекте» архивных данных проведен анализ динамики породной структуры лесов за 30 лет (1983–2013 гг.) (табл. 2).

### Результаты и обсуждение

Анализ показывает, что доля сосняков в лесном фонде остается достаточно стабильной, сосна занимает около 50 % покрытых лесной растительностью земель с незначительными колебаниями.

Доля ельников значительно возросла до 2003 г. (с 2,3 до 6,2 %), но к 2013 г. снизилась до 5,3 %. Основная причина — поражение ельников короедом-типографом после экстремальной засухи 2010 г.

Это еще раз подтверждает ошибочность увлечения культурами ели. В условиях Брасовского лесничества ель находится на южной границе своего естественного ареала. Она здесь неустойчива при ослаблении и подвергается поражению вредителями. Одной из особенностей ели является наличие поверхностной корневой системы, вследствие чего дерево резко ослабевает в засушливые периоды. О негативных явлениях, связанных с увлечением создания лесных культур ели, говорилось еще в 1994 г. А.С. Тихонов отмечал, что ель за р. Навлей должна рассматриваться как порода риска, погибающая от засух [3].

Сосняки являются более устойчивыми и более производительными, древостоями средней класс бонитета у сосняков Ia,4, у ельников I,3. По техни-

Т а б л и ц а 2

**Динамика породной структуры лесов**  
**Dynamics of the tree structure of forests**

Порода	1983 г.		1993 г.		2003 г.		2013 г.	
	Площадь, тыс. га	%	Площадь, тыс. га	%	Площадь, тыс. га	%	Площадь, тыс. га	%
Сосна	15,7	51,4	15,2	49,4	15,4	48,9	15,8	49,2
Ель	0,7	2,3	1,5	4,9	1,9	6,2	1,7	5,3
Лиственница	0,03	—	0,02	—	0,02	—	—	—
Итого хвойных	16,43	53,7	16,72	54,3	17,32	55,1	17,5	54,5
Дуб высокоствольный	0,6	2,0	1,0	3,2	2,6	8,4	2,7	8,4
Дуб низкоствольный	5,4	17,7	4,7	15,3	2,7	8,6	1,9	5,9
Итого дуба	6,0	19,7	5,7	18,5	5,3	17,0	4,6	14,3
Ясень	0,004	—	0,004	—	0,01	—	0,01	—
Клен	0,003	—	0,004	—	0,04	0,2	0,190	0,6
Итого твердолиственных	6,007	19,7	5,708	18,5	5,35	17,2	4,8	14,9
Береза	4,2	13,7	4,4	14,3	5,0	15,8	5,8	18,1
Осина	3,5	11,5	3,4	11,1	3,2	10,2	3,4	10,6
Ольха черная	0,4	1,3	0,5	1,6	0,5	1,6	0,5	1,6
Липа	0,01	0,03	0,02	0,1	0,02	0,06	0,05	0,16
Ива	0,01	0,03	0,02	0,1	0,03	0,09	0,03	0,09
Итого мягколиственных	8,12	26,6	8,34	27,2	8,75	27,7	9,78	30,6
<b>Всего</b>	<b>30,56</b>	<b>100</b>	<b>30,77</b>	<b>100</b>	<b>31,42</b>	<b>100</b>	<b>32,08</b>	<b>100</b>

ческим качествам древесина сосны ценится выше древесины ели. С учетом этих доводов в условиях Брасовского лесничества при лесовосстановлении следует отдавать предпочтение культурам сосны.

Значительно изменились площади дубовых древостоев. За период с 1983 г. они сократилась на одну треть: с 6084 га (19,7 %) в 1983 г. до 4551 га (14,3 %) в 2013 г. Площадь древостоев дуба высокоствольного возросла с 642 га (2,0 %) в 1983 г. до 2642 га (8,4 %) в 2003 г. и оставалась стабильной до 2013 г., а дуба низкоствольного — уменьшилась: в 1983 г. 5439 га (17,7 %), в 1993 г. 4672 га (15,3 %), 2003 г. в 2689 га (8,6 %), в 2013 г. 1855 га (5,9 %).

Таксация лесов в разные годы проводилась по разным лесоустроительным инструкциям: в 1983 г. по инструкции 1964 г. [4], в 1993 г. по инструкции 1985 г. [5], в 2003 г. по инструкции 1994 г. [6], в 2013 г. по инструкции 2011 г. [7].

Правила таксации дубрав несколько изменялись: по инструкции [4] для древостоев дуба не делали исключений, и таксировали их по общим правилам. В соответствии с лесоустроительной инструкцией [5] для древостоев дуба был определен отдельный порядок таксации. В [6] появились рекомендации по отнесению дубрав к высокоствольному и низкоствольному хозяйствам. Согласно лесоустроительной инструкции [7], дуб подразделяют не на высокоствольный и низкоствольный, а на древостной семенного и порослевого происхождения. При таксации древостоев дуба порослевого его считают преобладающим в насаждении при наличии не менее 5 единиц в составе (т. е. 50 % запаса), а для дуба семенного происхождения прописаны отдельные правила.

Приведенные данные показывают, что инструкции [5–7] при отнесении насаждений к дубнякам понижают его участие: до 2 единиц в молодняках, до 3 единиц в средневозрастных и приспевающих насаждениях, назначаемых в рубки ухода, и до 3 единиц во всех насаждениях дубравных и судубравных типов леса (С<sub>2</sub>–С<sub>3</sub>, Д<sub>2</sub>–Д<sub>3</sub>).

Общая ситуация не только в Брасовском лесничестве, но и в целом в Брянской области имеется тенденция к уменьшению площади дубрав. В табл. 3 приведены данные о площади дубрав начиная с 1962 г.

Основная причина уменьшение доли дубрав в составе лесов — это недостаточные мероприятия по их воспроизводству. Воспроизводство дубрав требует более сложной агротехники выращивания сеянцев. Посев желудями связан с риском их поедания диким кабаном.

С научной точки зрения большого внимания требуют созданные культуры дуба при их выращивании. Они быстро заглушаются мягколистными породами (осина, липа) и подлесочными породами (лещина, ива и др.). Уход требуется проводить чаще, не оголяя площадь вокруг дуба, руководствуясь старым изречением лесоводов: «Дуб необходимо выращивать в шубе, но с открытой головой». Тихонов является приверженцем восстановления дубрав за счет естественного самосева, но это требует высокой квалификации лесных специалистов и увеличения площади выборочных рубок [3].

Площадь дубрав, по данным государственной инвентаризации лесов (ГИЛ), составляет 50,2 тыс. га (подразделение дубрав на высокоствольные и низкоствольные методикой не предусматривалось). При этом ГИЛ проводилась по лесам на площади 1156,5 тыс. га. В 2008 г. в состав лесничеств были приняты «Сельские леса». Лесоустройство 1962–2003 гг. проводилось в лесах лесного фонда на площади ≈735 тыс. га.

По данным лесоустройства 2003 г., доля типов лесорастительных условий (ТЛУ) для выращивания дуба в Брасовском лесничестве составляет: С<sub>2</sub>–С<sub>3</sub> — 47,6 %, Д<sub>2</sub>–Д<sub>3</sub> — 10,9 %. При этом в ТЛУ Д<sub>2</sub>–Д<sub>3</sub> осинники занимают 1758 га, березняки — 1092 га, в ТЛУ С<sub>2</sub>–С<sub>3</sub> березняки занимают 3890 га, осинники — 3054 га.

Анализ динамики породной структуры лесов Брасовского лесничества позволяет сделать вывод о том, что площадь древостоев дуба низкоствольного уменьшилась с 2003 по 2013 г. на 834 га. После рубки древостоев дуба они заросли кленовыми молодняками порослевого происхождения (146 га), осинниками (276 га), на остальных 422 га посажены культуры хвойных пород.

Анализ динамики общих запасов древесины показывает, что происходит устойчивый прирост запасов хвойных пород: в 1993–2013 г. на 15 %,

Т а б л и ц а 3

**Динамика площади дубрав в лесном фонде Брянской области по данным таксаций разных лет**  
**Dynamics of the oak forest area for the forest fund in Bryansk region**

Порода	1962 г.		1974 г.		1983 г.		1993 г.		2003 г.		2010 г.	
	Площадь, тыс. га	%	Площадь, тыс. га	%	Площадь, тыс. га	%	Площадь, тыс. га	%	Площадь, тыс. га	%	Площадь, тыс. га	%
Дуб высокоствольный	22,1	3	22,1	4	26,5	4	28,6	4	32,2	4	—	—
Дуб низкоствольный	49,1	7	40,0	5	21,7	3	15,3	2	8,8	1	—	—
Итого дубрав	71,2	10	62,1	9	48,2	7	43,9	6	41,0	5	50,2	6



в 2003–2013 г. на 5,2 %; незначительно снизился запас твердолиственных пород: в 1993–2013 г. на 2,1 %, в 2003–2013 г. на 2,8 %; увеличился запас мягколиственных пород: в 1993–2013 г. на 21,8 %, в 2003–2013 г. на 9,4 %. Общий запас в 1993–2013 г. увеличился на 13,5 %, в 2003–2013 г. на 5,0 % (табл. 4).

Т а б л и ц а 4  
Динамика запасов древесины в лесах  
Брасовского лесничества по данным  
лесоустройств разных лет  
Dynamics of timber reserves in the forests  
of the Brasov Forestry

Группа пород	1993 г.		2003 г.		2013 г.	
	Запас, тыс. м <sup>3</sup>	%	Запас, тыс. м <sup>3</sup>	%	Запас, тыс. м <sup>3</sup>	%
Хвойные	4306,4	62,7	4691,7	63,2	4933,8	63,3
Твердолиственные	1074,4	15,7	1082,6	14,6	1052,2	13,5
Мягколиственные	1483,3	21,6	1651,8	22,2	1807,2	23,2
Итого	6864,1	100	7426,1	100	7793,2	100

В табл. 5 приведены сведения о динамике запаса и площади спелых и перестойных насаждений за период 1993–2013 гг.

Т а б л и ц а 5  
Динамика площади и запаса спелых  
и перестойных насаждений  
Dynamics of stock and area of mature and overmature  
plantations area

Группа пород	1993 г.		2003 г.		2013 г.	
	Площадь, тыс. га	Запас, тыс. м <sup>3</sup>	Площадь, тыс. га	Запас, тыс. м <sup>3</sup>	Площадь, тыс. га	Запас, тыс. м <sup>3</sup>
Хвойные	1,27	421,6	1,35	468,5	2,13	737,9
Твердолиственные	1,86	420,9	1,61	366,3	1,32	301,6
Мягколиственные	4,40	630,8	3,55	908,9	3,74	957,6
Итого	7,53	1473,3	6,51	1743,7	6,03	1997,1

Наиболее значимый показатель для лесопользователей (арендаторов) — это возможный объем пользования древесиной (расчетная лесосека) (табл. 6).

Расчетные лесосеки по арендованным участкам определялись по единой методике [8]. Согласно лесохозяйственному регламенту, расчетная лесосека при рубке спелых и перестойных насаждений составляет 54,6 тыс. м<sup>3</sup>, в том числе по хвойным породам 18,7 тыс. м<sup>3</sup>. При анализе установлено, что расчетные лесосеки по хвойным породам имеют устойчивую тенденцию к росту: за период 1993–2013 гг. их объем увеличился в 1,9 раза, за 2003–2013 гг. — в 2,2 раза. По прогно-

Т а б л и ц а 6  
Расчетные лесосеки по годам лесоустройства,  
тыс. м<sup>3</sup>  
Estimated cuttings by years of forest management,  
thousand m<sup>3</sup>

Группа пород	1993 г.		2003 г.		2013 г.		Прогноз на 2023 г.
	Лик-вид	Дело-вая	Лик-вид	Дело-вая	Лик-вид	Дело-вая	
Хвойные	18,6	17,1	16,0	14,7	34,8	31,9	42,4
Твердолиственные	14,2	9,7	12,9	8,8	6,5	4,4	11,1
Мягколиственные	34,6	16,6	35,9	17,2	27,0	13,0	29,5
Итого	67,4	43,4	64,8	40,7	68,3	49,3	83,0

зам на период 2023–2033 гг., расчетная лесосека по хвойным породам составит 42,4 тыс. га и по сравнению с 2013 г. возрастет на 22 %. Расчетная лесосека по твердолиственным породам снижается: в 1993–2013 гг. объем уменьшился в 2,2 раза, в 2003–2013 гг. — в 2 раза. Снижается и объем пользования по мягколиственным породам: в 1993–2013 гг. на 22 %, в 2003–2013 гг. на 25 %.

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

— пользование древесиной находится в пределах расчетной лесосеки;

— уровень ведения лесного хозяйства (проведение мероприятий по охране, защите, воспроизводству лесов) вполне удовлетворительный: породная структура лесов остается стабильной за исключением древостоев дуба низкоствольного, площадь которых уменьшается. На вырубаемых площадях создаются культуры хвойных пород, частично (на 50 %) они возобновляются мягколиственными породами. Но это общая тенденция по лесам Брянской и смежных областей;

— площадь дуба высокоствольного незначительно, но увеличилась;

— доля лесных культур возрасла и в настоящее время составляет 32 % земель лесного фонда. Общие запасы, запасы спелых и перестойных насаждений увеличились за исключением древостоев дуба низкоствольного;

— средние запасы на 1 га покрытых лесом земель, спелых и перестойных насаждений в целом по лесам лесничества возрастают, отмечается незначительное уменьшение средних запасов по мягколиственным породам;

— расчетная лесосека остается стабильной, но ее структура улучшается за счет увеличения по хвойному хозяйству и уменьшения по твердолиственному и мягколиственному хозяйствам. По прогнозам, к 2023 г. объем пользования древесиной увеличится на 22 % за счет хвойного хозяйства.

## Выводы

1. В состав лесохозяйственного регламента необходимо ввести раздел «Анализ хозяйственной деятельности в целом по лесничеству и по арендным участкам».

2. Основной породой при воспроизводстве лесов должна быть сосна как наиболее производительная и имеющая ценную древесину. Ель необходимо воспроизводить в условиях  $C_3$ , лучше ориентироваться на естественное возобновление путем сохранения подроста.

3. Арендаторам следует значительно увеличить воспроизводство дуба. Сделать это можно как путем создания лесных культур и дальнейшего ухода за ними, так и путем естественного возобновления и целенаправленного ухода.

## Список литературы

- [1] Лесной кодекс Российской Федерации. № 200-ФЗ (ред. 31.12.2010).
- [2] Программа пояснительной записки к проекту организации и ведения лесного хозяйства. М.: ВНИИЦ по лесным ресурсам, 1995. 118 с.
- [3] Тихонов А.С. Брянский лесной массив. Брянск: Читай-город, 2001. 312 с.
- [4] Инструкция по устройству государственного лесного фонда СССР. Ч. I, II. М.: Рослесхоз, 1964.
- [5] Инструкция по проведению лесоустройства в едином государственном лесном фонде СССР. Ч. I «Организация лесоустройства и полевые работы». Утверждена Постановлением Государственного комитета СССР по лесному хозяйству от 12 сентября 1985 г. № 4. М.: Рослесхоз, 1985.
- [6] Приказ от 15 декабря 1994 г. № 265 «Об утверждении инструкции по проведению лесоустройства в лесном фонде России». М.: Рослесхоз, 1991.
- [7] Приказ от 12 декабря 2011 г. № 516 «Об утверждении лесоустроительной инструкции». М.: Рослесхоз, 2011.
- [8] Приказ Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз) от 27 мая 2011 г. № 191 «Об утверждении Порядка исчисления расчетной лесосеки». М.: Рослесхоз, 2011.

## Сведения об авторе

**Перепечина Юлия Ивановна** — д-р с.-х. наук, доцент, профессор кафедры лесоустройства Брянского государственного инженерно-технологического университета, mail@bgita.ru

**Глушенков Олег Иосифович** — канд. с.-х. наук, директор филиала «Заплеспроект» ФГУП «Рослесинформ», rli@roslesinform.ru

**Глушенков Иосиф Степанович** — канд. с.-х. наук, доцент, ведущий специалист филиала «Заплеспроект» ФГУП «Рослесинформ», rli@roslesinform.ru

Статья поступила в редакцию 08.06.2017 г.

## ANALYSIS OF DYNAMICS OF THE MAIN INDICATORS OF THE FOREST FUND IN LEASED FOREST AREAS

Yu.I. Perepechina<sup>1</sup>, O.I. Glushenkov<sup>2</sup>, I.S. Glushenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bryansk State Engineering-Technological University, 241037, Bryansk, Stanke Dimitrova Avenue, 3

<sup>2</sup> Branch of «Roslesinform» «Zapslesproekt», 241021, Bryansk, ul. Nikitina, house 14

mail@bgita.ru

The information on the dynamics of the main forest characteristics for 1983–2013 is given, the past changes due to the economic activities of rentallers in 2003–2013 are analyzed. A justified conclusion was made about the improvement of the forest structure of forests due to the purposeful reproduction of forests, the analysis of the use of the calculated cutting area was made.

**Keywords:** forest management, rentaller, pine forest cell cultures, spruce, oak, oak stands, forest management instructions, timber stock, estimated cutting area, natural renewal

**Suggested citation:** Perepechina Yu.I., Glushenkov O.I., Glushenkov I.S. *Analiz dinamiki osnovnykh pokazateley lesnogo fonda na arendovannykh uchastkakh lesov* [Analysis of the dynamics of the main indicators of the forest fund in the leased forest areas]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 39–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-39-44

### References

- [1] *Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii № 200-ФЗ*. (red.31.12.2010) [Forest Code of the Russian Federation № 200-ФЗ (ed. 31.12.2010)].
- [2] *Programma pozasnitel'noy zapiski k proektu organizatsii i vedeniya lesnogo khozyaystva* [The program of an explanatory note to the project of organization and management of forestry]. Moscow: All-Union Scientific and Research Institute for Forest Resources, 1995, 118 pp.
- [3] Tikhonov A.S. *Bryanskiy lesnoy massiv* [Bryansk forest area]. Bryansk: Chitay-gorod, 2001, 312 p.
- [4] *Instruktsiya po ustroystvu gosudarstvennogo lesnogo fonda SSSR* [Instructions for the establishment of the State Forest Fund of the USSR]. Part I and II. Moscow: Rosleskhoz, 1964, t. I, 128 p., t. II, 67 p.
- [5] *Instruktsiya po provedeniyu lesoustroystva edinom gosudarstvennom lesnom fonde SSSR. Ch. I «Organizatsiya lesoustroystva i polevye raboty»*. Uтверждена Постановлением Государственного комитета СССР по лесному хозяйству 12 сентября 1985 г., no. 4. [Instructions for forest management of the unified state forest fund of the USSR. Part I «Organization of forest management and field work». Approved by the Resolution of the State Committee of the USSR on Forestry September 12, 1985, no. 4]. Moscow: Rosleskhoz, 1985.
- [6] *Prikaz ot 15 dekabrya 1994 g., no. 265 «Ob utverzhdenii instruktsii po provedeniyu lesoustroystva v lesnom fonde Rossii»* [Order of December 15, 1994, no. 265 «On approval of instructions for forest inventory in the forest fund of Russia»]. Moscow: Rosleskhoz, 1991.
- [7] *Prikaz Rosleskhoza ot 12 dekabrya 2011 goda № 516 «Ob utverzhdenii lesoustroitel'noy instruktsii»* [The order of the Federal Forestry Agency of December 12, 2011, no. 516 «On approval of forest management instructions»]. Moscow: Rosleskhoz, 2011.
- [8] *Prikaz Federal'nogo agentstva lesnogo khozyaystva (Rosleskhoz) ot 27 maya 2011 g., no. 191, g. Moskva «Ob utverzhdenii Poryadka ischisleniya raschetnoy lesoseki* [Order of the Federal Forestry Agency (Rosleskhoz) of May 27, 2011, no. 191 Moscow «On Approval of the Procedure for Calculating the Cutting Area»]. Moscow: Rosleskhoz, 2011.

### Author's information

**Perepechina Yuliya Ivanovna** — Dr. Sci. (Agricultural), Assoc. Prof, Bryansk State Engineering-Technological University, mail@bgita.ru

**Glushenkov Oleg Iosifovich** — Cand. Sci. (Agricultural), Branch of «Roslesinform» «Zapslesproekt», rli@roslesinform.ru

**Glushenkov Iosif Stepanovich** — Cand. Sci. (Agricultural), Branch of «Roslesinform» «Zapslesproekt», rli@roslesinform.ru

Received 08.06.2017

УДК 630.182

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-45-51

## МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ САМОСЕВА *PINUS SYLVESTRIS* L. НА ЗАРАСТАЮЩИХ ЛЕСОМ ЗОЛОТОВАЛАХ НА СРЕДНЕМ УРАЛЕ

Е.И. Филимонова, Н.В. Лукина, М.А. Глазырина, О.С. Шишаева, Д.В. Веселкин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620083, Екатеринбург, пр-т Ленина, д. 51  
elena.filimonova@urfu.ru

Изучено влияние условий созданных человеком техногенных местообитаний на строение самосева *Pinus sylvestris* L. Объектом изучения послужили ювенильные особи *P. sylvestris*, собранные на двух естественно зарастающих лесом золоотвалах на Среднем Урале. На каждом золоотвале сравнивали растущий самосев на рекультивированных (нанесение грунта) и нереккультивированных участках. В качестве контрольной группы взят самосев, растущий под пологом соснового леса на естественной почве. Результаты оценивали с использованием дисперсионного анализа. Учитывали изменчивость, связанную с абсолютным возрастом растений. По основным морфологическим признакам (масса надземных и подземных органов, длина надземной части, длина корней, плотность расположения поглощающих корней на проводящих, соотношение масс подземных и надземных органов) самосев с разных золоотвалов не различается. Также они не различаются или мало различаются с рекультивированных и нереккультивированных участков. Установлены контрастные отличия темпов развития самосева на золоотвалах от самосева под пологом естественного соснового древостоя. Растения на золоотвалах имеют в 1,5–2,5 раза более высокие размеры и надземных и подземных органов. Особенно велики различия по массе. Одновозрастные растения на золоотвалах имеют в 2–3 раза более высокую биомассу, чем в естественном лесу. Замедленный рост самосева в естественном лесу, по-видимому, связан с влиянием ценотического пресса, т. е. с конкуренцией и средообразующим воздействием взрослых деревьев. Сделан вывод, что для экосистем на золоотвалах, существующих 40–50 лет после окончания эксплуатации, факторы связанные со спецификой условий техногенных субстратов, не являются решающими для развития ювенильных *P. sylvestris*.

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris*, золоотвалы, самосев, лесовозобновление, рекультивация, техногенные местообитания, Средний Урал

**Ссылка для цитирования:** Филимонова Е.И., Лукина Н.В., Глазырина М.А., Шишаева О.С., Веселкин Д.В. Морфологические особенности самосева *Pinus sylvestris* L. на зарастающих лесом золоотвалах на Среднем Урале // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 45–51.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-45-51

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) — вид с пионерной экологической стратегией, способный быстро заселять нарушенные или вновь зарастающие участки земной поверхности [1]. Наряду с выраженными чертами пионерной или рудеральной стратегии, сосна обладает также свойствами толерантности, или патиентности [2], что отражается в ее способности произрастать при низком плодородии и неблагоприятном водном режиме почв. Такое сочетание свойств объясняет успешное использование сосны в лесовосстановлении, в том числе — при облесении антропогенно (техногенно) нарушенных или сформированных территорий [3–6]. Изучение способов реализации растениями адаптивных возможностей в неблагоприятных условиях техногенных местообитаний необходимо для решения вопросов управления лесами, их продуктивностью и средообразующими функциями. Такие исследования позволяют понять механизмы устойчивости растений, их сообществ и экосистем.

В настоящей работе проанализировано строение ювенильного самосева сосны в естественно зарастающих лесом техногенных экотопах зо-

лоотвалов Среднего Урала. Цель: оценить, как специфика условий техногенных местообитаний отражается на морфологических характеристиках самосева. Для этого сравнили строение самосева, произрастающего: 1) на разных золоотвалах и в естественном лесу; 2) на рекультивированных и переккультивированных участках.

### Материал и методы

**Районы и участки.** Исследования выполнены на золоотвалах Среднеуральской ГРЭС (СУГРЭС) и Верхнетагильской ГРЭС (ВТГРЭС) и на биологической станции Уральского федерального университета (Средний Урал; подзона южной тайги; восточные предгорья низкогорного южно-таежного физико-географического района Свердловской обл.).

Золоотвал Среднеуральской ГРЭС (104 га) не используется для золоудаления с 1968 г., несколько участков были рекультивированы путем нанесения слоя торфа или глины. Золоотвал Верхнетагильской ГРЭС (125 га) не эксплуатируется с 1968–1970 гг. Часть площади рекультивирована полосным нанесением слоя глинистого грунта толщиной 10...15 см полосами шириной



5...8 м через 5...8 м. Физико-химические свойства рекультивированных и нереккультивированных почвенно-грунтовых субстратов подробно охарактеризованы в работах [7, 8]. Физический и химический состав, значительная влагоемкость, особый температурный режим и бесструктурность делают золу специфическим техногенным субстратом, не имеющим аналогов в природе. Главные факторы, лимитирующие рост растений на золе, это отсутствие органических веществ и бедность доступными формами N и K.

На каждом золоотвале 2–5-летние растения выкапывали на двух участках: рекультивированном (зола + грунт) и нереккультивированном (зола). На всех участках представлена спонтанно сформировавшаяся лесная растительность с сосной II–III класса возраста [9].

На золоотвале Среднеуральской ГРЭС (табл. 1) на нереккультивированной золе древесной представлен *Populus tremula* L., *Pinus sylvestris*, *Betula pendula* Roth, *Populus* sp. Возраст деревьев 25–30 лет, полной сомкнутости нет. Из кустарников встречаются *Hippophae rhamnoides* L., *Salix myrsinifolia* Salisb., *S. cinerea* L. Травянистый покров изрежен. Развита лишайниковый ярус из видов рода *Cladonia*. Лес на рекультивированном участке формируется около 50 лет и сомкнут больше, чем на чистой золе. В древесном ярусе преобладают *Betula pendula*, *Pinus sylvestris*, *Populus tremula* и *Betula pubescens* Ehrh., в кустарниковом — *Salix myrsinifolia*, *Padus avium* Mill.

На золоотвале Верхнетагильской ГРЭС на чистой золе лес имеет выраженные ярусы. Первый сложен *Populus tremula*, *Betula pendula* и *B. pubescens*, второй — *Pinus sylvestris*, *Picea obovata* Ledeb., *Salix caprea* L., *S. cinerea*. Кустарниковый ярус представлен *Salix myrsinifolia*, *Salix pentandra* L., *Chamaecytisus ruthenicus* (Fisch. ex

Voloszcz.) Klásková, *Rosa acicularis* Lindl., встречаются всходы и подрост *Sorbus aucuparia* L., *Viburnum opulus* L., *Padus avium*. Древесный ярус на участке с нанесением полос грунта сложен *Betula pendula*, *Pinus sylvestris*, *Populus tremula* и *Picea obovata*. В подросте отмечены *Pinus sibirica* Du Tour, *Larix sibirica* Ledeb., *Abies sibirica* Ledeb. Кустарниковый ярус представлен *Chamaecytisus ruthenicus* и *Salix myrsinifolia*, всходами *Sorbus aucuparia*, *Padus avium*. Сосновый лес около биологической станции Уральского федерального университета расположен на пологом склоне на суглинистой дерново-подзолистой почве. В первом ярусе доминирует *Pinus sylvestris*, во втором — *Betula pendula* и *B. pubescens*, *Populus tremula* и *Pinus sylvestris*. В подлеске представлены *Padus avium*, *Sorbus aucuparia*, *Alnus incana* (L.) Moench., *Picea obovata*, в кустарниковом ярусе — *Chamaecytisus ruthenicus*, *Viburnum opulus*, *Rosa canina* L., *Cotoneaster melanocarpus* Fisch. ex Blytt.

**Анализ строения.** В августе 2013 г. выкапывали и затем анализировали 2–5-летние особи *Pinus sylvestris*, соответствующие критериям ювенильных растений — особей, имеющих одноосный побег без боковых побегов [10]. Определяли длину надземной части (высоту), длину хвои и среднюю массу хвои у особи. Измеряли общую протяженность недетерминированных (проводящих) корней, подсчитывали число детерминированных (поглощающих) корней у особи. Определяли массу надземных и подземных органов. Линейные промеры выполнены с точностью до мм, массу определяли с точностью до мг.

## Результаты

Особенности строения 2–5-летних особей сосны, собранных в разных местообитаниях, охарактеризованы в табл. 2.

Т а б л и ц а 1

Характеристики местообитаний самосева сосны обыкновенной  
Characteristics of habitats of seedfalls of a *Pinus sylvestris*

Характеристика	Золоотвалы				Естественный лес
	СУГРЭС		ВТГРЭС		
	Зола	Зола + Грунт	Зола	Зола + Грунт	
Толщина подстилки, см	0–0,5	3–5	2–3	1–3	4–6
Древостой					
Возраст деревьев, лет	25–30	50	30–35	40–45	90–110
Средняя высота, м	7,4	14,9	7,0	11,0	25,6
Средний диаметр, см	10,9	18,4	7,7	16,9	37,3
Сомкнутость крон, %	0–40	60–80	65–75	70–80	40–80
Напочвенный покров					
Проективное покрытие яруса:					
кустарникового, %	5–15	25–30	15–20	5–25	25–30
травяно-кустарникового, %	10–15	50–70	15–30	15–40	50–70
мохово-лишайникового, %	55–60	5–10	5–8	10–30	10–30
Плотность возобновления, экз./м <sup>2</sup>	0–12	0–3	0–5	0–1	0–23

Т а б л и ц а 2

**Строение самосева *Pinus sylvestris* в техногенных экотопах золоотвалов  
и естественном лесу ( $m \pm SE$ )**

Characteristics of the structure of seedfalls of *Pinus sylvestris* in technogenic ecotopes of ash dumps ( $m \pm SE$ )

Морфологический признак	Местообитание на золоотвалах				Естественный лес ( $n = 32$ )
	СУГРЭС		ВТГРЭС		
	Зола ( $n = 44$ )	Зола + Грунт ( $n = 36$ )	Зола ( $n = 35$ )	Зола + Грунт ( $n = 31$ )	
Высота, мм	60 ± 5	105 ± 10	91 ± 9	88 ± 10	39 ± 3
Длина хвои, мм	34 ± 1	45 ± 2	46 ± 2	44 ± 2	24 ± 1
Масса надземных органов, мг	393 ± 45	612 ± 76	605 ± 80	561 ± 90	180 ± 20
Длина корней, мм	188 ± 12	191 ± 17	194 ± 13	214 ± 17	156 ± 13
Количество корневых окончаний	89 ± 10	75 ± 8	88 ± 7	107 ± 8	43 ± 5
Масса подземных органов, мг	46 ± 4	61 ± 8	56 ± 6	63 ± 7	24 ± 2
Плотность корневых окончаний (количество окончаний на 100 мм корней)	45 ± 3	38 ± 2	45 ± 2	53 ± 4	27 ± 2
Удельная длина корня, м/г	4,9 ± 0,3	3,8 ± 0,2	3,9 ± 0,2	4,1 ± 0,3	6,8 ± 0,3
Отношение массы корней к массе надземных органов	0,13 ± 0,01	0,10 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,14 ± 0,01	0,15 ± 0,01

Примечание:  $n$  — количество проанализированных особей.

Наблюдаются большие расхождения значений следующих характеристик: линейных (высота надземной части, длина хвои, длина корней), счетных (количество корневых окончаний) и массовых. Эти различия закономерно увеличиваются с возрастом растений (в двухфакторных ANOVA для всех признаков  $P < 0,001$ ). Меньше связаны с возрастом относительные характеристики: плотность расположения поглощающих корней на проводящих и соотношение масс подземных и надземных органов ( $P = 0,001-0,067$ ). Поскольку возрастную изменчивость необходимо учитывать при сравнении самосева из разных биотопов, укажем, что модальные классы возрастов в разных местообитаниях различались. В естественном лесу, на участке чистой золы Среднеуральской ГРЭС и на рекультивированном участке Верхнетагильской ГРЭС преобладали двухлетние особи, а в двух других местообитаниях — трех- и четырехлетние растения.

В серии двухфакторных ANOVA установлено, что наряду с возрастной изменчивостью ясно выражены и особенности строения растений из разных биотопов (для всех признаков  $P < 0,001$ ). По всем характеристикам самые контрастные различия наблюдаются между особями из естественного леса и с золоотвалов. Растения на золоотвалах имеют в 1,5–2,5 раза большие размеры и надземных и подземных органов. Особенно контрастны различия по массе — до 2–3 раз. Эти особенности корректно иллюстрируют оценки для трехлетних особей, с достаточной численностью представленных во всех местообитаниях (табл. 3).

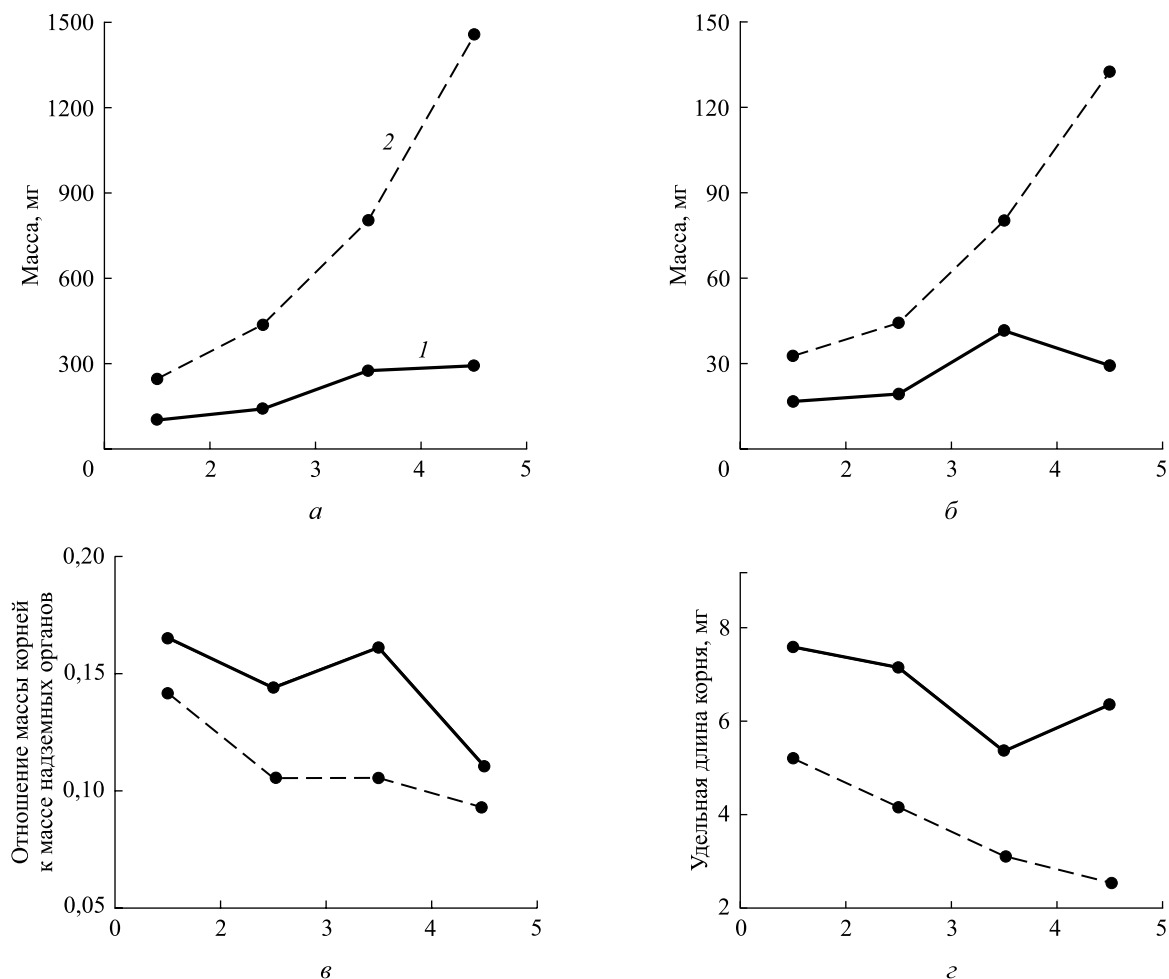
Растения с отвалов двух электростанций не абсолютно гомогенны по морфологическим характеристикам. Значения некоторых признаков

Т а б л и ц а 3  
**Строение трехлетних растений *Pinus sylvestris* в техногенных неоекотопах золоотвалов  
(размах средних значений для участка)  
Characteristics of the structure of three-year old seedfalls of *Pinus sylvestris* in technogenic neo-ecotopes of ash dumps (the range of mean values for the site)**

Морфологический признак	Золоотвалы	Естественный лес
Высота надземной части, мм	72–88	36
Длина хвои, мм	33–43	28
Длина корней, мм	144–245	137
Количество корневых окончаний	51–105	38
Плотность корневых окончаний (количество окончаний на 100 мм корней)	35–48	26
Масса надземных органов, мг	374–462	141
Масса подземных органов, мг	33–59	19

(длина хвои, масса надземных органов, плотность корневых окончаний) больше у сеянцев, растущих на отвале Верхнетагильской ГРЭС по сравнению с показателями сеянцев со Среднеуральской ГРЭС. Значимость этих характеристик в серии двухфакторных ANOVA варьируется ( $P = 0,001-0,023$ ), но в абсолютных величинах эти различия невелики. Независимо от того, наносился или нет на поверхность золы слой грунта, значения основных морфологических признаков практически не изменяются. Поэтому при рассмотрении общих направлений адаптации к техногенным местообитаниям все особи с золоотвалов можно объединить в одну группу.

Опережающие по сравнению с естественным лесом, темпы развития сосны на начальных этапах онтогенеза в местообитаниях золоотвалов, иллюстрируются данными, представленными на рис. 1.



**Рис. 1.** Строение ( $m \pm SE$ ) разновозрастных растений *Pinus sylvestris* из естественного леса (1) и техногенных неоекотопов золоотвалов (2): а — масса надземных органов; б — масса подземных органов; в — отношение масс подземных и надземных органов; г — удельная длина корня

**Fig. 1.** Structure ( $m \pm SE$ ) of different-aged *Pinus sylvestris* seedfalls from natural forest (1) and technogenic neo-ecotopes of ash dumps (2): а — mass of aboveground; б — mass of underground organs; в — the ratio of the masses of underground and aboveground organs; г — is the specific root length

Масса самосева с золоотвалов при увеличении его возраста растет экспоненциально (рис. 1, а, б), а в естественном лесу ускорение прироста массы с возрастом выражено слабо. Общие различия между естественным и техногенными участками по массе растений очень контрастны: значимость фактора «местообитание» в двухфакторном ANOVA:  $F = 103,80-132,81$ ;  $dF = 1$ ;  $P \ll 0,001$ . Другая характерная особенность растений из техногенных неоекотопов — несколько пониженная доля корней в общей массе (рис. 1, в);  $F = 15,89$ ;  $dF = 1$ ;  $P < 0,001$ . При этом корни растений с золоотвалов обладают меньшей удельной длиной (рис. 1, г);  $F = 92,75$ ;  $dF = 1$ ;  $P \ll 0,001$ , т. е. большей плотностью.

## Обсуждение результатов

На протяжении первых пяти лет развития в молодых мелколиственных лесах на золоотвалах самосев сосны развивается активнее, чем в

приспевающем естественном сосновом лесу. При этом на золоотвалах опережающими темпами развиваются преимущественно надземные органы, а доля корней в общей биомассе растений ниже, чем в естественном лесу. Эта диспропорция не компенсируется даже тем, что удельная длина корней на золоотвалах выше, чем в лесу. Иными словами, на золоотвалах единица длины недетерминированных корней имеет большую массу, чем в лесу. Одной из причин этого факта может быть повышенная плотность расположения детерминированных (поглощающих) корней на недетерминированных (проводящих) корнях в условиях золоотвалов (см. табл. 2).

Изложенные результаты позволяют выявить следующие закономерности регуляции морфогенеза ювенильной сосны в разных местообитаниях.

Лучшее развитие молодых особей наблюдается в лесных сообществах, формирующихся на

золоотвалах. Поэтому априорное предположение о негативном влиянии факторов бедности техногенных субстратов элементами питания или его неустойчивого водного режима на развитие растений не подтверждается. Это обстоятельство можно объяснить по-разному: вполне вероятно, что условия золоотвалов изначально не были чрезвычайно экстремальными либо оказались оптимизированными к моменту нашего наблюдения, т. е. преобразовались за прошедшие 45–50 лет под влиянием мелколиственных деревьев и травянистых растений.

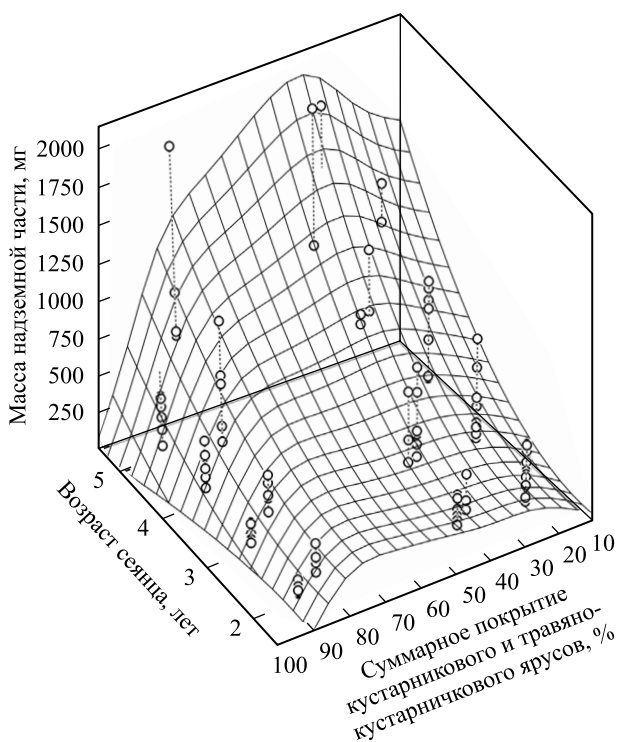
Не установлено сколько-нибудь существенных особенностей развития самосева на рекультивированных участках золоотвалов по сравнению с нереккультивированными участками. Иными словами, морфогенез ювенильной сосны не зависит от того, добавлялся ли к золе естественный грунт. Это позволяет предполагать существование какого-то фактора, сила влияния которого на ювенильные растения сосны превышает силу влияния возможных особенностей свойств субстратов, подвергшихся и не подвергшихся рекультивации.

Наиболее вероятно, что этот фактор — ценотический, т. е. одностороннее конкурентное влияние на самосев и средопреобразующее влияние на условия его существования со стороны взрослых деревьев и других растений. В частности, экспоненциальный рост в ювенильном и иматурном периодах, зарегистрированный на золоотвалах, характерен для сосны только в отсутствие ценотического пресса [11]. Таким образом, именно воздействием ценотического пресса можно объяснить замедленный рост сосны в естественном лесу. Этот факт можно проиллюстрировать зависимостью роста сеянцев от интенсивности биотического влияния на них (рис. 2).

В качестве показателя такого влияния использовали сумму проективных покрытий кустарников и растений травяно-кустарничкового яруса. Из рис. 2 видно, что наибольшее замедление общей экспоненциальной траектории возрастного развития самосева наблюдается при высокой сомкнутости травяно-кустарничкового и кустарникового ярусов, при их суммарном покрытии 75...90 %.

## Заключение

Изучаемые экосистемы на золоотвалах достигли возраста 40–50 лет (с окончания эксплуатации). Установлено, что факторы, связанные со спецификой условий техногенных субстратов, к этому возрасту экосистем не являются решающими для развития ювенильных сосен. На первый план выходят естественные факторы, связанные с биотическим воздействием со стороны сформировавшихся древостоев и растений подчиненных



**Рис. 2.** Накопление надземной массы разновозрастным самосевом сосны в зависимости от суммарного покрытия кустарников и растений травяно-кустарничкового яруса

**Fig. 2.** Accumulation of the above-ground mass by different-aged pine seedfalls, depending on the total coverage of bushes and plants of grass and shrubby layers

ярусов. Удовлетворительное развитие ювенильных *Pinus sylvestris* под пологом смешанных по составу лесов на золоотвалах, преимущественно с участием мелколиственных видов, соответствует типичной региональной траектории лесообразовательного процесса, состоящей в сукцессионном замещении лиственных древостоев хвойными.

*Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ (№ 14-04-90019).*

## Список литературы

- [1] Санников С.Н. Экология и география естественного возобновления сосны обыкновенной. М.: Наука, 1992. 264 с.
- [2] Смирнова О.В., Ханина Л.Г., Смирнов В.Э. Эколого-ценотические группы в растительном покрове лесного пояса Восточной Европы // Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность. В 2 кн. Кн. 1. / отв. ред. О.В. Смирнова. М.: Наука, 2004. 479 с.
- [3] Седых В.Н., Тараканов В.В. Выращивание древесных растений на техногенных субстратах в нефтедобывающих районах Западной Сибири // Лесоведение, 2003. № 3. С. 46–53.
- [4] Куприянов А.Н., Манаков Ю.А., Баранник Л.П. Восстановление экосистем на отвалах горнодобывающей промышленности Кузбасса. Новосибирск: Гео, 2010. 160 с.



- [5] Лиханова И.А., Хабибуллина Ф.М., Кураков А.В. Характеристика растительности и почв рекультивируемых песчаных пустошей Усинского нефтяного месторождения (Коми) // Почвоведение, 2008. № 9. С. 1101–1112.
- [6] Чудецкий А.И., Шутов В.В., Рыжова Н.В. Опыт лесной рекультивации выработанного песчаного карьера // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2014. № 4 (103). С. 112–115.
- [7] Экологические основы и методы биологической рекультивации золоотвалов тепловых электростанций на Урале / А.К. Махнев, Т.С. Чибрик, М.Р. Трубина, Н.В. Лукина, Н.Э. Гебель, А.А. Терин, Ю.И. Еловигов, Н.В. Топорков. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 356 с.
- [8] Экологические основы и опыт биологической рекультивации нарушенных промышленностью земель / Т.С. Чибрик, Н.В. Лукина, Е.И. Филимонова, М.А. Глазырина. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2011. 268 с.
- [9] Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А. Оценка опыта биологической рекультивации золоотвалов // Известия Оренбургского гос. аграрного ун-та, 2012. № 6 (38). С. 213–215.
- [10] Гусев М.В., Мелехова О.П., Романова Э.П. Сохранение и восстановление биоразнообразия. М.: Научный и учебно-методический центр, 2002. 286 с.
- [11] Санников С.Н. Возрастная биология сосны обыкновенной в Зауралье // Восстановительная и возрастная динамика лесов на Урале и в Зауралье. Свердловск: АН СССР. Уральский научный центр, 1976. С. 124–165.

## Сведения об авторе

**Филимонова Елена Ивановна** — канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории антропогенной динамики экосистем Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, elena.filimonova@urfu.ru

**Лукина Наталия Валентиновна** — канд. биол. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории антропогенной динамики экосистем Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, tamara.chibrik@urfu.ru

**Глазырина Маргарита Александровна** — канд. биол. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории антропогенной динамики экосистем Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, tamara.chibrik@urfu.ru

**Шишаева Олеся Сергеевна** — Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, tamara.chibrik@urfu.ru

**Веселкин Денис Васильевич** — д-р биол. наук, профессор, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, tamara.chibrik@urfu.ru

Статья поступила в редакцию 05.09.2017 г.

## THE MORPHOLOGICAL PECULIARITIES OF *PINUS SYLVESTRIS* L. SEEDFALL IN OVERGROWN FOREST ASH DUMPS IN THE MIDDLE URALS

**E.I. Filimonova, N.V. Lukina, M.A. Glazyrina, O.S. Shishaeva, D.V. Veselkin**

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620083, Ekaterinburg, prospekt Lenina 51

elena.filimonova@urfu.ru

The aim of the research is to assess the impact of technogenic habitats on the structure of the *Pinus sylvestris* seedfall. Scheme of observations: we analyzed the *P. sylvestris* juveniles collected in two forest overgrown ash dumps in the Middle Urals. In each ash dump we compared seedfall at recultivated (applying the substrate) and non-recultivated areas. A control seedfall group that grew under the canopy of pine forest on natural soil was used. The results were assessed by a dispersion analysis. Variability associated with an absolute age of the plants was taken into account. The seedfalls from the different ash dumps do not differ in main morphological characteristics (weight of shoots and roots and underground parts, height of shoots, root length, density of absorbing roots at conducting roots, root/shoot mass ratio). The seedfalls from recultivated and not recultivated sites do not differ or differ little. Contrasting difference was established in terms of the development rates of ash dumps seedfalls and seedfalls from a natural pine forest. Plants' shoots and roots of ash dumps are 1,5–2,5 times higher than the ones from natural forest. It was found that seedfalls in different habitats vary greatly in weight. The seedfalls biomass in ash dumps is 2–3 times greater than in natural forests. A slow growth of seedfalls in natural forests, apparently associated with the effects of coenosis press, is the result of competition and the impact of mature trees. It was concluded that by 40–50 years of ecosystems age at the ash dumps the impact of technogenic substrates is not critical for the development of *P. sylvestris* juveniles.

**Keywords:** *Pinus sylvestris*, ash dumps, seedfall, reforestation, restoration, technogenic habitats, Middle Urals

**Suggested citation:** Filimonova E.I., Lukina N.V., Glazyrina M.A., Shishaeva O.S., Veselkin D.V. *Morfologicheskie osobennosti seyantsev Pinus sylvestris L. na zarastayushchikh lesom zolootvalakh na Srednem Urale* [The morphological peculiarities of *Pinus sylvestris* L. seedlings on overgrown forest ash dumps in the Middle Urals]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 3, pp. 45–51. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-45-51

## References

- [1] Sannikov S.N. *Ekologiya i geografiya estestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovennoy* [Ecology and geography of natural regeneration of *Pinus sylvestris*], Moscow: Nauka Publ., 1992, 264 p.
- [2] Smirnova O.V., Khanina L.G., Smirnov V.E. *Ekologo-tsenoticheskie gruppy v rastitel'nom pokrove lesnogo poyasa Vostochnoy Evropy. Vostochnoevropeyskie lesa: istoriya v golotsene i sovremennost'* [Ecological-coenotic groups in the vegetation forest zone of Eastern Europe. East European forest: history in the Holocene and the present], Moscow: Nauka Publ., 2004, 479 p.
- [3] Sedykh V.N., Tarakanov V.V. *Vyrashchivanie drevesnykh rasteniy na tekhnogennykh substratakh v nefte dobyvayushchikh rayonakh Zapadnoy Sibiri* [The cultivation of woody plants in the man-made substrates in oil-producing regions of Western Siberia], *Lesovedenie* [Forestry], 2003, no. 3, pp. 46–53.
- [4] Kupriyanov A.N., Manakov Yu.A., Barannik L.P. *Vosstanovlenie ekosistem na otvalakh gornodobyvayushchey promyshlennosti Kuzbassa* [The Ecosystem restoration on the dumps from Kuzbass mining], Novosibirsk, 2010, 160 p.
- [5] Likhanova I.A., Khabibullina F.M., Kurakov A.V. *Kharakteristika rastitel'nosti i pochv, rekul'tiviruemyykh peschanykh pustoshey Usinskogo neftyanogo mestorozhdeniya (Komi)* [The characteristics of vegetation and soils, of recultivated sandy wastelands from Usinskoye oilfield (Komi)]. *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2008, no. 9, pp. 1101–1112.
- [6] Chudetskiy A.I., Shutov V.V., Ryzhova N.V. *Opyt lesnoy rekul'tivatsii vyrabotannogo peschanogo kar'era* [The experience of forest recultivation on the elaborated sand pit]. *Moscow state forest university bulletin — Lesnoy vestnik*, 2014, № 4 (103), pp. 112–115.
- [7] Makhnev A.K., Chibrik T.S., Trubina M.R., Lukina N.V., Gebel' N.E., Terin A. A., Elovikov Yu.I., Toporkov N.V. *Ekologicheskie osnovy i metody biologicheskoy rekul'tivatsii zolootvalov teplovykh elektrostantsiy na Urale* [Ecological principles and methods of biological recultivation on the Urals power stations ash dumps]. Ekaterinburg, 2002, 356 p.
- [8] Chibrik T.S., Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A. *Ekologicheskie osnovy i opyt biologicheskoy rekul'tivatsii narushennykh promyshlennost'yu zemel'* [The ecological bases and experience of biological recultivation on the disturbed industrial lands]. Ekaterinburg: South Ural State University Publ., 2011, 268 p.
- [9] Lukina N.V., Filimonova E.I., Glazyrina M.A. *Otsenka opyta biologicheskoy rekul'tivatsii zolootvalov* [The evaluation of ash dumps biological recultivation experience]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Proceedings of the Orenburg State Agrarian University], 2012, № 6(38), pp. 213–215.
- [10] Gusev M.V., Melekhova O.P., Romanova E.P. *Sokhranenie i vosstanovlenie bioraznoobraziya* [Protection and restoration of biodiversity], Moscow, 2002, 286 p.
- [11] Sannikov S.N. *Vozrastnaya biologiya sosny obyknovennoy v Zaural'e* [Age biology of *Pinus sylvestris* in the Urals] *Vosstanovitel'naya i vozrastnaya dinamika lesov na Urale i v Zaural'e* [The forests reconstructive and age dynamics in the Urals], Sverdlovsk: AN SSSR. The Ural Scientific Center Publ., 1976, pp. 124–165.

## Author's information

**Filimonova Elena Ivanovna** — Cand. Sci. (Biol.), Scientific researcher in the Laboratory of anthropogenic ecosystem dynamics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, elena.filimonova@urfu.ru

**Lukina Natalia Valentinovna** — Cand. Sci. (Biol.) Assoc. Prof, Scientific researcher in the Laboratory of anthropogenic ecosystem dynamics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, tamara.chibrik@urfu.ru

**Glazyrina Margarita Aleksandrovna** — Cand. Sci. (Biol.) Assoc. Prof, Scientific researcher in the Laboratory of anthropogenic ecosystem dynamics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, tamara.chibrik@urfu.ru

**Shishaeva Olesya Sergeevna** — Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, tamara.chibrik@urfu.ru

**Veselkin Denis Vasilyevich** — Dr. Sci. (Biol.), Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, tamara.chibrik@urfu.ru

Received 05.09.2017

## ЛЕСНАЯ ТИПОЛОГИЯ Г.Ф. МОРОЗОВА — А.А. КРЮДЕНЕРА — П.С. ПОГРЕБНЯКА — ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА ЛЕСОВОДСТВА

**Е.С. Мигунова**

Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації імені Г.М. Висоцького, 61024, Харків, вул. Пушкінська, 86

migunova-l-s@yandex.ua

Кратко охарактеризованы история становления, классификационные модели и методы исследования лесной типологии как учения о взаимосвязях леса и его среды. Назван ряд положений, требующих доработки. Обосновывается необходимость ведения лесного хозяйства по зонально-типологическому принципу. Предлагается опыт хозяйственной группировки типов леса. Рассматриваются выявленные лесной типологией закономерности взаимосвязей между живой и неорганической природой.

**Ключевые слова:** лесная типология, климатическая сетка, эдафическая сетка, классификация, плодородие, лимитированные экологические ресурсы

**Ссылка для цитирования:** Мигунова Е.С. Лесная типология Г.Ф. Морозова — А.А. Крюденера — П.С. Погребняка — теоретическая основа лесоводства // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 52–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-52-63

Лесная типология как особое направление теоретического лесоводства сформировалась на основе народных знаний о природе леса, собранных российскими лесоводами на рубеже XIX–XX в. и обобщенных Г.Ф. Морозовым в учение о взаимосвязях леса и его среды, или учение о типах насаждений. В его основе признание жесткой обусловленности лесов абиотической средой: «Лес находится под влиянием климата и под властью земли» [1].

Последователь Морозова А.А. Крюденер, крупный лесоустроитель, изучавший народные знания так, как изучают сказания, былины, назвал таксон «тип насаждения» единством климата, почвогрунта и растительного сообщества. Тем самым он дал первое в истории науки (на 20 лет раньше английского геоботаника А. Тэнсли [2]) определение экосистемы [3]. Следуя народному постулату «каков грунт земли, таков и лес», он разработал сопряженную классификацию лесов и почвогрунтов, в которой леса размещены по нарастанию плодородия почвогрунтов, в координатах увеличения в них количества пищи (семь групп) и влаги (15 групп), оцениваемых по механическому составу грунтов, положению в рельефе, составу насаждений и напочвенного покрова. В этой классификации почвогрунты разделяют на типы в зависимости от находящихся на них типов насаждений, растительность признается критерием качества почв. Этот прием позволил объединить почвы и приуроченные к ним древостои в один тип, дать им единый объем, отражающий экосистемную сущность их взаимосвязей. В результате было выявлено, что разные типы насаждений формируются на почвогрунтах разного механического состава, а не на разных генетических типах почв, как по-

лагал Морозов [4]. Крюденер и определил типы почвогрунтов и приуроченные к ним леса по двум параметрам — сухие боры, свежие субори, влажные рамени, совместив название типа леса со шкалой богатства почв пищей (бор, рамень), так как чаще всего именно количество элементов питания в почвогрунтах определяет состав, а значит, и тип насаждений.

Тип насаждения — элементарная ячейка природы, по своему объему аналогичная экосистеме, биогеоценозу ботаников и геосистеме, фации географов, но в отличие от них имеющая достаточно объективные критерии выделения. К разным типам относят однородные участки леса, различающиеся либо по составу и структуре коренных древостоев (появление или выпадение древесных пород, обладающих разной требовательностью к условиям среды, их переход из подчиненных ярусов в верхний полог и наоборот), либо по продуктивности (как правило, на один класс бонитета).

Данная классификация разносторонне обоснована Крюденером в его монографии «Основы классификации типов насаждений и их народно-хозяйственное значение в обиходе страны» [3]. Два тома этой монографии были опубликованы в 1916 и 1917 гг. в качестве бесплатного приложения к «Лесному журналу», редактором которого был Г.Ф. Морозов. Заключительный — третий — том, к сожалению, не увидел света. В монографии приведено также первое лесорастительное районирование Европейской России. Выделение главных признаков почвогрунтов (обеспеченности пищей и влагой), положенных в основу классификации, и принцип ее построения (система координат) позволили привести в строгую систему все разнообразие насаждений лесной зоны — от чисто сосновых древостоев на бедных

песчаных землях (боры) до ельников (раменей) и дубрав на богатых суглинках.

Классификацию начали использовать при лесоустройстве. Однако А.А. Крюденер был немец, имел баронский титул, дарованный Екатериной II его предкам, которые на протяжении многих поколений проживали в Прибалтике. Закончив в 1894 г. Лесной институт, Крюденер более 20 лет работал в Удельном ведомстве, управлявшем владениями членов царской семьи. Многие годы он заведовал Лесным отделом ведомства, в ведении которого находились лучшие лесные массивы в разных регионах России. За работы по устройству этих лесов и составлению первых русских таблиц объемов стволов всех главных древесных пород Европейской России (20 выпусков, 1908–1913 гг.) Крюденер получил высший в России гражданский чин — действительного тайного советника, соответствующий воинскому званию маршала. В 1918 г. он вместе с семьей выехал в Финляндию, а затем в Германию. Этого оказалось достаточно для того, чтобы в СССР его труды, в том числе лесотипологическая классификация, были изъяты из употребления. Ряд крупных лесничих подали тогда в знак протеста прошения об отставке. При широкомасштабных работах по инвентаризации лесов и лесоустройству, начавшихся в середине 1920-х г., была принята ботаническая, точнее, фитоценотическая (от греч. «фитоценоз» — растительное сообщество) классификация Каяндера — Сукачева (сосняки — беломошники, ельники — черничники и т. п.), не опирающаяся на почвогрунты, как классификации Морозова и Крюденера. На ее основе вскоре сформировалось новое направление лесной типологии — фитоценотическое [5], в отличие от сугубо экологического направления Морозова — Крюденера [6–27].

## Лесная типология на Украине

Благодаря усилиям Г.Н. Высоцкого классификация Крюденера сохранилась на Украине в виде классификации Е.В. Алексеева, который в 1914 г. переехал из Петербурга в Киев и на основе разработки Крюденера создал сокращенный вариант его классификации применительно к украинским лесам [6]. Ученик Высоцкого П.С. Погребняк [7–18], продолжая работы Алексеева, преобразовал центральный фрагмент таблицы Крюденера в компактную классификационную модель в координатах четырех типов богатства (трофности) и шести типов увлажнения земель (табл. 1), получившую название эдафической сетки (от греч. «эдафос» — почва, земля), ставшую основой украинской школы лесной типологии. При этом Погребняк объединил кислоторегнойные и наземистые типы Крюденера, переводя их в категорию вариантов — ацидифильных и кальциефильных. Горизонтальный ряд эдафической сетки получил название трофогенного, вертикальный — гигрогенного. Соответственно отдельные звенья этих рядов названы трофотопами и гигротопами.

Суть этой классификации можно сформулировать следующим образом. В природе имеется четыре основных типа земель с разным богатством элементами питания. В разных климатах к ним приурочены насаждения из пород, сходных по требовательности к этим элементам, но различающихся по теплолюбию и морозоустойчивости. Поскольку к 30-годам XX в. почвоведомы-генетиками значение механического состава было низведено только до показателя крупности фракций, а оценка по нему плодородия почв считалась ненаучной, устаревшей, Погребняк полностью

Т а б л и ц а 1

### Сопряженная классификационная модель типологического разнообразия лесов и их местообитаний разных климатических областей — эдафическая сетка Крюденера — Погребняка (с дополнениями автора)

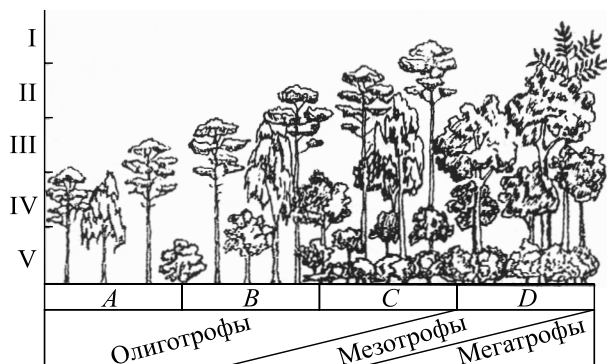
The conjugated classification model of the typological diversity of forests and their habitats of different climatic regions is the edueic grid of Krüdenner — Pogrebnyak (with the author's additions)

Типы леса	А. Боры	В. Субори	С. Сугрудки	Д. Груды*
Типы местообитаний — эдатопы	Подтипы богатства — трофотопы			
	Бедные	Относительно бедные	Относительно богатые	Богатые
Подтипы влажности — гигротопы				
0. Очень сухие	A <sub>0</sub>	B <sub>0</sub>	C <sub>0</sub>	D <sub>0</sub>
1. Сухие	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>
2. Свежие	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>
3. Влажные	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>
4. Сырые	A <sub>4</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	D <sub>4</sub>
5. Мокрые	A <sub>5</sub>	B <sub>5</sub>	C <sub>5</sub>	D <sub>5</sub>

\*Груд — народное название грабовой дубравы. Принято как таксон, объединяющий все леса на богатых землях.



перешел на оценку плодородия *методом фитоиндикации* — по составу и продуктивности всех ярусов насаждений (рисунок), который предложил Крюденер. В первой публикации Погребняка [17] приведены списки растений напочвенного покрова, характерные для *сухих, свежих, влажных сырых и заболоченных* боров, которыми типологи пользуются и в настоящее время. Значение механического состава почвогрунтов при оценке почв методом фитоиндикации выявляется весьма четко (табл. 2).



Класс бонитета. Изменение состава, структуры и бонитета насаждений по мере повышения трофности местообитаний (в условиях достаточной обеспеченности влагой) [22]

Class of bonitet. Changes in the composition, structure, and bonitet of plantations with increasing trophicity of habitats (under conditions of sufficient moisture supply) [22]

Метод фитоиндикации является весьма объективным. При огромном многообразии высших растений в природе нет двух видов, полностью тождественных по своим экологическим характеристикам [9]. Растения дают обобщенную, усредненную оценку экологических режимов, так как и любое сообщество, и отдельный индивид обладают значительной инерцией и отзываются только на продолжительные направленные изменения режимов, а не на их кратковременные и периодические пульсации. При этом особое значение имеют растения-индикаторы, обилие которых в покрове часто весьма невелико. Так, появление

в покрове орляка, грушанки, земляники четко отделяет свежие субори ( $B_2$ ) от боров. Свежий бор ( $A_2$ ) отличается от влажного ( $A_3$ ) наличием чабреца, типчака, сырой ( $A_4$ ) — появлением андромеды, сфагнома. Это позволяет по составу, структуре и продуктивности естественной растительности оценивать качество и степень однородности среды с такой точностью, какую не могут обеспечить самые детальные обследования и самые совершенные приборы. Но для определения причин возникновения того или иного уровня плодородия необходимо проведение почвенных исследований. В сосновых насаждениях на песчаных землях нужно доуглублять почвенные разрезы бурением до глубины не менее 3 м или до грунтовой воды, если она залегает выше.

В зависимости от геоморфологии (плакоры, поймы, террасы), рельефа и водно-физических свойств почвогрунтов формируется шесть уровней увлажнения земель от 0-го (очень сухой) до 4-го (сырой) и 5-го (мокрый), обуславливающих разную продуктивность насаждений. В покрове виды от ксерофитов (0-й уровень) до гигрофитов (5-й уровень). Земли разного богатства и увлажнения образуют 24 типа местообитаний ( $A_2$  — бедные свежие,  $D_3$  — богатые влажные и т. д.) плюс их подтипы (бедноватые, влажноватые), варианты (пойменные, кальциефильные, засоленные и др.), характеризующиеся строго определенным уровнем плодородия. К ним приурочены разные типы насаждений, по которым исходно типы местообитаний выделены. Их единства представляют типы леса. При этом следует особо подчеркнуть, что в эдафической сетке учтены все земли, различающиеся по уровню богатства, тучности. На протяжении XIX в. во многих странах Западной Европы почвы разделяли на подобные четыре группы *богатства* — *ржаные* (песчаные), *овсяные* (суглинисто-песчаные), *ячменные* (песчано-суглинистые) и *пшеничные* (суглинистые). Это деление утратило силу лишь после того, как на пашне начали интенсивно вносить удобрения.

Лесные типологи, начиная от Крюденера, оперируют не почвами и даже не почвогрунтами,

Т а б л и ц а 2

Типы богатства (трофности) земель эдафической сетки  
Types of wealth (troph) land edaphic grid

Тип земель	Горная порода	Насаждения, класс бонитета	Напочвенный покров
А. Бедные (боровые)	Пески	Сосна, II–III	Олиготрофы
В. Относительно бедные (суборовые)	Супеси	Сосна, I–Ia; Ель, дуб, III–IV	Олиготрофы + мезотрофы
С. Относительно богатые (сугрудковые)	Пески и супеси, подстилаемые суглинками	Сосна, Ia–Ic; Ель, дуб, II–III	Олиго- и мезотрофы + мегатрофы
Д. Богатые (грудовые)	Суглинки, глины	Ель, дуб, I–Ia; Сосны нет	Только мегатрофы

а всем комплексом факторов, влияющих на рост насаждений. В расчет принимается приуроченность объектов к тем или другим геоморфологическим элементам (террасы, поймы), положение в рельефе, степень дренированности территории, уровень и проточность грунтовых вод. Этот комплекс факторов может быть определен понятием «земли». В ботанике ему соответствует термин «местообитания».

Позже типологами были разработаны климатические сетки: Д.В. Воробьевым [10] в координатах теплоты и влажности климата, Д.Д. Лавриненко [11] — в координатах теплоты и континентальности. На Украине эти экологические (в единстве местообитаний и насаждений) принципы классификации лесов, получившие название классификации Алексева — Погребняка, широко используются в научных исследованиях и являются теоретической базой лесного хозяйства. Имя же основоположника этих принципов Крюденера со временем забылось, и нам потребовалось приложить немало усилий, чтобы вернуть его из забвения. Ряд положений данного учения нуждается в доработке. Это касается прежде всего лесотипологических таксонов, предложенных Д.В. Воробьевым в начале его творческого пути [12] и получивших широкое распространение.

### Лесотипологические таксоны

Создание Воробьевым *системы таксонов* — типа лесного участка, типа леса и типа древостоя — является существенным вкладом в развитие лесной типологии. До этого главным таксоном был *тип насаждения* и в качестве сопутствующего ему тип почвогрунта. У украинских типологов тип насаждения стал определяться *типом леса* [6], а тип почвогрунта — *типом местообитания* или *эдапом* (геоботанические термины). Воробьев назвал тип местообитания типом лесного

участка, понимая под ним площади, сходные по уровню плодородия почвогрунтов, и выделил его в качестве наиболее крупного таксона, утверждая, что при одном и том же типе лесного участка климат может быть разным. Между тем климат представляет собой наиболее мощный природный фактор, обуславливающий не только состав и продуктивность лесных насаждений, но и саму возможность существования лесов в том или ином регионе, определяя главную особенность природы Земли — зональность ее растительного покрова. В разных климатических зонах имеются сходные, но *не одинаковые, а аналогичные* типы местообитаний, поскольку в разных зонах имеются пески, супеси, суглинки, содержащие примерно одинаковое количество элементов питания [13], что обуславливает их сходное потенциальное плодородие. Климат определяет возможность его реализации. К таким землям приурочены *аналогичные* типы леса.

Система лесотипологических таксонов приведена в табл. 3. В ней выделены *таксоны среды* (тип климата, тип местообитания и тип среды, тип лесорастительных условий) и *таксоны растительности* (тип насаждения и тип древостоя). *Климатоп* (тип климата) понимается как территория, к которой приурочена однородная по отношению к климату высшая растительность. Объективным показателем такой однородности является формирование одного типа леса (степи) на суглинках плакоров. В соответствии с лесотипологическими принципами это территория однородная (в пределах толерантности высших растений) по плодородию климата, так же как типы местообитаний однородны по плодородию земель. Мы добавили в систему таксон *тип насаждения* как растительный компонент типа леса, его биоценоз. Единство типа лесорастительных условий и типа насаждения представляет тип

Т а б л и ц а 3

### Классификационные таксоны лесных экосистем

#### Classification taxa of forest ecosystems

Единица среды	Ведущие факторы	Единица растительности
Климатоп (тип климата)	Теплота, увлажнение и континентальность климата	Зональный комплекс типов леса (биоценозов)
Эдапот, геотоп (тип местообитания)	Богатство и водообеспеченность почвогрунта	Массивы типов-аналогов (боров, суборей, грудов) в разных зонах
Экотоп (тип среды, тип лесорастительных условий)	Сочетание климатопы и эдапоты	Тип насаждения, травостоя (коренные биоценозы) Тип древостоя, сельскохозяйственных культур (производные и искусственные биоценозы)
Тип экосистемы (биоэкосистемы) — Тип леса, луга, степи: Коренная экосистема: экотоп + тип насаждения Производная экосистема: экотоп + тип древостоя		

леса, тип лесной экосистемы. Внутри одного типа климата

*тип местообитания + тип насаждения →*  
*→ тип леса*

### Лесотипологическая классификация климата

В принятой на Украине климатической сетке Д.В. Воробьева [10] в качестве основного таксона выделены *климаты зональных эдаптопов* (местообитаний), поскольку Воробьев считал тип местообитания более крупным таксоном, чем тип климата. Классификация построена по принципу эдафической сетки в системе координат, на одной оси которой представлено восемь зон тепла (*T*), на другой — девять зон влажности (*W*). Ни зоны тепла, ни зоны влажности не увязаны с зональностью лесов Европейской части СССР (ЕЧС), для которой сетка составлялась [14].

Использованный Воробьевым прием позволяет оценить теплоту и влажность климата. Однако если его показатели *T* и *W* не сопряжены с давно установленным зональным делением ЕЧС, они не отражают существующих связей растительности с климатом. При создании нового варианта климатической сетки в ее основу был положен главный лесотипологический принцип — сопряженность лесов и их среды, в данном случае климата. Сетка построена в координатах *теплоты* и *континентальности климата*, как это предлагали П.С. Погребняк, первым выдвинувший идею создания климатической сетки, и использовав-

ший этот прием Д.Д. Лавриненко [11]. По вертикальной оси нанесены: зональность (основные природные зоны и подзоны Восточно-Европейской равнины, представляющие главную черту ее растительного покрова) и общая оценка климата этих зон, прежде всего уровень обеспеченности теплом (от I — «крайне холодный» — в лесотундре до VII — «относительно теплый» — в лесостепи) (табл. 4).

Горизонтальная ось сетки отражает подразделение зон и подзон на области, различающиеся степенью континентальности климата. Типологи выделяют эти области по изменению зональных (приуроченных к суглинистым водоразделам) типов леса. Территория, на которой представлен один зональный тип леса, принята в качестве основного климатического таксона — типа климата (климатопа) или климатической области.

Рассмотрим в качестве примера лесостепь, на западе которой зональными являются грабовые дубравы, за Днестром их сменяют кленово-липовые, а за Волгой липовые дубравы. За Уралом на смену дубовой лесостепи приходит березовая. В лесной зоне на западе произрастает ель европейская, в центре преобладает ель сибирская, на востоке появляется примесь западносибирских видов (кедра, пихты). Это служит основанием для выделения трех зональных типов климата (относительно мягкого, слабоконтинентального и среднеконтинентального), определяемых по изменению зональных типов леса так же, как это принято при выделении типов местообитаний на эдафической сетке. Зоны и их климат обозначен-

Т а б л и ц а 4

**Сопряженная классификационная модель типов климата и зональных типов леса Восточно-Европейской равнины (климатическая сетка)**  
**Conjugated classification model of climate types and zonal forest types of the East European Plain (climatic grid)**

Климат Зоны, подзоны	Климатопа		
	а (Относительно мягкий)	б (Слабоконтинентальный)	с (Среднеконтинентальный)
	Зональные типы леса		
I. Крайне холодный Лесотундра	Ia	Ib	Ic
II. Очень холодный Северная тайга	IIa	IIb	IIc
III. Холодный Средняя тайга	IIIa	IIIb	IIIc
IV. Относительно холодный Южная тайга	IVa	IVb	IVc
V. Умеренный Хвойно-широколиственные	Va	Vb	Vc
VI. Относительно умеренный Широколиственные	VIa	VIb	VIc
VII. Относительно теплый Лесостепь	VIIa	VIIb	VIIc

ны римскими цифрами, зональные типы леса и климатопы — начальными буквами латинского алфавита (а, b, с). Климатопы определяются *западной, центральной и восточной климатическими областями*.

Целесообразно разрабатывать климатические сетки для крупных, в определенной степени автономных территорий, таких как Восточно-Европейская равнина, Западная и Восточная Сибирь, Дальний Восток, с учетом не только лесных (см. табл. 4), но и всех имеющихся на этих территориях природных зон, что необходимо для работ агролесомелиоративного плана, исключая горные системы. Изменения климата в горах при подъеме на каждые 100 м примерно соответствуют тем, которые на равнине происходят на расстоянии около 1000 км. Поэтому для горных систем, отличающихся сложным строением, необходимо создавать особые климатические сетки и уже для выделенных на них климатов разрабатывать эдафические сетки, так как в разных климатопках аналогичные типы леса различаются и по составу, и по продуктивности. В географии принято выделять зоны и подзоны по тепло-обеспеченности климата и областей и провинций по степени его континентальности; в данном случае зоны выделяются в зависимости от изменений состава и продуктивности растительности.

Что касается конкретных климатических характеристик, отмеченных на сетках Воробьева и Лавриненко, то из-за различий состава и строения (рельефа) поверхностных отложений, границы между зонами и областями проходят далеко не строго горизонтально и вертикально, а потому указать для их смен конкретные значения количества тепла и континентальности невозможно, можно указать лишь их амплитуду. Однако в данном случае, так же как и при выделении типов леса на эдафической сетке, наиболее объективным и точным является разделение зон по растительности методом фитоиндикации. Поэтому не рекомендуется вводить в эдсетки значения количества лимитированных био-элементов и влаги для разных трофо- и гигротопов, хотя такие сетки для некоторых областей составлены автором [15, 16]. Помимо того, что это делает эдсетки более громоздкими, получение таких данных требует огромного объема аналитической работы, тогда как по составу и продуктивности насаждений типы леса и их границы определяются и точнее, и несопоставимо быстрее. Климатические области или территории с одним типом климата являются наиболее удобным таксоном при разработке разнообразных районирований. Для каждой области должна составляться особая эдсетка. При незначительных различиях состава насаждений в разных климатопках возможно составление для них единых эдсеток.

Эдафические сетки классифицируют леса только в пределах однородного по климату региона. Это было установлено еще тогда, когда Алексеев использовал классификацию Крюденера на Украине. В своей классификации он заменил крюденовские *таежные рамени* (ельники) на *груды*. Следом за ним Погребняк заменил рамени на дубравы [17]. Погребняк первым указал на необходимость составления отдельных эдафических сеток для разных зон [18]. Но до сих пор не стало общепризнанным очень важное положение о том, что эта основная классификационная модель лесной типологии систематизирует *внутризональное разнообразие лесов*. В ней не учитывается роль климата, в частности тепла, а тот факт, что почвогрунты определяют состав лесов только внутри однородного по климату региона, не вызывает сомнений.

Климат обусловил возникновение хвойных, листопадных и тропических лесов, степей, саванн, пустынь. Все это многообразие может быть отражено только созданием особых эдафических сеток для *разных типов климата*. То же касается и горных систем. Для крупных регионов требуется учет не только количества влаги и тепла, но и их распределения по сезонам года, что в значительной мере отражает степень континентальности климата. Примечательно, что геоботаник Л.Г. Раменский, занимавшийся изучением лугов практически теми же, что и лесные типологи, методами, свою первую экологическую шкалу создал для всей ЕЧС, однако позже он разработал классификацию лугов только лесной зоны [9], аналогичную эдафической сетке Погребняка.

Несмотря на существенные различия, у всех сеток одна и та же главная особенность: наиболее сложные по составу и высокопродуктивные насаждения находятся в центре сетки, на богатых оптимально увлажненных — свежих и влажноватых — землях, наиболее бедные по составу и низкопродуктивные — по углам сетки, на бедных, сухих, засоленных и переувлажненных землях. Это позволяет выделить в пределах зон серию земель разной производительности, образующих на эдсетках систему ареалов.

На Украине, где сохранились разработанные Морозовым и Крюденером лесотипологические принципы, они уже давно служат теоретической основой научного и практического лесоводства. Суть этих принципов отражена в их классификационных построениях, названных сетками. Однако термин «сетки» не соответствует тому огромному багажу сведений, которые в них содержатся. Полагаем, что для таких серьезных классификационных построений более подходит определение «сопряженные классификационные модели». Хотя это совсем не исключает воз-



возможности использования привычного термина «сетки», в том числе «климсетки» и «эдсетки». Вместе две эти модели можно назвать *лесотипологической классификационной системой*.

## Лимитированные экологические ресурсы

Очень долго один из основных параметров эдафической сетки, определяемый термином «трофность» (от греч. «трофэ» — питание, термин предложен Г.Н. Высоцким), не имел не только количественного, но и понятийного обоснования. Многолетние исследования автора, проведенные (в основном внепланово) на территории от Закарпатья до Якутии и от Архангельска до Ашхабада [13, 15], показали, что одинаковые по трофности местообитания в разных зонах формируются на сходных по гранулометрическому составу грунтах (песках, супесях, суглинках), повсеместно содержащих примерно одинаковые количества двух *основных лимитированных элементов питания растений — фосфора и калия*. При этом определяющее значение имеют не их средние проценты или запасы, а наибольшее валовое количество (кроме калия, заключенного в кристаллических решетках полевых шпатов) в пределах корнедоступного слоя, откуда растения черпают эти элементы так же, как они потребляют влагу из наиболее увлажненных слоев почвогрунта. Установлены значения количества фосфора и калия, обуславливающие формирование аналогичных трофотопов в разных зонах (менее 0,02 %  $P_2O_5$  и 0,03 %  $K_2O$  в бедных типах и более 0,06 %  $P_2O_5$  и 0,80 %  $K_2O$  — в богатых).

Очень удачным методом определения имеющихся в почве биоэлементов, в том числе их труднодоступных форм, является вытяжка Гинзбург (кипячение в смеси концентрированной серной и хлорной кислот) [19], в которую переходят все биоэлементы, исключая практически недоступный растениям калий кристаллических решеток полевых шпатов. Большое значение имеет содержание кальция, определяющее рН почвенных растворов, а тем самым и доступность биоэлементов, наибольшую в условиях нейтральной среды. Сопряженное изучение почв и их материнских пород показало жесткую обусловленность содержания фосфора и калия в почвах их содержанием в грунтах и подтвердило тот факт, что количество этих элементов в почвах, как и в целом минеральный состав почв, обусловлены составом почвообразующих пород.

Засоленность почв четче всего оценивается наличием и глубиной залегания *токсичного количества хлора* (> 0,03 %) и *соды* (> 0,01 %). Для территорий с засушливым климатом шкалу трофности эдсетки дополнена четырьмя *геотопами* —

Е, F, G, H, — что позволяет использовать ее во всех природных зонах [15, 16]. Кроме того, автором выделены четыре категории кальциефильных (карбонатных) вариантов: от слабокальциефильных ( $K'$ ), на которых произрастают дубравы с участием кальциефила ясеня обыкновенного и которые приурочены к лёссам повышенной карбонатности, до карбонатных пустошей (K) на выходах плотных карбонатных пород. Как и у засоленных почв, у нетоксичных высококарбонатных местообитаний определяющее значение для их лесорастительных свойств имеют условия увлажнения.

Важнейшее влияние на *продуктивность* растений оказывает влага — ее доступное на протяжении вегетации количество в корнеобитаемом слое, объективно оцениваемое по разности ее запасов на начало вегетации и в наиболее сухой период второй половины вегетации [8]. Оно изменяется от 150 мм в очень сухих типах до 500 мм и более во влажных. Сырые и мокрые типы во всех зонах формируются при близком залегании грунтовых вод (ГВ).

Как по количеству элементов питания и токсичных элементов, так и по запасам доступной влаги лесотипологической классификации вычленились в разных зонах 4–6 больших групп: от бедных до богатых, от слабо- до сильнозасоленных, от очень сухих до мокрых, заболоченных. В зависимости от зоны различаются площади этих типов и их положение в рельефе: в лесостепной зоне свежий тип увлажнения распространен на водоразделах (т. е. является зональным), в лесной — на верхних, в степной — на нижних частях склонов. Климат определяет степень реализации биопотенциала местообитаний.

Выявленные факты имеют очень большое значение: они раскрывают сущность основного принципа изучения природы, отличающего лесную типологию от других научных направлений. Лесотипологическая классификационная система основана на учете основных *лимитированных на Земле экологических* (необходимых для жизни) *ресурсов*, разной обеспеченности ими среды. Таких ресурсов всего три. Это *тепло, влага и пища*. Свет выступает как ограничитель производительности по отношению к подчиненным ярусам, но не к растительности в целом. Впервые эти три фактора назвал «элементами жизни растений» Высоцкий [8]. Далее два «космических» (тепло и свет) и два «земных» (пища и влага) фактора жизни растений выделил В.Р. Вильямс [20]. Из типологов только Погребняк [18] неоднократно отмечал особую роль данных факторов для формирования разных типов леса. Но эти ученые не оценивали их как лимитирующие жизнь. Лесотипологическая климатическая сетка построена

в координатах нарастания количеств тепла и атмосферных осадков, определяющих увлажнение надземной среды, эдафическая — на учете запасов пищи и доступной влаги в почвогрунтах. Как показали последующие наблюдения, эти факторы формируют и обуславливают все разнообразие живой природы. Тепло в качестве ограничителя жизнедеятельности выступает в приполярных областях и на высокогорьях, элементы питания — на грунтах легкого гранулометрического состава, маломощных, выпаханых землях и в тропических лесах. На остальной преобладающей части суши Земли главным ресурсом, ограничивающим продуктивность биоты, является влага.

*Тип лесорастительных условий* как единство климатопы и эдаптопы, или *экотоп*, *тип среды*, характеризуется строго определенным количеством и соотношением лимитированных экологических ресурсов. К каждому экотопу приурочен свой биоценоз (растительность, животный мир) и свои почвы, формирующие в единстве *экосистему*, в лесах — *тип леса*. Типы леса (степи) могут объединяться в более крупные лесотипологические таксоны — комплексы, массивы, ландшафты.

Лесное хозяйство должно вестись с учетом двух основных особенностей природных условий — *зональности*, определяемой климатом, и *внутризонального разнообразия*, связанного с различиями состава и строения (рельефа) поверхностных отложений и глубиной залегания и минерализацией грунтовых вод, проявляющихся через уровень плодородия почвогрунтов, их обеспеченность пищей и влагой. Это позволит повысить эффективность лесохозяйственного производства, организуя его по наиболее совершенному сценарию — на *зонально-типологической основе* [21], о чем Г.Ф. Морозов говорил 100 лет назад [22].

Необходимо значительно усилить внимание к роли климата, обуславливающего зональность и высотную поясность лесов. Нельзя считать одинаковыми в разных зонах типы леса, сходные по породному составу, поскольку они находятся в разных типах лесорастительных условий. При близком составе в разных климатических условиях они существенно различаются по продуктивности и долговечности, а потому требуют дифференцированных приемов хозяйствования. В связи с этим нужна разработка хозяйственной группировки типов леса для разных зон. Обоснование целесообразности такой группировки — возможность ведения хозяйства по крупным выделам. Основной принцип — объединение насаждений по единству главных лесохозяйственных приемов, обусловленному сходством условий произрастания — типов местообитаний. Приводим опыт такой группировки на примере лесной зоны Украины.

## Полесье (лесная зона)

I. Свежие и влажные сосновые боры в комплексе с сухими и сырыми борами на песчаных землях. Типы  $A_2, A_3 + A_1, A_4$ .

II. Свежие и влажные сосново-дубовые субори в комплексе с сырыми субориями и борами на глинистых песках и супесях. Типы  $B_2, B_3 + B_4, A_4$ .

III. Влажные дубово-грабово-сосновые сугруды в комплексе с сырыми на песках и супесях, подстилаемых на глубине до 2...3 м суглинками. Типы  $C_3 + C_4$ .

IV. Сырые и мокрые боры и субори на заболоченных землях. Типы  $A_4, A_5, B_4, B_5$ .

V. Влажные грабово-кленовые дубравы в комплексе с судубравами на лёссовидных и других суглинках. Типы  $D_3 + C_3$ .

VI. Пойменные варианты типов леса.

VI<sub>1</sub>. Насаждения ив и тополей на прирусловой пойме. Типы  $V'_{2-3} - C'_{1-3}$ .

VI<sub>2</sub>. Дубравы центральной поймы. Типы  $D''_2 + D''_3$ .

VI<sub>3</sub>. Сырые и мокрые черноольховые груды и сугруды (ольсы) по притеррасным понижениям. Типы  $C'''_{4-5} - D'''_{4-5}$ .

Во всех хозгруппах разных природных зон наличие в комплексах более сухих местообитаний предполагает более редкое размещение насаждений и более интенсивный уход за ними, наличие более богатых местообитаний — расширение ассортимента древесных пород и кустарников. Типы леса, не выделенные в самостоятельные группы, присоединяются к соответствующим группам по сходству их местообитаний.

## Значение лесотипологических принципов изучения природы

Обобщая приведенные материалы, особо подчеркнем то, что лесная типология Морозова — Крюденера — Погребняка представляет собой выдающееся научное достижение российских и украинских лесоводов. Изучив многовековые народные знания о природе, ученые восприняли от них понимание нерасторжимой связи и взаимообусловленности природных факторов. Одним из главных положений народных знаний являются издавна сложившиеся представления об экосистемном строении природы, формировании ее элементарных ячеек, какими являются однородные внутри себя участки насаждений, приуроченные к строго определенным условиям среды, прежде всего к почвогрунтам — боры, рамени, дубравы и др.

Крюденер создал классификацию типов насаждений, положив в ее основу плодородие почвогрунтов. *Плодородие, способность воспро-*

*изводить растения*, является главным качеством, отличающим почвы от всех других природных тел, их ни с чем не сопоставимой функцией, миссией на Земле, поскольку без растений, осуществляющих процесс фотосинтеза, переводящего неорганические соединения в органические, жизнь невозможна. Исключительным является принятый Крюденером принцип сопряженности разных природных объектов. Поскольку тип растительности обусловлен почвогрунтами, последние классифицируют не по их так называемым «внутренним» свойствам (генетическому типу, степени гумусированности, оструктуренности и др.), а по росту на них насаждений разного состава и продуктивности — олиго- или мезотрофов, ксеро- или гигрофитов. Границы типов почвогрунтов определяют по сменам на них типов леса, так как растительность признается критерием качества почвогрунтов и среды в целом. Мы называем этот прием *ключом Крюденера*. Между тем для всех проводимых комплексных исследований, начиная с известных докучаевских экспедиций конца XIX в., характерно то, что специалисты разных наук работают в них методами, принятыми в этих науках, а они очень слабо сопрягаются, так как в одной науке объекты классифицируются по происхождению, в других — по морфологии, в третьих — по составу. Поэтому взаимосвязь разных объектов в таких работах установить не удается.

Одним из наиболее революционных шагов лесной типологии является выделение в разных зонах, в связи с наличием в них сходных по потенциальному плодородию земель, *аналогичных типов местообитаний*, а следовательно, и *аналогичных типов леса*. Различаются лишь их площади и положение в рельефе. Климат обуславливает разную степень реализации потенциального плодородия земель. Эти факты не известны представителям естественных наук. Между тем они довольно легко выявляются методом фитоиндикации.

Исследованиями выявлено, что координаты эдафической сетки (системы) — водо- и пищеобеспеченность местообитаний — интегрально отражают различия состава и строения (рельефа) грунтов, поверхностных отложений, а также глубин залегания, режима и минерализации грунтовых вод (при их близком залегании), обуславливающих все разнообразие растительности и почв в пределах однородных по климату территорий или их внутризональное разнообразие. Богатство почв биоэлементами зависит от их исходного содержания в почвообразующих породах, их химического (минерального) состава и в целом растет по мере утяжеления гранулометрического состава грунтов, а также минерализации грунтовых вод.

Различия в водообеспеченности почвогрунтов при одинаковом количестве атмосферных осадков внутри зон связаны с перераспределением влаги рельефом и гранулометрическим составом поверхностных отложений, определяющим их водно-физические свойства, в частности водопроницаемость и водоудерживающую способность, а также с глубиной залегания и режимом ГВ. В результате шкала трофности эдафической сетки отражает утяжеление состава поверхностных отложений, как это показал еще Крюденер, и повышение минерализации ГВ, приводящее в итоге к засолению почв, шкала гигрогенности — понижение рельефа и приближение к поверхности ГВ. Поэтому данная сетка может называться также оропетрографической (от греч. «орос» — гора, «петра» — камень, горная порода). Данные факты определяют выход лесной типологии на уровень естественно-научной дисциплины.

При размещении эдафических сеток отдельных регионов в глобальной климатической (географической) сетке создается единая классификационная модель всех основных компонентов природной среды, «периодическая система» элементарных ячеек природы — экосистем. Координатами такой эдафо(гео)-климатической сетки являются главные абиотические факторы — климат, поверхностные отложения и грунтовые воды, их лимитирующие жизнь параметры, — тепло, влага и пища, зависимые переменные — биотические и биокосные — растительность, животные, почвы. Заметим, что эдафическая сетка по построению сходна с Периодической системой элементов Д.И. Менделеева: по горизонтали у Менделеева идет утяжеление атомного веса элементов, в эдсетке — утяжеление механического состава земель, по вертикали у Менделеева — увеличение щелочности элементов, в эдсетках — повышение увлажненности земель. Это очень крупное научное достижение лесоводов, еще один прорыв на том же естественно-научном уровне. В.В. Докучаев всю жизнь призывал изучать природу в целом, а не отдельные составные ее части, но он и помыслить не мог о возможности создания единой классификации природы.

Все эти достижения лесоводов определяются следующими причинами. Лесоводы никогда не имели возможности активно влиять на почвы и на среду обитания лесов в целом. Поэтому они шли по пути углубленного изучения взаимосвязей между лесом и средой с тем, чтобы опираться на них при восстановлении лесов. Многолетний, а нередко многовековой рост деревьев позволяет заметить зависимость растительности от факторов абиотической среды — климата, а внутри однородного климата — от почвогрунтов. Основоположники лесной типологии трудились



в почти нетронутых девственных лесах, в которых эти взаимосвязи выявляются особенно четко.

Одновременно эта нетронутость, неизученность лесов той поры обусловило необходимость при их обследовании тесных контактов с местным населением. Как оказалось, люди очень глубоко понимали природу этих лесов, сформулировав один из главных ее законов: «Каков грунт земли, таков и лес». Создатель первой лесотипологической классификации Крюденер понял, что означает этот народный постулат, и распределил леса по степени плодородия почв, на которых они произрастают, в координатах увеличения в них количества пищи и влаги. Именно так определяли плодородие почв Костычев и Вильямс. Метод фитоиндикации также был взят из народных знаний о лесе. Эти принципы Крюденера стали основой классификаций Алексева и Погребняка. Главный принцип их классификации — признание высших зеленых растений, масса которых на Земле превышает 99 % всего имеющегося на ней органического вещества, *критерием качества всех факторов природной среды*.

Выскажем свое глубокое убеждение в необходимости усилить внимание к изучению растительности, причем не только естественной, но и культурной, и сорной. На основании опыта лесных типологов можно утверждать, что знание растительности, ее видового состава, экологических особенностей разных видов и выделение по ним типов местообитания — бедных и сухих ( $A_1$ ) или богатых и влажных ( $D_3$ ) — в буквальном смысле открывает глаза на мир. Поэтому освоение приемов фитоиндикационной оценки среды крайне необходимым не только представителям всех наук о Земле, но и всем, кто на ней работает.

В своей монографии «Типы леса и типы природы» [16] автор постаралась показать, как лесотипологические принципы позволяют дать сопряженную классификацию всех основных природных факторов, и выделила типы и виды природы. *Видами природы* являются элементарные лесотипологические таксоны — типы леса, типы лесных и других экосистем (свежая сосново-дубовая суборь, влажный белоусовый луг и др.). Экосистемой (биоэкосистемой) автор называет однородный по плодородию участок суши или мелководья вместе со сформировавшимся на нем в процессе длительной эволюции биоценозом, строго соответствующим по своим экологическим потребностям уровню его плодородия и потому наиболее устойчивым и самовосстанавливающимся после уничтожения стихийными и антропогенными факторами. Под *типами природы* автор понимает *массивы* (термин Морозова) *близких видов* — дубравы, ельники, сельскохозяйственно-удобья на водораз-

делах, сосновые боры на песчаных террасах рек, злаково-разнотравные луга в поймах, верховые и низинные болота на переувлажненных землях.

В пределах природных зон, сформированных климатом, особенности растительности обусловлены наличием в почвогрунтах элементов питания и влаги: от разных по составу лесов, степей и лугов из требовательных видов растений на богатых биоэлементами суглинистых почвогрунтах, особенно лёссах, имеющих нейтральную реакцию, при которой биоэлементы наиболее доступны, и на минерализованных грунтовых водах до почти лишенных растительности переветренных кварцевых песков (практически 100 % бесплодного кварца) и верховых сфагновых болот на ультрапресных дождевых водах.

Одним из наиболее важных достоинств лесной типологии является принятый в качестве основного метода изучения взаимосвязей леса и среды метод фитоиндикации — оценка среды, прежде всего почвогрунтов, по составу, структуре и продуктивности произрастающей на данных почвогрунтах растительности. Разработанный Крюденером принцип систематизации лесов (этой наиболее мощной растительной формации Земли, в которой сконцентрировано не менее двух третей всего имеющегося на нашей планете органического вещества) по нарастанию плодородия их местообитаний, их обеспеченности лимитированными экологическими ресурсами, очень важен не только для лесной типологии, но и для понимания взаимосвязей между органической и неорганической природой, поскольку эти связи определяют уровень биоразнообразия, состав, структуру и продуктивность всего живого на нашей планете.

С помощью принципов лесной типологии можно дать развернутую характеристику законов, определяющих взаимосвязи органической и неорганической природы, которые В.В. Докучаев назвал сутью, ядром естествознания. Главное — это признание жесткой обусловленности живых организмов плодородием нашей планеты, количеством, соотношением и распределением по сезонам года тепла, влаги и пищи. Когда типологи вслед за Крюденером стали классифицировать леса по плодородию их местообитаний, природа из живописного хаоса превратилась в строгую и стройную систему, в которой все можно предвидеть, рассчитывать. Создана методика таких работ [23].

Начатый на рубеже XIX и XX вв. в лесоустройстве, а далее в лесокультурном деле перевод лесного хозяйства на лесотипологические принципы к настоящему времени доведен на Украине до такого уровня, когда практически все мероприятия — от семеноводства и выращивания посадочного материала до рубок главного пользования и



реконструкции малоценных насаждений — планируются и реализуются на лесотипологической основе, с учетом потенциальной производительности земель разных типов леса. Таким образом, достигнут уровень основной теоретической базы лесохозяйственного производства. Разработана целая серия наставлений и рекомендаций по вопросам ведения лесохозяйственного производства на лесотипологических позициях, обобщенных В.П. Ткачом [24]. Когда лесное хозяйство Украины особенно активно использовало эти разработки, оно выходило на положение одного из лучших в мире [25–27].

Лесная типология сформировалась на обнаруженных в народе представлениях о жесткой обусловленности лесов условиями среды и потому исходно является экологией леса. Разработки школы В.Н. Сукачева представляют одно из направлений фитоценологии, изучающей взаимосвязи внутри растительных сообществ (фитоценозов). Крюденер выделил типы леса по приуроченности к землям одного уровня плодородия, Сукачев — по преобладающим видам напочвенного покрова как наиболее конкурентоспособным. Эти исходные различия определяют разные подходы представителей данных школ к вопросам познания природы леса и к решению различных лесохозяйственных проблем.

## Выводы

Лесотипологические принципы можно использовать не только на всех этапах лесоводственных исследований и лесохозяйственного производства, но и в других сферах, в том числе в природоохранной деятельности и сельскохозяйственном производстве. Со временем данные принципы могут стать основополагающими для разных наук о природе Земли.

## Список литературы

- [1] Морозов Г.Ф. О типах насаждений и их значении в лесоводстве // Лесной журнал, 1904. Вып. 1. С. 6–25.
- [2] Tansley A.G. The use and abuse of vegetation concepts and terms // *Ecology*, 1935, v. 16, no. 3.
- [3] Крюденер А.А. Основы классификации типов насаждений и их народнохозяйственное значение в обиходе страны. Петроград: Типография Главного Управления Уделов, 1916. Вып. 3. 190 с.
- [4] Морозов Г.Ф. Исследование лесов Воронежской губернии // Лесной журнал, 1913. Вып. 3–4. С. 463–481.

## Сведения об авторах

**Мигунова Елена Сергеевна** — д-р с.-х. наук, профессор, академик Лесной академии наук Украины, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии леса Украинского научно-исследовательского института лесного хозяйства и агролесомелиорации имени Г.М. Высоцкого, migunova-l-s@yandex.ua

Статья поступила в редакцию 25.01.2017 г.

- [5] Сукачев В.Н. Основы лесной типологии и биогеоценологии. Избр. труды. Т. 1. Л.: Наука, 1972. 420 с.
- [6] Алексеев Е.В. Типы украинского леса. Правобережье. Киев, 1928. 120 с.
- [7] Крюденер А.А. Лесная типология людей природы и ее значение. 1926 // *Лісівництво і агролісомеліорація*. Харків: УкрНДЛГА, 2008. Вип. 113. С. 3–7.
- [8] Высоцкий Г.Н. Биологические, почвенные и фенологические наблюдения и исследования в Велико-Анадолле. 1901–1902 // *Избранные сочинения*. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 159–497.
- [9] Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипин Н.А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Сельхозгиз, 1956. 470 с.
- [10] Воробьев Д.В. Лесотипологическая классификация климатов // *Тр. Харьковского СХИ*, 1961. Т. 30. С. 23–43; 1972. Т. 169. С. 51–62.
- [11] Лавриненко Д.Д. Основы лесной экологии. Киев: УСХА, 1978. 35 с.
- [12] Воробьев Д.В., Погребняк П.С. Лісовий типологічний визначник Українського Полісся // *Тр. з ліс. дослід. справи*. Харків, 1929. Вип. XI. 164 с.
- [13] Мигунова Е.С. Леса и лесные земли (количественная оценка взаимосвязей). М.: Экология, 1993. 364 с.
- [14] Воробьев Д.В. Типы лесов европейской части СССР. Киев: АН УССР, 1953. 450 с.
- [15] Мигунова Е.С. Лесоводство и естественные науки (ботаника, география, почвоведение). Харьков, 2000. 1-е изд.; М.: МГУЛ, 2007. 2-е изд. 592 с.
- [16] Мигунова Е.С. Типы леса и типы природы. Экологические взаимосвязи. Saarbücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 295 с.
- [17] Погребняк П.С. Основи типологічної класифікації та методика складати її // *Сер. наук. вид. ВНДЛГА*. Харків: ВНДЛГА, 1931. Вип. 10.
- [18] Погребняк П.С. Основы лесной типологии. Киев: АН УССР, 1955. 456 с.
- [19] Гинзбург К.Е. Методы определения фосфора в почвах // *Агрохимические методы исследования почв*, под ред. А.В. Соколова. М.: Наука, 1975. С. 118.
- [20] Вильямс В.Р. Программа и конспект курса почвоведения (1935). Избр. сочинения. Т. 1. М.: Сельхозгиз, 1949. С. 21–132.
- [21] Моисеев Н.А., Побединский А.В. Зональные системы воспроизводства лесных ресурсов // *Лесное хозяйство*, 1986. № 10. С. 15–19.
- [22] Морозов Г.Ф. О лесоводственных устоях // *Лесной журнал*, 1918. Вып. 6–10. С. 380–392.
- [23] Воробьев Д.В. Методика лесотипологических исследований. Киев: Урожай, 1967. 387 с.
- [24] Остапенко Б.Ф., Ткач В.П. Лісова типологія. Харків: ХДАУ, 2002. 204 с.
- [25] Бобров Р.В. Лесные наши учителя // *Обзорная информация*. М.: ВНИИЦ Лесресурс, 1997. № 7. 58 с.
- [26] Высоцкий Г.Н. О карте типов местопроизрастаний // *Современные вопросы русского сельского хозяйства*. СПб., 1904. С. 81–94.
- [27] Крюденер А.А. Опыт группировки почвенного покрова в связи с местоположением, почвой, инсоляцией и возобновлением под пологом и на лесосеках // *Лесной журнал*, 1903. Вып. 6. С. 1430–1468.

## FOREST TYPOLOGY BY G.F. MOROZOV — A.A. KRYUDENER — P.S. POGREBNIYAK IS THEORETICAL BASIS OF FORESTRY

E.S. Migunova

Ukrainian Scientific Research Institute of Forestry and Agroforestry named after G.M. Vysotsky, 61024, Kharkiv, st. Pushkinskaya, 86 migunova-l-s@yandex.ua

The history of formation, classification models and methods of studying forest typology as the doctrine of the interrelationships of the forest and its environment are briefly described. A number of provisions that require refinement were named. The necessity of forestry management is grounded on the zonal-typological principle. The experience of economic grouping of forest types is suggested. The patterns of interrelations between living and inorganic nature revealed by the forest typology are examined.

**Keywords:** forest typology, climatic and edaphic networks, classification, fertility, limited ecological resources

**Suggested citation:** *Lesnaya tipologiya G.F. Morozova — A.A. Kryudenera — P.S. Pogrebnyaka — teoreticheskaya osnova lesovodstva* [Forest typology by G.F. Morozov — A.A. Kryudener — P.S. Pogrebnyak is theoretical basis of forestry] *Lesnyy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 52–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-52-63

### References

- [1] Morozov G.F. *O tipakh nasazhdeniy i ikh znachenii v lesovodstve* [On types of plantations and their significance in forestry] *Lesnoy zhurnal*, 1904, iss. 1, pp. 6–25.
- [2] Tansley A.G. The use and the abuse of vegetation concepts and terms. *Ecology*, 1935, v. 16, pp. 284–307.
- [3] Kryudener A.A. *Osnovy klassifikatsii tipov nasazhdeniy i ikh narodnokhozyaystvennoe znachenie v obikhode strany* [The basis for the classification of plantation types and their national economic importance in the country's everyday life]. Petrograd: Tipografiya Glavnogo Upravleniya Udelov, 1916, v. 3, 190 p.
- [4] Morozov G.F. *Issledovanie lesov Voronezhskoy gubernii* [Investigation of the forests of the Voronezh province] *Lesnoy zhurnal*, 1913, iss. 3–4, pp. 463–481.
- [5] Sukachev V.N. *Osnovy lesnoy tipologii i biogeotsenologii* [Basics of forest typology and biogeocenology]. Fav. works, t. 1. Leningrad: Nauka, 1972, 420 p.
- [6] Alekseev E.V. *Tipy ukrainskogo lesa. Pravoberezh'e* [Types of Ukrainian forest. Right-bank]. Kiev, 1928, 120 p.
- [7] Kryudener A.A. *Lesnaya tipologiya lyudey prirody i ee znachenie. 1926* [Forest typology of people of nature and its significance. 1926] Лісівництво і агролісомеліорація. Kharkiv: UkrNDILGA, 2008, v. 113, pp. 3–7.
- [8] Vysotskiy G.N. *Biologicheskie, pochvennye i fenologicheskie nablyude-niya i issledovaniya v Veliko-Anadole 1901–1902* [Biological, soil and phenological observations and studies in Veliko-Anadol. 1901-1902]. Selected treatises. T. 1. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1962, pp. 159–497.
- [9] Ramenskiy L.G., Tsatsenkin I.A., Chizhikov O.N., Antipin N.A. *Ekolo-gicheskaya otsenka kormovykh ugodiy po rastitel'nomu pokrovu* [Ecological assessment of fodder land by vegetation cover]. Moscow: Sel'khozgiz, 1956, 470 p.
- [10] Vorob'ev D.V. *Lesotipologicheskaya klassifikatsiya klimatov* [Lesitipologicheskaya classification of climates] Tr. Kharkov Agricultural Institute, 1961, t. 30, pp. 23–43; 1972, t. 169, pp. 51–62.
- [11] Lavrinenko D.D. *Osnovy lesnoy ekologii* [Fundamentals of forest ecology]. Kiev: USHA, 1978, 35 p.
- [12] Migunova E.S. *Lesy i lesnye zemli (kolichestvennaya otsenka vzaimo-svyazey)* [Forests and forest lands (a quantitative assessment of mutual relations)]. Moscow: Ecology, 1993, 364 p.
- [13] Migunova E.S. *Lesy i lesnye zemli (kolichestvennaya otsenka vzaimo-svyazey)* [Forests and forest lands (a quantitative assessment of mutual relations)]. Moscow: Ecology, 1993, 364 p.
- [14] Vorob'ev D.V. *Tipy lesov evropeyskoy chasti SSSR* [Types of forests in the European part of the USSR]. Kiev: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1953, 450 p.
- [15] Migunova E.S. *Lesovodstvo i estestvennye nauki (botanika, geogra-fiya, pochvovedenie)* [Forestry and natural sciences (botany, geography, soil science)]. Kharkov, 2000. 1st ed.; Moscow: MGUL, 2007. 2nd ed. 592 p.
- [16] Migunova E.S. *Tipy lesa i tipy prirody. Ekologicheskie vzaimosvyazi* [Types of forests and types of nature]. Ecological relationships. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, Germany. 2014. 295 p.
- [17] Pogrebnyak P.S. *Osnovi tipologichnoi klasifikatsii ta metodika skladati ii* [The basis of the typological classification and the methodology of warehousing ii]. Ser. nauk. VNDILGA, Kharkiv: VNDILGA, 1931, v. 10.
- [18] Pogrebnyak P.S. *Osnovy lesnoy tipologii* [Basics of forest typology]. Kiev: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1955, 456 p.
- [19] Ginzburg K.E. *Metody opredeleniya fosfora v pochvakh* [Methods for determination of phosphorus in soils] Agrochemical methods of soil investigation. Moscow: Nauka, 1975, p. 118.
- [20] Vil'yams V.R. *Programma i konspekt kursa pochvovedeniya (1935)* [Program and abstract of the course of soil science (1935)]. Fav. compositions. T.1. Moscow: Sel'khozgiz, 1949, pp. 21–132.
- [21] Moiseev N.A., Pobedinskiy A.V. *Zonal'nye sistemy vosproizvodstva lesnykh resursov* [Zonal systems of reproduction of forest resources] *Forestry*, 1986, no. 10, pp. 15–19.
- [22] Morozov G.F. *O lesovodstvennykh ustoyakh* [About silvicultural foundations] *Lesnoy zhurnal*, 1918, iss. 6–10, pp. 380–392.
- [23] Vorob'ev D.V. *Metodika lesotipologicheskikh issledovaniy* [Methods of forest typological studies]. Kiev: Urozhay, 1967, 387 p.
- [24] Ostapenko B.F., Tkach V.P. *Lisova tipologiya* [Lisova typology]. Kharkiv: KhDAU, 2002, 204 p.
- [25] Bobrov R.V. *Lesnye nashi uchitelya* [Our teachers are forest]. *Obzornaya informatsiya*. Moscow: VNIIZLesresurs, 1997, no. 7, 58 p.
- [26] Vysotskiy G.N. *O karte tipov mestoproizrastaniy* [On the map of types of habitats] Modern questions of Russian agriculture. St. Petersburg, 1904, pp. 81–94.
- [27] Kryudener A.A. *Opyt gruppirovki pochvennogo pokrova v svyazi s me-stopolozheniem, pochvoyu, insolyatsiey i vozobnovleniem pod pogomom i na lesno-sekakh* [Experience in the grouping of soil cover in connection with the location, soil, insolation and renewal under the canopy and on the forest-trees] *Lesnoy Journal*, 1903, iss. 6, pp. 1430–1468.

### Author's information

**Migunova Elena Sergeevna** — D-r Sci. (Agricultural), Professor, Academician of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Leading Researcher of the Forest Ecology Laboratory of the Ukrainian Scientific Research Institute of Forestry and Agroforestry named after G.M. Vysotsky, migunova-l-s@yandex.ua

Received 25.01.2017

## БИОЭНЕРГОТЕХНОЛОГИИ И ЛЕСОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС

**Г.И. Кольниченко, Я.В. Тарлаков, А.В. Сиротов**

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1  
tarlakov@mgul.ac.ru

Рассматривается перспектива использования древесины и ее отходов для получения электроэнергии и тепла. Перечислены факторы, способствующие и препятствующие внедрению биоэнерготехнологий в лесном комплексе. В лесном комплексе все более востребованными становятся биоэнерготехнологии, связанные с применением все большего числа средств малой распределенной энергетики, которые особенно нужны там, где решаются проблемы энергоснабжения маломощных потребителей, удаленных от централизованного электроснабжения. По данным статистики, в лесном комплексе наибольшее распространение получили дизельные электростанции. Возрастание масштабов применения дизельных электростанций в условиях малой распределенной энергетики в мире привело к использованию жидкого топлива и биодобавок к нему. Россия располагает большими возможностями для производства энергии из биотоплива, так как она имеет огромные запасы древесины (свыше 20 % мировых запасов). Наличие большого количества отходов при заготовке и переработке леса стимулирует развитие и внедрение биоэнергетических технологий, поскольку биоэнергетика не только представляет новые источники тепла и электроэнергии, но и решает проблему утилизации древесных отходов. К числу наиболее значимых энерготехнологий следует отнести переработку низкокачественных отходов древесины в облагороженное биотопливо — топливные гранулы (пеллеты) и брикеты. Но развитие этого сегмента биоэкономики тормозит ряд сдерживающих факторов (недостаток знаний в этой области, отсутствие недорогого и надежного отечественного оборудования для биоэнергетического производства и др.). В Московском государственном университете леса (ныне Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана) были проведены эксплуатационные испытания дизель-генератора, работающего на штатном стандартном биотопливе (то есть дизельном топливе с добавлением рапсового масла). В статье изложены методика и результаты аналитического и экспериментального исследования влияния свойств биотоплива на основные характеристики двигателей внутреннего сгорания и определения рациональных режимов дизельных электростанций с учетом экологических стандартов.

**Ключевые слова:** биоэнергетика, биотопливо, малая распределенная энергетика, дизельная электростанция, рапсовое масло

**Ссылка для цитирования:** Кольниченко Г.И., Тарлаков Я.В., Сиротов А.В. Биоэнерготехнологии и лесопромышленный комплекс // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 64–68.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-64-68

Стратегия развития лесного комплекса должна предусматривать развитие и внедрение биоэнергетических технологий, поскольку биоэнергетика не только предоставляет источники тепла и электроэнергии, но и решает проблему утилизации древесных отходов.

Россия располагает большими возможностями для производства энергии из биотоплива, так как имеет огромные запасы древесины (свыше 20 % мировых запасов). Наличие большого количества отходов при заготовке и переработке леса позволяет расширять внедрение технологий производства тепловой и электрической энергии из древесины.

К числу значимых биоэнергетических технологий следует в первую очередь отнести переработку низкокачественных отходов древесины в облагороженное биотопливо — топливные гранулы (пеллеты) и брикеты.

В структуру лесопромышленного производства входят предприятия лесозаготовительной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, на которых производство топливных гранул должно быть частью их основного процесса, включающего лесопиление,

выпуск пиломатериалов, производство древесно-стружечных и древесно-волоконистых плит, бумаги и т. д.

Интерес к биоэнерготехнологиям усиливается повсеместно. Сдерживающим фактором в развитии биоэкономики лесного комплекса страны является прежде всего недостаток знаний в этой области, а также отсутствие недорогого и надежного оборудования для биоэнергетического производства.

В ряде регионов России существует практика предоставления из регионального (республиканского) бюджета субсидий для компенсации части затрат на организацию производства брикетов и гранул, что стимулирует появление новых предприятий в этой сфере. В настоящее время формируется рынок биотоплива, но он до сих пор не сложился, находится в стадии становления и по сравнению с мировым рынком биотоплива неустойчив. Для движения вперед нашему рынку просто необходимо детально проработанный закон по энергосбережению, который должен быть написан с участием производителей биотоплива, производителей и поставщиков оборудования и представителей власти [1, 2].



В лесном комплексе все более востребованными становятся и другие биоэнерготехнологии, связанные с внедрением все большего числа средств малой распределенной энергетики (МРЭ), которая рассматривается сегодня как важная составляющая в новой парадигме развития мировой энергетики.

Объекты МРЭ особенно нужны там, где проблемы энергоснабжения огромных территорий на основе централизованного электросетевого строительства невозможно решить ввиду относительной дороговизны ЛЭП для питания удаленных маломощных потребителей. Именно поэтому множество удаленных от централизованного электроснабжения поселков (а это зачастую лесные поселки) снабжаются электроэнергией от локальных дизельных электростанций.

География размещения объектов малой генерации будет только расширяться, так как установки малой распределенной энергетики становятся все более привлекательными для потребителей, заинтересованных в экономии средств путем энергосбережения и в уменьшении выбросов токсичных веществ в атмосферу. В качестве привода электроустановок МРЭ могут быть использованы дизельные, бензиновые и газовые двигатели. Проведенный авторами анализ показал, что в лесном комплексе наибольшее распространение получили дизельные электростанции [3, 4].

В ближайшей перспективе (т. е. в течение нескольких десятилетий) нефть по-прежнему останется основным источником моторного топлива. Однако обострение проблемы обеспечения населения органическими энергоносителями привело к необходимости хотя бы частичной замены природных топлив (главным образом нефтяных) возобновляемыми растительными, т. е. биотопливом или его добавками. Выход на рынок биотоплива является серьезной альтернативой дорогостоящим нефтяным ресурсам [2].

### Объект исследования

В основе технологии получения биотоплива лежит реакция переэтерификации (т. е. модификации молекулярного состава) любого растительного масла или животного жира в метиловые эфиры жирных кислот. Себестоимость биодизельного топлива сегодня заведомо выше, чем аналогичных нефтепродуктов, но в регионах, обеспечивающих успешное выращивание масличных культур и не имеющих своего минерального сырья, такое производство может существовать и занимать определенный сектор рынка. Развитые страны (США, страны ЕС, Китай, Бразилия и др.) планируют в ближайшие годы существенно увеличить долю биотоплива в общем расходе топлива на транспортные и другие цели. Предполагается,

что концу XXI в. биотопливо обеспечит более двух третей потребности транспортной отрасли в жидком топливе [5, 6].

Биотоплива по своим физико-химическим свойствам более близки к дизельным топливам, чем к бензиновым, имеют сравнительно высокие плотность и вязкость, низкую испаряемость, что делает возможным их использование в дизельных двигателях, которые не только применяются на транспорте, но и входят в состав многочисленных дизельных электростанций [7, 8].

Значительное внимание во многих странах ныне уделяется биотопливу, полученному из рапса. Рапс занимает прочные позиции в мировом сельском хозяйстве как одна из основных масличных культур.

Использование рапсового масла связано с такими направлениями в развитии энергетики, как увеличение энергетического использования биомассы, развитие средств малой распределенной энергетики и замена потребления нефтепродуктов и природного газа на биотопливо [9].

### Цель работы

В Московском государственном университете леса (ныне Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана) были проведены эксплуатационные испытания дизель-генератора как объекта исследования, связанного с определением мощностных экологических и экономических характеристик двигателя, работающего на штатном стандартном топливе и биотопливе, т. е. дизельном топливе (ДТ) с добавлением рапсового масла (РМ) [4].

Математическая модель определения оптимальных характеристик работы двигателей на топливе с биодобавками, а также критериев оценки работы таких двигателей с точки зрения экологической безопасности была построена и исследована на предмет оптимизации с помощью общих методов нелинейного математического программирования.

Общая задача нелинейного (в нашем случае) программирования состояла в определении максимального или минимального (в зависимости от требований задачи) значения целевой функции при условии, что переменные этой функции могут удовлетворять некоторым ограничениям или связям.

В общем случае целевая функция, выражающая преимущества того или иного дизельного двигателя на топливе с определенным процентным содержанием биодобавок, работающего на определенной вырабатываемой полезной мощности по определенному технологическому режиму с затратами на техническое обслуживание (ТО), ремонт (Р) и модернизацию, определена следующим образом:



$$F(x_1, \dots, x_k, T, C, P_1, P_2, D) = A(x_1, \dots, x_k, T, C, P_1, P_2, D) + B(T, C) + G(x_1, \dots, x_k, T, D) \rightarrow \min \text{ при естественных ограничениях } h_j(x_1, \dots, x_k) \leq b_j,$$

где  $h_j(x_1, \dots, x_k)$  — ограничительные функции, определяемые из положений предлагаемой методики;

$x_1, \dots, x_k$  — набор параметров, от которых может зависеть работа двигателя (такие как процентное содержание биодобавок, выделяемая мощность, мощность потребляемая, вязкость компонентов и т. д.);

$b_j$  — параметры ограничений по вредным выбросам в атмосферу, предъявляемые евростандартами.

Затраты на топливо  $A(x_1, \dots, x_k, P_1, P_2, D)$  зависят от стоимости биодобавки  $P_1$  и стоимости дизельного топлива  $P_2$ , а также от физического расхода топлива  $D$ , который, в свою очередь, зависит от тех же параметров:

$$D = D(x_1, \dots, x_k).$$

Затраты на техническое обслуживание и ремонт  $B(T, C)$  зависят от вида используемого топлива, стоимости ТО и Р, а также от периодичности ТО и Р(T):

$$C = C(x_1, \dots, x_k, T).$$

Затраты на модернизацию  $G$ , т. е. замена элементов топливной аппаратуры, включение в состав двигателя специальных устройств подготовки топлива, зависят от стоимости новых элементов топливной аппаратуры с учетом особенностей применяемого биотоплива, а также способа подготовки топлива (например, путем подогрева). При этом будет соответственно изменяться периодичность ТО и Р, а также расход топлива:

$$G(x_1, \dots, x_k, T, D).$$

В качестве стандартного топлива для дизельной электростанции типа SKAT УГД-4500 ( $P_{\max} = 5$  кВт) использовалось чистое дизельное топливо по ГОСТ 309–82 и смесевое топливо (дизельное топливо + рапсовое масло в различных пропорциях). Соотношение РМ:ДТ в смесевом топливе варьировалось от 0:100 до 40:60.

Для оценки эксплуатационных показателей дизельных электростанций (ДЭС) проведена серия экспериментов по количественному определению содержания вредных веществ ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH$ ) и дымности отработавших газов (ОГ) при разном процентном содержании биодобавок для разных значений генерируемых мощностей. С этой целью разработан стенд для определения технических характеристик передвижных электростанций с приводом от двигателей внутреннего сгорания [10].

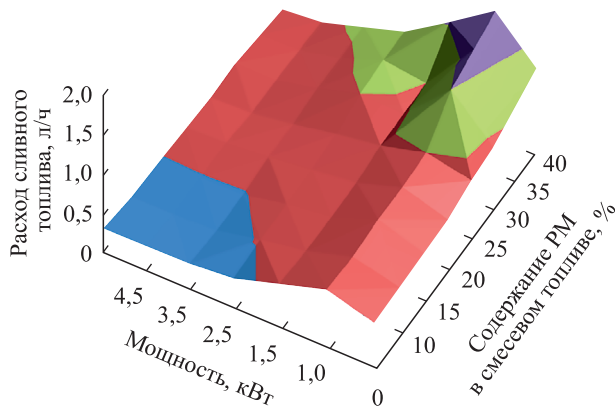
## Результаты и обсуждение

Таким образом, основными результатами проведенных исследований являются разработка методического обеспечения данных экспериментов и использование предложенного авторами стенда с целью получения зависимостей расхода топлива от мощности для различных смесевых топлив (в пересчете на 1 кВт · ч генерируемой электроэнергии), а также их последующего применения для определения вредных веществ в ОГ в зависимости от режимных параметров двигателей внутреннего сгорания.

С помощью полученных функциональных зависимостей и значений ограничительных параметров стандартов для каждого используемого значения процентного содержания биодобавки определяется диапазон мощностей, генерируемых ДЭС, в котором возможна работа двигателя при данном процентном содержании биодобавки, на основе чего формируются ограничения для возможных технологических режимов работы ДЭС [2].

Таким образом, все полученные формулы используются для обоснования рационального применения смесевое топлива с учетом суммарного воздействия всех компонентов вредных веществ и определения области допустимых значений эксплуатационных показателей ДЭС в зависимости от выбранных ограничений по евростандартам (EURO IV, EURO V и т. д.). На рисунке изображен трехмерный график, с помощью которого можно определить оптимальные эксплуатационные показатели ДЭС.

С помощью графика можно определить расход смесевое топлива при различном процентном содержании РМ в нем и варьировании генериру-



Графическое определение оптимальных эксплуатационных показателей ДЭС относительно требуемых условий  
Graphical definition of optimal operational parameters of DES concerning the required conditions

емой мощности. Кроме того, график позволяет подобрать подходящее смесевое топливо с выполнением оптимальных условий эксплуатации.

## Выводы

1. Предприятия лесного комплекса России и его лесопромышленный сектор предоставляют огромные возможности для внедрения биоэнергетических технологий. При этом предпочтительно включать производство твердого обогороженного биотоплива (гранул, брикетов) в основной производственный процесс предприятия.

2. Тенденции развития мировой энергетики подтверждают актуальность задачи постепенной замены традиционного жидкого топлива возобновляемыми источниками энергии. Проведенные в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) экспериментальные и теоретические исследования работы дизельной электростанции позволили установить степень влияния концентрации биодобавок к дизельному топливу на ее эксплуатационные характеристики. Подтверждена работоспособность двигателя на биотопливах различного состава. Установлена возможность улучшения показателей токсичности путем оптимизации состава смесевое топлива.

3. Полученные в ходе исследования зависимости эксплуатационных показателей дизельных электростанций позволяют выбрать рациональные режимы работы, включающие оптимизацию расхода и затрат на топливо, а также минимизацию количества вредных веществ в отработавших газах. На основании данной информации определяются диапазоны экологически безопасных режимов работы ДЭС в зависимости от процентного содержания биодобавок с учетом ограничений по мощностным, экономическим и экологическим показателям.

## Сведения об авторах

**Кольниченко Георгий Иванович** — д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [g\\_kolnic@mail.ru](mailto:g_kolnic@mail.ru)

**Тарлаков Яков Викторович** — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [tarlakov@mgul.ac.ru](mailto:tarlakov@mgul.ac.ru)

**Сиротов Александр Владиславович** — д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), [siroto@mgul.ac.ru](mailto:siroto@mgul.ac.ru)

## Список литературы

- [1] Россо Я. Что мешает развитию отечественной биоэнергетики? // ЛесПромИнформ, 2016. № 6 (120). С. 38–39.
- [2] Rakopoulos C.D., Rakopoulos D.C., Giakoumis E.G., Dimaratos A.M., Founti M.A. Comparative environmental behavior of bus engine operating on blends of diesel fuel with four straight vegetable oils of Greek origin: sunflower, cottonseed, corn and olive // Int. J. Green Energy Fuel, 2011, v. 90, pp. 3439–3446.
- [3] Кольниченко Г.И., Сиротов А.В., Тарлаков Я.В. Исследование и обоснование эксплуатационных характеристик дизель-генератора, работающего на дизельном топливе с биодобавками // Сб. тр. III Междунар. конф. АПЭЭТ-2014. Екатеринбург: УРФУ, 2014. С. 230–232.
- [4] Тарлаков Я.В. Эксплуатационные показатели дизельных электростанций лесного комплекса при работе на биотопливе: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУИ, 2013. 156 с.
- [5] Астахов К. Природный газ и солнечная энергия как потенциальные доминанты // Независимая газета – Энергия, 14 мая 2013 г.
- [6] Balafoutis A.T., Papageorgiou E., Dikopoulou Z., Fountas S., Papadakis G. Sunflower Oil Fuel for Diesel Engines: An Experimental Investigation and Optimum Engine Setting Evaluation Using a Multi-Criteria Decision Making Approach. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15435075.2013.777912>.
- [7] Avinash Kumar Agarwal, Atul Dhar. Wear, durability, and lubricating oil performance of a straight vegetable oil (Karanja) blend fueled direct injection compression ignition engine // J. Renewable and Sustainable Energy, 2012, no. 4, p. 063138. Available at: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4771694>
- [8] Sendilvelan S., Anandanatarajan R. Controlling Silicon and Soot Content in the Crank Case Oil to Improve Performance of Diesel Engine Global J. Res. in Enging, 2016, v. 16, no. 2-a. Available at: <http://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/1456>
- [9] Esteban B., Baquero G., Puig R., Riba J.R., Rius A. Is it environmentally advantageous to use vegetable oil directly as biofuel instead of converting it to biodiesel? // Biomass Bioenergy, 2011, no. 35, pp. 1317–1328. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.025>
- [10] Устройство для измерения технических характеристик передвижных электростанций с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Пат. 106918 Российская Федерация МПК F 02 И 63/04. / А.В. Сиротов, Я.В. Тарлаков, В.И. Панферов, заявитель и патентообладатель МГУИ. № 2011112065/06; заявл. 31.03.11; опубл. 27.07.11, бюл. № 21. 2 с.

Статья поступила в редакцию 08.06.2017 г.

## BIOENERGETIC TECHNOLOGIES AND FOREST INDUSTRY COMPLEX

G.I. Kol'nichenko, Ya.V. Tarlakov, A.V. Sirotoy

BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia  
tarlakov@mgul.ac.ru

The article studies perspectives of wood usage to produce electrical and heat energy, it also lists factors promoting and hindering bioenergetics technologies implementation in the forest sector. The article states that bioenergetics technologies are becoming more and more popular in the forest sector due to the implementation of more and more sources of small scale distributed energetics, which are needed in those places where problems of power supply to low capacity customers living in remote areas far from a central power supply are solved. Statistics reports that diesel power stations got the most popular in forest sector. There has been a tendency of using liquid fuel and bioadditives in it due to the raised amounts of applying diesel power stations in terms of small scale distributed energetics in forest regions. Due to this fact the article states the main points of methodology and results of analytical and experimental research about the influence of biofuel properties on the basic characteristics of internal combustion engines as well as about determining rational regimes of diesel power stations taking into account ecological restrictions. Russia has a lot of possibilities to produce energy from bio fuel, as it has huge deposits of wood (over 20 per cent of the world deposits). A big amount of waste left after logging and wood processing stimulates the development and implementation of bioenergetics technologies because it is not only the source of heat and energy but also can solve the problem of waste utilization. That is why one of the most important energetic technologies must be processing of low quality wood waste into higher quality bio fuel — pellets and brick fuel. However, the development of this bioenergetic technology is stopped by a number of limiting factors (lack of knowledge in this sphere, lack of cheap but reliable equipment for the industry etc). In Moscow State Forest University (now — Mytishchi Branch Bauman Moscow State Technical University) the performance tests of diesel generator working on standard fuel with the additives of rape oil have been made. The article states the main points of methodology and results of analytical and experimental research on the influence of biofuel properties on the basic characteristics of internal combustion engines as well as about determining rational regimes of diesel power stations taking into account ecological restrictions.

**Keywords:** bioenergy, biofuel, small scale distributed energetics, diesel power station, rape oil

**Suggested citation:** Kol'nichenko G.I., Tarlakov Ya.V., Sirotoy A.V. *Bioenergotekhnologii i lesopromyshlennyy kompleks* [Bioenergetic technologies and forest industry complex]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 64–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-64-68

### References

- [1] Rosso Ya. *Chto meshaet razvitiyu otechestvennoy bioenergetiki?* [What prevents the development of domestic bioenergy?] Specialized information and analytical magazine. *LesPromInform*, 2016, no. 6 (120), pp. 38–39.
- [2] Rakopoulos C.D., Rakopoulos D.C., Giakoumis E.G., Dimaratos A.M., Founti M.A. Comparative environmental behavior of bus engine operating on blends of diesel fuel with four straight vegetable oils of Greek origin: sunflower, cottonseed, corn and olive. *International Journal of Green Energy Fuel*, 2011, v. 90, pp. 3439–3446.
- [3] Kol'nichenko G.I., Sirotoy A.V., Tarlakov Ya.V. *Issledovanie i obosnovanie ekspluatatsionnykh kharakteristik dizel'-generatortora, rabotayushchego na dizel'nom toplive s biodobavkami* [Research and justification of the performance characteristics of a diesel generator operating on diesel fuel with bioadditives] Proceedings of the III International Conference APEET-2014. Ekaterinburg: URFU, 2014, pp. 230–232.
- [4] Tarlakov Ya.V. *Ekspluatatsionnye pokazateli dizel'nykh elektrostansiy lesnogo kompleksa pri rabote na biotoplive: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Operational indicators of diesel power plants of the forest complex when working on biofuel: Diss. ... Cand. Sci. (Tech.)]. Moscow: MGUL, 2013.
- [5] Astakhov K. *Prirodnyy gaz i solnechnaya energiya kak potentsial'nye dominanty* [Natural Gas and Solar Energy as Potential Dominants] *Nezavisimaya Gazeta – Energiya*, May 14, 2013.
- [6] Balafoutis A.T., Papageorgiou E., Dikopoulou Z., Fountas S., Papadakis G. Sunflower Oil Fuel for Diesel Engines: An Experimental Investigation and Optimum Engine Setting Evaluation Using a Multi-Criteria Decision Making Approach. Published online: 20 Jun 2013. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15435075.2013.777912?scroll=top&needAccess=true>
- [7] Avinash Kumar Agarwal, Atul Dhar Wear, durability, and lubricating oil performance of a straight vegetable oil (Karanja) blend fueled direct injection compression ignition engine // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2012, no. 4, 063138. Published Online: December 2012. Available at: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4771694>
- [8] Sendilvelan S., Anandanatarajan R. Controlling Silicon and Soot Content in the Crank Case Oil to Improve Performance of Diesel Engine The Global Journal of Researches in Engineering, v. 16, no. 2-a (2016) Available at: <http://engineeringresearch.org/index.php/GJRE/article/view/1456>
- [9] Esteban B., Baquero G., Puig R., Riba J.R., Rius A. Is it environmentally advantageous to use vegetable oil directly as biofuel instead of converting it to biodiesel? // *Biomass Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1317–1328. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953410004836?via%3Dihub>
- [10] Sirotoy A.V., Tarlakov Ya.V., Panferov V.I. *Patent na poleznuyu model' 106918, Rossiyskaya Federatsiya MPK F 02 I 63/04. Ustroystvo dlya izmereniya tekhnicheskikh kharakteristik peredvizhnykh elektrostansiy s privodom ot dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [Device for measuring the technical characteristics of mobile power plants driven by an internal combustion engine. Patent for Utility Model 106918, Russian Federation IPC F 02 AND 63/04] applicant and patent holder Moscow State Forest University. No. 2011112065/06; claimed. 31.03.11; publ. 27.07.11, bul. no. 21. 2 p.

### Author's information

**Kol'nichenko Georgiy Ivanovich** — Dr. Sci. (Tech.), Prof. BMSTU (Mytishchi branch), [g\\_kolnic@mail.ru](mailto:g_kolnic@mail.ru)  
**Tarlakov Yakov Viktorovich** — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. BMSTU (Mytishchi branch), [tarlakov@mgul.ac.ru](mailto:tarlakov@mgul.ac.ru)  
**Sirotoy Aleksandr Vladislavovich** — Dr. Sci. (Tech.), Prof. BMSTU (Mytishchi branch), [sirotoy@mgul.ac.ru](mailto:sirotoy@mgul.ac.ru)

Received 08.06.2017

## ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ТЕРМИЧЕСКИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

М.Г. Ермоченков, А.Г. Евстигнеев

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

ermochenkov@mgul.ac.ru

Термическое модифицирование древесины широко используется для улучшения ее свойств. Применение термически модифицированной древесины в качестве отделочного и конструкционного материала предполагает наличие информации о ее теплофизических и физико-механических свойствах, в том числе о теплопроводности. Нагрев без доступа окислителя приводит к деструкции материала, которая вызывает изменение состава и структуры и, как следствие, свойств. Термодеструкция является многостадийным процессом. Степень разложения материала зависит от температуры, времени и кинетических параметров каждой стадии процесса. В статье приведены результаты исследований теплопроводности древесины и ее изменений при термообработке. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для определения коэффициентов теплопроводности различных материалов, в которой реализован метод стационарного плоского слоя. Проведены экспериментальные исследования теплопроводности образцов древесины сосны, ели и березы. Образцы изготавливались из необработанной древесины и из древесины, подвергшейся термической деструкции. Режимы отжига исходных материалов определялись с учетом кинетических параметров термодеструкции соответствующих пород древесины. Для математического описания теплопроводности древесины и ее изменений в процессе термообработки предложено использовать методы теории обобщенной проводимости, модель материалов со взаимопроницаемыми структурами. Такой подход позволяет учитывать изменение состава и структуры материала, его влажности, а также состав и свойства газофазных продуктов в порах древесины. Проведено сравнение результатов экспериментальных и расчетных исследований коэффициентов теплопроводности образцов из древесины березы, сосны и ели при разных значениях влажности и степени термической деструкции. Показано удовлетворительное совпадение результатов расчетов и экспериментов.

**Ключевые слова:** древесина, термическая деструкция, модифицирование, кинетические параметры, коэффициент теплопроводности

**Ссылка для цитирования:** Ермоченков М.Г., Евстигнеев А.Г. Теплопроводность термически модифицированной древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 69–74.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-69-74

Древесина — это природный композиционный материал. Она широко используется в качестве конструкционного и отделочного материала. Древесина обладает рядом достоинств и недостатков. Для улучшения свойств ее подвергают модифицированию. В настоящее время все более широкое применение находит термическое модифицирование. Это процесс деструкции древесины при высокой температуре без доступа кислорода. В результате изменяются состав, структура и свойства материала. При использовании термодревесины в качестве строительного материала большое значение имеет информация о ее теплофизических свойствах. Таким образом, целью исследования является разработка метода прогнозирования теплопроводности термически модифицированной древесины.

### Методы и исследования

Были проведены исследования теплопроводности древесины, модифицированной при различных режимах. Степень модифицирования определяется интенсивностью и временем теплового воздействия. Термическая деструкция рассматривается как сложный многостадийный физико-химический

процесс. Скорость протекания многостадийного процесса описывается уравнением [1–5]

$$\frac{d\omega_j}{d\tau} = \sum_{j=1}^m \omega_j^{n_j} A_j \exp\left(-\frac{E_j}{RT}\right), \quad (1)$$

где  $j$  — номер стадии;

$m$  — число стадий;

$\omega_j$  — безразмерная масса стадии;

$n_j$  — порядок реакции  $j$ -й стадии;

$A_j$  — частотный фактор  $j$ -й стадии,  $\text{с}^{-1}$ ;

$E_j$  — энергия активации  $j$ -й стадии, Дж/моль;

$R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К);

$T$  — температура, К.

Кинетические параметры  $A$ ,  $E$  и  $\omega$  определяют по результатам термогравиметрических экспериментов [5–9]. Метод обработки результатов экспериментальных исследований для получения по стадийных кинетических параметров приведен в работах [2, 10–12].

Относительная масса стадии может быть определена из соотношения [2, 3, 11]

$$\omega_{\gamma}(T, \tau) = \omega_{0,\gamma} \exp\left[-A_{\gamma} \int_0^{\tau} \exp\left(-\frac{E_{\gamma}}{RT}\right) d\tau\right], \quad (2)$$



Относительная масса образца

$$\omega(T, \tau) = \sum_{\gamma} \omega_{0,\gamma} \exp \left[ -A_{\gamma} \int_0^{\tau} \exp \left( -\frac{E_{\gamma}}{RT} \right) d\tau \right]. \quad (3)$$

Результаты исследований кинетики термической деструкции древесины приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

**Кинетические параметры термической деструкции древесины**  
**Kinetic parameters of thermal destruction of wood**

Но- мер ста- дии	Береза			Сосна		
	На- чаль- ная масса стадии $\omega_0$	Энергия акти- вации $E/R, К$	Частотный фактор $A,$ $c^{-1}$	На- чаль- ная масса стадии, $\omega_0$	Энергия акти- вации, $E/R, К$	Частотный фактор, $A,$ $c^{-1}$
1	0,164	21 274	$3,666 \cdot 10^{14}$	0,023	13 941	$2,987 \cdot 10^9$
2	0,246	26 006	$7,347 \cdot 10^{16}$	0,077	19 460	$7,567 \cdot 10^{12}$
3	0,216	17 997	$4,988 \cdot 10^{10}$	0,606	17 991	$3,319 \cdot 10^{10}$
4	0,179	5 823	10,448	0,134	8 535	571
5	0,195	10 049	500,765	0,160	11 793	$3,005 \cdot 10^3$

Для учета зависимости коэффициента теплопроводности термически модифицированной древесины от плотности, влажности, степени термической деструкции, состава газовой фазы в порах и температуры удобно воспользоваться методами теории обобщенной проводимости — формулой для материалов со взаимопроникающими компонентами [13]:

$$\lambda = \lambda_1 \left[ C^2 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} (1 - C)^2 + 2 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{C(1 - C)}{\left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} C + 1 - C \right)} \right], \quad (4)$$

$$C = 0,5 + A \cos \omega / 3, \quad (5)$$

$$A = -1; \varphi = 2\pi - \arccos(1 - 2r_2) \text{ при } 0 \leq r_2 \leq 0,5, \quad (6)$$

$$A = 1; \varphi = 2\pi - \arccos(2r_2 - 1) \text{ при } 0,5 < r_2 \leq 1. \quad (7)$$

Определение коэффициента теплопроводности осуществляется как последовательный расчет теплопроводности бинарных смесей.

Значения истинных (при нулевой пористости) коэффициентов теплопроводности каждого из компонентов могут быть рассчитаны по формулам

$$\lambda_{и} = \frac{-(\lambda_{в} C^3 + \lambda_{в} d^3 - \lambda_{эф} d + 2\lambda_{в} C d)}{2C^2 d} \pm \frac{\sqrt{(\lambda_{в} C^3 + \lambda_{в} d^3 - \lambda_{эф} d + 2\lambda_{в} C d)^2 - 4C^2 d (\lambda_{в}^2 C d^2 - \lambda_{эф} \lambda_{в} C)}}{2C^2 d} \times \frac{\sqrt{-4C^2 d (\lambda_{в}^2 C d^2 - \lambda_{эф} \lambda_{в} C)}}{2C^2 d}. \quad (8)$$

Здесь  $\lambda_{и}$  — истинный коэффициент теплопроводности материала;

$\lambda_{в}$  — коэффициент теплопроводности воздуха в порах материала;

$\lambda_{эф}$  — эффективный коэффициент теплопроводности материала;

$$d = 1 - C, \quad C = 0,5 + A \cos \omega / 3, \quad (9)$$

$$A = (-1); \varphi = 2\pi - \arccos(1 - 2\Pi) \text{ при } 0 \leq \Pi \leq 0,5,$$

$$A = 1; \varphi = 2\pi - \arccos(2\Pi - 1), \text{ при } 0,5 \leq \Pi \leq 1, \quad (10)$$

где  $\Pi$  — пористость исследуемых образцов.

Экспериментальные исследования теплопроводности проводились методом стационарного плоского слоя. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Образец 1 исследуемого материала в форме цилиндра диаметром 100 мм или менее и высотой 2...5 мм устанавливается на рабочую поверхность холодильника 10. Холодильник служит для отвода теплоты, проходящей через образец, и создания перепада температур. Он изготовлен из меди, так как она имеет теплопроводность, более чем на три порядка превышающую теплопроводность исследуемых материалов, и обеспечивает интенсивный отвод теплоты от зоны контакта с образцом. Холодильник имеет массу более 40 кг и, вследствие этого, большую теплоемкость, что обуславливает практическую неизменность его температуры при проведении экспериментального исследования.

Для создания теплового потока через исследуемый образец на него устанавливается электрический нагреватель 2. Перепад температур на образце измеряется дифференциальной термопарой 11. Возникающая в термопаре термо-ЭДС регистрируется с помощью цифрового мультиметра 5 типа АРРА109. Исследуемый образец с нагревателем находится внутри охранного нагревателя 4, что предотвращает потери теплоты с верхних и боковых поверхностей. Между основным и охранным нагревателями создается зазор с помощью кольцевой прокладки 3, изготовленной из теплоизоляционного материала. Термопара 8 контролирует разность температур между верхней поверхностью основного и нижней поверхностью охранный нагревателей. Величина вкладываемой в охранный нагреватель мощности регулируется прецизионным задатчиком температуры 7 типа РИФ-101 и обеспечивает нулевую разность температур. Свободные концы термопар 11 и 8 подведены к термостатированному переключателю 6. Для уменьшения влияния на результаты экспериментальных исследований теплопроводности случайных факторов, связанных с возможными изменениями режимов конвективных потоков в зоне установки, рабочий участок накрыт стеклянным колпаком 9.

Образец из исследуемого материала помещается на рабочую поверхность холодильника, сверху на него устанавливается нагреватель. Места

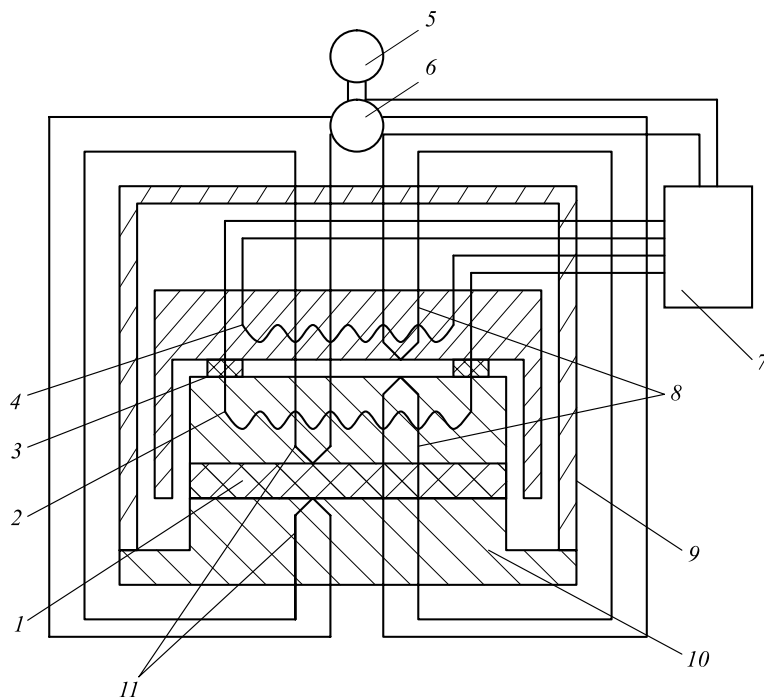


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения коэффициентов теплопроводности композиционных материалов

Fig. 1. Diagram of the experimental setup for determining the coefficients of thermal conductivity of composite materials

контактов образца с поверхностью холодильника и нагревателя смазываются тонким слоем консистентной смазки. Для создания и поддержания стационарного теплового режима нагреватель подключен к стабилизированному источнику постоянного тока. Мощность нагревателя задается с таким расчетом, чтобы перепад температур на внешних поверхностях образца составлял 1...8 К.

Коэффициент теплопроводности древесины определяется из соотношения

$$\lambda = \frac{q\delta}{(T_{w1} - T_{w2})}. \quad (11)$$

Здесь  $\delta$  — толщина образца, м;

$T_{w1}$  и  $T_{w2}$  — температуры внешних поверхностей образца, К;

$q$  — плотность удельного теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>,

$$q = \frac{IU}{F_{обр}}, \quad (12)$$

где  $I$  — сила тока, проходящего через нагреватель, А;

$U$  — падение напряжения на нагревателе, В;

$F_{обр}$  — площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

## Результаты и обсуждение

Были проведены экспериментальные исследования теплопроводности древесины различных пород.

Сосновые образцы изготавливались из древесины, модифицированной в масляной среде при температуре  $T = 210$  °С, время нагрева  $\tau = 4$  ч. Плотность сухого материала до модифицирования составляла  $\rho_{нач} = 476$  кг/м<sup>3</sup>. Графики изменения относительных масс отдельных стадий приведены на рис. 2. Определялись плотность образцов из модифицированной древесины, коэффициент теплопроводности и влажность. Расчет коэффициентов теплопроводности образцов древесины проводился по соотношениям (4)–(7). Результаты экспериментальных и расчетных исследований приведены в табл. 2.

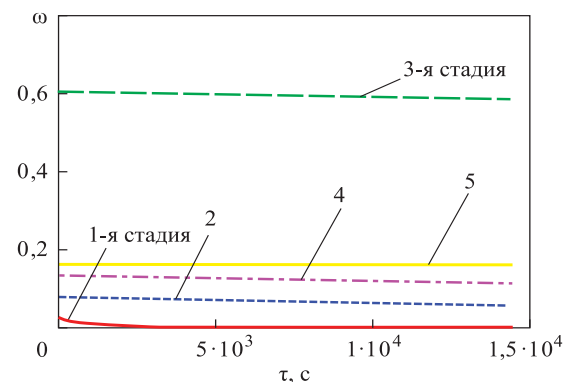


Рис. 2. Зависимость относительных масс отдельных стадий термической деструкции древесины сосны ( $T = 210$  °С) от времени

Fig. 2. Time dependences of relative masses of individual stages of thermal destruction of pine wood ( $T = 210$  °С)

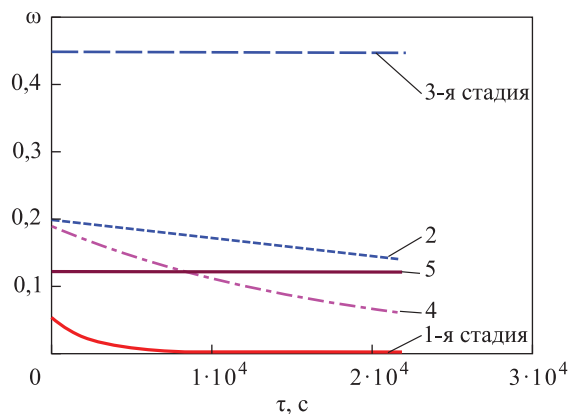
Т а б л и ц а 2

**Результаты экспериментальных и расчетных исследований теплопроводности древесины**  
**Results of experimental calculating studies of the thermal conductivity of wood**

Древесина	Температура нагрева, °С	Время нагрева, ч	Начальная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Текущая плотность, кг/м <sup>3</sup>	Текущая влажность, %	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	
						Расчетное значение	Экспериментальное значение
Сосна	210	4	476	438	1,8	0,115	0,114
	210	4	476	459	2,0	0,116	0,114
	210	4	476	431	1,8	0,116	0,112
Ель	230	5,5	414	317	4,5	0,101	0,099
	230	5,5	414	302	3,0	0,092	0,094
Сосна	–	–	546	–	7	0,16	0,15
Береза	–	–	644	–	9	0,19	0,18
	–	–	635	–	10	0,20	0,19

Древесина ели модифицировалась в масляной среде при температуре  $T = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , время нагрева  $\tau = 5,5\text{ ч}$ .

На рис. 3 приведены графики зависимости от времени относительных масс отдельных стадий деструкции древесины ели.



**Рис. 3.** Зависимость относительных масс отдельных стадий термической деструкции древесины ели ( $T = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) от времени

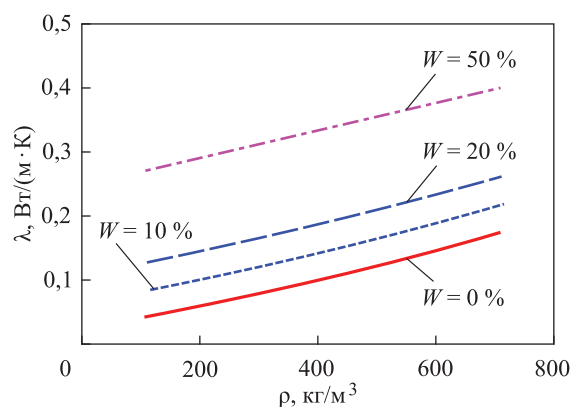
**Fig. 3.** Time dependence of relative masses of individual stages of thermal destruction of spruce wood ( $T = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Начальная плотность древесины ели в абсолютно сухом состоянии составляла  $\rho_{\text{нач}} = 414\text{ кг/м}^3$ . Результаты экспериментальных исследований коэффициента теплопроводности, плотности и влажности образцов приведены в табл. 2.

В этой же табл. 2 представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований теплопроводности древесины, не подвергшейся модифицированию (у нее в графах «Температура нагрева», «Время нагрева» и «Текущая плотность» стоят прочерки).

Анализ экспериментальных и расчетных данных позволяет сделать вывод, что модель (4)–(7) удовлетворительно описывает зависимость теплопроводности древесины от ее плотности и влажности.

На рис. 4 представлены графики зависимости коэффициента теплопроводности древесины от ее плотности. Определялась теплопроводность древесины для разных значений влажности. Рассчитывались коэффициенты теплопроводности при влажности  $W = 0, 10, 20$  и  $50\text{ }\%$ .



**Рис. 4.** Зависимость коэффициента теплопроводности древесины от плотности при разных значениях влажности

**Fig. 4.** Graphs of the dependence of the thermal conductivity of wood on density at different values of humidity

На рис. 5 приведены графики зависимости коэффициента теплопроводности древесины от влажности. Представлены зависимости для древесины с плотностью в абсолютно сухом состоянии  $\rho = 420\text{ кг/м}^3$ , что соответствует плотности ели,  $\rho = 480\text{ кг/м}^3$  (плотность сосны) и  $\rho = 620\text{ кг/м}^3$  (плотность березы).

Анализ результатов экспериментальных и расчетных исследований позволяет сделать вывод о том, что зависимость коэффициента теплопроводности древесины от плотности и влажности носит сложный характер. Несмотря на близость значений коэффициента теплопроводности воды ( $\lambda = 0,68\text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ) и коэффициента теплопроводности вещества стенок древесных клеток ( $\lambda = 0,65\text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ), определенного по формулам

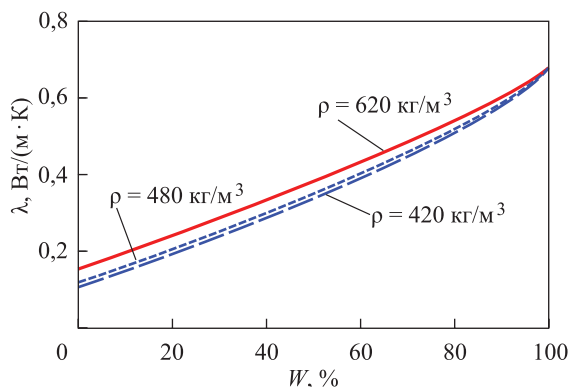


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности древесины от влажности при разных значениях плотности

Fig. 5. Graphs of the dependence of the thermal conductivity of wood from humidity at different density values

теории обобщенной проводимости (8)–(10), коэффициенты теплопроводности сухой и влажной древесины при равенстве значений их плотности существенно различаются. Задача осложняется зависимостью теплопроводности воды и древесного вещества от температуры.

Коэффициенты теплопроводности воды и воздуха с увеличением температуры возрастают. Таким образом, необходимо ввести зависимость истинных коэффициентов теплопроводности всех этих компонентов от температуры материала.

Передача теплоты через слой влажной древесины может осуществляться как кондуктивными, так и конвективными потоками. Конвективный перенос теплоты связан с испарением влаги в слоях с более высокой температурой, диффузией и конденсацией пара в слоях с низкой температурой. Таким образом, коэффициенты теплопроводности влажной древесины являются эффективными. На основании данных, приведенных на диаграмме коэффициента теплопроводности древесины березы поперек волокон при базисной плотности  $\rho_6 = 500 \text{ кг/м}^3$  [14], и теплофизических свойств сухого воздуха и воды получены соотношения для аппроксимации зависимости от температуры истинных коэффициентов теплопроводности воздуха и влаги:

$$\lambda_{\text{воз}} = 0,026 + 6 \cdot 10^{-5}t; \quad (13)$$

$$\lambda_{\text{вод}} = 0,551 + f(W)t; \quad (14)$$

где

$$f(W) = 0,033 - 4,05 \cdot 10^{-4}W + 1,57 \cdot 10^{-6}W^2. \quad (15)$$

## Сведения об авторах

**Ермоченков Михаил Геннадьевич** — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ermochenkov@mgul.ac.ru

**Евстигнеев Алексей Георгиевич** — зав. лабораторией, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), evstigneev@mgul.ac.ru

## Выводы

Модель теплопроводности среды со взаимопроникающими структурами (4)–(7) и (13)–(15) позволяет определить коэффициент теплопроводности древесины как функцию плотности, влажности, температуры материала и теплопроводности газовой среды в порах. Проведена экспериментальная проверка предложенной модели. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что их расхождение не превышает 10 %.

## Список литературы

- [1] Ермоченков М.Г. Прогнозирование свойств термически модифицированной древесины // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2010. № 4 (73). С. 111–115.
- [2] Ермоченков М.Г., Евстигнеев А.Г., Кувик Т.Е. Термогравиметрические исследования кинетики термической сушки древесины // Научн. тр. МГУЛ. М.: МГУЛ, 2007. Вып. 335. С. 36–46.
- [3] Жигунов С.В. Тепломассообмен и кинетика термодеструкции при высокотемпературном нагреве композиционных материалов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.05.. М.: МГУЛ, 1990. 184 с.
- [4] Grieco E., Baldi G. Analysis and modelling of wood pyrolysis // Chemical Engineering Science, 2011, v. 66, iss. 4, pp. 650–660.
- [5] Pétrissans A., Younsi R., Chaouch M., Gérardin P., Pétrissans M. Wood thermodegradation: experimental analysis and modeling of mass loss kinetics // Maderas- Ciencia y Tecnologia, 2014, v. 16, iss. 2, pp. 133–148.
- [6] Кислицын А.Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. М.: Лесная пром-сть, 1990. 312 с.
- [7] Корякин В.И. Термическое разложение древесины. Л.: Гослесбумиздат, 1962. 678 с.
- [8] Slopicka K., Bartocci P., Fantozzi F. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis // 3rd Int. Conf. on Applied Energy (ICAEE), Perugia, Italy, 2011 // Applied Energy, 2012, v. 97, pp. 491–497.
- [9] Hongbo Yu, Fang Liu, Ming Ke, Xiaoyu Zhang. Thermogravimetric analysis and kinetic study of bamboo waste treated by Echinodontium taxodii using a modified three-parallel-reactions model // Bioresource Technology, 2015, v. 185, pp. 324–330.
- [10] Кувик Т.Е. Кинетика термической деструкции древесины в приложении к прогнозированию свойств термически модифицированной древесины // Матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». М.: МГАУ, 2011. Т. 2. С. 144–148.
- [11] Шведов Б.А. Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетно-космических систем: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: МЛТИ, 1990. 542 с.
- [12] Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1974.
- [13] Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справочная книга. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
- [14] Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения: Учебник для лесотехнических вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Лесная пром-сть, 1980. 208 с.

Статья поступила в редакцию 08.06.2017 г.



## HEAT CONDUCTIVITY OF THERMALLY MODIFIED WOOD

M.G. Ermochenkov, A.G. Evstigneev

BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia  
ermochenkov@mgul.ac.ru

Thermal modification of wood is widely used to improve its properties. The use of thermally modified wood as finishing and structural materials presumes the availability of information on its thermophysical and physical-mechanical properties including thermal conductivity. Heating without access to the oxidant leads to the destruction of the material which causes a change in the composition and structure and properties as a consequence. Thermal destruction is a multi-stage process. The degree of decomposition of the material depends on the temperature, time and kinetic parameters of each stage of the process. The article presents the results of the investigation of the thermal conductivity of wood and its changes during heat treatment. An experimental setup to determine the coefficients of thermal conductivity in various materials was developed and fabricated, in which the stationary plane layer method was realized. Experimental studies of the thermal conductivity of samples of pine, spruce and birch wood have been carried out. Samples were made from unprocessed wood and from wood subjected to thermal destruction. The annealing conditions of the initial materials were determined taking into account the kinetic parameters of the thermal destruction of the corresponding wood species. For the mathematical description of the thermal conductivity of wood and its variation in the heat treatment process, it is offered to use methods of the theory of generalized conductivity, a model of materials with interpenetrating structures. This approach allows to take into account changes in the composition and structure of the material, its moisture content, as well as the composition and properties of gas phase products in wood pores. The results of experimental and calculated studies of the thermal conductivity coefficients of samples from birch, pine and spruce wood under different humidity and the degree of thermal degradation were compared. A satisfactory agreement between the results of calculations and experiments is shown.

**Keywords:** wood, thermal destruction, modification, kinetic parameters, coefficient of thermal conductivity

**Suggested citation:** Ermochenkov M.G., Evstigneev A.G. *Teploprovodnost' termicheski modifitsirovannoy drevesiny* [Heat conductivity of thermally modified wood]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 69–74. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-69-74

### References

- [1] Ermochenkov M.G. *Prognozirovanie svoystv termicheski modifitsirovannoy drevesiny* [Forecasting the properties of thermally modified wood] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2010, no. 4 (73), pp. 111–115.
- [2] Ermochenkov M.G., Evstigneev A.G., Kuvik T.E. *Termogravimetricheskie issledovaniya kinetiki termicheskoy sushki drevesiny* [Thermogravimetric studies of the kinetics of thermal drying of wood] *Scientific Works MSFU. Moscow: MGUL*, 2007, v. 335, pp. 36–46.
- [3] Zhigunov S.V. *Teplomassoobmen i kinetika termodestruktsii pri vysokotemperaturnom nagreve kompozitsionnykh materialov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Heat and mass transfer and kinetics of thermal degradation during high-temperature heating of composite materials: dis. ... Cand. Sci. (Tech.)]. Moscow: MGUL, 1990. 184 p.
- [4] Grieco E., Baldi G. Analysis and modulating of wood pyrolysis. *Chemical Engineering Science*, 2011, v. 66, Iss. 4, pp. 650–660.
- [5] Pétrissans A., Younsi R., Chaouch M., Gérardin P., Pétrissans M. Wood thermodegradation: experimental analysis and modeling of mass loss kinetics. *Maderas-Ciencia y Tecnologia*, 2014, v. 16, Iss. 2, pp. 133–148.
- [6] Kislitsyn A.N. *Piroliz drevesiny: khimizm, kinetika, produkty, novye protsessy* [Pyrolysis of wood: chemistry, kinetics, products, new processes]. Moscow: Lesnaya prom-st [Forest Industry], 1990, 312 p.
- [7] Koryakin V.I. *Termicheskoe razlozhenie drevesiny* [Thermal decomposition of wood]. Leningrad: Goslesbumizdat, 1962, 678 p.
- [8] Slopiecka K., Bartocci P., Fantozzi F. Thermogravimetric analysis and kinetic study of poplar wood pyrolysis. 3rd Int. Conf. on Applied Energy (ICAIE), Perugia, Italy, 2011. *Applied Energy*, 2012, v. 97, pp. 491–497.
- [9] Hongbo Yu, Fang Liu, Ming Ke, Xiaoyu Zhang. Thermogravimetric analysis and kinetic study of bamboo waste treated by *Echinodontium taxodii* using a modified three-parallel-reactions model. *Bioresource Technology*, 2015, v. 185, pp. 324–330.
- [10] Kuvik T.E. *Kinetika termicheskoy destruktsii drevesiny v prilozhenii k prognozirovaniyu svoystv termomodifitsirovannoy drevesiny* [Kinetics of thermal destruction of wood in application to forecasting the properties of thermomodified wood]. Proceedings IV Intern. scientific-practical conference «Modern energy-saving thermal technologies (drying and thermal treatment of materials)». Moscow: MGAU, 2011, v. 2, pp. 144–148.
- [11] Shvedov B.A. *Energo- i massoobmen v materialakh teplovoy zashchity mnogorazovykh raketno-kosmicheskikh sistem: dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Energy and mass transfer in the materials of thermal protection of reusable rocket and space systems: dis. ... Dr. Sci. (Tech.)]. Moscow: MLTI, 1990. 542 p.
- [12] Emanuel' N.M., Knorre D.G. *Kurs khimicheskoy kinetiki* [Course of chemical kinetics]. Moscow: High School, 1974.
- [13] Dul'nev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov* [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. Leningrad: Energia, 1974, 264 p.
- [14] Ugolev B.N. *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya* [Wood Science with the Basics of Forest Goods Science]. Moscow: Lesnaya prom-st [Forest Industry], 1980, 208 p.

### Author's information

**Ermochenkov Mikhail Gennad'evich** — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof., BMSTU (Mytishchi branch), ermochenkov@mgul.ac.ru

**Evstigneev Aleksey Georgievich** — Head. of laboratory of the BMSTU (Mytishchi branch), evstigneev@mgul.ac.ru

Received 08.06.2017

УДК 674.816.3

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-75-82

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ДРЕВЕСНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**И.Н. Челышева, Н.П. Плотников, Н.А. Афанасьева**

Братский государственный университет, 665709, Иркутская область, г. Братск, ул. Макаренко, д. 40

irinachelysheva@yandex.ru

Разработана технология получения древесного композиционного материала на основе опилок, соответствующего требованиям ГОСТ 19222–84. Показана возможность использования влажных опилок хвойных пород древесины для производства древесного композиционного материала, изготовлены экспериментальные образцы опилкобетона с использованием влажных опилок хвойных пород древесины, установлено предельное содержание влажных опилок хвойных пород древесины в составе композиции для опилкобетона — 32 %; установлена предельная массовая доля золошлаковой смеси в составе композиции — 15 % от объема извести-пушонки. Представлены результаты исследования качественных показателей опилкошлакобетона. Показано, что изготовление строительных блоков из опилкошлакобетона предложенного состава (массовая доля древесных опилок 32 % от общего объема композиции, массовая доля золошлаковой смеси 15 % от объема извести-пушонки) позволит выпускать теплоизоляционный строительный материал, полностью соответствующий требованиям ГОСТ 19222–84 к физико-механическим параметрам опилкобетона марки М10. Применение предложенной композиции может обеспечить снижение себестоимости производства 1 м<sup>3</sup> данного материала не менее чем на 26 % по сравнению с традиционной технологией его получения. Построена математическая модель, описывающая технологический процесс производства опилкошлакобетона.

**Ключевые слова:** древесный композиционный материал, опилки, шлак, опилкобетон, утилизация

**Ссылка для цитирования:** Челышева И.Н., Плотников Н.П., Афанасьева Н.А. Совершенствование технологии получения древесных композиционных материалов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 4. С. 75–82. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-75-82

Современное состояние строительного рынка отражает положительную тенденцию в направлении создания новых теплоизоляционных материалов, что обусловлено политикой энергосбережения в условиях критичного удорожания энергетических ресурсов. Обеспечение необходимых показателей теплового сопротивления предопределяет широкое использование теплоизоляционных материалов [1, 2]. Перспективным сырьем для их производства являются отходы деревообрабатывающих производств и теплоэнергетических предприятий. Использование данных видов сырья позволит не только удовлетворить возрастающий спрос на экологически безопасные теплоизоляционные материалы, но и частично решить проблему утилизации древесных отходов и продуктов сжигания угля [3–5].

Целью работы является создание технологии получения древесного композиционного материала на основе опилок, соответствующего требованиям ГОСТ 19222–84 [6].

### Материалы и методика

Опилкобетон является разновидностью арболита, поэтому при определении основных требований к исходным материалам для изготовления опилкобетона руководствовались СН 549–82 «Инструкция по проектированию, изготовлению и применению конструкций и изделий из арболита» [7].

Древесное сырье (опилки) должно удовлетворять требованиям ГОСТ 19222–84.

Жидкое стекло должно иметь модуль от 2,4 до 3. Модуль жидкого стекла определяется по ГОСТ 13078–81. Вода для затворения арболитовых (опилкобетонных) смесей и бетона (раствора) отделочных слоев должна удовлетворять требованиям ГОСТ 23732–2011.

Расчетные составы опилкобетона проверялись в лабораторных условиях путем изготовления и испытания контрольных образцов-кубов по ГОСТ 10180–2012.

### Результаты и их обсуждение

В России ежегодно в среднем образуется не менее 4,2 млн м<sup>3</sup> учтенных древесных опилок. Более 70 % из них остаются невостребованными, что повышает пожароопасность и ухудшает экологическую обстановку в местах расположения предприятий [8–9].

Одним из перспективных направлений переработки древесных опилок является производство строительных теплоизоляционных материалов и изделий на их основе. Показатели теплосоппротивления опилкобетона превосходят большинство традиционных строительных материалов. При этом опилкобетон — уникальный теплоизоляционный материал, который не только сочетает в себе лучшие свойства камня и дерева, но и не требует затрат на специальную подготовку сырья, как арболита. Эти факторы снижают его стоимость, удешевляя строительство, а также позволяют решить проблему утилизации отхо-

дов деревообрабатывающей промышленности [10–11]. Благодаря достаточно высокому содержанию органики опилкобетон, обладает хорошими показателями в отношении газопроницаемости, звукопоглощения и экологичности.

С целью определения удельной доли влажных опилок в составе опилкобетона реализован однофакторный эксперимент. В качестве переменного фактора принята доля влажных опилок хвойных пород в составе композиции, варьируемая от 17 до 37 % с шагом 5 %. В качестве выходных параметров приняты средняя плотность, влажность, прочность при сжатии, сорбционное увлажнение. Изготовлено по восемь образцов размером 100×100×100 мм различного состава (табл. 1), опыты продублированы. Параллельно изготовлены контрольные образцы из опилкобетона марки М10, в котором удельный вес древесных опилок составляет 17 %.

Т а б л и ц а 1  
Состав опытных образцов опилкобетона  
Composition of prototypes of sawdust concrete

Компонент	Конт- рольный состав, 17 %	Состав 1, 22 %	Состав 2, 27 %	Состав 3, 32 %	Со- став 4, 37 %
Цемент (ПЦ М400 Д20)	280,0	227,2	174,3	121,3	68,4
Известь-пушонка	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Песок	265,8	265,8	265,8	265,8	265,8
Опилки хвойных пород (в пересчете на абсолютно сухие)	180,0	233,0	285,9	338,9	391,8
Вода	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Жидкое стекло	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0

Постоянные факторы эксперимента были фиксированы в следующих значениях: температура воздуха 22 ± 1 °С; влажность воздуха 45 ± 5 %; породный состав опилок — хвойные; фракционный состав опилок — 5/0,5 мм; размер получаемых образцов 100×100×100 мм; расход известь-пушонки 25,0 кг на 1 м<sup>3</sup> смеси; расход песка — 265,8 кг на 1 м<sup>3</sup> смеси; расход воды — 300,0 л на 1 м<sup>3</sup> смеси; расход жидкого стекла 8,0 кг на 1 м<sup>3</sup> смеси.

Результаты определения физико-механических свойств образцов опилкобетона обобщены в табл. 2 (состав образцов 1–5 см. табл. 1, контрольный состав и составы 1–4).

Зависимость физико-механических свойств полученных образцов опилкобетона от удельного веса опилок в составе композиции приведена на рис. 1–2.

На основании анализа представленных результатов экспериментальных исследований определен интервал варьирования содержания древесных опилок в составе композиции: от 17 до 32 %.

Т а б л и ц а 2  
Физико-механические свойства образцов  
опилкобетона

Physical and mechanical properties of sawdust concrete samples

Номер образца (% древесных опилок)	Прочность, МПа		Влажность, %		Плотность, кг/м <sup>3</sup>		Сорбционное увлажнение, %	
	Норма	Факт	Норма	Факт	Норма	Факт	Норма	Факт
Образец 1 (17%, контрольный)	1,5–2,5	2,46	≤ 25	24,60	450–500	457,0	4–8	6,31
Образец 2 (22 %)	1,5–2,5	2,13	≤ 25	24,73	450–500	455,3	4–8	6,46
Образец 3 (27 %)	1,5–2,5	1,84	≤ 25	24,82	450–500	453,4	4–8	6,57
Образец 4 (32 %)	1,5–2,5	1,52	≤ 25	24,93	450–500	451,5	4–8	6,72
Образец 5 (37 %)	1,5–2,5	1,19	≤ 25	25,07	450–500	449,6	4–8	6,88

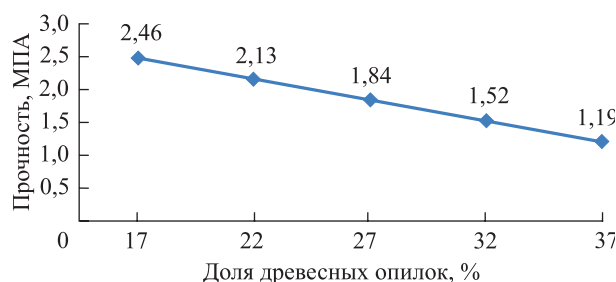


Рис. 1. Зависимость прочности образцов опилкобетона от содержания древесных опилок в их составе

Fig. 1. Graph of dependence of the strength of samples of sawdust concrete on the content of wood sawdust in their composition

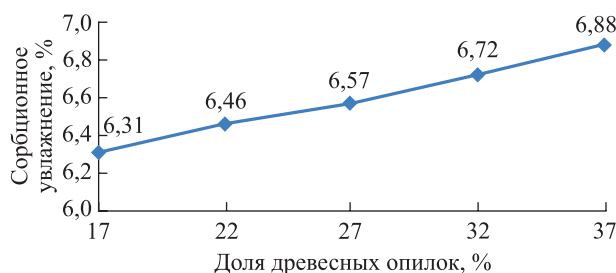


Рис. 2. Зависимость сорбционного увлажнения образцов опилкобетона от содержания древесных опилок в их составе

Fig. 2. Graph of dependence of sorption moistening of samples of sawdust concrete on the content of wood sawdust in their composition

В следующей серии опытов были проведены исследования возможности применения золошлаковой смеси для производства строительных теплоизоляционных материалов. В экспериментальных исследованиях использована отвальная золошлаковая смесь Иркутской ТЭЦ-6 г. Братска, полученная от сжигания бурого угля КАТЭК Ирша-Бородинского угольного разреза.

В ходе исследований реализован однофакторный эксперимент. В качестве переменного фактора принято количество указанной золошлаковой смеси — 10...25 % от объема извести-пушонки в опилкобетоне предложенного состава (содержанием древесных опилок 32 %) с интервалом варьирования 5 %. В качестве выходных параметров приняты средняя плотность, влажность, прочность при сжатии, сорбционное увлажнение. Изготовлено по восемь образцов размером 100 × 100 × 100 мм различного состава (табл. 3), опыты продублированы. Параллельно изготовлены контрольные образцы (образец 1) из опилкобетона марки М10 (содержание древесных опилок 32 %).

Т а б л и ц а 3  
Состав опытных образцов  
опилкошлакобетона, г  
Composition of prototypes of sawdust slag concrete

Компонент	Контрольный состав (без добавки)	Состав 1, 10 %	Состав 2, 15 %	Состав 3, 20 %	Состав 4, 25 %
Известь-пушонка	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0
Песок	265,8	265,8	265,8	265,8	265,8
Опилки хвойных пород (сухие)	180,0	338,9	338,9	338,9	338,9
Вода	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0
Жидкое стекло	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Золошлаковая смесь	0	2,5	3,8	5,0	6,3
– масс. доля от объема извести-пушонки, %	0	10	15	20	25
– масс. доля от объема формочной смеси, %	0	0,236	0,359	0,472	0,595

Проведены исследования влияния золошлаковой смеси в составе композиции на физико-механические показатели опилкобетонов.

Результаты определения физико-механических свойств образцов обобщены в табл. 4. Здесь же приведены требования ГОСТ 19222–84 (в таблице обозначены как «норма»).

Зависимость физико-механических свойств полученных образцов от доли золошлаковой смеси в их составе приведена на рис. 3–4.

На основании анализа представленных результатов экспериментальных исследований установлена предельная массовая доля золошлаковой смеси в составе композиции — 15 % от объема извести-пушонки.

На следующем этапе были проведены экспериментальные исследования качественных пока-

Т а б л и ц а 4  
Физико-механические свойства образцов  
опилкошлакобетона

Physicomechanical properties of samples of sawdust slag concrete

Номер образца (% добавки)	Прочность, МПа		Влажность, %		Плотность, кг/м³		Сорбционное увлажнение, %	
	Норма	Факт	Норма	Факт	Норма	Факт	Норма	Факт
Образец 1 (контрольный, без добавки)	1,5–2,5	2,46	≤ 25	24,6	450–500	457	4–8	6,31
Образец 2 (10 %)	1,5–2,5	2,18	≤ 25	22,7	450–500	472,94	4–8	5,34
Образец 3 (15 %)	1,5–2,5	1,86	≤ 25	20,4	450–500	498,74	4–8	4,02
Образец 4 (20 %)	1,5–2,5	1,53	≤ 25	19,3	450–500	544,5	4–8	2,86
Образец 5 (25 %)	1,5–2,5	1,08	≤ 25	18,2	450–500	593,13	4–8	1,62

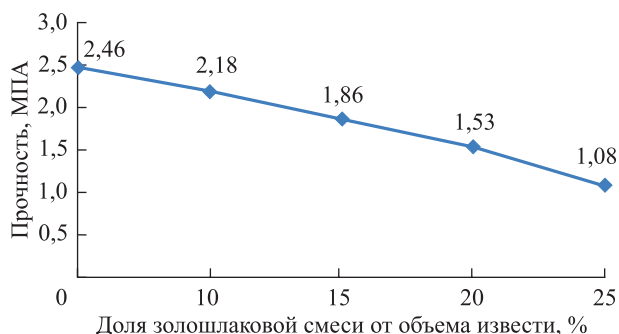


Рис. 3. Зависимость прочности образцов от содержания золошлаковой смеси в их составе

Fig. 3. Graph of the dependence of the strength of the samples on ash content in their composition

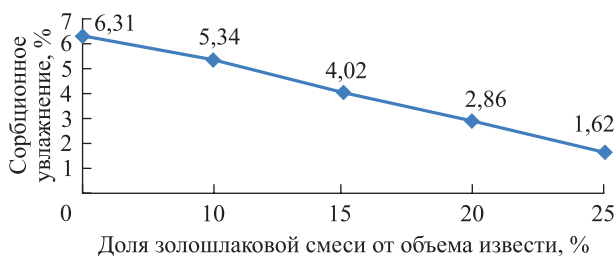


Рис. 4. Зависимость сорбционного увлажнения образцов от содержания золошлаковой смеси в их составе

Fig. 4. Graph of the dependence of the sorption moisture of the samples on the content of ash and slag mixture in their composition

зателей опилкошлакобетона с целью разработки математической модели для описания технологического процесса производства опилкошлакобетона.



В качестве выходных величин были приняты качественные показатели готовой продукции (теплоизоляционного опилкобетона марки М10):  $Y_1$  — средняя плотность  $\rho_{cp}$ , кг/м<sup>3</sup>;  $Y_2$  — влажность  $W$ , %;  $Y_3$  — прочность при сжатии  $\sigma_{сж}$ , МПа;  $Y_4$  — сорбционное увлажнение  $A_c$ , %.

Варьируемые факторы эксперимента:  $X_1$  — доля влажных опилок хвойных пород в составе композиции  $d_{оп}$ , %;  $X_2$  — доля золошлаковой смеси от объема извести-пушонки в составе композиции,  $d_{зш}$ , %.

Постоянные факторы эксперимента имеют следующие значения: температура воздуха  $23 \pm 1$  °С; влажность воздуха  $45 \pm 5$  %; породный состав опилок — хвойные; влажность опилок  $6,0 \pm 0,1$  %; фракционный состав опилок 5/0,5 мм; размер получаемых образцов 100×100×100 мм; расход извести-пушонки 25,0 кг на 1 м<sup>3</sup> смеси; расход песка 265,8 кг на 1 м<sup>3</sup> смеси; расход воды 300,0 л на 1 м<sup>3</sup> смеси; расход жидкого стекла 8,0 кг на 1 м<sup>3</sup> смеси.

В табл. 5 представлены варьируемые факторы в натуральном и кодовом обозначении, их уровни и интервалы варьирования при проведении двухфакторного эксперимента.

С целью получения адекватного математического описания технологического производства опилкошлакобетона предложенного состава, проведен многофакторный эксперимент.

Полученные значения выходных параметров совмещены в табл. 6 с матрицей планирования эксперимента по В-композиционному плану второго порядка в нормализованных и натуральных обозначениях варьируемых факторов.

Математическое описание зависимости нормируемых ГОСТ 19222–84 физико-механических свойств опилкошлакобетона от варьируемых технологических параметров представлено в виде уравнений регрессии:

— плотность, кг/м<sup>3</sup>:  
 $\rho = 464,7841 - 0,402d_{оп} + 4,9859d_{зш} - 0,0007d_{оп}^2 + 0,0139d_{зш}^2 - 0,0178d_{оп}d_{зш}$ ;

— влажность, %:  
 $W = 24,634 - 0,002d_{оп} - 0,284d_{зш}$ ;

— прочность на сжатие, МПа:  
 $\sigma_{сж} = 3,2122 - 0,0363d_{оп} - 0,0003d_{зш}^2 + 0,0004d_{оп}d_{зш}$ ;

— сорбционное увлажнение, %:  
 $A_c = 5,998 + 0,0173d_{оп} - 0,2041d_{зш}$ .

По полученным уравнениям регрессии были построены графические зависимости (рис. 5–8).

Согласно ГОСТ 19222–84, у теплоизоляционного опилкобетона марки М10 должны быть следующие характеристики плотность 450...500 кг/м<sup>3</sup>, влажность не более 25 %, прочность 1,5...2,5 МПа, сорбционное увлажнение 4...8 %. Графики, представленные на рис. 5–7 свидетельствуют о соответствии качества образцов требованиям ГОСТ.

Таблица 5

**Основные факторы и уровни их варьирования**

The main factors and levels of their variation

Фактор	Обозначение	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
Доля влажных опилок хвойных пород в составе композиции, %	$X_1$	17	27	37	10
Доля золошлаковой смеси от объема извести, %	$X_2$	0	12,5	25	12,5

Таблица 6

**Матрица планирования и результаты двухфакторного эксперимента**

The planning matrix and the results of the two-factor experiment

Номер опыта	$x_1$	$X_1, d_{оп}, \%$	$x_2$	$X_2, d_{зш}, \%$	$Y_1, \rho, \text{кг/м}^3$	$Y_2, W, \%$	$Y_3, \sigma_{сж}, \text{МПа}$	$Y_4, A_c, \%$
1	-1	17	-1	0	457,0	24,6	2,5	6,3
2	+1	37	-1	0	449,6	25,1	1,2	6,9
3	-1	17	+1	25	582,8	17,7	2,3	1,4
4	+1	37	+1	25	566,5	18,2	1,3	2,1
5	-1	17	0	12,5	519,9	21,1	2,4	3,8
6	+1	37	0	12,5	503,7	21,6	1,4	4,5
7	0	27	-1	0	453,4	24,8	1,8	6,6
8	0	27	+1	25	574,7	17,9	1,9	1,7

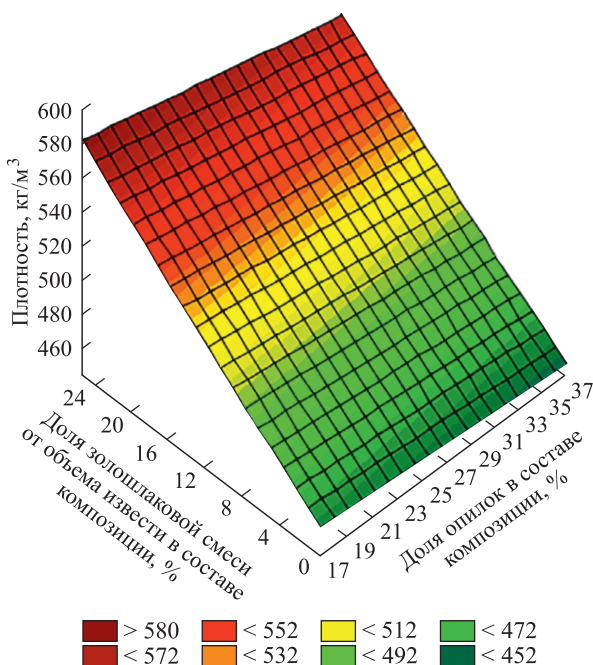
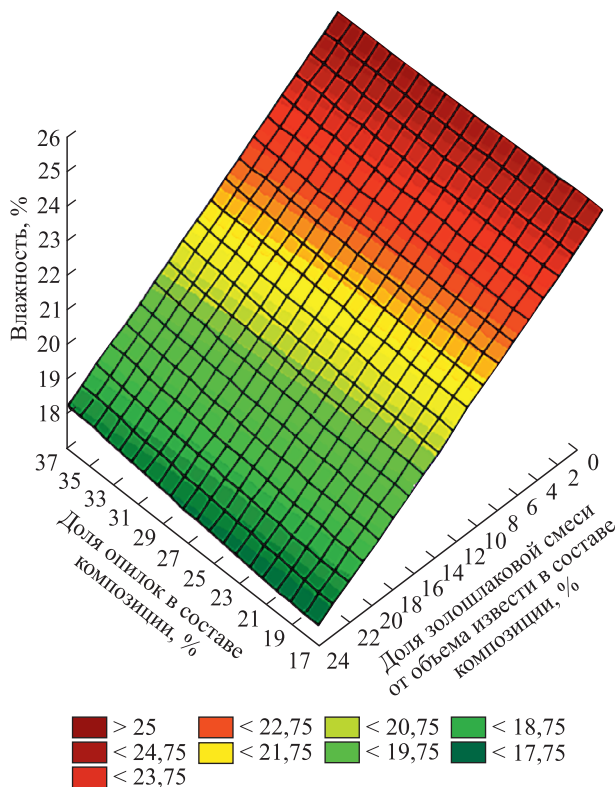
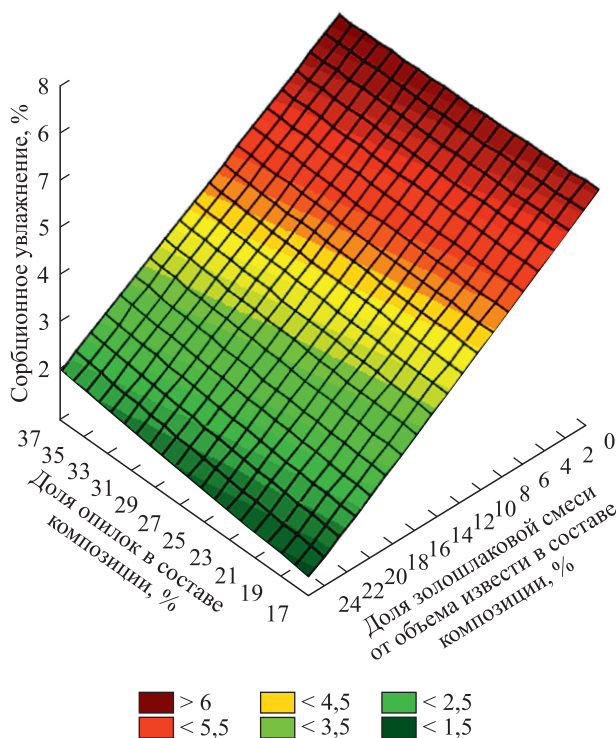


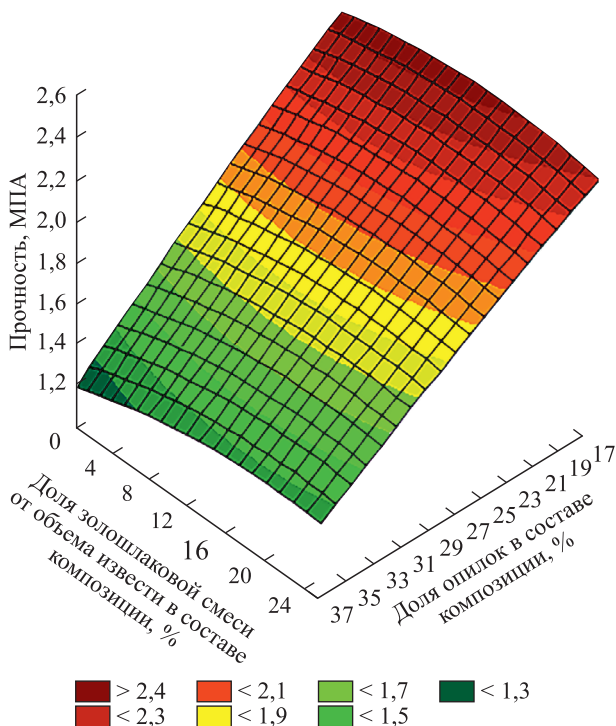
Рис. 5. Зависимость плотности опилкошлакобетона от доли опилок и золошлаковой смеси в составе композиции  
 Fig. 5. Graph of the dependence of the density of sawdust slag-concrete on the share of sawdust and ash and slag mixture in the composition



**Рис. 6.** Зависимость влажности опилкошлакобетона от доли опилок и золошлаковой смеси в составе композиции  
**Fig. 6.** Graph of moisture content of sawdust slag concrete from the share of sawdust and ash and slag mixture in the composition



**Рис. 8.** Зависимость сорбционного увлажнения опилкошлакобетона от доли опилок и золошлаковой смеси в составе композиции  
**Fig. 8.** Graph of the dependence of sorption humidification of sawdust slag concrete on the share of sawdust and ash and slag mixture in composition



**Рис. 7.** Зависимость прочности опилкошлакобетона от доли опилок и золошлаковой смеси в составе композиции  
**Fig. 7.** Graph of the dependence of strength of sawdust slag concrete on the share of sawdust and ash-and-slag mixture in composition

Анализируя результаты экспериментальных исследований, можно рекомендовать к применению в составе композиций для изготовления теплоизоляционного опилкошлакобетона содержание: золошлаковой смеси не более 15 % от объема извести-пушонки, содержание влажных древесных опилок хвойных пород с удельным весом в составе композиции не более 32 % (табл. 7).

**Таблица 7**  
**Рекомендуемый состав опилкошлакобетона на 1 м<sup>3</sup> смеси**  
**Recommended composition of sawdust slag concrete for 1 m<sup>3</sup> of mixture**

Компонент	Расход
Цемент (ПЦ М400 Д20), кг	117,5
Известь-пушонка, кг	25,0
Песок, кг	265,8
Опилки хвойных пород (в пересчете на абсолютно сухое), кг	338,9
Вода, л	300,0
Жидкое стекло, кг	8,0
Золошлаковая смесь, кг	3,8

## Выводы

1. В результате исследования установлена возможность использования влажных опилок хвойных пород древесины для производства строительных теплоизоляционных материалов, изготовлены экспериментальные образцы опилкобетона с использованием влажных опилок хвойных пород древесины, проведены необходимые лабораторные испытания, установлено предельное содержание влажных опилок хвойных пород древесины в составе композиции для опилкобетона — 32 %.

2. Установлена возможность использования влажных опилок хвойных пород древесины и золошлаковой смеси для производства теплоизоляционных строительных материалов, изготовлены образцы строительных материалов, проведены необходимые лабораторные испытания, установлена предельная массовая доля золошлаковой смеси в составе композиции — 15 % от объема извести-пушонки.

3. Проведено экспериментальное исследование качественных показателей опилко-шлакобетона. Показано, что изготовление строительных блоков из опилкошлакобетона предложенного состава (массовая доля древесных опилок 32 % от общего объема композиции, массовая доля золошлаковой смеси 15 % от объема извести-пушонки) позволит выпускать теплоизоляционный строительный материал, полностью соответствующий требованиям ГОСТ 19222–84 к физико-механическим параметрам опилкобетона марки М10. применение предложенной композиции позволит обеспечить снижение себестоимости производства 1 м<sup>3</sup> теплоизоляционного опилкобетона данной марки не менее чем на 26 % по сравнению с традиционной технологией его получения. Исходя из полученных данных можно судить о соответствии качества испытанных образцов требованиям ГОСТ:

а) согласно ГОСТ 19222–84, плотность теплоизоляционного опилкобетона должна находиться в пределах 450...500 кг/м<sup>3</sup>. Минимальное значение плотности опилкошлакобетона предложенного состава, равное 449,6 кг/м<sup>3</sup>, наблюдается в случае, когда доля влажных опилок хвойных пород в составе композиции находится на уровне 37 %, а золошлаковая смесь отсутствует. Максимальное значение плотности опилкошлакобетона, равное 582,8 кг/м<sup>3</sup>, достигается, когда доля влажных опилок хвойных пород в составе композиции составляет 17 %, а доля золошлаковой смеси — 25 %;

б) согласно ГОСТ 19222–84, влажность теплоизоляционного опилкобетона должна быть не более 25 %. Минимальное значение влажности опилкошлакобетона предложенного состава,

равное 17,7 %, наблюдается в случае, когда доля влажных опилок хвойных пород в составе композиции находится на уровне 17 %, а доля золошлаковой смеси составляет 25 %. Максимальное значение влажности опилкошлакобетона, равное 25,1 %, достигается, когда доля влажных опилок хвойных пород в составе композиции составляет 37 %, а золошлаковая смесь отсутствует;

в) согласно ГОСТ 19222–84, прочность теплоизоляционного опилкобетона должна находиться в пределах 1,5...2,5 МПа. Минимальное значение прочности опилкошлакобетона предложенного состава, равное 1,2 МПа, наблюдается в случае, когда доля влажных опилок хвойных пород в составе композиции находится на уровне 37 %, а золошлаковая смесь отсутствует. Максимальное значение прочности опилкошлакобетона, равное 2,5 МПа, достигается, когда доля влажных опилок хвойных пород в составе композиции составляет 17 %, а золошлаковая смесь отсутствует;

г) согласно ГОСТ 19222–84, сорбционное увлажнение теплоизоляционного опилкобетона должно быть в пределах 4...8 %. Минимальное значение сорбционного увлажнения опилкошлакобетона предложенного состава, равное 1,4 %, наблюдается в случае, когда доля влажных опилок хвойных пород в составе композиции находится на уровне 17 %, а доля золошлаковой смеси составляет 25 %. Максимальное значение сорбционного увлажнения опилкошлакобетона, равное 6,9 %, достигается, когда доля влажных опилок хвойных пород в составе композиции составляет 37 %, а золошлаковая смесь отсутствует.

4. Разработана математическая модель, описывающая технологический процесс производства опилкошлакобетона. По уравнениям регрессии построены графические зависимости нормируемых значений физико-механических показателей опилкошлакобетона марки М10 (плотность, влажность, прочность, сорбционное увлажнение) от доли влажных опилок хвойных пород и золошлаковой смеси в составе композиции.

## Список литературы

- [1] Афанасьева Н.В., Пыльнева А.А. Теплоизоляционные строительные материалы на основе вторичного сырья // Молодая мысль: наука, технологии, инновации: Матер. VI (XII) Всерос. науч.-техн. конф. Братск: БрГУ, 2014. С. 18–21.
- [2] Чельшева И.Н., Афанасьева Н.В., Овчинникова О.В. Вторичное древесное сырье как объект утилизации // Естественные и инженерные науки — развитию регионов Сибири: Матер. XIII (XXXV) Всерос. науч.-техн. конф. Братск: БрГУ, 2014. С. 35–36.
- [3] Чельшева И.Н., Афанасьева Н.В. Вторичное сырье в составе композиционных древесных материалов // Естественные и инженерные науки — развитию регионов Сибири: Матер. XIII (XXXV) Всерос. науч.-техн. конф. Братск: БрГУ, 2014. С. 41.



- [4] Афанасьева Н.В. Снижение себестоимости производства строительных материалов на основе использования побочных продуктов лесопиления // Проблемы экономики и управления строительством в условиях экологически ориентированного развития: материалы Всерос. науч.-практ. онлайн-конф. с междунар. участием и элементами науч. школы для молодежи, 9–10 апр. 2014 г. Иркутск: БГУЭП, 2014. С. 48–53.
- [5] Афанасьева Н.В. Возможность использования сырых опилок // Молодая мысль — развитию лесного комплекса: Матер. 14-й науч.-техн. конф. студентов и магистрантов. Братск: БрГУ, 2013. С. 26–30.
- [6] ГОСТ 19222–84 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия» // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-19222-84>.
- [7] СН 549–82 «Инструкция по проектированию, изготовлению и применению конструкций и изделий из арболита» URL: [http://sniphelp.ru/constructing/002.005.003/SN\\_549-82\\_2032/#i456482](http://sniphelp.ru/constructing/002.005.003/SN_549-82_2032/#i456482)
- [8] Чельшева И.Н. Технология композиционных материалов: метод. указания по выполнению лабораторных работ. Братск: БрГУ, 2010. 36 с.
- [9] Плотников Н.П., Денисов С.В. Оптимизация технологических режимов склеивания фанеры модифицированными клеевыми композициями // Вестник КрасГАУ, 2010. № 5. С. 143–148.
- [10] Плотников Н.П., Симикова А.А. Снижение токсичности карбамидоформальдегидных смол // Вестник КрасГАУ. № 6. С. 155–158.
- [11] Плотников Н.П., Плотникова Г.П. Совершенствование технологии производства древесноплитных материалов. Новосибирск: НП «СибАК», 2013. 112 с.

## Сведения об авторах

**Чельшева Ирина Николаевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры воспроизводства и переработки лесных ресурсов ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», [irinachelysheva@yandex.ru](mailto:irinachelysheva@yandex.ru)

**Плотников Николай Павлович** — канд. техн. наук, доцент кафедры воспроизводства и переработки лесных ресурсов ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», [n-plotnikov@mail.ru](mailto:n-plotnikov@mail.ru)

**Афанасьева Наталия Александровна** — магистрант ФГБОУ ВО «Братский государственный университет», [GalkovaNV@yandex.ru](mailto:GalkovaNV@yandex.ru)

Статья поступила в редакцию 17.07.2017 г.



## IMPROVEMENT OF TECHNOLOGY OF WOOD COMPOSITE MATERIALS

I.N. Chelysheva, N.P. Plotnikov, N.A. Afanasyeva

Bratsk state University, 665709, Irkutsk region, Bratsk, Makarenko St. 40  
irinachelysheva@yandex.ru

There was developed a technology for producing wood composite material based on sawdust, corresponding to requirements of GOST 19222–84. A way of using damp sawdust of softwood species for production of wood composite material made in experimental models of sawdust concrete using wet sawdust of coniferous breeds of wood, determined the maximum content of wet sawdust of coniferous breeds of wood in the composition for sawdust concrete — 32 %; determined the maximum mass fraction of ash and slag mixture in the composition is 15 % by volume of hydrated lime. The article presents the results of qualitative indicators of sawdust slag concrete. The author established that the production of building blocks from sawdust slag concrete with the proposed composition (mass fraction of sawdust 32 % of the total volume of the composition, mass fraction of ash and slag mixture 15 % by volume of hydrated lime) will produce heat-insulating building material, fully corresponding to the requirements established by GOST 19222-84 physico-mechanical parameters to the sawdust concrete brand M10. The proposed composition allows to reduce the production cost of 1 m<sup>3</sup> of this material to not less than 26 %.

**Keywords:** wood composite material, sawdust, slag, sawdust concrete, disposal

**Suggested citation:** Chelysheva I.N., Plotnikov N.P., Afanasyeva N.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii polucheniya drevesnykh kompozitsionnykh materialov* [Improvement of technology of wood composite materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 75–82. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-75-82

### References

- [1] Afanas'eva N.V., Pyl'neva A.A. *Teploizolyatsionnye stroitel'nye materialy na osnove vtorichnogo syr'ya* [Heat-insulating building materials on the basis of secondary raw materials]. Young thought: science, technology, innovations: materials of the VI (XII) All-Russian Scientific and Technical Conference. Bratsk: BrSU Publ., 2014, pp. 18–21.
- [2] Chelysheva I.N., Afanas'eva N.V., Ovchinnikova O.V. *Vtorichnoe drevesnoe syr'e kak ob'ekt utilizatsii* [Secondary wood raw material as an object of utilization]. Natural and engineering sciences – the development of the regions of Siberia: materials XIII (XXXV) All-Russian scientific and technical conference. Bratsk: BrSU Publ., 2014, pp. 35–36.
- [3] Chelysheva I.N., Afanas'eva N.V. *Vtorichnoe syr'e v sostave kompozitsionnykh drevesnykh materialov* [The second raw material in composition wood materials. Natural and engineering sciences – the development of the regions of Siberia] Materials XIII (XXXV) All-Russian scientific and technical conference. Bratsk: BrSU Publ., 2014, p. 41.
- [4] Afanas'eva N.V. *Snizhenie sebestoimosti proizvodstva stroitel'nykh materialov na osnove ispol'zovaniya pobochnykh produktov lesopileniya* [Decrease in the cost of production of building materials based on the use of byproducts of sawmilling] Problems of economics and management of construction in an environmentally oriented development: materials of the All-Russian scientific and practical online conference with the international participation and elements of a scientific school for youth, April 9–10, 2014 [The Problems of the Construction Economics and Management in Environmentally Sustainable Development: The Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference School for Young People, Apr. 9–10, 2014]. Irkutsk: BGUEP Publ., 2014, p. 48–53.
- [5] Afanas'eva N.V., Aleksa T.V., Gromova N.V., Ivanov D.S. *Vozmozhnost' ispol'zovaniya sryrykh opilok. Molodaya mysl' – razvitiyu lesnogo kompleksa* [The possibility of using raw sawdust] A young thought – the development of the forest complex: materials of the 14th scientific and technical conference of students and undergraduates. Bratsk: BrSU Publ., 2013, pp. 26–30.
- [6] *GOST 19222-84. «Arbolit i izdeliya iz nego. Obshchie tekhnicheskie usloviya»* [GOST 19222-84 "Arbolite and products from it. General technical conditions"] Electronic fund of legal and normative-technical documentation. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost19222-84>
- [7] *SN 549-82. Instruktsiya po proektirovaniyu, izgotovleniyu i primeneniyu konstruktivnykh izdeliy iz arbolita* [SN 549-82 Instructions for the design, manufacture and application of structures and products from arbolite: introduction. 1983-01-01] Electronic Fund of GOSTs and SNIPs. Available at: [http://sniphelp.ru/constructing/002.005.003/SN\\_549-82\\_2032/#i456482](http://sniphelp.ru/constructing/002.005.003/SN_549-82_2032/#i456482)
- [8] Chelysheva I.N. *Tekhnologiya kompozitsionnykh materialov: metodicheskoe* [Technology of composite materials: methodical. instructions for performing laboratory work]. Bratsk: BrSU Publ., 2010, 36 p.
- [9] Plotnikov N.P., Denisov S.V. *Optimizatsiya tekhnologicheskikh rezhimov skleivaniya fanery modifitsirovannymi kleevymi kompozitsiyami* [Optimization of technological modes of gluing of plywood with modified adhesive compositions] Bulletin of the State University of Economics, 2010, no. 5, p. 143–148.
- [10] Plotnikov N.P., Simikova A.A. *Snizhenie toksichnosti karbamidoformal'degidnykh smol* [Reduction of the toxicity of carbamide-formaldehyde resins] *Vestnik KrasAAU*, v. 6, pp. 155–158.
- [11] Plotnikov N.P., Plotnikova G.P. *Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva drevesnoplitnykh materialov* [Improvement of the technology of production of wood-based materials]. Novosibirsk: NP «SibAK» Publ., 2013, 112 p.

### Author's information

**Chelysheva Irina Nikolaevna** — Cand Sci. (Tech.), Associate Professor, Departement of reproduction and processing of forest resources of the Bratsk State University, irinachelysheva@yandex.ru

**Plotnikov Nikolai Pavlovich** — Cand Sci. (Tech.), Associate Professor, Departement of reproduction and processing of forest resources of the Bratsk State University, n-plotnikov@mail.ru

**Afanasyeva Natalia Aleksandrovna** — graduate student of Bratsk state University, galkovanv@yandex.ru

Received 17.07.2017

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМ СЛОЕМ ИЗ ДРЕВЕСНО-ЦЕМЕНТНОГО МАТЕРИАЛА

**В.И. Запруднов, С.П. Карпачёв**

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

zaprudnov@mgul.ac.ru

Рассмотрено развитие нового направления в малоэтажном строительстве — технология изготовления монолитных трехслойных конструкций с теплоизоляционными древесно-цементными слоями и наружными слоями из конструкционных бетонов. Трехслойные конструкции с теплоизоляционными слоями из древесно-цементных материалов с позиций восприятия комплекса воздействий, которым они подвергаются, более рациональны. В такой конструкции функции материалов разграничены, что позволяет полнее использовать потенциальные возможности отдельных материалов. Внутренний теплоизоляционный слой из древесно-цементного материала в трехслойных конструкциях надежно защищен от возгорания и влагопоглощения, что повышает их долговечность и надежность в эксплуатации. Технологический процесс возведения стен в сборно-монолитном малоэтажном домостроении предусматривает: приготовление древесно-цементной смеси на строительной площадке; доставку раствора и бетона автотранспортом либо приготовление их на строительной площадке; формование стеновых конструкций; твердение стеновых конструкций; подъем и монтаж стеновых конструкций. Применение монолитного малоэтажного строительства особенно целесообразно в южных районах страны, где климатические условия позволяют вести работы практически весь год без тепловой обработки древесно-цементного материала.

**Ключевые слова:** древесно-цементные материалы, малоэтажное строительство, монолитные трехслойные конструкции

**Ссылка для цитирования:** Запруднов В.И., Карпачёв С.П. Технология изготовления трехслойных монолитных конструкций с теплоизоляционным слоем из древесно-цементного материала // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 83–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-83-88

В практике применения древесно-цементных материалов в малоэтажном строительстве получило развитие принципиально новое направление — монолитные трехслойные конструкции с теплоизоляционными древесно-цементными слоями и наружными слоями из конструкционных бетонов. Древесные материалы получают в результате лесозаготовок и деревообработки [1].

Трехслойные конструкции с теплоизоляционными слоями из древесно-цементных материалов с позиций восприятия комплекса воздействий, которым они подвергаются, более рациональны. В такой конструкции функции материалов разграничены, что позволяет полнее использовать потенциальные возможности отдельных материалов. Внутренний теплоизоляционный слой из древесно-цементного материала в трехслойных конструкциях надежно защищен от возгорания и влагопоглощения, что повышает их долговечность и надежность в эксплуатации. Применение монолитного малоэтажного строительства особенно целесообразно в южных районах страны, где климатические условия позволяют вести работы практически весь год без тепловой обработки древесно-цементного материала.

Опыт монолитного малоэтажного строительства, в том числе из древесно-цементных мате-

риалов, в Краснодарском крае [2–5], свидетельствует о том, что наиболее оптимальным вариантом конструкций с применением древесно-цементного материала являются трехслойные стены. Такие конструкции содержат внутренний несущий слой из тяжелого или легкого бетона, теплоизоляционный слой из древесно-цементного материала и наружный защитный слой из бетона или цементно-песчаного раствора.

Получившие распространение способы возведения вертикальных монолитных конструкций включают установку противостоящих опалубочных щитов с последующим заполнением пространства между ними бетонной смесью. При таком способе возведения стен получение трехслойных конструкций представляется затруднительным в технологическом отношении при высокой трудоемкости работ. Кроме того, уплотнение древесно-цементной смеси наиболее распространенными методами с применением вибраторов различных конструкций, в силу специфических свойств древесно-цементной смеси, не дает ожидаемого эффекта.

Исходя из перечисленных фактов в Мытищинском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана разработали технологию и специальную конструкцию опалубки. Эта опалубка была изготовлена на базе

АПК «Кубань». В основу создания конструкции опалубки положен принцип горизонтального формирования стеновых панелей.

Технологический процесс возведения стен в сборно-монолитном домостроении предусматривает: приготовление древесно-цементной смеси на строительной площадке; доставку раствора и бетона автотранспортом либо приготовление их на строительной площадке; формирование стеновых конструкций; твердение стеновых конструкций; подъем и монтаж стеновых конструкций [6–10].

Для приготовления древесно-цементной смеси применяются материалы, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 19222, а именно: органический наполнитель — кофра конопли без предварительного фракционирования, отсева пыли, высушивания или замачивания в воде, измельченная до максимальной длины частиц не более 100 мм; портландцемент марки М400 (для сокращения времени возведения стен рекомендуется применять быстротвердеющие цементы); химическая добавка — хлорид кальция.

Древесно-цементная смесь готовится в смесителях принудительного действия типа СБ-138. Подача в смеситель компонентов древесно-цементной смеси производится в следующем порядке: наполнитель, вода (с учетом воды, имеющейся во влажном наполнителе), растворы химических добавок, цемент. Время перемешивания зависит от применяемого смесителя, его конструкции, интенсивности воздействия на смесь. Исследования показали, что время перемешивания должно быть не менее 8 мин. Приготовление древесно-цементной смеси может осуществляться параллельно с укладкой бетонного слоя стеновой конструкции.

Формование стеновых конструкций производится в крупнощитовой опалубке, разработанной в Мытищинском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана [2]. Конструкция опалубки состоит из щитов каркасной конструкции. Каждый щит состоит из двух частей — цокольной и стеновой. Обе части щита соединены между собой через шарнир так, что стеновая часть может поворачиваться при возведении конструкции относительно неподвижной цокольной части на  $90^\circ$  и занимать горизонтальное или вертикальное положение.

Подвижная стеновая часть щита воспринимает основную часть нагрузки при укладке и уплотнении бетонной смеси, а также при переводе стеновых панелей из горизонтального положения в вертикальное. Формообразующая часть стенового щита выполнена в виде обрешетки, состоящей из продольных, поперечных и диагональных прогонов. Опалубка рассчитана на восприятие нагрузки  $P = 10 \text{ кН/м}^2$  с учетом коэффициента перегрузки и динамических нагрузок.

Весь комплект опалубки состоит из 10 опалубочных щитов четырех типоразмеров, съемной бортоснастки, подносов с домкратами, проеомообразователей, стяжек, щитов опалубки цоколя. Высота стеновой части щита 3,0 м, цокольной части — 0,65 м.

В целях сокращения трудозатрат при установке и разборке опалубочные щиты изготавливают укрупненных размеров из расчета установки по два щита вдоль каждой стены дома. Опалубка может монтироваться как отдельными щитами, так и панелями на всю стену.

Опалубочные щиты автомобильным краном устанавливаются по периметру и вдоль внутренней несущей стены дома таким образом, чтобы стеновая часть щита находилась в строго горизонтальном положении (рис. 1). Затем с внутренней стороны стены устанавливаются опалубочные щиты цоколя, которые крепят тяжами, пропускаемыми в конусных втулках.



Рис. 1. Опалубка стеновой панели с установленными бортами и проеомообразователями

Fig. 1. Formwork of the wall panel with installed sides and profilers

На расположенные горизонтально стеновые щиты прикрепляют проеомообразователи и устанавливают объемные борты, которые крепят к щиту стяжными болтами. Если предусматривается отделка наружных поверхностей декоративной плиткой, то плиточные ковры укладывают на опалубку и далее устанавливают арматурные каркасы, различные проеомообразователи, вентиляционные блоки, трубы для прокладки электропроводки. Арматурные каркасы устанавливаются на подкладку для того, чтобы арматура находилась внутри защитного слоя из раствора или бетона.

К заполнению опалубки бетонной и древесно-цементной смесью следует приступать только после тщательной очистки поверхностей опалуб-



ки от цементного раствора, строительного мусора и проверки правильности установки арматурного каркаса и закладных деталей. Чтобы уменьшить сцепление бетона с опалубкой и обеспечить распалубку, перед бетонированием смазывают опалубку специальными смазками, например ЭСО-ГИСИ-151.

Бетонирование стен начинают с укладки нижнего фактурного слоя бетона заданной толщины. Укладка бетонной смеси производится с помощью бетононасоса или бетонораздатчика. Бетонную смесь подают последовательно в несколько точек равномерно по всей площади бетонируемой стены. Заполнение и разравнивание бетонного слоя по всей площади опалубки стены следует проводить в максимально короткий срок, не более чем за 30 мин. Уплотнение бетонных слоев трехслойных стеновых конструкций можно осуществлять поверхностными или навешенными на опалубку вибраторами. Слой бетонной смеси толщиной до 50 мм уплотняется за один проход со скоростью 0,4...1 м/мин. Рекомендуемая частота поверхностного вибрирования 2800...6000 кол./мин, амплитуда колебаний 0,2...0,5 мм.

После завершения укладки бетонного слоя укладывают древесно-цементный слой (рис. 2). Укладка древесно-цементного слоя по всей площади опалубки должна быть выполнена до начала схватывания цемента в бетонном слое. Время перекрытия слоя устанавливается лабораторией в зависимости от вида цемента и температуры окружающего воздуха. Для обеспечения необходимых теплоизоляционных свойств древесно-цементного слоя его толщину необходимо выдерживать с точностью  $\pm 10$  мм.



Рис. 2. Древесно-цементная смесь, уложенная в опалубку  
Fig. 2. Wood-cement mixture laid in formwork

Жесткую древесно-цементную смесь уплотняют ручным или механическим трамбованием. Ручную и пневматическую трамбовку целесообразно применять в малоармированных конструкциях.

Поризованные древесно-цементные смеси, обладающие подвижностью не менее 2 см, могут уплотняться с применением глубинных вибраторов с гибким валом и вибронаконечником не более 50 мм. Толщина уплотняемого слоя должна быть не более 1,25 рабочей части вибронаконечника. Шаг перестановки вибратора не должен превышать 1,5 радиуса его действия. Для ориентировочных расчетов: средний радиус действия вибраторов 25...30 см. При вибрировании запрещается опирать вибратор на арматуру, особенно в узлах стыкования стержней. Длительность виброуплотнения тем больше, чем жестче смесь. Чрезмерное вибрирование приводит к расслоению смеси. Продолжительность уплотнения древесно-цементной смеси составляет 20...50 с. Степень виброуплотнения определяется визуально. Уплотнение можно считать достаточным, если наблюдаются прекращение оседания смеси, появление цементного молока и прекращение выделения пузырьков воздуха. Зоны действия вибратора должны перекрывать друг друга.

Особое внимание следует уделять уплотнению древесно-цементной смеси у бортов опалубки, у проемообразователей и т. д. с тем, чтобы исключить возможность затекания цементного теста из верхнего слоя бетона и образования мостиков холода.

Далее укладывают бетон, при необходимости используя бетононасос. Укладку верхнего бетонного слоя проводят до наступления обезвоживания поверхности древесно-цементной смеси из-за испарения и поглощения влаги заполнителем. Для уплотнения, выравнивания и заглаживания верхнего бетонного слоя применяется виброрейка типа СО-132А. Изготовленная стеновая конструкция показана на рис. 3.

В начальный период твердения уложенной бетонной смеси необходимо поддерживать благоприятный температурно-влажностный режим,



Рис. 3. Выдержка конструкции до набора бетоном монтажной прочности  
Fig. 3. Exposure of the structure to concrete set-up



предотвращающий значительные температурно-усадочные деформации древесно-цементной смеси.

Обезвоживание древесно-цементной смеси в ранние сроки в результате испарения может замедлить или прекратить процесс твердения и привести к недобору прочности, а также вызвать большие усадки и растрескивание.

Контактирование древесно-цементной смеси с влагой вызывает набухание древесного заполнителя. Твердение трехслойных конструкций с теплоизоляционным древесно-цементным материалом должно осуществляться в естественных условиях при температуре воздуха не ниже 15 °С и относительной влажности воздуха, равной 60...80 %.

По окончании формовки стеновых конструкций последние должны быть защищены от атмосферного воздействия (полиэтиленовой пленкой, термоэлектрическими матами и т. п.). Способы ухода за монолитными трехслойными конструкциями зависят от вида конструкции, типа цемента, местных климатических условий. Хождение людей по забетонированным конструкциям, а также отделка и исправление дефектов разрешается не ранее того времени, когда бетон наберет прочность.

При твердении конструкций с теплоизоляционным слоем из древесно-цементного материала, изготовленного на портландцементе марки 400 и более, в естественных условиях при 18...25 °С и относительной влажности воздуха 60...80 % древесно-цементный материал приобретает прочность при сжатии, равную 50 % проектной прочности, примерно через трое суток. После приобретения древесно-цементным материалом прочности при сжатии, равной 50 % проектной, разрешается устанавливать трехслойные стеновые конструкции в проектное положение.

Стены ставят в вертикальное положение путем поворота вокруг неподвижного шарнира вместе с щитом опалубки. Подъем осуществляется автокраном грузоподъемностью 10 тс с длиной стрелы 14 м (рис. 4).

Перед установкой панелей в вертикальное положение выполняют гидроизоляцию цоколя и укладывают выравнивающий слой из цементно-песчаного раствора толщиной 2...3 см поверх гидроизоляции на цоколе здания.

Для предотвращения смещения панели по плоскости опалубки во время установки ее фиксируют за арматурные выпуски к конструкции опалубки. Установленные стеновые конструкции временно раскрепляют металлическими подкосами с винтовыми домкратами (рис. 5). Стеновые конструкции скрепляют друг с другом путем сваривания арматурных выпусков класса А-I диамет-



Рис. 4. Подъем трехслойной стеновой конструкции с помощью автокрана

Fig. 4. Lifting of a three-layered wall structure by means of a truck crane



Рис. 5. Установка трехслойных стеновых конструкций

Fig. 5. Installation of three-layered wall structures

ром 12 мм, расположенных в торцах панелей в двух уровнях. После постоянного закрепления стеновых панелей опускают щиты опалубки и проводят демонтаж опалубки. Угловые и торцовые стыки в панелях после наклейки воздухоизоляционного покрытия и установки уплотняющих прокладок замоноличивают легким бетоном.

## Список литературы

- [1] Запруднов В.И., Карпачев С.П., Быковский М.А. Технологии и технические редства процессов лесосечных работ // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 108–117. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-108-117
- [2] Валуева Е.Ф. Стеновые конструкции из арболита на основе костры конопля: Автореф. дис. ... канд. М., 1998. 20 с.
- [3] Запруднов В.И. Трехслойные конструкции с древесно-цементными теплоизоляционными слоями. М.: МГУЛ, 2006. 322 с.
- [4] Щербаков А.С., Запруднов В.И., Кучерявый В.И., Мирошникова Е.Ф. Разработка стеновых панелей из арболита и их внедрение в производство // Научн. тр. МГУЛ, 1997. Вып. 293. С. 5–13.
- [5] Щербаков А.С., Запруднов В.И., Мирошникова Е.Ф. Испытание трехслойных стеновых панелей для промышленных зданий с внут-ренним слоем из арболита // Научн. тр. МГУЛ, 1997. Вып. 293. С. 24–29.
- [6] Запруднов В.И. Исследование процесса влияния тех-

- нологических факторов на свойства древесно-цементного утеплителя // Науч. тр. МГУЛ, 1996. Вып. 285. С. 12–17.
- [7] Подчуфаров В.С., Чемлева Т.А., Щербаков А.С. Об оптимальном составе арболита повышенного качества // Науч. тр. МЛТИ, 1976. Вып. 93. С. 68–88.
- [8] Sanaev V.G., Zaprudnov V.I., Gorbaheva G.A., Oblivin A.N. Factors affecting the quality of wood-cement composites // Bulletin of the Transilvania University of Braşov Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Enging, 2016, v. 9 (58), no. 2. pp. 63–71.
- [9] Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Лесная пром-сть, 1986. 266 с.
- [10] Запруднов В.И., Подчуфаров В.С. Деформативность ковра из фиброцементной массы при изготовлении трехслойных стеновых панелей для малоэтажного домостроения // Науч. тр. МЛТИ, 1988. Вып. 203. С. 167–171.

### Сведения об авторах

**Запруднов Вячеслав Ильич** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zaprudnov@mgul.ac.ru

**Карпачёв Сергей Петрович** — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), karpachevs@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.06.2017 г.

# TECHNOLOGY OF MANUFACTURE OF THREE-LAYER MONOLITHIC STRUCTURES WITH THERMAL INSULATING LAYER WOOD-CEMENT MATERIAL

V.I. Zaprudnov, S.P. Karpachev

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

zaprudnov@mgul.ac.ru

The development of a new direction in low-rise construction, the technology of manufacturing monolithic sandwich structures with insulating wood-cement layers and outer layers of structural concrete, is considered. Three-layer structure with heat-insulating layers of wood-cement materials from the standpoint of perception of the complex influences to which they are exposed is more rational. In such constructions the function of the materials delineated that allows you to fully use the potential properties materials. The inner insulating layer of wood-cement material in sandwich structures protected against fire and moisture absorption, which enhances their durability and reliability. Technological process of wall construction in precast-monolithic low-rise construction provides for: preparing wood-cement mix at the construction site; the delivery of mortar and concrete by trucks or trade them on the construction site; formation of the wall structures; hardening of the wall structures; lifting and installation of wall construction. The use of monolithic low-rise construction particularly useful in the southern parts of the country where climatic conditions allow to work almost the entire year without heat treatment of wood-cement material.

**Keywords:** wood-cement material, low-rise construction, monolithic three-layer design

**Suggested citation:** Zaprudnov V.I., Karpachev S.P. *Tekhnologiya izgotovleniya trekhslonnykh monolitnykh konstruktiv s teploizolyatsionnym sloem iz drevesno-tsementnogo materiala* [Technology of manufacture of three-layer monolithic structures with thermal insulating layer wood-cement material] *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 5, pp. 83–88. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-83-88

## References

- [1] Zaprudnov V.I., Karpachev S.P., Bykovskiy M.A. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva protsessov lesosechnykh работ* [Technologies and technical equipment used in logging operations]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 108–117. DOI: 10.18698 / 2542-1468-2017-1-108-117
- [2] Valueva E.F. *Stenovye konstruktii iz arbolita na osnove kostry konopli* [Wall structures made of arbolite based on bonfire hemp: abstract of cand. dis.]. Moscow, 1998, 20 p.
- [3] Zaprudnov V.I. *Trekhslonnye konstruktii s drevesno-tsementnymi teploizolyatsionnymi sloyami* [Three-layer constructions with wood-cement heat-insulating layers]. Moscow: MGUL, 2006, 322 p.
- [4] Shcherbakov A.S., Zaprudnov V.I., Kucheryavyi V.I., Miroshnikova E.F. *Razrabotka stenovykh paneley iz arbolita i ikh vnedrenie v proizvodstvo* [Development of wall panels from arbolite and their introduction into production] *Scientific Works of MSFU*, 1997, v. 293, pp. 5–13.
- [5] Shcherbakov A.S., Zaprudnov V.I., Miroshnikova E.F. *Ispytanie trekhslonnykh stenovykh paneley dlya promyshlennykh zdaniy s vnutrennim sloem iz arbolita* [Testing of three-layer wall panels for industrial buildings with an internal layer of arbolite] *Scientific Works of MSFU*, 1997, v. 293, pp. 24–29.
- [6] Zaprudnov V.I. *Issledovanie protsessa vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov na svoystva drevesno-tsementnogo uteplitelya* [Investigation of the process of the influence of technological factors on the properties of wood-cement insulator] *Scientific Works of MSFU*, 1996, v. 285, pp. 12–17.
- [7] Podchufarov V.S., Chemleva T.A., Shcherbakov A.S. *Ob optimal'nom sostave arbolita povyshennogo kachestva* [On the optimal composition of high-quality arbolite] *Scientific Works of MLTI*, 1976, v. 93, pp. 68–88.
- [8] Sanaev V.G., Zaprudnov V.I., Gorbaheva G.A., Oblivin A.N. Factors affecting the quality of wood-cement composites. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2016, v. 9 (58), no. 2, pp. 63–71.
- [9] Ugolev B.N. *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya* [Wood science with the basics of forest commodity science]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1986, 266 p.
- [10] Zaprudnov V.I., Podchufarov V.S. *Deformativnost' kovra iz fibrotsementnoy massy pri izgotovlenii trekhslonnykh stenovykh paneley dlya maloetazhnogo domostroeniya* [The deformativity of carpet from fibrocement mass in the production of three-layer wall panels for low-rise housing construction] *Scientific Works of MLTI*, 1988, v. 203, pp. 167–171.

## Author's information

**Zaprudnov Vyacheslav Il'ich** — D-r Sci. (Tech.), Professor of BMSTU (Mytishchi branch), zaprudnov@mgul.ac.ru

**Karpachev Sergey Petrovich** — D-r Sci. (Tech.), Professor of BMSTU (Mytishchi branch), karpachevs@mail.ru

Received 26.06.2017

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНЕТРОНА С ПОЛЫМ КАТОДОМ, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Н.П. Полуэктов, И.И. Усатов, Ю.П. Царьгородцев, А.Г. Евстигнеев, О.О. Амелькин

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1  
poluekt@mgul.ac.ru

Проведены исследования магнетронного разряда с полым катодом, питание которого осуществляется за счет источника мощных импульсов тока. Источник питания и система измерений параметров плазмы импульсного разряда разработаны сотрудниками секции физики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал). С помощью зондовых и спектральных измерений изучена динамика импульсного разряда. Предложен механизм образования и развития разряда.

**Ключевые слова:** магнетрон с полым катодом, плазма, импульсный разряд, зондовые и спектральные измерения

**Ссылка для цитирования:** Полуэктов Н.П., Усатов И.И., Царьгородцев Ю.П., Евстигнеев А.Г., Амелькин О.О. Исследование магнетрона с полым катодом, работающего в режиме мощных импульсов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 89–95. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-89-95

Среди различных способов получения тонких (микронной и нанометровой толщины) пленок наиболее широко применяется осаждение пленок в плазме низкого давления методом распыления. При использовании данного метода в результате бомбардировки катода-мишени положительными ионами инертного газа происходит выбивание атомов металла, которые осаждаются на подложке. В электронной промышленности наиболее широко используется магнетронный тлеющий разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях [1] (рис. 1).

Плазма в аргоне загорается между анодом и катодом, который изготовлен из распыляемого металла. На катод подается отрицательное напряжение 400...800 В. Электроны захватываются магнитным полем и совершают сложное циклоидальное движение по траекториям вблизи поверхности мишени. Область плазмы с высокой концентрацией (более  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>) имеет вид тора малого объема толщиной порядка 1 см, вне его концентрация уменьшается до  $10^9$ ... $10^{10}$  см<sup>-3</sup>.

Магнетронный способ осаждения обладает рядом недостатков. Особые сложности возникают при осаждении пленок на рельефных субмикронных структурах. В качестве примера можно привести металлизацию сквозных отверстий и канавок (тренчей) при создании современных ультрабольших интегральных схем (УБИС) (проводящие шины для управления транзисторами). В обычном магнетроне поток распыленного металла почти на 100 % состоит из нейтральных атомов, так как вероятность их ионизации при данных размерах и концентрациях плазмы мала. Изотропное распределение частиц здесь приводит к тому, что на верхней части субмикронной структуры образуется навес, а внутри — полость. В результате толщи-

на пленок на различных поверхностях структуры будет существенно различаться. Чтобы провести анизотропную металлизацию узкого отверстия, необходим поток частиц, приходящий на поверхность структуры вдоль нормали.

Одним из возможных способов решения данной проблемы является ионизация распыляемого металла. Позитивный эффект состоит в том, что на ионы можно воздействовать электрическим полем слоя объемного заряда перед подложкой. Для увеличения вероятности ионизации распыленных атомов мишени необходимо создавать плазму высокой концентрации (более  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>) во всем объеме между мишенью и подложкой (15...20 см).

Начиная с 1980-х гг. появились так называемые источники высокоплотной плазмы. Эти источники создают существенно неравновесную плазму с концентрацией более  $10^{11}$  см<sup>-3</sup> в объеме нескольких литров. Благодаря наличию в таких установках больших потоков ионов можно получать наноструктурные пленки с уникальными физическими свойствами (высокие адгезия, прочность, теплопроводность, износоустойчивость). К таким источникам относится индуктивно связанный разряд, сверхвысокочастотный электрон-циклотронный (СВЧ-ЭЦР) разряд, геликонный разряд, магнетронный разряд с полым катодом (МПК) [2–11]. Область рабочего давления — от единиц до десятков мТорр. Температура атомов и ионов порядка 0,1–0,2 эВ, а температура электронов 1...5 эВ. Степень ионизации потока распыляемых атомов металла (отношение потока ионов металла  $\Gamma_{Me^+}$  к полному потоку металла  $\Gamma_{Me + Me^+}$ , состоящего из атомов и ионов) достигает величин 20–50 % для разеых металлов. Процесс образования пленок существенно неравновесный, что и является одной из причин уникальности их свойств.



В лаборатории секции физики Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана создан источник высокоплотной плазмы на основе магнетрона с полым катодом [9–11].

Особенностью этого разряда является высокая концентрация плазмы (более  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> при давлении 1...10 мТорр), создаваемая в большом объеме, низкая (10...50 эВ) и легко изменяемая энергия ионов, приходящих на подложку. Установки на основе данного разряда широко применяются за рубежом для создания адгезионных, диффузионных и травочных слоев в канавках (трэнчах) и межслойных отверстиях современных УБИС [6–8].

Чтобы еще больше повысить степень ионизации потока атомов металла с начала 2000-х гг. стали исследовать магнетроны, в которых стационарный источник питания заменяется на импульсно-периодический, работающий в режиме мощных импульсов (максимум тока 100...1000 А, длительность разряда 10–300 мкс, период разряда  $\tau = 100...300$  Гц), скважность  $\tau/T$  менее 3 %. Плотность ионного тока на мишень превышает 1 А/см<sup>2</sup>, что на порядок больше, чем в стационарных магнетронах.

В зарубежной литературе этот тип разряда называют HiPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering) [12–15]. Дело в том, что мишень магнетрона, работающего в стационарном режиме с плотностью ионного тока на мишень 1 А/см<sup>2</sup>, испытывает большие тепловые нагрузки, что приводит к местному расплавлению мишени, образованию капли и срыву тлеющего разряда (дугообразованию). В HiPIMS-разряде вследствие малой скважности средняя мощность за период не превышает 1...2 кВт, что не приводит к перегреву катода-мишени. При этом в момент импульса тока концентрация плазмы вблизи катода в этом разряде достигает величины  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>, что позволяет электронам ионизовать распыленные атомы мишени на малом расстоянии (несколько сантиметров). Степень ионизации потока атомов металла достигает 80 %. По сравнению со стационарным разрядом скорость осаждения пленки в HiPIMS-разряде с одинаковой средней мощностью уменьшается, что является его недостатком. Это связано с тем, что часть ионов металла (с положительным зарядом), родившихся вблизи отрицательно заряженного катода-мишени, возвращается на мишень и участвует в самораспылении, соответственно на подложку поток ионов металла уменьшается, что снижает скорость осаждения пленки. В большинстве случаев в HiPIMS-разряде используется плоский катод в виде диска диаметром 50...300 мм. Область плазмы с концентрацией  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> располагается на расстоянии менее 10 см от катода.

Мы решили исследовать характеристики HiPIMS-разряда с полым катодом. Область разряда с высокой концентрацией в этом случае в два и

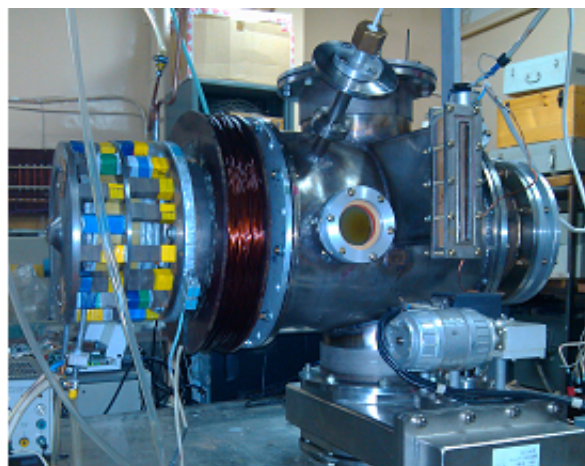
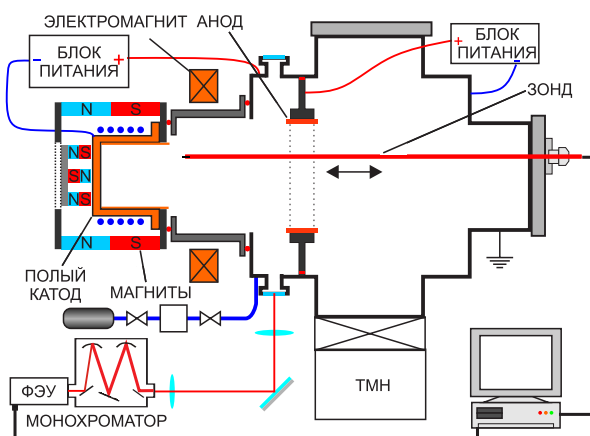
более раз больше, что должно увеличить степень ионизации потока атомов металла. Кроме того, зондовые и спектральные исследования внутри и вне полого катода [10, 16], питаемого от источника постоянного тока (мощность до 4 кВт, ток до 10 А) показали, что ионизация распыляемых атомов металла происходит не вблизи катода, а за пределами выходного сечения, и возвращения ионов металла назад, на катод не происходит. Имеется предположение, что в случае мощных импульсов (ток свыше 100 А) эта ситуация изменится мало, и, следовательно, скорость осаждения изменится незначительно.

Цель данных исследований — получить начальные данные о пространственных и временных параметрах мощного импульсного магнетронного разряда с полым катодом. Для этого было необходимо создать источник питания мощных высоковольтных импульсов тока, систему зондовых и спектральных измерений, разработать необходимое программное обеспечение.

### Экспериментальная установка и методы исследования

Схема установки показана на рис. 1. Катод магнетрона выполнен в виде закрытого с одного конца цилиндра (диаметр 14 см, длина 10 см), изготовленного из меди и охлаждаемого водой. В него можно вставлять цилиндрические мишени из различных металлов. Напряжение импульсного источника разряда до 900 В, максимальная сила тока 150 А, длительность импульса 50...350 мкс, частота 100...200 Гц. Магнитное поле создается столбиками магнитов из сплава Fe-Nd-B, расположенных вокруг катода, а также электромагнитом, установленным вблизи выходного сечения. Концы столбиков соединены кольцевыми железными магнитопроводами. Индукция магнитного поля вблизи цилиндрической поверхности катода составляет 500 Гс. Магнитная пробка на выходе из катода, образуемая такой конструкцией, удерживает вторичные электроны внутри катода. Для расширения потока плазмы и создания более однородного радиального распределения на расстоянии нескольких сантиметров от выходного сечения полого катода установлен электромагнит, магнитное поле которого включено навстречу магнитному полю постоянных магнитов, образуя на выходе магнетрона поле, остроугольной (касповой) конфигурации.

Скрещенные  $E \times B$  поля вызывают дрейф электронов в азимутальном направлении, в результате внутри полого катода создается плазма высокой концентрации (более  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>). Те электроны и ионы, которые имеют начальную аксиальную скорость, способны покинуть полый катод и распространяться к подложке. Для данного катода диаметр центрального керны потока составляет



а

б

**Рис. 1.** Схема (а) и внешний вид (б) установки магнетронного разряда с полым катодом  
**Fig. 1.** Diagram (a) and appearance (б) of a magnetron discharge device with a hollow cathode

порядка 5 см на расстоянии 20 см от выходного сечения магнетрона. Для расширения потока плазмы и создания более однородного радиального распределения на расстоянии нескольких сантиметров от среза и установлен электромагнит, магнитное поле которого включено навстречу магнитному полю постоянных магнитов.

Из источника плазма поступает в технологическую камеру, в которой установлен медный диск с подложками для нанесения пленок.

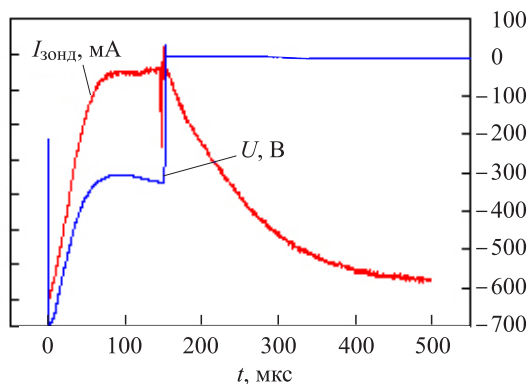
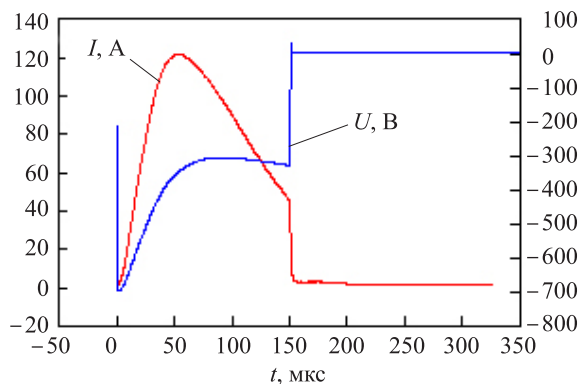
Воздух из камеры откачивают турбомолекулярным насосом до давления  $5 \cdot 10^{-6}$  Торр, затем напускают аргон до давления 3–10 мТорр. Разряд зажигается системой предьонизации (2 кВ, 5...10 мА), а затем включается импульсный источник. Система предьонизации обеспечивает повторяемость разряда.

Система диагностики состоит из зондовой и спектральной. С помощью зондов Лэнгмюра мож-

но определять концентрацию плазмы, температуру электронов, плазменный и плавающий потенциалы в различные моменты времени импульсного разряда. Спектральная диагностика позволяет измерять динамику различных спектральных линий. Излучение из плазмы фокусируется на входную щель монохроматора МДР-12 (обратная дисперсия 1,3 нм/мм) и регистрируется фотоэлектронным умножителем ФЭУ-100. Все данные выводятся на компьютер с помощью системы сбора и обработки информации. Для регистрации применяются двух лучевой цифровой осциллограф Bordo 241 (150 МГц) и плата Nation Instruments.

### Результаты и обсуждения

На рис. 2 показаны характерные осциллограммы силы тока  $I$  и напряжения разряда  $U$ , а также силы ионного тока насыщения зонда  $I_{зонд}$ . Длительность разряда 150 микросекунд. Ток достигает



**Рис. 2.** Осциллограммы силы тока  $I$  и напряжения  $U$  HiPIMS-разряда (а) и силы ионного тока насыщения зонда  $I_{зонд}$  (б) на расстоянии 19 см от среза магнетрона ( $p = 10$  мТорр,  $W = 4,42$  Дж,  $P_{имп} = 29,5$  кВт,  $P_{cp} = 440$  Вт)

**Fig. 2.** Oscillograms of the current intensity  $I$  and the voltage  $U$  HiPIMS of the discharge (a); ion current saturation probe  $I_{зонд}$  (b) at a distance of 19 cm from the cut of the magnetron. ( $p = 10$  mTorr,  $W = 4,42$  J,  $P_{имп} = 29,5$  kW,  $P_{cp} = 440$  W)

максимальной величины 120А на микросекунде, напряжив в момент начала разряда равно -700 В, затем выходит на плато с величиной -350 В. Из осциллограммы ионного тока  $I_{\text{зонд}}$  видно, что после выключения импульса тока ( $t = 150$  мкс) плазма рекомбинирует в течение сотен микросекунд.

На рис. 3, а приведены осциллограммы тока разряда  $I$  и ионного тока насыщения зонда (напряжение на зонде 60 В) на различных расстояниях  $Z$  от мишени. Здесь  $Z = 0$  соответствует краю магнетрона на выходе. Зонд расположен на радиусе  $R = 6$  см, т. е. на 1 см от боковой поверхности катода-мишени. Время достижения максимума тока возрастает по мере увеличения расстояния от дна ( $Z = -11$  см). Разряд начинается в глубине мишени, а затем распространяется к выходному сечению. При этом в течение начального периода ( $t < 15$  мкс) внутри мишени ( $Z < 0$ ) ток отрицательный. Это свидетельствует о наличии электронов с энергией более 60 эВ. Ток зонда на расстоянии  $Z = 17$  см от среза мишени имеет два максимума.

На рис. 3, б показано распределение по радиусу ионного тока зонда, установленного на расстоянии  $Z = 19$  см. Ионный ток зонда также имеет два максимума. Первый максимум на разных радиусах достигается в одно и то же время и совпадает по времени с максимумом разрядного тока. Время второго максимума ближе к концу импульсного тока увеличивается с ростом радиуса.

На рис. 4 показано, как изменяется в течение импульсного разряда интенсивность излучения спектральных линий атомов и ионов аргона и меди на расстоянии  $Z = 19$  см от магнетрона. Интенсивность атомов аргона  $\text{Ar } 6965$  нм (газа, в котором производится разряд) нарастает с увеличением тока разряда, и максимум излучения ( $t = 25$  мкс) достигается немного ранее максимума тока ( $t = 60$  мкс)

(рис. 4, а). Интенсивность излучения распыленных с поверхности мишени атомов меди  $\text{Cu } 2766$  нм медленно нарастает в течение разряда, максимум интенсивности расположен вблизи выключения тока ( $t = 200$  мкс) (рис. 4, б). Интенсивность излучения ионов аргона  $\text{Ar}^+ 4806$  нм достигает максимума в момент  $t = 60$  мкс, это время совпадает с первым максимумом ионного тока (см. рис. 3, б). Затем интенсивность излучения ионов аргона начинает уменьшаться (рис. 4, в). Интенсивность излучения ионов меди  $\text{Cu}^+ 2136$  нм нарастает медленнее и имеет максимум в момент времени  $t = 180...190$  мкс — время появления второго максимума ионного тока (см. рис. 3, б).

На основании зондовых и спектральных измерений можно предложить следующую трактовку динамики разряда. Разряд начинается в глубине катода вблизи его цилиндрической поверхности, а затем распространяется к выходному сечению. К моменту времени  $t = 60$  мкс разрядный ток достигает максимума, затем начинает уменьшаться. Такое поведение тока объясняется уменьшением концентрации атомов аргона в магнетроне вследствие двух причин: во-первых, поток ионов, выходящий из катода, в результате столкновений с атомами выталкивает их (ионный ветер); во вторых, температура газа возрастает и при постоянном давлении концентрация падает. Измерения потенциала плазмы вдоль оси  $Z$  показали, что внутри катода потенциал отрицательный (порядка десятков вольт), а снаружи катода он положительный (около 10 В). Таким образом, для ионов, находящихся внутри катода, создается потенциальный барьер, преодолеть который могут только ионы, обладающие большой энергией. Замагниченные электроны легче всего могут уходить из цилиндрической мишени вдоль оси разряда, где магнитное поле наименьшее. Элек-

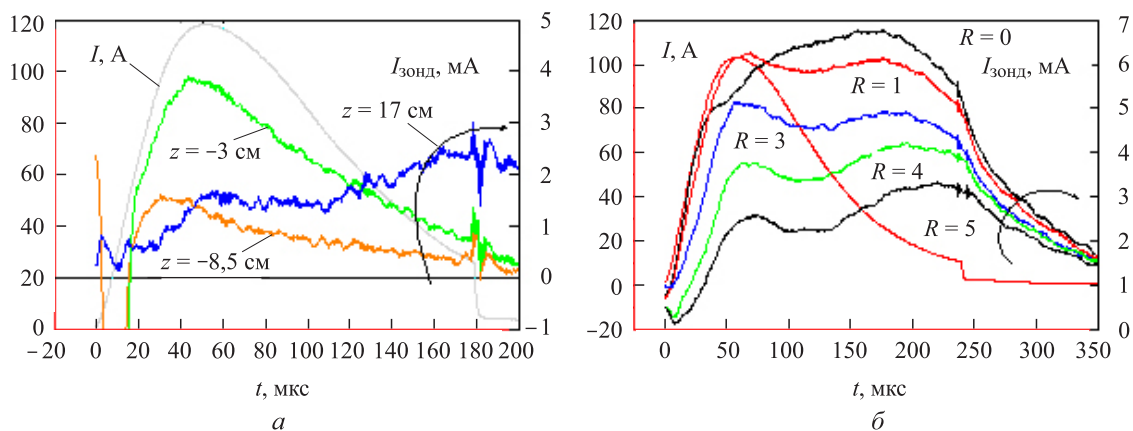
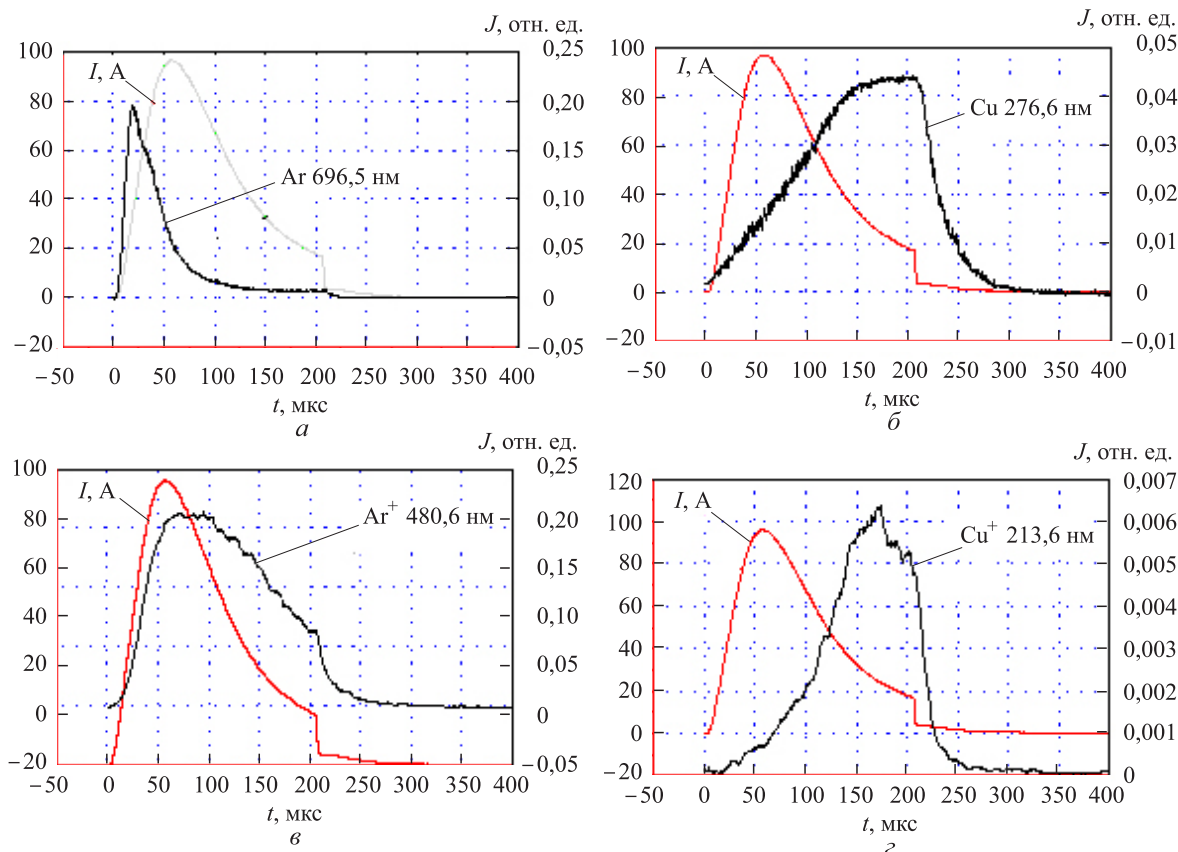


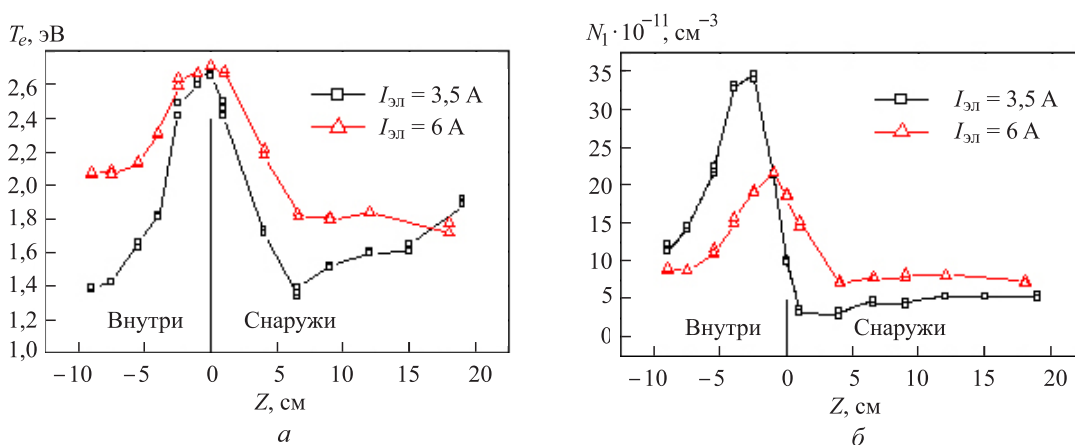
Рис. 3. Осциллограммы силы тока разряда  $I$  и ионного тока зонда:

а — во время импульсного разряда внутри и снаружи полого катода; б — на различных радиусах на расстоянии 19 см от катода ( $p = 10$  мТорр,  $I_{\text{эл}} = 3,5$  А)

Fig. 3. a) Oscillograms of the discharge current  $I$  and the ion current of the probe  $I_{\text{зонд}}$  during the pulsed discharge inside and outside the hollow cathode; b) the dynamics of the ion current of the probe at different radii at a distance of 19 cm from the cathode ( $p = 10$  мТорр,  $I_{\text{эл}} = 3,5$  А)



**Рис. 4.** Динамика излучения линий атомов и ионов аргона и меди на расстоянии  $Z = 19$  см от среза мишени  
**Fig. 4.** Dynamics of emission of lines of atoms and ions of argon and copper at a distance  $Z = 19$  cm from the target section



**Рис. 5.** Температура электронов (а) и концентрация плазмы (б) внутри и снаружи магнетрона в момент времени разряда  $t = 100$  мкс на радиусе  $R = 6$  см для двух значений тока электромагнита  $I_{эл}$   
**Fig. 5.** The electron temperature (а) and the plasma concentration (б) inside and outside the magnetron at a discharge time  $t = 100$  мкс at a radius of  $R = 6$  cm for two values of the electromagnet current  $I_{эл}$

троны вытягивают из магнитной ловушки часть высокоэнергетичных ионов, которые не замагничены и могут уходить из катода по разным радиусам. К моменту времени  $t = 60$  мкс эта группа (в основном ионы аргона и меди) достигают расстояния  $Z = 19$  см от выходного сечения. Оценка скорости этой группы порядка  $2,5...3$  км/с.

В последующие моменты времени разряда ток уменьшается, также падает потенциал плазмы, об

разующий барьер для ионов. Создаются условия для выхода оставшейся части ионов, что вызывает появление второго максимума на графике ионного тока и увеличение интенсивности излучения ионов меди.

На рис. 5 представлены распределения температуры электронов и концентрации ионов вдоль оси  $Z$ , снятые на радиусе  $R = 6$  см в момент времени  $t = 100$  мкс для двух значений силы тока электромагнита. Видно, что температура и концентрация



сильно зависят от конфигурации магнитного поля и достигают максимальных значений вблизи выходного сечения. Вероятно, это связано с большим азимутальным током, протекающим в данной области.

## Заключение

Выполнены зондовые и спектральные измерения временных характеристик импульсно-периодического разряда. Описано распределение параметров плазмы внутри и снаружи магнетрона. В результате проведенных измерений выявлена сложная картина процессов, происходящих в импульсном магнетронном разряде с полым катодом. Для более полного понимания картины необходимы дальнейшие исследования.

## Список литературы

- [1] Hopwood J., Qian F. Mechanisms for highly ionized magnetron sputtering. *J. Appl. Phys.*, 1995, v. 78, pp. 758–765.
- [2] Hopwood J. Ionized physical vapor deposition of integrated circuit interconnects. *J. Phys. Plasmas*, 1998, v. 5, pp. 1624–1631.
- [3] Rosnagel S.M. Thin film deposition with PVD and related technologies. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2003, v. 21, pp. 74–81.
- [4] Gorbatkin S.M., Rosnagel S.M. Cu metallization using a permanent magnet ECR microwave plasma. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1996, v. 14B, pp. 1853–1859.
- [5] Poluektov N.P., Kharchenko V.N., Usatov I.G. Ionization of Sputtered Metal Atoms in a Microwave ECR Plasma Source. *Plasma Physics Reports*, 2001, v. 27, no. 7, pp. 625–633.
- [6] Meng L., Raju R., Flauta R., Shin H., Ruzic D.N. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2010, v. 28A, p. 112.
- [7] Wu L., Ko E., Dulkan A., Park K.J., Fields S., Leeser K., Meng L., Ruzic D.N. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, v. 81, pp. 123502.
- [8] Dulkan A., Ko E., Wu L., Karim I., Leeser K., Park K.J., Meng L., Ruzic D.N. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2011, v. 29A, pp. 041514–1.
- [9] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Ionization Fraction of the Sputtered Metal Flux in a Hollow Cathode Magnetron. *Plasma Physics Reports*, 2014, v. 40, no. 9, pp. 754–759.
- [10] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Plasma parameters of the hollow cathode magnetron inside and downstream. *Plasma sources Science and Technology*, 2015, v. 24, pp. 035009–035015.
- [11] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G. Energy flux to the substrate in a magnetron discharge with hollow cathode. *Thin Solid Films*, 2017, v. 640, pp. 60–66.
- [12] Alami J., Gudmundsson J.T., Bohlmark J., Birch J., Helmersson U. Plasma dynamics in a highly ionized pulsed magnetron discharge. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2005, v. 14, pp. 525–531.
- [13] Anders A. Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 2011, v. 205, pp. 1–9.
- [14] Hecimovic A. Anomalous cross-B field transport and spokes in HiPIMS plasma. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016, v. 49, pp. 1801–1806.
- [15] Ramana P., Shchelkanov I.A., McLain J., Ruzic D.N. High power pulsed magnetron sputtering: A method to increase deposition rate. *J. Vac. Sci. Technol.* 2015, v. 33A, pp. 031304 (1–10).
- [16] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Probe and Emission Spectrometry Diagnostics in Hollow Cathode Magnetron. *J. Modern Phys.*, 2012, v. 3, pp. 1494–1502.

## Сведения об авторах

**Полужков Николай Павлович** — д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), poluekt@mgul.ac.ru

**Усатов Игорь Игоревич** — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), caf-physics@mgul.ac.ru

**Царьгородцев Юрий Петрович** — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), caf-physics@mgul.ac.ru

**Евстигнеев Алексей Георгиевич** — зав. лабораторией, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), evstigneev@mgul.ac.ru

**Амелькин Олег Олегович** — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал),

Статья поступила в редакцию 27.03.2017 г.

## STUDY OF A HOLLOW CATHODE MAGNETRON, OPERATING IN THE REGIME OF POWERFUL PULSES

N.P. Poluektov, I.I. Usatov, Yu.P. Tsar'gorodtsev, A.G. Evstigneev, O.O. Amel'kin

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

poluekt@mgul.ac.ru

Investigations of a magnetron discharge with a hollow cathode, which is powered by a source of powerful current pulses, are carried out. The power source and the system for measuring the parameters of the pulsed discharge plasma were developed by the staff of the physics section. With the help of probe and spectral measurements, the dynamics of a pulsed discharge is studied. Based on the data obtained, a mechanism for the formation and development of a discharge is proposed.

**Keywords:** hollow cathode magnetron, plasma, pulse discharge, probe and spectral measurements

**Suggested citation:** Poluektov N.P., Usatov I.I., Tsar'gorodtsev Yu.P., Evstigneev A.G., Amel'kin O.O. *Issledovanie magnetrona s polym katodom, rabotayushchego v rezhime moshchnykh impul'sov* [Study of a hollow cathode magnetron, operating in the regime of powerful pulses]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 3, pp. 89–95. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-89-95

### References

- [1] Hopwood J., Qian F. Mechanisms for highly ionized magnetron sputtering. *J. Appl. Phys.*, 1995, v. 78, pp. 758–765.
- [2] Hopwood J. Ionized physical vapor deposition of integrated circuit interconnects. *J. Phys. Plasmas*, 1998, v. 5, pp. 1624–1631.
- [3] Rossnagel S.M. Thin film deposition with PVD and related technologies. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2003, v. 21, pp. 74–81.
- [4] Gorbalkin S.M., Rossnagel S.M. Cu metallization using a permanent magnet ECR microwave plasma. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1996, v. 14B, pp. 1853–1859.
- [5] Poluektov N.P., Kharchenko V.N., Usatov I.G. Ionization of Sputtered Metal Atoms in a Microwave ECR Plasma Source. *Plasma Physics Reports*, 2001, v. 27, no. 7, pp. 625–633.
- [6] Meng L., Raju R., Flauta R., Shin H., Ruzic D.N. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2010, v. 28A, p. 112.
- [7] Wu L., Ko E., Dulkin A., Park K.J., Fields S., Leeser K., Meng L., Ruzic D.N. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, v. 81, pp. 123502.
- [8] Dulkin A., Ko E., Wu L., Karim I., Leeser K., Park K.J., Meng L., Ruzic D.N. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2011, v. 29A, pp. 041514–1.
- [9] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Ionization Fraction of the Sputtered Metal Flux in a Hollow Cathode Magnetron. *Plasma Physics Reports*, 2014, v. 40, no. 9, pp. 754–759.
- [10] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Plasma parameters of the hollow cathode magnetron inside and downstream. *Plasma sources Science and Technology*, 2015, v. 24, pp. 035009–035015.
- [11] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G. Energy flux to the substrate in a magnetron discharge with hollow cathode. *Thin Solid Films*, 2017, v. 640, pp. 60–66.
- [12] Alami J., Gudmundsson J.T., Bohlmark J., Birch J., Helmersson U. Plasma dynamics in a highly ionized pulsed magnetron discharge. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2005, v. 14, pp. 525–531.
- [13] Anders A. Discharge physics of high power impulse magnetron sputtering. *Surf. Coat. Technol.*, 2011, v. 205, pp. 1–9.
- [14] Hecimovic A. Anomalous cross-B field transport and spokes in HiPIMS plasma. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016, v. 49, pp. 1801–1806.
- [15] Ramana P., Shchelkanov I.A., McLain J., Ruzic D.N. High power pulsed magnetron sputtering: A method to increase deposition rate. *J. Vac. Sci. Technol.* 2015, v. 33A, pp. 031304 (1–10).
- [16] Poluektov N.P., Tsar'gorodtsev Yu.P., Usatov I.I., Evstigneev A.G., Kamyschov I.A. Probe and Emission Spectrometry Diagnostics in Hollow Cathode Magnetron. *J. Modern Phys.*, 2012, v. 3, pp. 1494–1502.

### Author's information

**Poluektov Nikolay Pavlovich** — Dr. Sci. (Tech.), Professor, BMSTU (Mytishchi branch), poluekt@mgul.ac.ru

**Usatov Igor' Igorevich** — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Professor, BMSTU (Mytishchi branch), caf-physics@mgul.ac.ru

**Tsar'gorodtsev Yuriy Petrovich** — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Professor, BMSTU (Mytishchi branch), caf-physics@mgul.ac.ru

**Evstigneev Aleksey Georgievich** — Head of laboratory of the BMSTU (Mytishchi branch), evstigneev@mgul.ac.ru

**Amel'kin Oleg Olegovich** — student, BMSTU (Mytishchi branch), kalinina@mgul.ac.ru

Received 27.03.2017

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЮБИЛЕЙНОГО КОНГРЕССА ИЮФРО 2017 ГОДА

**В.С. Шалаев, В.К. Тепляков**

Институт системы исследований леса, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

shalaev@mgul.ac.ru

Юбилейный конгресс, посвященный 125-летию Международного союза лесных исследовательских организаций (ИЮФРО), проходил в г. Фрайбург (Германия) с 18 по 22 сентября 2017 г. под девизом «Interconnecting Forests, Science and People», который подчеркивает жизненно важную роль леса и деревьев в поддержании жизни на Земле. В течение 125 лет Союз был привержен делу содействия международному сотрудничеству в исследованиях, охватывающих весь спектр лесной тематики. Цель Юбилейного конгресса — не только отметить прошлые достижения и огромную роль ИЮФРО в обеспечении основы для принятия политических решений на всех уровнях, но и продолжить развитие сотрудничества со всеми заинтересованными сторонами и секторами, такими как водное и сельское хозяйство, энергетика. В работе конгресса приняли участие около 2500 ученых и экспертов, в том числе около 2000 зарегистрировавшихся делегатов из 89 стран. На этапе представления рефератов — аннотаций выступлений и постеров в оргкомитет поступило 3407 заявок. В сборнике рефератов устных и стендовых докладов конгресса было опубликовано 16 аннотаций, написанных представителями Российской Федерации, они были подготовлены преимущественно сотрудниками вузов и академических институтов. Около 20 ученых России выполнили работы в соавторстве с зарубежными коллегами и выступили от имени зарубежных стран. Конгресс послужил платформой для обмена знаниями по всем научным дисциплинам, имеющим отношение к исследованиям лесов, и был открыт для всех ученых независимо от их нынешней принадлежности к ИЮФРО. Тематика конгресса охватила весьма широкий круг вопросов и проблем лесного комплекса. Научная программа включала в себя заседания по основным темам, соответствующим направлениям Стратегии ИЮФРО, и заседания по направлениям отделений ИЮФРО. Стендовые доклады представлялись и обновлялись ежедневно в соответствии с расписанием в помещениях Университета Фрайбурга. В рамках специальных мероприятий (side-events) проведены презентации двух книг: «Gender and Forests: Climate Change, Tenure, Value Chains and Emerging Issues» под редакцией Кэрол Дж. Пирс Колфер и англоязычного издания второй редакции монографии «A History of IUFRO Congresses, Forest Research and Russia's Participation». Анализ состава участников Юбилейного конгресса во Фрайбурге показывает положительную динамику российского участия по сравнению с предыдущим конгрессом, что внушает определенный оптимизм в плане дальнейшего упрочения позиций России в деятельности ИЮФРО.

**Ключевые слова:** Юбилейный конгресс, всемирный, ИЮФРО, участие, российские ученые, англоязычное издание

**Ссылка для цитирования:** Шалаев В.С., Тепляков В.К. Результаты Юбилейного конгресса ИЮФРО 2017 года // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 5. С. 96–100. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-96-100

Юбилейный конгресс, посвященный 125-летию Международного союза лесных исследовательских организаций (ИЮФРО), проходил в г. Фрайбурге (Германия) с 18 по 22 сентября 2017 г. Девиз конгресса «Взаимосвязь лесов, науки и людей» (Interconnecting Forests, Science and People) стал лозунгом ИЮФРО и неотъемлемой частью логотипа Союза. При определении цели конгресса подчеркивалась жизненно важная роль леса и деревьев в поддержании жизни на земле, а также тот факт, что в течение 125 лет Союз был привержен делу содействия международному сотрудничеству в исследованиях, охватывающих весь спектр лесной тематики [1, 2].

Следует отметить, что с момента основания ИЮФРО как клуба руководителей лесных опытных станций и лесохозяйственных ведомств он превратился в мощную организацию, внесшую обеспечивающую значительный вклад в достижение социальных, экономических и экологических целей, изложенных в соответствующих докумен-

тах ООН и многих международных соглашениях. В действующей Стратегии ИЮФРО на 2015–2019 г. [1, 3, 4] рассматриваются такие вопросы, как продовольствие, питьевая вода, доступная энергия, доходы и рабочие места, пути повышения устойчивости к изменению климата и стихийным бедствиям в разных странах.

Важность поставленных задач заставляет организации — члены ИЮФРО и отдельных исследователей гордиться тем, что они являются частью Союза, в котором накапливаются и предоставляются специалистам знания, необходимые для выработки научно обоснованных решений текущих и будущих глобальных задач в интересах лесов и людей. Поэтому нам представляется необходимым участие значительного количества российских лесных факультетов, колледжей, НИИ и отдельных ученых в работе ИЮФРО с целью донести отечественные научно-практические достижения и разработки до как можно большего числа деятелей мирового научного пространства.

Таким образом, цель Юбилейного конгресса состояла не только отметить прошлые достижения и жизненно важную роль ИЮФРО в обеспечении основы для принятия политических решений на всех уровнях, но также продолжить развитие сотрудничества со всеми заинтересованными сторонами и секторами, такими как водное и сельское хозяйство, энергетика.

В рамках конгресса была проведена серия сессий «Наука в диалоге» для привлечения ученых из лесохозяйственных и смежных дисциплин со всех уголков мира к открытому диалогу с национальными и международными политиками, лицами, принимающими решения, другими заинтересованными сторонами. Среди важных вопросов этих сессий, послуживших базой для научной программы конгресса, можно выделить следующие:

1. Каким образом можно улучшить роль лесов в обеспечении средств к существованию и качества жизни людей и какой вклад в связи с этим может внести восстановление лесов?

2. Как леса могут играть большую роль в связывании углерода и одновременно стать более устойчивыми к климатическим изменениям?

3. Какую роль могут играть леса в формирующейся биоэкономике и как можно оценить их истинную стоимость?

4. Каким образом можно эффективно решить проблему утраты биоразнообразия и биологических инвазий?

5. Как деревья, почва и влага взаимодействуют в лесных экосистемах и какую роль могут играть леса в деле улучшения снабжения пресной водой? [2, 5].

В рамках деятельности конгресса ИЮФРО работали ставшие уже традиционными: Программа помощи ученым (Scientist Assistance Program), которая дала возможность ученым представителям младшего и среднего звена из экономически неблагополучных стран принять участие в Юбилейном конгрессе; Программа наставничества молодых студентов и исследователей (IFSA-IUFRO Mentoring Program); сессия «Инкубатор молодых ученых» Международной ассоциации студентов лесного хозяйства (IFSA Incubator Session).

Летние школы, перечисленные ниже, предлагались и были организованы Партнерскими исследовательскими учреждениями, местными организаторами конгресса были организованы летние школы по следующим направлениям:

1) европейские дендроэкологические полевые летние школы;

2) стабильные изотопы в исследованиях лесной экосистемы;

3) функции почв при антропогенном воздействии;

4) исследования лесной и экологической политики: от теории к методологии и обратно;

5) международные лесные и глобальные проблемы;

6) наземный лидер на лесных участках.

Школы были проведены в Швейцарии, Франции и Германии (земля Баден-Вюртемберг). Первые четыре были проведены до начала работы конгресса, пятая и шестая после завершения конгресса.

В работе конгресса приняли участие около 2500 ученых и экспертов, в том числе около 2000 зарегистрировавшихся делегатов из 89 стран [1, 2]. На этапе представления рефератов — аннотаций выступлений и постеров в Оргкомитет поступило 3407 заявок, что свидетельствует о большом интересе к Юбилейному конгрессу. Оргкомитет заблаговременно, до начала работы конгресса, опубликовал в электронном виде рефераты — аннотации (свыше 1800) всех зарегистрировавшихся делегатов, что дало возможность оценить направленность выступлений и активность ученых разных стран.

В России это событие было анонсировано в выступлениях представителей ИЮФРО и средствах массовой информации, в частности в журнале «Устойчивое лесопользование» [6]. В сборнике рефератов устных и стендовых докладов конгресса было опубликовано 16 аннотаций, написанных представителями Российской Федерации причем они подготовлены преимущественно сотрудниками вузов, в основном Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова и Московского государственного университета леса (в настоящее время — Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, и работниками институтов РАН. С сожалением следует отметить, что, как и в прежние годы (если не сказать десятилетия), перед мировым лесным научным сообществом не предстали российская отраслевая наука, институты лесного комплекса — лесного хозяйства, лесопромышленников и переработчиков.

Около 20 ученых России выполнили работы в соавторстве с зарубежными коллегами и выступили от имени зарубежных стран, например, Д. Щепашенко (Международный институт прикладного системного анализа, Австрия), А. Моисеев (Европейский институт леса, Финляндия, и Норвежский университет наук о жизни, Норвегия), И. Дробышев (Шведский институт сельскохозяйственных наук, Швеция), К. Крутовский (Геттингенский университет, Германия, и Международный институт прикладного системного анализа, Австрия) и др. [7].

От России на конгрессе присутствовали только 8 докладчиков, из девяти зарегистрировавшихся делегатов было примерно поровну представителей академических институтов и вузов. При этом следует отметить возросшую активность и увеличившееся представительство Санкт-Петербургского



государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, который уверенно занимает свободное пространство в международном научном сообществе.

Заседаниям во время конгресса предшествовало торжественное и достаточно традиционное мероприятие — Посадка деревьев. В качестве символа социальной связи между деревьями и людьми было высажено дерево липы (*Tilia* sp.). Церемония состоялась под эгидой и при участии профессора Даниэлы Кляйншмит, координатора 9-го отделения ИЮФРО (Германия), и сопровождалась живой музыкой оркестра. На мероприятие были приглашены ученые из разных уголков мира, в том числе и из России. Исторически деревья этой породы часто украшали проспекты в странах Центральной Европы, рощи из них служили местом для судебных заседаний, для танцев и отдыха на открытом воздухе, и в липовых садах собирались любители пива. Особую привлекательность липам придают сердцевидные листья, которые делают их деревьями любви, молодости и будущего. С приветственным словом к присутствующим обратились мэр города Фрайбурга доктор Дитер Саломон (Dieter Salomon), президент ИЮФРО профессор Майкл Вингфильд (Michael Wingfield) и другие официальные лица.

Сразу же после церемонии посадки деревьев была открыта выставка «Взаимосвязь лесов, науки и людей», расположенная во внутреннем дворе факультета охраны окружающей среды и природных ресурсов Университета Фрайбурга. При открытии с приветствиями выступили: профессор Гюнтер Нейхауз (Gunter Neuhaus), проректор Университета Фрайбурга; профессор Тимо Беккер (Timo Becker), ректор Университета искусств, дизайна и популярной музыки; профессор Университета Фрайбурга Уве Шмидт (Uwe E. Schmidt), куратор выставки. Мероприятие базировалось на трех взаимосвязанных элементах: выставке истории лесных наук, художественной фотовыставке и соединительной гостиной для отдыха. Выставка истории лесных наук рассказывала об истории леса, а также о деятельности Международного союза лесных исследовательских организаций. Шесть стендов были посвящены исследованиям, имеющим историческое значение, и деятельности различных отделений ИЮФРО. Фотовыставка под названием «Следы в лесу» предлагала пространственно-временную интерпретацию отношений между людьми и лесом. Выставка была объектом совместного творчества представителей факультета окружающей среды и природных ресурсов Университета Фрайбурга и студентов Университета искусств, дизайна и популярной музыки, который также находится во Фрайбурге.

Первое заседание проходило под руководством директора Лесного научно-исследовательского

института Баден-Вюртемберга профессора Константина фон Тейффеля (Konstantin von Teuffel). На открытии конгресса с приветствием к участниками обратились: президент ИЮФРО профессор Майкл Вингфильд (Michael Wingfield) (Претория, ЮАР); министр промышленности и защиты потребителей Баден-Вюртемберга Питер Хаук (Peter Hauk) (Штутгарт, Германия); председатель совета Большого Восточного региона Филипп Ришерт (Philippe Richert) (Страсбург, Франция); президент Германского лесохозяйственного совета Георг Ширмбек (Georg Schirmbeck) (Берлин, Германия); директор Европейского лесного института Марк Палахи (Marc Palahi) (Йоэнсуу, Финляндия); исполнительный директор ИЮФРО Александр Бук (Alexander Buck) (Вена, Австрия) который представил новый лозунг ИЮФРО; статс-секретарь Федерального министерства продовольствия и сельского хозяйства Германн Онко Айкенс (Hermann Onko Aeikens) (Берлин, Германия); директор Федерального агентства окружающей среды Марк Шардонан (Marc Chardonens), (Бёрн, Швейцария); глава лесного департамента Федерального министерства сельского и лесного хозяйства, управления окружающей средой и водными ресурсами Герхард Маннсбергер (Gerhard Mannsberger) (Вена, Австрия); атташе по сельскому хозяйству посольства Франции Арно Бризэ (Arnaud Brizay) (Берлин, Германия).

В программе [2, 5] было запланированы и проведены пленарные заседания, на которых ярко выступили с ключевыми докладами следующие участники:

– Вернер Курц (Werner Kurz) из Канадской лесной службы с докладом «Потенциальный вклад лесного сектора в смягчение климатических изменений»;

– Уилл Стеффен (Will Steffen), представляющий Австралийский национальный университет и Стокгольмский центр упругости, с докладом «Система Земля, антропоцентризм и мировые леса»;

– Арун Агравал (Arun Agrawal) из Университета Мичигана (США) с докладом «Ошибочные последствия стимулов для сохранения лесов»;

– Робин Чэздон (Robin Chazdon) из Университета Коннектикута (США) с докладом «Восстановление лесного хозяйства: вызовы и возможности для лесоводов, лесов и ландшафтов»;

– Хойка Крайгер (Hojka Kraigher) из Словенского лесохозяйственного научно-исследовательского института (Словения) с докладом «Скрываемое биоразнообразие и лесная динамика».

Конгресс послужил платформой для обмена знаниями по всем научным дисциплинам, имеющим отношение к исследованиям лесов, и был открыт для всех ученых независимо от их нынешней принадлежности к ИЮФРО. Тематика конгресса охватила весьма широкий круг вопросов и

проблем лесного комплекса. Научная программа включала в себя две составляющие: заседания по основным темам, соответствующим направлениям Стратегии ИЮФРО, и пять заседаний по направлениям отделений ИЮФРО [2, 5]. Темы заседаний по основным направлениям:

- леса для людей;
- леса и изменение климата;
- леса и лесные продукты для экологически безопасного («зеленого») будущего;
- биоразнообразии, экосистемные услуги и биологические инвазии;
- взаимодействие лесов, почвы и воды.

Были проведены также заседания по отделениям: «Проектирование и управление лесными технологиями и операциями» (3-е отделение); «Лесная инвентаризация, моделирование и управление» (4-е отделение); «Социальные аспекты лесов и лесного хозяйства» (6-е отделение); «Состояние лесов» (7-е отделение); «Лесная политика и экономика» (9-е отделение).

Стеновые доклады представлялись и обновлялись ежедневно в соответствии с расписанием в помещениях Университета Фрайбурга.

Официальная церемония закрытия включала: главные предложения Юбилейного конгресса ИЮФРО 2017 года; процедуру вручения наград ИЮФРО «За выдающиеся заслуги» (Distinguished Service) и «Специальное признание» (Special Recognition Awards); видеопрезентацию города Куритиба (Бразилия) — места проведения XXV Всемирного конгресса ИЮФРО в 2019 г. и приглашение принять участие в его работе.

После заседаний конгресса были организованы экскурсии на полдня по окрестностям Фрайбурга и в Шварцвальд (три маршрута), а также одно- и двухдневные экскурсии по югу Германии, в Швейцарию и по северо-востоку Франции (десять маршрутов). Экскурсии представляли ряд связанных с лесом тем, имеющих отношение к Центральной Европе, и охватывали разнообразные ландшафты: равнины Рейна, Шварцвальд, горы — Вогезы и Юра во Франции, Альпы, горные районы Швейцарии.

В рамках специальных мероприятий (side-events) прошли презентации двух книг. Так, 21 сентября состоялась презентация книги «Гендер и леса: изменение климата, владение жильем, цепочка создания стоимости и возникающие проблемы» (Gender and Forests: Climate Change, Tenure, Value Chains and Emerging Issues), редак-

торы Кэрол Дж. Пирс Колфер, Бимбика Сиджапати Баснетт, Марлен Элиас, 2016 [2, 5].

Весьма заметно, при широком участии руководства ИЮФРО, 20 сентября прошла презентация англоязычного издания второй редакции монографии В.К. Теплякова и В.С. Шалаева, вышедшей под названием «История съездов IUFRO, исследования леса и участие России» (A History of IUFRO Congresses, Forest Research and Russia's Participation) [8]. Подробная оценка этой книги и характеристика презентации были зафиксированы в соответствующем документе, подписанном руководящими лицами ИЮФРО и элитой мирового лесного научного сообщества. Мероприятие широко освещалось в средствах массовой информации, имело определенный резонанс в научных кругах. Текст книги размещен на сайте ИЮФРО среди основных публикаций [1, 2, 5].

Анализ состава участников Юбилейного конгресса, прошедшего во Фрайбурге, показывает определенную положительную динамику российского участия, по крайней мере по сравнению с конгрессом в Солт-Лейк-Сити [3, 4, 9], что внушает оптимизм в плане дальнейшего упрочения позиций России в деятельности ИЮФРО.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 37.8809.2017/БЧ.*

## Список литературы

- [1] ИЮФРО (официальный сайт). URL: <http://www.iufro.org>
- [2] Юбилейный конгресс ИЮФРО 2017 года (официальный сайт). URL: <http://iufro2017.com>
- [3] Санаев В.Г., Шалаев В.С., Никитин В.В. Некоторые результаты XXIV Всемирного конгресса ИЮФРО // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2014. Вып. 6 (18). С. 226–231.
- [4] Тепляков В.К., Шалаев В.С. История съездов ИЮФРО и Россия. В 2 т. Т. 2. 2-е изд., испр. и доп. М.: МГУЛ, 2015. 372 с.
- [5] 125th Anniversary Congress. Main Program. Freiburg, 18–22 September 2017. 284 p.
- [6] Шалаев В.С. Юбилейный конгресс ИЮФРО // Устойчивое лесопользование, 2016. № 3 (47). С. 47.
- [7] 125th Anniversary Congress. Abstract Book. Freiburg, 18–22 September 2017. 722 p. URL: <http://iufro2017.com>
- [8] Teplyakov Victor K., Shalaev Valentin S. A History of IUFRO Congresses, Forest Research and Russia's Participation / Translation of the 2nd Russian edition, John A. Parrotta and Ptija Parrotta Natarajan, editors. Seoul: DongJinMoonHwaSa Publishers, 2017. 581 p.
- [9] Шалаев В.С., Тепляков В.К. Анализ участия отечественных представителей в съездах и конгрессах ИЮФРО // Известия вузов, Лесной журнал, 2016. № 3 (351). С. 9–20.

## Сведения об авторах

**Шалаев Валентин Сергеевич** — член Международного совета ИЮФРО, д-р техн. наук, профессор Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, [shalaev@mgul.ac.ru](mailto:shalaev@mgul.ac.ru)

**Тепляков Виктор Константинович** — канд. с.-х. наук, профессор Института системных исследований леса Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, [teplyakovv@gmail.com](mailto:teplyakovv@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 30.09.2017 г.

## RESULTS OF THE ANNIVERSARY IUFRO WORLD CONGRESS 2017

V.S. Shalaev, V.K. Teplyakov

Institute of System Forest Research, Bauman MSTU (Mytishchi branch), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytishchi, Moscow region, Russia

shalaev@mgul.ac.ru

The article contains information about the Jubilee Congress dedicated to the 125th Anniversary of the International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) held in Germany (Freiburg, September 18-22, 2017) under the motto «Interconnecting Forests, Science and People». The goal of the Congress is to emphasize the vital role of forests and trees in maintaining life on the Earth and to demonstrate that for 125 years the Union has been committed to promoting international cooperation in research covering the full range of forest topics. Thus, the 125th Anniversary IUFRO Congress was aimed not only to note achievements and the vigorous role of IUFRO in providing the basis for political decision-making at all levels, but also to continue developing cooperation with all stakeholders and sectors such as water, agriculture, and power engineering. About 2500 scientists and experts participated in the Congress including about 2000 registered delegates from 89 countries. At the stage of submission of abstracts, the Congress Organizing Committee received some 3407 applications. Some 16 abstracts of the Russian scientists, mainly representatives of universities and academic institutions, are presented in the Congress publication. About 20 Russian scientists received a sponsorship and participated in the Congress on behalf of foreign countries' institutions. The Congress became a platform for the exchange of scientific knowledge in most scientific disciplines related to forest research; it was open to all scientists, regardless of their current affiliation with the IUFRO. The Congress scientific program included the main topics corresponding to the focus of the IUFRO Strategy and the direction of the meetings for the IUFRO Divisions. According to the schedule, at the premises of the University of Freiburg, posters were displayed and updated. At the Congress's side-events two books were presented. One of them is «Gender and Forests: Climate change, tenure, value of chains and emerging issues», edited by Carol J. Pearce Colfer and published in 2016. With the broad participation of the IUFRO leadership, the presentation of the English version of the 2d edition of the printed in 2017 monograph by V.K. Teplyakov and V.S. Shalaev entitled «A History of IUFRO Congresses, Forest Research and Russia's Participation» was held. The quantitative evaluation of the jubilee Congress in Freiburg shows a certain positive dynamics of the Russian participation and inspires certain optimism for further consolidation of our positions in the IUFRO activities.

**Keywords:** Anniversary congress, world, IUFRO, participation, Russian scientists, English edition

**Suggested citation:** Shalaev V.S., Teplyakov V.K. *Rezultaty yubileynogo kongressa IYUFRO 2017 goda* [Results of the Anniversary IUFRO World Congress 2017]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017. vol. 21, no. 5, pp. 96–100. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-5-96-100

### References

- [1] Materialy sayta *IYuFRO* [Materials of the IUFRO]. Available at: <http://www.iufro.org>
- [2] Materialy sayta *Yubileyniy kongress IYuFRO 2017 goda* [Materials of the site of the Jubilee Congress of the IUFRO in 2017]. Available at: <http://iufro2017.com>
- [3] Sanaev V.G., Shalaev V.S., Nikitin V.V. *Nekotorye rezultaty XXIV Vsemirnogo kongressa IYuFRO* [Some results of the XXIV World Congress of the IUFRO] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2014, t. 18, no. 6, pp. 226–231.
- [4] Teplyakov V.K., Shalaev V.S. *Istoriya s'ezdov IYuFRO i Rossiya* [History of Congresses IUFRO and Russia]. Moscow: MGUL, 2015, t. 2, 372 p.
- [5] The 125<sup>th</sup> Anniversary Congress. Main Program. Freiburg, 18–22 September 2017, 284 p.
- [6] Shalaev V.S. *Yubileynyy kongress IYuFRO* [Jubilee congress of the IUFRO] *Ustoychivoe lesopol'zovanie* [Sustainable forest management], 2016, no. 3 (47), p. 47.
- [7] The 125<sup>th</sup> Anniversary Congress. Abstract Book. Freiburg, 18–22 September 2017, 722 p. Available at: <http://iufro2017.com>
- [8] Teplyakov V.K., Shalaev V.S. *A History of IUFRO Congresses, Forest Research and Russia's Participation* [A History of IUFRO Congresses, Forest Research and Russia's Participation] Translation of the 2d Russian edition. John A. Parrotta and Ptiya Parrotta Natarajan, editors. Seoul: DongJinMoonHwaSa Publishers, 2017, 581 p.
- [9] Shalaev V.S., Teplyakov V.K. *Analiz uchastiya otechestvennykh predstaviteley v s'ezdakh i kongressakh IYuFRO* [Analysis of the participation of domestic representatives in congresses and congresses of the IUFRO] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy, Lesnoy zhurnal* [News of Higher Educational Institutions, Forestry Magazine], 2016, no. 3/351, pp. 9–20.

### Author's information

**Shalaev Valentin Sergeevich** — member of IUFRO International Council, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Institute of System Forest Research, Bauman MSTU (Mytishchi branch), shalaev@mgul.ac.ru

**Teplyakov Victor Konstantinovich** — Cand. Sci. (Agric.), Professor, Institute of System Forest Research, Bauman MSTU (Mytishchi branch), teplyakovv@gmail.com

Received 30.09.2017