

ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал

№ 3 ' 2023 Том 27

Главный редактор

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

Редакционный совет журнала

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

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

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

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

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

Бугаёв Александр Степанович, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург

Бурмистрова Ольга Николаевна, д-р техн. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет»

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

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

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

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

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

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

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

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

Ковачев Атанас, д-р архитектуры, профессор, член-корр. Болгарской АН, профессор Международной Академии Архитектуры, Лесотехнический университет, Болгария, Варна

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь Расева Елена Александровна

Редактор Л.В. Сивай

Перевод М.А. Карлухиной

Электронная версия Ю.А. Раяжской

Учредитель МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-68118 от 21.12.2016

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

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

Выходит с 1997 года

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

Дата выхода в свет 02.05.2023

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 18,75 п. л.

Цена свободная

LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal

No. 3 ' 2023 Vol. 27

Editor-in-chief

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

Editorial council of the journal

Artamonov Dmitriy Vladimirovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Penza State

Ashraf Darwish, Associate Professor of Computer Science, Faculty of Computer Science, Helwan University, Cairo, Egypt, Machine Intelligence Research Labs (MIR Labs), USA

Belyaev Mikhail Yur'evich, Dr. Sci. (Tech.), Head of Department, Deputy Director of S.P. Korolev RSC «Energia», Moscow

Bemman Al'brekht, Professor, the Dresden technical university, professorate Institute for countries of Eastern Europe, Germany

Besschetnov Vladimir Petrovich, Professor, Dr. Sci. (Biol.), Nizhny Novgorod State Agricultural Academy, Nizhny Novgorod

Bugaev Aleksandr Stepanovich, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Sankt-Peterburg

Burmistrova Olga Nikolaevna, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Ukhta State Technical University, Ukhta

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

Chumachenko Sergey Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Deglise Xavier, Dr. Sci. (Agric.), Academician of the IAWS, Academician of the French Academy of Agriculture, Nancy, France

Drapalyuk Mikhail Valentinovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Rector of VSUFT, Voronezh

Evdokimov Yuriy Mikhaylovich, Professor, Ph. D. (Chemical); academician of the New York Academy of Sciences, corr. Academy of Natural Sciences, a member of the Central Board of Nanotechnology Society of Russia, Moscow

Zalesov Sergey Veniaminovich, Professor, Dr. Sci. (Agric.), 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

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

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

Kovachev Atanas, Corresponding Member of the Bulgarian Academy of Sciences, Dr. Sci., Professor, University of Forestry, Bulgaria, Sofia

Kokh Nil's Elers, Professor, the Dr. of agronomics in the field of forest policy, the President of IUFRO, the Center of forest and landscape planning of university Copenhagen, Denmark

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

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

Kotiev George Olegovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

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

Kozhukhov Nikolay Ivanovich, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Econ.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Krott Maks, Professor of Forest politics specialization, George-August-Universitat, Goettingen

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

Lu Haibao, Dr., Tenure-track Professor, Vice Director of the National Key Laboratory of Science and Technology on Advanced Composites in Special Environments, Harbin Institute of Technology (HIT), China

Lukina Natalya Vasilyevna, Corresponding Member of the RAS, Professor, Director of the Center for Sub-Settlement Research RAS, Deputy Chairperson of the Forest Research Council

Makuev Valentin Anatol'evich, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Malashin Alexey Anatolyevich, Professor, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Martynyuk Aleksandr Aleksandrovich, Academician of the RAS, Dr. Sci. (Agric.), VNIILM, Moscow

Melekhov Vladimir Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, NARFU, Arkhangelsk

Moiseyev Aleksandr Nikolaevich, Senior Researcher, European Forest Institute, Joensuu, Finland

Nakvasina Elena Nikolaevna, Professor, Dr. Sci. (Agric.), Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Higher School of Natural Sciences and Technology, Arkhangelsk

Niemz Peter, Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c., Prof. for Wood Physics, ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology in Zurich; Eidgenossische Technische Hochschule Zurich)

Oblivin Aleksandr Nikolaevich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences and MANVSh, Honored worker of science and equipment of the Russian Federation, BMSTU, Moscow

Pasztor, Zoltan, Dr., Ph.D., Director of Innovation Center, University of Sopron, Sopron, Hungary

Pavlenko Aleksandr Nikolaevich, Corresponding Member of the RAS, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

Poleshchuk Olga Mitrofanovna, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Poluektov Nikolai Pavlovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Rodin Sergey Anatol'evich, Professor, the Dr. Sci. (Agric.), ARRISMF, Moscow

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

Shchepashchenko Dmitry Gennadievich, Associate Professor, Dr. Sci. (Biol.), Senior Researcher, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Austria

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

Strekalov Aleksandr Fedorovich, Ph. D. (Tech.), JSC «Tactical Missiles Corporation», Korolev

Teodoronskiy Vladimir Sergeevich, Professor, Dr. Sci. (Agric.), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Titov Anatoliy Matveevich, Ph. D. (Tech.), Deputy Chief of Department, Scientific Secretary of the Board of MCC TSNIIIMASH, Korolev

Trichkov Neno Ivanov, professor, Dr., Vice-Rector for Research, Forestry University, Sofia, Bulgaria

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

Assistant Editor Raseva Elena Aleksandrovna

Editor L.V. Sivay

Translation by M.A. Karpukhina

Electronic version by Yu.A. Ryazhskaya

Founder BMSTU

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

Certificate on registration ПИ № ФС 77-68118 of 21.12.2016

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

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

It has been published since 1997

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

It is sent for the press 02.05.2023
Circulation 600 copies
Order №
Volume 18,75 p. p.
Price free

СОДЕРЖАНИЕ

БИОЛОГИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

Саханов В.В., Коротков С.А., Фитчин А.А., Стоноженко Л.В., Попова А.Д. Современное состояние лесопромышленного комплекса Сахалинской области и перспективы его развития	5
Грязькин А.В., Гаврилова О.И., Чэн Тун, Семенова Е.А. Структурные особенности лесных фитоценозов формирующихся на скальниках после пожара	18
Коба В.П., Салтыков А.Н., Макаров Н.А., Коренькова О.О. Возобновление сосны пицундской (<i>Pinus brutia</i> var. <i>pityusa</i> (Steven) Silba) на заповедных территориях Горного Крыма	26
Левин С.В. Семеношение кедра корейского (<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.) при его интродукции в условиях лесостепи Воронежской области	36
Малиновских А.А. Влияние клена ясенелистного (<i>Acer negundo</i> L.) на естественное возобновление сосны обыкновенной в Барнаульском ленточном бору	48

ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Сергеев А.Г. Результаты производственной проверки рубительного комплекса РБ-55	57
Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера	69
Карпачев С.П., Быковский М.А. Моделирование технологии очистки леса с помощью многооперационной машины	81

ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

Градов О.В. Эволюционная нелинейная химия самоорганизующихся мезофазных (жидкокристаллических) структур древесины: от морфогенеза до регуляции углеобразования (обзор)	91
Кононов Г.Н., Вережкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Хвалько Д.Д. Древесина как химическое сырье. История и современность. V. Древесная целлюлоза как природное полимерное сырье. Часть I	128
Деянов Д.И., Косарин А.А., Моисеев С.А., Курышов Г.Н. Импульсная сушка заготовок из древесины ироко, мербау и венге в конвективной сушильной камере	143

CONTENTS

BIOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF FORESTRY

Sakhanov V.V., Korotkov S.A., Fitchin A.A., Stonozhenko L.V., Popova A.D. Industry current state in Sakhalin region and its development prospects	5
Gryaz'kin A.V., Gavrilova O.I., Cheng Tong, Semenova E.A. Structural features of forest phytocoenosis formed on rock plants after a fire	18
Koba V.P., Saltykov A.N., Makarov N.A., Korenkova O.O. Renewal of <i>Pinus brutia</i> var. <i>pityusa</i> (Steven) Silba in reserved territories of Mountain Crimea	26
Levin S.V. Korean cedar (<i>Pinus koraiensis</i> Sieb. et Zucc.) seed production during its introduction in Voronezh region forest-steppe	36
Malinovskikh A.A. Influence of ash-leaved maple (<i>Acer negundo</i> L.) on scots pine natural renewal in Barnaul ribbon pine forest	48

FOREST ENGINEERING

Bulatov S.Y., Nechaev V.N., Sergeev A.G. Results of RB-55 chopping complex production inspection	57
Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system	69
Karpachev S.P., Bykovskiy M.A. Modelling forest clearing technology with multi-operator machine	81

WOODWORKING AND CHEMICAL WOOD PROCESSING

Gradov O.V. Evolutionary nonlinear chemistry of self-organizing mesophase (liquid crystal) structures of wood: from morphogenesis to regulation of carbon formation (review)	91
Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Khval'ko D.D. Wood as chemical raw material. History and modernity. V. Wood pulp as natural polymer raw material. Part I	128
Deyanov D.I., Kosarin A.A., Moiseev S.A., Kuryshov G.N. Impulse drying of african teak, merbau and wenge wood blanks in a convection drying chamber	143

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА САХАЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ

В.В. Саханов¹, С.А. Коротков^{2,3✉}, А.А. Фитчин⁴, Л.В. Стоноженко⁵, А.Д. Попова⁶

¹АО «Государственный научный центр лесопромышленного комплекса (АО «ГНЦ ЛПК»), Россия, 105120, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятинская, д. 5, стр. 3А

²ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Мытищинский филиал, Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

³БГУН «Институт лесоведения РАН» (ИЛАН РАН), Россия, 143030, Московская обл., Одинцовский р-н, с. Успенское, ул. Советская, д. 21

⁴ФГБУ «Рослесинфорг», Россия, 109316, Москва, Волгоградский пр-т, д. 45, стр. 1

⁵ФАУ ДПО «Всероссийский институт повышения квалификации руководителей работников и специалистов лесного хозяйства», Россия, 141202, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 17

⁶ФБУ «Авиалесоохрана», Россия, 141207, Московская обл., г. Пушкино, ул. Горького, д. 20

skorotkov-71@mail.ru

Приведен анализ динамики показателей лесопромышленного комплекса Сахалинской обл. и основных факторов, влияющих на показатели эффективности лесопользования. Выявлены основные системные проблемы, сдерживающие его поступательное развитие, в числе которых низкий уровень освоения расчетной лесосеки, недостаток экономически и транспортно доступных лесных ресурсов, несовершенство структуры производства и экспорта лесопродукции, сложное финансовое положение предприятий отрасли, недостаточность кадрового обеспечения. Рассмотрены в динамике основные показатели работы лесопромышленного комплекса и причины их постоянного снижения. Даны рекомендации по динамическому развитию лесопромышленного комплекса Сахалинской обл.

Ключевые слова: лесопользование, лесные ресурсы, лесопромышленный комплекс, системные проблемы, перспективы развития

Ссылка для цитирования: Саханов В.В., Коротков С.А., Фитчин А.А., Стоноженко Л.В., Попова А.Д. Современное состояние лесопромышленного комплекса Сахалинской области и перспективы его развития // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 5–17. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-5-17

Механизмам реализации государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года [1] посвящено достаточно много научных исследований и рекомендаций специалистов. В Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года (далее — Стратегия) [2] определены системные проблемы лесного хозяйства и лесопромышленного комплекса и сформулированы основные меры по их преодолению. Однако Стратегия далеко не в полной мере учитывает проблемы отдельных субъектов Российской Федерации, в том числе и Сахалинской обл., лесопромышленный комплекс которой длительное время находится, по оценке ее администрации, в «стагнации» [3–5]. Длительное отсутствие устойчивого развития лесопромышленного комплекса негативно влияет на использование, охрану, защиту и воспроизводство лесов. Введенные в 2022 г. санкции затронули и лесной сектор. В связи с этим требуется объективная оценка их последствий и разработка мер по их преодолению, в частности, в Сахалинской обл.

Цель работы

Цель работы — изучение динамики факторов, влияющих на эффективность функционирования предприятий лесного сектора Сахалинской обл. и разработка рекомендаций по повышению его устойчивости.

Материалы и методы

Материалы исследования основаны на анализе статистических данных Федеральной службы государственной статистики (Росстата) и Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Сахалинской обл. (Сахалинстата), а также данных лесного плана Сахалинской обл. и литературных источников в области эффективности лесопользования.

При проведении работ были использованы такие методы исследования, как полевые наблюдения, систематизация и обобщение собранного статистического материала, применен исторический метод интерпретации данных в хронологическом порядке. Анализ системы лесопромышленного комплекса и лесопользования выполнен исходя из системного подхода к выявлению уровня взаимодействия структуры лесопромышленного производства и динамики использования лесного фонда.

Результаты и обсуждение

По данным на 01.01.2022 г., общая площадь земель Сахалинской обл., на которых расположены леса, составляет 7,169 млн га, в том числе земли лесного фонда — 6,978 млн га, из которых покрыты лесной растительностью 5,774 млн га. Общий запас лесных насаждений на всех категориях земель региона составляет 662,53 млн м³, на землях лесного фонда — 643,72 млн м³, из которых 82,1 % приходится на хвойные породы, в том числе на пихту — 28,6 %, ель — 27,3, лиственницу — 25,5 %. Общий запас древесины спелых и перестойных насаждений в лесном фонде области составляет 334,96 млн м³ [6].

Для всех хвойных пород характерна значительная закомелистость, простирающаяся по стволу в зависимости от породы, высоты и диаметра дерева до высоты 1,0–3,5 м от поверхности [7]. Низкие значения видового числа стволов в древостоях определяют особенности технологии производства сортиментов, связанные с их стандартной длиной (как правило, не более 4 м).

Своеобразные типы леса отражены в различных типологических схемах [7–9].

На состоянии лесного фонда отразились интенсивные лесозаготовительные работы в южной части рассматриваемого региона, особенно после передачи в 1905 г. территории южнее 50° с. ш. под юрисдикцию Японии [10, 11].

Лесной фонд области характеризуется определенной расстроенностью и низким качеством заготавливаемой древесины, расположением значительной части древесных ресурсов на удаленных и труднодоступных территориях, а также нарушением сроков проведения лесоустройства по многим лесничествам. Использование лесных ресурсов здесь происходило неравномерно и по сезонам.

В аналитическом обзоре «Лесной комплекс Дальнего Востока России [12] отмечается, что «... мнение об исчерпанности лесных ресурсов Дальневосточного региона возникло только по одной причине — в результате многих десятилетий истощительного «снятия лесных сливок», которых действительно осталось очень мало и которые сегодня ускоренно уничтожаются».

Основным способом воспроизводства лесов в Сахалинской обл. является естественное лесовосстановление, на долю которого приходится 80 % возобновительных работ, а в отдельные годы до 86,5 % (рис. 1).

Известно, что при естественном лесовосстановлении мягколиственные породы восстанавливаются более высокими темпами. Для искусственного лесовосстановления следует использовать участки с учетом их транспортной доступности.

На протяжении длительного времени в области не велось строительство дорог лесохозяйственного назначения. Это послужило причиной перехода части земель лесокультурного фонда в статус недоступных для хозяйственного воздействия площадей, зарастающих кустарниками и бамбуком, не имеющим применения.

Несмотря на резкое падение объема лесозаготовки в 1990-х годах, в динамике лесовосстановления таких скачков не наблюдалось: до 2002 г., естественное лесовосстановление варьировалось в пределах от 13,15 до 17,17 тыс. га (в среднем 14,98), искусственное — от 3,2 до 5,8 тыс. га (в среднем 4,6). На фоне свертывания лесозаготовительной деятельности в 1997–1998 гг. на территории субъекта наблюдались масштабные пожары, уничтожившие за два года свыше 41 тыс. га насаждений, а затем в меньших объемах повторившиеся уже в 2002–2003 гг. С 2003 г. величина лесовосстановления в регионе опустилась до 12–13 тыс. га в год, а с 2012 г. — ниже 5 тыс. га в год. Таким образом, за период с 2006 г. по 2021 г. объемы естественного восстановления леса снизились в 3,7 раза, искусственного — в 2,3 раза. На протяжении 2020–2021 гг. отмечен небольшой рост площади искусственного лесовосстановления в Сахалинской обл. В ближайшее время, возможно, потребуется интенсифицировать данные работы.

Лесопользование в Сахалинской обл. к началу 2023 г. остается на крайне низком уровне — при допустимых объемах изъятия древесины в 2416,5 тыс. м³ фактическая величина заготовки по всем видам рубок, в частности, в 2021 г. составила 204,4 тыс. м³, т. е. 8,5 % расчетной лесосеки (минимальное значение за весь постсоветский период), в то время как в Дальневосточном федеральном округе в целом — 14,6 %. На Дальнем Востоке ситуация с освоением расчетной лесосеки хуже только в Камчатском крае (6,7 %), Магаданской обл. (5,6 %), Республике Саха (Якутия) (3,8 %) и Чукотском автономном округе (0,9 %). Вместе с тем в Приморском крае в 2021 г. было заготовлено 49,9 % допустимого объема изъятия, в Еврейской автономной области — 23,9, в Хабаровском крае — 20,6, в Республике Бурятия — 19,8, в Забайкальском крае — 11,8, в Амурской обл. — 10,4 % [6, 15, 16].

Промышленные заготовки леса ведутся на Сахалине с 1912 г. Существенный вклад в обезлесение острова внесли японцы, владевшие его южной частью в 1905–1945 гг., и заготовившие за этот период порядка 117 млн м³ древесины, в отдельные годы объем рубок достигал 7 млн м³. В послевоенный период до момента развала СССР среднегодовая величина заготовки древесины на всей территории острова сохранялась на уровне 3,5 млн м³, а использование расчетной лесосеки составляло около 45 % [10, 11].

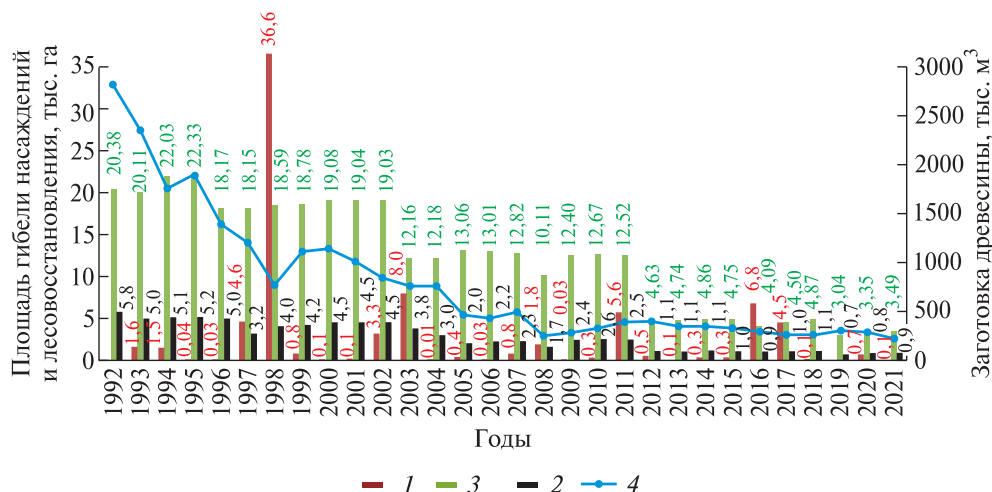


Рис. 1. Сопоставление динамики заготовки древесины, гибели лесных насаждений и объемов лесовосстановления (в том числе искусственного) в Сахалинской обл. [6, 13, 14]: 1 — гибель лесных насаждений, тыс. га; 2 — лесовосстановление всего, тыс. га; 3 — искусственное лесовосстановление, тыс. га; 4 — объем заготовки древесины, тыс. м³

Fig. 1. Dynamics comparison of the timber harvesting, the death of forest plantations and the volume of reforestation (including artificial) in the Sakhalin region [6, 13, 14]: 1 — loss of forest plantations, thous. ha; 2 — total reforestation, thous. ha; 3 — artificial regeneration, thous. ha; 4 — the volume of timber harvesting, thous. m³

В начале 1990-х годов на фоне стремительного и многократного сокращения лесозаготовок допустимый объем изъятия древесины был снижен примерно в 2 раза — до уровня около 4 млн м³, а к 2007 г. постепенно уменьшился до 3,4 млн м³. Поскольку процесс уменьшения масштабов лесозаготовительных работ развивался быстрыми темпами, процент освоения расчетной лесосеки к концу того же года снизился до 13,3 %.

В 2008 г. допустимый объем изъятия древесины в Сахалинской обл. был снижен до 2356,3 тыс. м³, однако в силу почти двукратного снижения объемов заготовок в тот год, обусловленного потерей экспортных рынков из-за правительственных ограничений [17–19], ее освоение уменьшилось до 9,88 %. Вслед за этим наблюдался четырехлетний период медленного восстановления в лесозаготовительной промышленности, по результатам которого использование расчетной лесосеки в 2012 г. достигло 16,63 %, однако после этого последовали нисходящие тенденции, которые к 2023 г. не удалось переломить [6, 15, 16].

Дискуссия о методах определения расчетной лесосеки имеет место среди практиков и в научной литературе, однако, по нашему мнению, этот показатель является достаточно точным индикатором, отражающим уровень эффективности лесопользования. При системной организации лесозаготовительного производства лесопользование ведется более рационально, к примеру, на арендуемых лесных участках освоение расчетной лесосеки в Сахалинской обл. в 2021 г. составило 59,29 %.

Низкий общий уровень освоения расчетной лесосеки в рассматриваемом регионе является следствием некоторых системных причин. Резкое снижение объемов заготовок древесины, которые с 2 926,3 тыс. м³ в 1990 г. уменьшились до 204,44 тыс. м³ в 2021 г. или более чем в 14 раз, в первую очередь, было вызвано сокращением емкости внутреннего рынка древесины в переходный к рынку период. Тогда были закрыты все семь целлюлозно-бумажных предприятий с общим объемом потребляемой древесины более 1,5 млн м³ в год. Производство пиломатериалов снизилось более чем на 755 тыс. м³ — с 810 тыс. м³ в 1990 г. до 54,89 тыс. м³ в 2021 г., что уменьшило внутреннее потребление древесины также более чем на 1,5 млн м³ [13–14, 20].

Экспортный рынок, аккумулировавший ранее порядка 600 тыс. м³, в силу принятых федеральными органами власти в 2007 г. решений об увеличении экспортных пошлин на необработанную древесину [17–19], сузился до нескольких тысяч кубометров, а затем поставки круглого леса из Сахалинской обл. вовсе прекратились. (Для справки: объем экспорта круглого леса в 2007 г. составил 184,6 тыс. м³, а объем выручки — 18,3 млн дол. США.) Экспорт пилопродукции регионом в последние годы также носит нерегулярный характер, и с 2010 г. не превышает 3 тыс. м³ [4, 21, 22].

Таким образом, для лесопромышленного комплекса Сахалинской обл. внутренний рынок остался фактически единственным потребителем заготавливаемой древесины и пиломатериалов. Основными сегментами внутреннего рынка стали

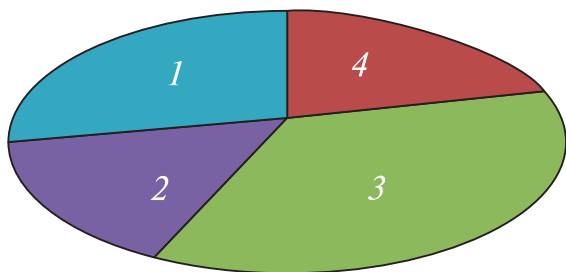


Рис. 2. Структура заготовок древесины в Сахалинской обл. в 2021 г. в разрезе крупности предприятий (в процентах к общему объему) [6]: 1 — до 5 тыс. м³ в год (34,49 %); 2 — от 5 до 10 тыс. м³ в год (15,17 %); 3 — от 10 до 15 тыс. м³ в год (35,10 %); 4 — свыше 15 тыс. м³ в год (15,25 %)

Fig. 2. The structure of timber harvesting in the Sakhalin region in 2021 in the context of the size of enterprises, as a percentage of the total volume [6]: 1 — up to 5 thousand m³ per year (34,49 %); 2 — from 5 to 10 thousand m³ per year (15,17 %); 3 — from 10 to 15 thousand m³ per year (35,10 %); 4 — over 15 thousand m³ per year (15,25 %)

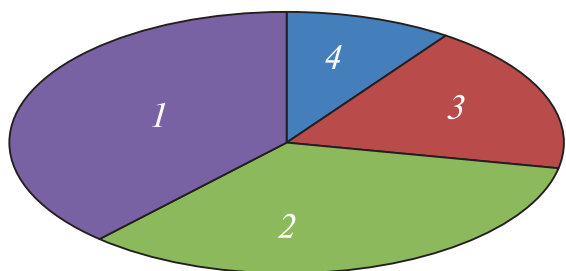


Рис. 3. Распределение объемов производства пиломатериалов в Сахалинской обл. по типам предприятий (в процентах к общему объему) [13]: 1 — индивидуальные предприниматели (40,19 %); 2 — микропредприятия (28,80 %); 3 — малые предприятия (19,26 %); 4 — крупные организации (11,75 %)

Fig. 3. Distribution of lumber production volumes in the Sakhalin region by types of enterprises, as a percentage of the total volume [13]: 1 — individual entrepreneurs (40,19 %); 2 — micro-enterprises (28,80 %); 3 — small enterprises (19,26 %); 4 — large organizations (11,75 %)

строительные организации, муниципальные службы и местное население, потребности которых в части ассортимента лесопродукции значительно шире, чем это могли предложить действующие лесопромышленные предприятия региона.

В итоге, в лесозаготовительной сфере остались в основном предприятия малого бизнеса и индивидуальные предприниматели, а также компании, использующие лесные участки для строительства, реконструкции и эксплуатации линейных объектов. Из 204,44 тыс. м³ заготовленной в 2021 г. в Сахалинской обл. древесины 62,2 %, или 127,09 тыс. м³, пришлось на сплошные рубки (в том числе 42,33 тыс. м³ — на рубки лесных насаждений, предназначенных для строительства, реконструкции и эксплуатации объектов), на выборочные рубки — 37,8 %,

или 77,36 тыс. м³ (в том числе 66,7 тыс. м³ спелых и перестойных лесных насаждений). Рубка лесных насаждений на арендуемых лесных участках по всем формам рубок составила 170,4 тыс. м³, заготовка на лесных участках, предоставленных в постоянное (бессрочное) пользование — 2,3 тыс. м³. Граждане в соответствии со ст. 30 Лесного кодекса Российской Федерации заготовили в Сахалинской обл. в 2021 г. для собственных нужд 12,717 тыс. м³ древесины, или 6,22 % ее общего объема. Предприятий с объемом заготовки свыше 15 тыс. м³ оказалось всего два, и они суммарно вывезли 31,2 тыс. м³ древесины, или 15,25 % общего объема. Доля заготовителей с объемом от 10 до 15 тыс. м³ составила 35,1 %, от 5 до 10 тыс. м³ — 15,17 %, остальная часть приходится на хозяйствующие субъекты с меньшим масштабом деятельности (рис. 2) [6].

В лесопилении, по данным 2019 г., доля крупных предприятий в общем объеме производства составила 11,75 %, малых — 19,26, микропредприятий — 28,8 %, индивидуальных предпринимателей — 40,19 % (рис. 3).

Концентрация производства на предприятиях малого бизнеса препятствует привлечению инвестиций в местный лесопромышленный комплекс, что обусловило ослабление технологической оснащенности предприятий, использование при лесозаготовках и деревообработке устаревших технологий и оборудования. Отсутствие необходимых собственных финансовых средств и проблемы с получением кредитов усугубляют ситуацию.

Отсутствие глубокой переработки древесины определило достаточно большие объемы завоза в Сахалинскую обл. продукции более высоких переделов: фанеры, древесностружечных и древесноволокнистых плит, домокомплектов, столлярно-строительных изделий, бумаги, картона и изделий из них, мебели из других регионов Российской Федерации и из-за рубежа.

Начиная с 2008 г. в Сахалинской обл. по лесопродукции имеется отрицательное сальдо, причем в отдельные годы величина импорта превышала экспорт более чем в 1 570 раз (рис. 4).

До этого основным источником валютной выручки от экспорта были круглые лесоматериалы, на которые приходилось около 90 % поступлений. Однако в 2007 г. федеральные органы решили увеличить экспортные пошлины на необработанную древесину, при этом, совсем не приняв во внимание региональные особенности. В итоге экспорт необработанной древесины с острова снизился с 588 тыс. м³ в 2000 г. до 13,795 тыс. м³ в 2008 г., а с 2010 г. полностью прекратился. Вследствие вступления России в ВТО и снижения таможенных пошлин поставки

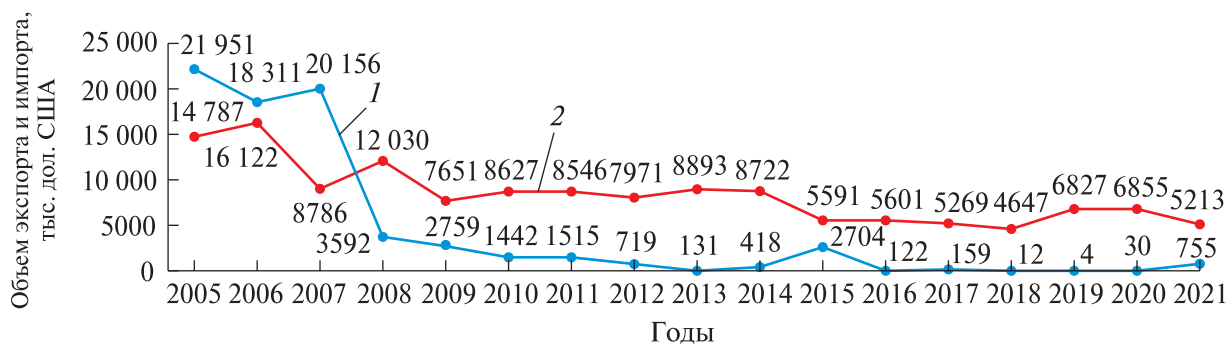


Рис. 4. Динамика экспорта (1) и импорта (2) лесопродукции Сахалинской обл. в 2005–2021 гг. [4, 21–22]

Fig. 4. Dynamics of export (1) and import (2) of timber products by the Sakhalin region in 2005–2021 [4, 21–22]

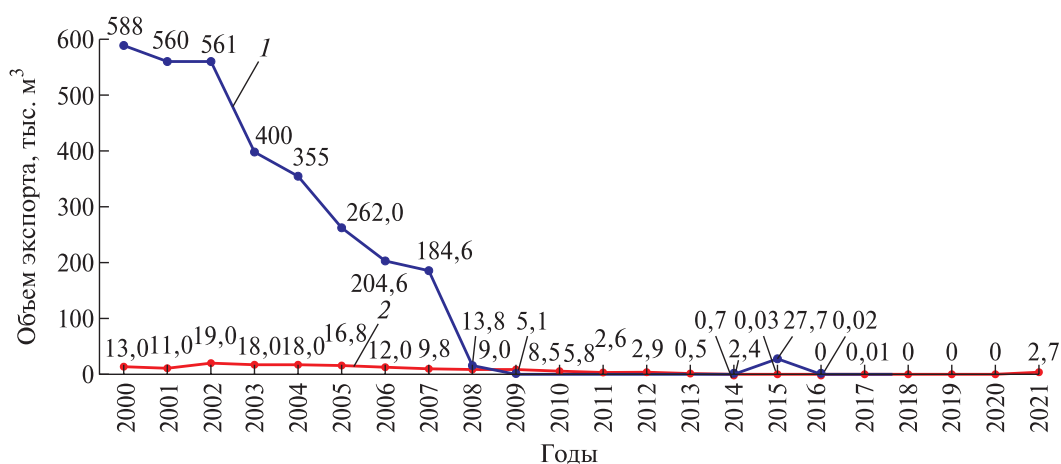


Рис. 5. Динамика экспорта круглого леса (1) и пиломатериалов (2) из Сахалинской обл. в 2000–2021 гг. [4, 21–22]

Fig. 5. Dynamics of exports of roundwood (1) and sawn timber (2) from the Sakhalin region in 2000–2021 [4, 21–22]

на внешний рынок возобновились в небольших объемах — в 2014 г. было вывезено 2,4 тыс. м³, в 2015 г. — 27,7 тыс. м³, однако с 2016 г. они были прекращены.

Поставки на экспорт пиломатериалов также постоянно сокращались — если в 2002 г. они достигали 19 тыс. м³, то с 2010 г. не превышали 3 тыс. м³, а в отдельные периоды вообще не осуществлялись (рис. 5) [4, 21–22].

В 2021 г. возобновившиеся после трехлетнего перерыва поставки пилопродукции в объеме 2,7 тыс. м³, направленные в Южную Корею, обеспечили 98,8 % валютной выручки сахалинских лесопромышленников, или 746,5 тыс. дол. США. Вся остальная продукция — древесный уголь, деревянные столовые и кухонные принадлежности, декоративные изделия из дерева, картона, ящики и коробки из гофрированной бумаги или гофрированного картона, ярлыки и этикетки всех видов, из бумаги или картона, литые и прессованные изделия из бумажной массы и прочие изделия из бумаги и картона принесли суммарно всего 8,978 тыс. дол. США (рис. 6).

Импорт лесопродукции в Сахалинскую обл. в 2021 г. превысил объем экспорта в 6,9 раза и составил 5,212 млн дол. США (рис. 7). Основную долю здесь заняла целлюлозно-бумажная продукция — 76,5 %, в том числе ящики и коробки из картона — 59,13, туалетная бумага и санитарно-гигиенические изделия — 10,4 %. На закупки мебели были потрачены средства, сопоставимые с полученными от экспорта пиломатериалов — 718,8 тыс. дол. США (13,79 %), на фанеру — 427,4 тыс. дол. США (8,2 %).

В целом с 2005 г. Сахалинской обл. объем экспорта лесобумажной продукции в стоимостном выражении снизился в 29,1 раза, а импорта — только в 2,8 раза.

Сокращение вывоза за рубеж необработанной древесины не сопровождалось развитием лесопиления или других видов углубленной переработки древесины. В структуре отгруженной продукции лесопромышленного комплекса Сахалинской обл., составившей в 2021 г. 500,2 млн руб. (рис. 8), наибольший объем занимает продукция с низким уровнем переработки древесины — лесоматериалы

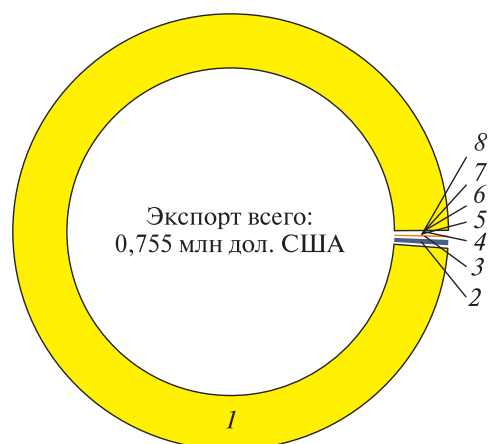


Рис. 6. Структура экспорта лесопродукции из Сахалинской области в 2021 г. [21]: 1 — пиломатериалы: 746 514 дол. США (98,81 %); 2 — декоративные изделия из дерева: 4 819 дол. США (0,64 %); 3 — ярлыки и этикетки всех видов, из бумаги или картона: 2 069 дол. США (0,27 %); 4 — картонки, ящики и коробки, из гофрированной бумаги или гофрированного картона: 993 дол. США (0,13 %); 5 — принадлежности столовые и кухонные, деревянные: 498 дол. США (0,07 %); 6 — древесный уголь: 252 дол. США (0,03 %); 7 — литые и прессованные изделия из бумажной массы: 243 дол. США (0,03 %); 8 — прочие изделия из бумаги и картона: 105 дол. США (0,01 %)

Fig. 6. The structure of timber exports from the Sakhalin region in 2021 [21]: 1 — lumber: \$ 746,514 (98,81 %); 2 — decorative wood products: \$ 4,819 (0,64 %); 3 — labels and labels of all kinds, made of paper or cardboard: \$ 2,069 (0,27 %); 4 — cartons, boxes and boxes, made of corrugated paper or corrugated cardboard: \$ 993 (0,13 %); 5 — dining and kitchen utensils, wooden: \$ 498 (0,07 %); 6 — charcoal: \$ 252 (0,03 %); 7 — molded and pressed products from paper pulp: \$ 243 (0,03 %); 8 — other products made of paper and cardboard: \$ 105 (0,01 %)

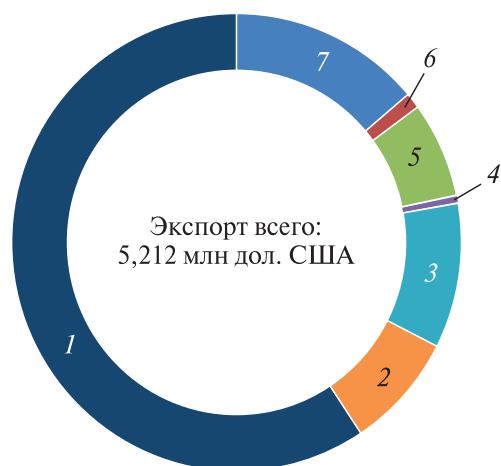


Рис. 7. Структура импорта лесопродукции в Сахалинскую обл. в 2021 г. [21]: 1 — ящики и коробки из картона: 3 082 517 дол. США (59,13 %); 2 — фанера: 427 402 дол. США (8,20 %); 3 — туалетная бумага и санитарно-гигиенические изделия: 542 049 дол. США (10,40 %); 4 — прочие изделия из дерева: 19 549 дол. США (0,38 %); 5 — прочие изделия из бумаги и картона: 362 132 дол. США (6,95 %); 6 — пиломатериалы: 60 531 дол. США (1,16 %); 7 — мебель: 718 770 дол. США (13,79 %)

Fig. 7. The structure of imports of timber products to the Sakhalin region in 2021 [21]: 1 — boxes and boxes made of cardboard: \$ 3,082,517 (59,13 %); 2 — plywood: \$ 427,402 (8,20 %); 3 — toilet paper and sanitary ware: \$ 542,049 (10,40 %); 4 — other wood products: \$ 19,549 US (0,38 %); 5 — other paper and cardboard products: \$ 362,132 (6,95 %); 6 — lumber: \$ 60,531 (1,16 %); 7 — furniture: \$ 718,770 (13,79 %)

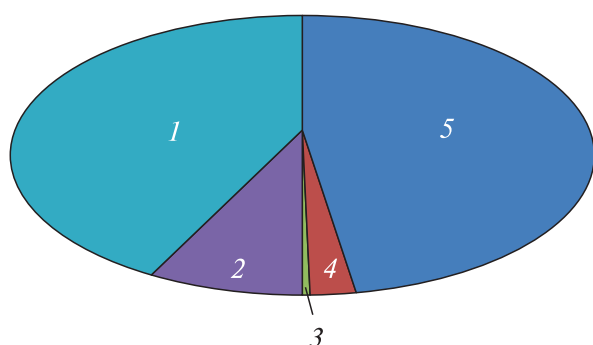


Рис. 8. Структура отгруженной продукции лесопромышленного комплекса Сахалинской обл. в 2021 г. [13–14]: 1 — лесозаготовки: 213,10 млн руб. (42,6 %); 2 — производство мебели: 36,97 млн руб. (7,4 %); 3 — производство бумаги и бумажных изделий: 1,14 млн руб. (0,2 %); 4 — производство изделий из дерева, пробки, соломки и материалов для плетения 11,08 млн руб. (2,2 %); 5 — распиловка и строгание древесины: 237,87 млн руб. (47,6 %)

Fig. 8. The structure the timber industry complex shipped products of the Sakhalin region in 2021, [13–14]: 1 — logging: 213,10 million rubles (42,6 %); 2 — furniture production: 36,97 million rubles (7,4 %); 3 — production of paper and paper products: 1,14 million rubles (0,2 %); 4 — production of wood products, cork, straw and materials for weaving 11,08 million rubles (2,2 %); 5 — sawing and planing of wood: 237,87 million rubles (47,6 %)

необработанные и пиломатериалы, на которые приходилось 450,97 млн руб., или 90,2 % общего объема. Доля мебели составила 7,39 %, бумаги и бумажных изделий — 0,23, изделий из древесины — 2,21 % [13–14].

По сравнению с 2020 г. отгрузка лесопромышленных товаров в Сахалинской обл. снизилась на 0,9 %, в том числе в деревообработке на 17,9 %,

в производстве бумаги и бумажных изделий — в 2,4 раза, при этом в производстве мебели и лесозаготовках на фоне опережающего роста цен отмечен рост отгрузки.

Несовершенная структура производства обуславливает низкий вклад отрасли в экономику региона. По продукции переработки (без лесоматериалов необработанных) вклад составил 0,03 %

в объеме промышленности, и 0,41 % в объеме обрабатывающей промышленности.

Доля Сахалинской обл. в объемах производства продукции, производимой по Российской Федерации и Дальневосточному федеральному округу, в 2021 г. составила соответственно: по лесоматериалам необработанным — 0,09 и 1,17 %, по пиломатериалам — 0,17 и 1,78 %, по деревянным дверным и оконным блокам — 0,05 и 26,14 %, по деревянным поддонам — 0,01 и 4,22 %, по бланкам из бумаги и картона — 0,34 и 6,28 %, по мебели — 0,05 и 3,93 %. Работа предприятий региона характеризуется низким уровнем загрузки, в частности, использование мощностей по лесопилению в 2021 г. составило 24,4 %. Выпуск ряда товаров с высокой добавленной стоимостью к настоящему времени вообще прекращен.

В долгосрочных планах развития лесопромышленного комплекса Сахалинской обл. администрация области, оценивая ситуацию в лесном секторе экономики как неудовлетворительную, наметила комплекс мер по развитию ряда новых производств, в том числе конструкций для деревянного домостроения, изделий из низкосортной древесины и отходов лесопиления (плит МДФ и OSB), биотоплива из отходов древесины [4, 5, 23]. Некоторые деревообрабатывающие предприятия в отдельные годы начали производство клееного бруса, оцилиндрованного бруса, конструкций для деревянного домостроения, экспортных пиломатериалов, технологической щепы. Однако по некоторым причинам технического и организационного характера данная продукция не нашла устойчивого спроса и, как следствие, не получила необходимого развития и не стала массовой.

В условиях определяющего спроса на заготовленную древесину только на рынке Сахалинской обл. и нерентабельности ее сбыта за пределами региона, требуется существенно изменить структуру производства в направлении углубления переработки древесины. К сожалению, предпринимавшиеся попытки привлечь в лесной комплекс Сахалинской обл. крупных инвесторов длительное время не приносили успехов. Не был реализован и приоритетный инвестиционный проект, исполнителем которого было определено АО «БМ Сахалин» (ныне ликвидировано) [24].

Инвестор планировал создать на территории Сахалинской обл. в 2012–2016 гг. комплексное деревообрабатывающее предприятие по выпуску пиломатериалов хвойных сухих в объеме 213,8 тыс. м³, пиломатериалов лиственных сухих — 6,0 тыс. м³ и технологической щепы — 339,0 тыс. м³. Проект предусматривал использование 747 тыс. м³ сырья и создание 686 рабочих мест. По предложенным инвестором в ходе реализации данного проекта изменениям, касающимся

расширения линейки выпускаемой продукции с включением в нее элементов деревянного домостроения (клееного бруса) — 50 тыс. м³, пеллет — 100 тыс. т, от Минпромторга России был дважды получен отказ [25, 26]. Впоследствии в силу невыполнения обязательств инвестора данный проект был исключен Минпромторгом России из федерального перечня приоритетных инвестиционных проектов в области освоения лесов [27].

Что касается перспективных планов развития производства лесопроductии, то в Лесном плане Сахалинской области на 2019–2028 годы [23] (далее — Лесной план) не предусматривалось развитие углубленной переработки древесины. К 2028 г., в соответствии с Лесным планом, планировался выпуск традиционной для области лесопроductии — лесоматериалов необработанных и пиломатериалов хвойных, с ориентировкой их поставок преимущественно на внутренний рынок. Таким образом, режим стагнации лесопромышленного комплекса сохранился бы как минимум до 2028 г.

Серьезность намерений администрации Сахалинской обл. сдвинуть с мертвой точки вопрос углубления переработки древесины и на этой основе повысить эффективность лесопромышленного комплекса была предпринята в «Стратегии социально-экономического развития Сахалинской области на период до 2035 года» [28]. В реализацию этой задачи по инициативе Правительства Сахалинской области в перечень приоритетных инвестиционных проектов в области лесов был включен проект «Создание лесоперерабатывающего комплекса на территории Сахалинской области», инвестором которого определен ООО «Евразлес» [29]. Объем заявленных инвестиций составит 13,17 млрд руб., объем потребляемого сырья — 793,1 тыс. м³, объем и ассортимент выпускаемой продукции: строганный пиломатериал — 53,734 тыс. м³, CLT-плиты — 53,734 тыс. м³, древесно-полимерный композит — 9,313 тыс. м³, древесный уголь — 9,498 тыс. т. топливные гранулы (пеллеты) — 9 тыс. т, плиты OSB — 142,498 тыс. м³, химико-термомеханическая масса (ХТММ) — 60 тыс. т. В рамках проекта предполагается создать 240 рабочих мест, а завершить его реализацию — в 2026 г.

Показатели данного проекта, за редким исключением, в основном совпадают с показателями, заложенными в проект, анонсированный ранее Национальным лесным агентством развития и инвестиций [30]. Принципиальным отличием является перенос промышленной площадки из пгт Тымовское в с. Дачное Корсаковского городского округа Сахалинской обл. и некоторое расширение перечня выпускаемой продукции. Реализация проекта в полном объеме позволит

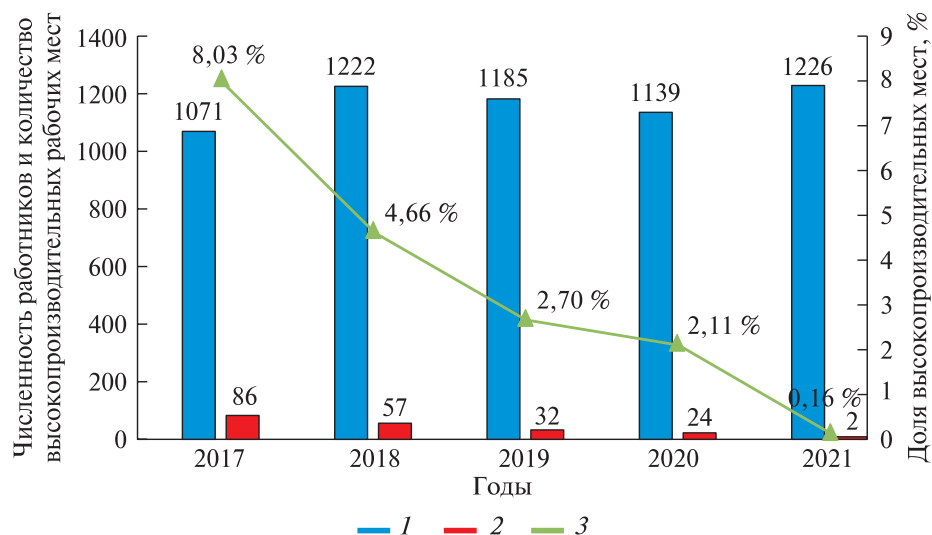


Рис. 9. Динамика среднесписочной численности работников и числа высокопроизводительных рабочих мест в лесопромышленном комплексе Сахалинской обл. в 2017–2021 гг. [13, 14, 18]: 1 — среднесписочная численность работников по полному кругу организаций лесопромышленного комплекса, чел.; 2 — число высокопроизводительных рабочих мест в лесопромышленном комплексе, ед.; 3 — доля высокопроизводительных рабочих мест в общем количестве занятых в лесопромышленном комплексе, %

Fig. 9. Dynamics of the average number of employees and the number of high-performance jobs in the timber industry complex of the Sakhalin region in 2017–2021 [13, 14, 18]: 1 — the average number of employees in the full range of organizations of the timber industry complex, people; 2 — the number of highly productive jobs in the timber industry, units; 3 — the share of highly productive jobs in the total number of people employed in the timber industry, %

существенно улучшить эффективность лесопользования. Однако в сложившейся непростой ситуации, связанной с введением санкций, в том числе и в отношении лесного сектора, от инвестора и региона потребуются принятие дополнительных мер по снижению возможных рисков, связанных с реализацией инвестиционного проекта.

Осуществление лесохозяйственной и лесопромышленной деятельности инвестор будет вести в сложных природно-климатических и топографических условиях Сахалинской обл., с низкой товарностью древесных ресурсов и повышенными издержками на формирование инфраструктуры в лесном фонде. Речь идет не только о лесовозных, но и лесохозяйственных дорогах, строительство которых велось неудовлетворительно. Сложилась ситуация, при которой, часть лесных земель стала недоступной для хозяйственного возделывания, поскольку расположена на крутых склонах 30° и выше. Лесовосстановление и строительство лесовозных дорог лесопользователями на условиях аренды лесных участков и договоров краткосрочного пользования практически не велось. Осуществление полномасштабного лесовосстановления особенно важно в условиях проведения в Сахалинской обл. эксперимента по установлению специального регулирования выбросов и поглощения парниковых газов [31].

Принимая во внимание увеличение плеч доставки древесины, рекомендуется рассмотреть вопрос об организации лесозаготовок в некоторых лесничествах, расположенных в южной части области, которые имеют перспективы развития заготовок древесины в приспевающих и спелых лесах. Возможно, для этого придется решить вопрос о корректировке возрастов рубок.

Направленность поставок основных объемов продукции на экспорт в страны, которые активно вводят санкции против Российской Федерации, вызывает настороженность. В этой связи актуальность приобретает переориентация части планируемой к выпуску продукции на внутренний рынок. Это важно для решения проблемы высокой доли ветхого и аварийного жилья за счет развития деревянного и малоэтажного домостроения не только в Сахалинской обл., но и в других субъектах Российской Федерации, в том числе в Дальневосточном федеральном округе. Внутриобластное потребление топливных гранул (пеллет) можно увеличить за счет вовлечения их в энергообеспечение промышленных предприятий и коммунальных котельных. Проект по производству химико-термомеханической массы в перспективе целесообразно дополнить мощностями по производству тароупаковочного картона.

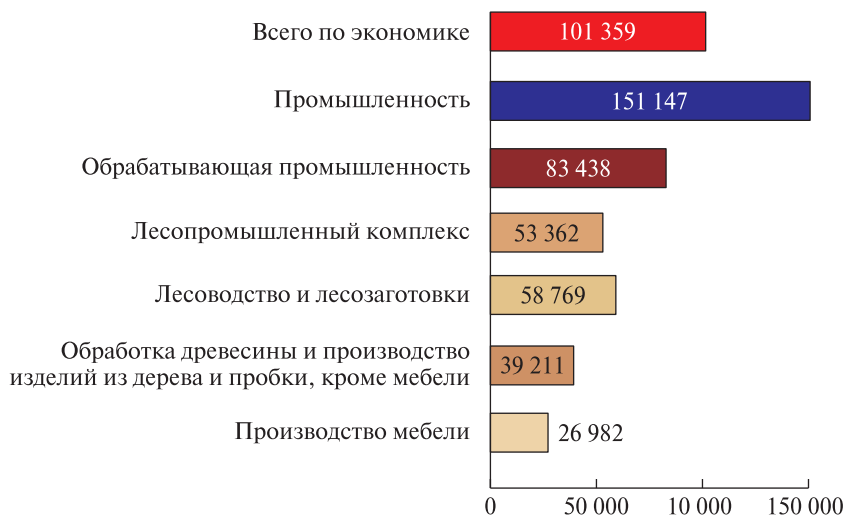


Рис. 10. Сопоставление среднемесячной начисленной заработной платы (руб.) по подотраслям лесопромышленного комплекса со средней по экономике, обрабатывающей промышленности и промышленности Сахалинской обл. за январь — сентябрь 2022 г. [13, 14, 16]

Fig. 10. The comparison of the average monthly accrued wages (rubles) by sub-sectors of the timber industry with the average of the economy, manufacturing and industry of the Sakhalin region in January — September 2022 [13, 14, 16]

Инвестору следует учесть трудности с обеспечением новых производств квалифицированным персоналом, поскольку в структуре экономики Сахалинской обл. нет свободных ресурсов для развития лесопромышленного комплекса. Стагнация производства привела к оттоку из лесопромышленного комплекса работников, имеющих высокие компетенции, и, соответственно, к снижению уровня оплаты труда в отрасли. Если в 2017 г. в Сахалинской обл. к высокопроизводительным относились 86 рабочих мест в лесопромышленном комплексе, или 8,03 % от количества занятых в нем, то к 2021 г. их число сократилось до 2, т. е. до 0,16 % (рис. 9).

Как показал сравнительный анализ, в целом в лесопромышленном комплексе Дальнего Востока доля высокопроизводительных рабочих мест составляет по данным на 2021 г., 43,1 %, в том числе в Республике Бурятия — 76,7, в Чукотском автономном округе — 65,7, в Амурской области — 59,7, в Приморском крае — 45,6, в Республике Саха (Якутия) — 44,2, в Хабаровском крае — 37,9, в Еврейской автономной обл. — 34,1, в Забайкальском крае — 20,8, в Камчатском крае — 2,4, в Магаданской обл. — 2,1 %. Таким образом, Сахалинская обл. по этому показателю заняла последнее место среди всех субъектов Дальневосточного федерального округа.

В январе — сентябре 2022 г. среднемесячная начисленная заработная плата работающих в лесоводстве и лесозаготовках в Сахалинской обл. составила 58,8 тыс. руб., в деревообработке — 39,2 тыс. руб., в производстве мебели — 27,0 тыс. руб. По всем подотраслям лесопромыш-

ленного комплекса она установилась на уровне 53,3 тыс. руб., что ниже в 1,9 раза средней по Сахалинской обл., в 2,8 раза — средней по промышленности и в 1,6 раза — средней по обрабатывающей промышленности (рис. 10) [13, 14, 18].

Решение кадровой проблемы будет во многом зависеть от создания в ходе реализации инвестиционного проекта высокотехнологичных и высокопроизводительных рабочих мест. Это позволит повысить уровень оплаты и престижность работы в лесном секторе экономики Сахалинской обл.

Выводы

1. Администрацией Сахалинской обл. взят курс на интенсивное развитие лесопромышленного комплекса, позволяющий выйти из долговременной стагнации с использованием механизма приоритетных инвестиционных проектов в области освоения лесов.

2. Планируемый инвестиционный проект «Создание лесоперерабатывающего комплекса на территории Сахалинской области» следует признать высокорисковым с высокой капиталоемкостью и значительными инфраструктурными и лесохозяйственными издержками, что потребует для его успешной реализации существенно расширить федеральную и региональную поддержку, особенно инвестора, имеющего недостаточный опыт реализации проектов в области освоения лесов.

3. Для повышения конкурентоспособности лесопромышленного комплекса Сахалинской обл. и преодоления территориальной изолированности

требуется предусмотреть особые для региона условия субсидирования транспортных затрат вследствие более высоких логистических издержек при поставках лесопромышленной продукции на рынки других регионов Российской Федерации и на экспорт. Это позволит включить лесопромышленный комплекс Сахалинской обл. в полноценную хозяйственную деятельность других субъектов Российской Федерации.

Список литературы

- [1] Распоряжение Правительства РФ от 26.09.2013 № 1724-р «Об утверждении Основ государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_152506/ (дата обращения 20.11.2022).
- [2] Распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 № 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_377162/ (дата обращения 20.11.2022).
- [3] Постановление Правительства Сахалинской области от 28.03.2011 № 99 «О Стратегии социально-экономического развития Сахалинской области на период до 2025 года». URL: <https://docs.cntd.ru/document/424087324> (дата обращения 20.11.2022).
- [4] Распоряжение Правительства Сахалинской области от 28.10.2011 № 759-р «Об утверждении Стратегии развития лесопромышленного комплекса Сахалинской области на период до 2020 года». URL: <https://sakhalin.gov.ru/doc/19083> (дата обращения 20.11.2022).
- [5] Постановление Правительства Сахалинской области от 18.07.2013 года № 353 «Об утверждении государственной программы Сахалинской области «Развитие лесного комплекса, охотничьего хозяйства и особо охраняемых природных территорий Сахалинской области». URL: <https://docs.cntd.ru/document/460161186> (дата обращения 20.11.2022).
- [6] Агентство лесного и охотничьего хозяйства Сахалинской области. URL: <https://les.sakhalin.gov.ru/> (дата обращения 20.11.2022).
- [7] Леса Дальнего Востока / под ред. А.С. Агеенко. М.: Лесная пром-сть, 1969. 392 с.
- [8] Обидённых В.И., Волков С.Н., Коротков С.А. Зонально-типологические основы лесного хозяйства. М.: МГУЛ, 2015. 220 с.
- [9] Кабанов Н.Е. Лесная растительность советского Сахалина. Владивосток: Изд-во Горнотаежной станции Академии наук СССР, 1940. 212 с.
- [10] Сабиров Р.Н. Использование лесных ресурсов Южного Сахалина в период губернаторства Карафута (1905–1945 гг.) // Первые Краеведческие чтения: Материалы науч. конф., посвященные памяти известного ученого-историка, архивиста, доктора исторических наук А.И. Костанова (Южно-Сахалинск, 7–8 декабря 2017 г.). Южно-Сахалинск: Сахалинская областная типография, 2018. С. 143–151.
- [11] Лисицын Д. Освоение под знаком огня // Лесной бюллетень, 1999. № 3. URL: <http://old.forest.ru/rus/bulletin/10/2.html> (дата обращения 20.11.2022).
- [12] Лесной комплекс Дальнего Востока России: аналитический обзор / под ред. А.С. Шейнгауза. Владивосток; Хабаровск: Изд-во ДВО РАН, 2005. 160 с.
- [13] Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения 20.11.2022).
- [14] Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Сахалинской области. URL: <https://sakhalinstat.gks.ru/> (дата обращения 20.11.2022).
- [15] Федеральное агентство лесного хозяйства. URL: <https://rosleshoz.gov.ru/> (дата обращения 20.11.2022).
- [16] Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). URL: <https://www.fedstat.ru/> (дата обращения 20.11.2022).
- [17] Постановление Правительства Российской Федерации от 24.03.2006 № 158 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 30 ноября 2001 г. № 830 и от 9 декабря 1999 г. № 1364 в отношении отдельных видов лесоматериалов необработанных». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_59222/ (дата обращения 20.11.2022).
- [18] Постановление Правительства РФ от 23.12.2006 № 795 «Об утверждении ставок вывозных таможенных пошлин на товары, вывозимые с территории Российской Федерации за пределы государств — участников соглашений о Таможенном союзе, и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64861/ (дата обращения 20.11.2022).
- [19] Постановление Правительства РФ от 05.02.2007 № 75 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 23 декабря 2006 г. № 795 в отношении отдельных видов лесоматериалов необработанных». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_65981/ (дата обращения 20.11.2022).
- [20] Стоноженко Л.В., Коротков С.А., Ухов М.В. Лесные ресурсы и динамика лесопользования Сахалинской области // Интенсификация использования и воспроизводства лесов Сибири и Дальнего Востока: Материалы Всерос. науч. конф. / под ред. А.Ю. Алексеенко. Хабаровск: Изд-во ФБУ «ДальНИИЛХ», 2021. С. 78–84.
- [21] Федеральная таможенная служба России. URL: <https://customs.gov.ru/> (дата обращения 20.11.2022).
- [22] Дальневосточное таможенное управление. URL: <https://dvtu.customs.gov.ru/> (дата обращения 20.11.2022).
- [23] Указ Губернатора Сахалинской области от 08.02.2019 № 7 «Об утверждении Лесного плана Сахалинской области на 2019–2028 годы». URL: <https://base.garant.ru/48825788/> (дата обращения 20.11.2022).
- [24] Приказ Минпромторга России от 07.06.2012 № 748 «О включении инвестиционного проекта в перечень приоритетных инвестиционных проектов в области освоения лесов». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/SignatoryAuthority/foiv255> (дата обращения 20.11.2022).
- [25] Письмо Минпромторга России от 10.03.2015 № 13-1006 «Об отказе во внесении изменений в Перечень приоритетных инвестиционных проектов Российской Федерации в области освоения лесов». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/SignatoryAuthority/foiv255> (дата обращения 20.11.2022).
- [26] Письмо Минпромторга России от 01.07.2015 № 20487/13 «Об отказе во внесении изменений в Перечень приоритетных инвестиционных проектов Российской Федерации в области освоения лесов». URL: <http://publication.pravo.gov.ru/SignatoryAuthority/foiv255> (дата обращения 20.11.2022).
- [27] Приказ Минпромторга России от 14.12.2017 № 4407 «Об исключении инвестиционного проекта из перечня приоритетных инвестиционных проектов в области освоения лесов». URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=719918#n7EDcZTikYAQsPHk2> (дата обращения 20.11.2022).

- [28] Постановление Правительства Сахалинской области от 24.12.2019 № 618 «Об утверждении Стратегии социально-экономического развития Сахалинской области на период до 2035 года». URL: <https://docs.cntd.ru/document/561676850> (дата обращения 20.11.2022).
- [29] Приказ Минпромторга России от 27.06.2022 № 2664. Официальный сайт Минпромторга России. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207280032> (дата обращения 20.11.2022).
- [30] Игры с Сахалинским ЛПК // Лесной комплекс, 2019. № 6 (40). С. 150–154.
- [31] План мероприятий «Дорожная карта» по реализации на территории Сахалинской области эксперимента по установлению специального регулирования в целях создания необходимых условий для внедрения технологий, направленных на сокращение выбросов парниковых газов, отработки методов формирования системы верификации, учета выбросов и поглощения парниковых газов. Утвержден Заместителем Председателя Правительства Российской Федерации В. Абрамченко 28 декабря 2020 г. № 12712п-П11. URL: https://economy.gov.ru/material/file/faf1abaae1e3f2be140971c9e934d0ab/dorozhnaya_karta.pdf (дата обращения 20.11.2022).

Сведения об авторах

Саханов Виктор Владимирович — канд. экон. наук, зам. генерального директора по спецпроектам АО Государственный научный центр лесопромышленного комплекса (АО «ГНЦ ЛПК»), sakhanov@rambler.ru

Коротков Сергей Александрович✉ — канд. биол. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ФГБУН «Институт лесоведения РАН» (ИЛАН РАН), skorotkov-71@mail.ru

Фитчин Андрей Александрович — зам. начальника отдела аналитической обработки информации ФГБУ «Рослесинфорг», fitchin.gizelking@yandex.ru

Стоноженко Леонид Валерьевич — канд. с.-х. наук, зав. кафедрой лесосочетных работ, использования лесов и экологии ФАУ ДПО «Всероссийский институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов лесного хозяйства», stonozhenko@mgul.ac.ru

Попова Акмарал Дулатовна — гл. специалист ФБУ «Авиалесоохрана», aigenova@aviales.ru

Поступила в редакцию 05.12.2022.

Одобрено после рецензирования 18.01.2023.

Принята к публикации 28.03.2023.

INDUSTRY CURRENT STATE IN SAKHALIN REGION AND ITS DEVELOPMENT PROSPECTS

V.V. Sakhanov¹, S. A. Korotkov^{2, 3✉}, A.A. Fitchin⁴, L.V. Stonozhenko⁵, A.D. Popova⁶

¹SSC LPC, buil. 3A, 5, Nizhnaya Syromyatnicheskaya st., 105120, Moscow, Russia

²BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

³Institute of Forest Science RAS, 21, Sovetskaya st., village Uspenskoe, Odintsovo district, 143030, Moscow reg., Russia

⁴Roslesinforg, buil. 1, 45, Volgogradskiy av., 109316, Moscow, Russia

⁵VIPKLH, 17, Institutskaya st., 141202, Pushkino, Moscow reg., Russia

⁶Avialesookhrana, 20, Gorky st., 141207, Pushkino, Moscow reg., Russia

skorotkov-71@mail.ru

The article provides an analysis of the dynamics of the Sakhalin Region's timber industry indicators and the main factors influencing the indicators of forest management efficiency are presented. The main systemic problems that hinder the progressive development of the timber industry sector in the Sakhalin Region are revealed, including the low level of development of the estimated logging area, the lack of economical and transportable forest resources, the imperfect structure of production and export of forest products, the difficult financial situation of the industry's enterprises, and the insufficient staffing. The main performance indicators of the region's timber industry complex and the reasons for their constant decline are considered in dynamics. Recommendations on the dynamic development of the timber industry of the Sakhalin region are given.

Keywords: forest management, forest resources, timber industry complex, systemic problems, development prospects

Suggested citation: Sakhanov V.V., Korotkov S.A., Fitchin A.A., Stonozhenko L.V., Popova A.D. *Sovremennoe sostoyanie lesopromyshlennogo kompleksa Sakhalinskoj oblasti i perspektivy ego razvitiya* [Industry current state in Sakhalin region and its development prospects]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 5–17. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-5-17

References

- [1] *Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 26.09.2013 № 1724-r «Ob utverzhdenii Osnov gosudarstvennoy politiki v oblasti ispolzovaniya, okhrany, zashchity i vosproizvodstva lesov v Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda»* [Decree of the Government of the Russian Federation of September 26, 2013 No. 1724-r «On approval of the Fundamentals of State Policy in the field of use, protection, protection and reproduction of forests in the Russian Federation for the period up to 2030»]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_152506/ (accessed 20.11.2022).
- [2] *Rasporyazheniye Pravitel'stva RF ot 11.02.2021 № 312-r «Ob utverzhdenii Strategii razvitiya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda»* [Decree of the Government of the Russian Federation of February 11, 2021 No. 312-r «On Approval of the Strategy for the Development of the Forest Complex of the Russian Federation until 2030»]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_377162/ (accessed 20.11.2022).
- [3] *Postanovleniye Pravitel'stva Sakhalinskoy oblasti ot 28.03.2011 № 99 «O Strategii sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Sakhalinskoy oblasti na period do 2025 goda»* [Decree of the Government of the Sakhalin Region of March 28, 2011 No. 99 «On the Strategy for the Social and Economic Development of the Sakhalin Region for the period up to 2025»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/424087324> (accessed 20.11.2022).
- [4] *Rasporyazheniye Pravitel'stva Sakhalinskoy oblasti ot 28.10.2011 № 759-r «Ob utverzhdenii Strategii razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa Sakhalinskoy oblasti na period do 2020 goda»* [Decree of the Government of the Sakhalin Region of October 28, 2011 No. 759-r «On approval of the Strategy for the development of the timber industry complex of the Sakhalin Region for the period up to 2020»]. Available at: <https://sakhalin-gov.ru/doc/19083> (accessed 20.11.2022).
- [5] *Postanovleniye Pravitel'stva Sakhalinskoy oblasti ot 18.07.2013 goda № 353 «Ob utverzhdenii gosudarstvennoy programmy Sakhalinskoy oblasti «Razvitiye lesnogo kompleksa, okhotnichyego khozyaystva i osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriy Sakhalinskoy oblasti»* [Decree of the Government of the Sakhalin Region of July 18, 2013 No. 353 «On Approval of the State Program of the Sakhalin Region «Development of the Forest Complex, Hunting and Specially Protected Natural Territories of the Sakhalin Region»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/460161186> (accessed 20.11.2022).
- [6] *Agentstvo lesnogo i okhotnichyego khozyaystva Sakhalinskoy oblasti* [Agency for Forestry and Hunting of the Sakhalin region]. Available at: <https://les.sakhalin.gov.ru/> (accessed 20.11.2022).
- [7] *Les Dal'nego Vostoka* [Forests of the Far East]. Ed. A.S. Ageyenko. Moscow: Publishing House «Forest Industry», 1969, 392 p.
- [8] Obydyonnikov V.I., Volkov S.N., Korotkov S.A. *Zonalno-tipologicheskiye osnovy lesnogo khozyaystva* [Zonal-typological foundations of forestry]. Moscow: MSFU, 2015, 220 p.
- [9] Kabanov N.E. *Lesnaya rastitelnost sovetskogo Sakhalina* [Forest vegetation of Soviet Sakhalin]. Vladivostok: Izd-vo Gornotaezhnoy stantsii Akademii nauk SSSR, 1940, 212 p.
- [10] Sabirov R. N. *Ispolzovaniye lesnykh resursov Yuzhnogo Sakhalina v period gubernatorstva Karafuto (1905–1945 gg.)* [The use of forest resources of South Sakhalin during the governorship of Karafuto (1905–1945)]. Pervyye Kravevedcheskiye chteniya: Materialy nauch. konf., posvyashchennyye pamyati izvestnogo uchenogo-istorika, arkhivista, doktora istoricheskikh nauk A. I. Kostanova (Yuzhno-Sakhalinsk, 7–8 dekabrya 2017 g.) [First local history readings: materials of a scientific conference dedicated to the memory of the famous scientist-historian, archivist, doctor of historical sciences A.I. Kostanov (Yuzhno-Sakhalinsk, December 7–8, 2017)]. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalin Regional Printing House, 2018, pp. 143–151.
- [11] Lisitsyn D. *Osvoyeniye pod znakom ognya* [Development under the sign of fire]. Forest Bulletin, 1999, no. 3. Available at: <http://old.forest.ru/rus/bulletin/10/2.html> (accessed 20.11.2022).
- [12] *Lesnoy kompleks Dal'nego Vostoka Rossii: analiticheskiy obzor* [Forest Complex of the Russian Far East: Analytical Review]. Ed. A.S. Sheyngauza. Vladivostok-Khabarovsk: Izd-vo DVO RAN, 2005, 160 p.
- [13] *Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki* [Federal State Statistics Service]. Available at: <https://rosstat.gov.ru/> (accessed 20.11.2022).
- [14] *Territorial'nyy organ Federal'noy sluzhby gosudarstvennoy statistiki po Sakhalinskoy oblasti* [Territorial body of the Federal State Statistics Service for the Sakhalin Region]. Available at: <https://sakhalinstat.gks.ru/> (accessed 20.11.2022).
- [15] *Federal'noe agentstvo lesnogo khozyaystva* [Federal Forestry Agency]. Available at: <https://rosleshoz.gov.ru/> (accessed 20.11.2022).
- [16] *Yedinaya mezhvedomstvennaya informatsionno-statisticheskaya sistema (YeMISS)* [Unified Interdepartmental Information and Statistical System (EMISS)]. Available at: <https://www.fedstat.ru/> (accessed 20.11.2022).
- [17] *Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 24.03.2006 № 158 «O vnesenii izmeneniy v postanovleniya Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 30 noyabrya 2001 g. № 830 i ot 9 dekabrya 1999 g. № 1364 v otnoshenii otdelnykh vidov lesomaterialov neobrabotannykh»* [Decree of the Government of the Russian Federation No. 158 dated March 24, 2006 «On Amendments to Decrees of the Government of the Russian Federation No. 830 dated November 30, 2001 and No. 1364 dated December 9, 1999 regarding certain types of raw timber»]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_59222/ (accessed 20.11.2022).
- [18] *Postanovleniye Pravitel'stva RF ot 23.12.2006 № 795 «Ob utverzhdenii stavok vyvoznnykh tamozhennykh poshlin na tovary, vyvozimyye s territorii Rossiyskoy Federatsii za predely gosudarstv — uchastnikov soglasheniy o Tamozhennom soyuze, i priznanii utrativshimi silu nekotorykh aktov Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii»* [Decree of the Government of the Russian Federation of December 23, 2006 No. 795 «On Approving the Rates of Export Customs Duties on Goods Exported from the Territory of the Russian Federation Outside the States Parties to Customs Union Agreements and Recognizing Some Acts of the Government of the Russian Federation as Invalid»]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64861/ (accessed 20.11.2022).
- [19] *Postanovleniye Pravitel'stva RF ot 05.02.2007 № 75 «O vnesenii izmeneniy v postanovleniya Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 23 dekabrya 2006 g. № 795 v otnoshenii otdelnykh vidov lesomaterialov neobrabotannykh»* [Decree of the Government of the Russian Federation of 05.02.2007 No. 75 «On Amendments to the Decree of the Government of the Russian Federation of December 23, 2006 No. 795 in relation to certain types of raw timber»]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_65981/ (accessed 20.11.2022).
- [20] Stonozhenko L.V., Korotkov S.A., Ukhov M.V. *Lesnyye resursy i dinamika lesopolzovaniya Sakhalinskoy oblasti* [Forest resources and dynamics of forest management in the Sakhalin region]. Intensifikatsiya ispolzovaniya i vosproizvodstva lesov Sibiri i Dalnego Vostoka: materialy Vseros. nauch. konf. [Intensification of the use and reproduction of forests in Siberia and

- the Far East: Materials of Vseros. scientific conf.]. Ed. A.Yu. Alekseyenko. Khabarovsk: Publishing House «DalNIILKH», 2021, pp. 78–84.
- [21] *Federal'naya tamozhennaya sluzhba Rossii* [Federal Customs Service of the Russian Federation]. Available at: <https://customs.gov.ru/> (accessed 20.11.2022).
- [22] *Dal'nevostochnoe tamozhennoe upravlenie* [Far Eastern Customs Administration]. Available at: <https://dvtu.customs.gov.ru/> (accessed 20.11.2022).
- [23] *Ukaz Gubernatora Sakhalinskoy oblasti ot 08.02.2019 № 7 «Ob utverzhdenii Lesnogo plana Sakhalinskoy oblasti na 2019 – 2028 gody»* [Decree of the Governor of the Sakhalin Region dated February 8, 2019 No. 7 «On Approval of the Forest Plan of the Sakhalin Region for 2019-2028»]. Available at: <https://base.garant.ru/48825788/> (accessed 20.11.2022).
- [24] *Prikaz Minpromtorga Rossii ot 07.06.2012 № 748 «O vkluchenii investitsionnogo proekta v perechen' prioritnykh investitsionnykh proektov v oblasti osvoeniya lesov»* [Order of the Ministry of Industry and Trade of Russia dated June 7, 2012 No. 748 «On the inclusion of an investment project in the list of priority investment projects in the field of forest development»]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/SignatoryAuthority/foiv255> (accessed 20.11.2022).
- [25] *Pis'mo Minpromtorga Rossii ot 10.03.2015 № 13-1006 «Ob otkaze vo vnesenii izmeneniy v Perechen' prioritnykh investitsionnykh proektov Rossiyskoy Federatsii v oblasti osvoeniya lesov»* [Letter of the Ministry of Industry and Trade of Russia No. 13-1006 dated March 10, 2015 «On the refusal to amend the List of priority investment projects of the Russian Federation in the field of forest development»]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/SignatoryAuthority/foiv255> (accessed 20.11.2022).
- [26] *Pis'mo Minpromtorga Rossii ot 01.07.2015 № 20487/13 «Ob otkaze vo vnesenii izmeneniy v Perechen' prioritnykh investitsionnykh proektov Rossiyskoy Federatsii v oblasti osvoeniya lesov»* [Letter of the Ministry of Industry and Trade of Russia dated July 1, 2015 No. 20487/13 «On the refusal to amend the List of priority investment projects of the Russian Federation in the field of forest development»]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/SignatoryAuthority/foiv255> (accessed 20.11.2022).
- [27] *Prikaz Minpromtorga Rossii ot 14.12.2017 № 4407 «Ob iskluchenii investitsionnogo proekta iz perechnya prioritnykh investitsionnykh proektov v oblasti osvoeniya lesov»* [Order of the Ministry of Industry and Trade of Russia dated December 14, 2017 No. 4407 «On the exclusion of an investment project from the list of priority investment projects in the field of forest development»]. Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=EXP&n=719918#n7EDcZTikYAQsPHk2> (accessed 20.11.2022).
- [28] *Postanovleniye Pravitel'stva Sakhalinskoy oblasti ot 24.12.2019 № 618 «Ob utverzhdenii Strategii sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Sakhalinskoy oblasti na period do 2035 goda»* [Decree of the Government of the Sakhalin Region dated December 24, 2019 No. 618 «On approval of the Strategy for the socio-economic development of the Sakhalin Region for the period up to 2035»]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/561676850> (accessed 20.11.2022).
- [29] *Prikaz Minpromtorga Rossii ot 27.06.2022 № 2664. Ofitsialnyy sayt Minpromtorga Rossii* [Order of the Ministry of Industry and Trade of Russia dated June 27, 2022 No. 2672. Official website of the Ministry of Industry and Trade of Russia]. Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207280032> (accessed 20.11.2022).
- [30] *Igry s Sakhalinskim LPK* [Games with the Sakhalin TPC]. Forest Complex, 2019, no. 6 (40), pp. 150–154.
- [31] *Plan meropriyatiy «Dorozhnaya karta» po realizatsii na territorii Sakhalinskoy oblasti eksperimenta po ustanovleniyu spetsial'nogo regulirovaniya v tselyakh sozdaniya neobkhodimykh usloviy dlya vnedreniya tekhnologii, napravlennoy na sokrashchenie vybrosov parnikovykh gazov, obrabotki metodov formirovaniya sistemy verifikatsii, ucheta vybrosov i pogloshcheniya parnikovykh gazov. Utverzhen Zamestitelem Predsedatelya Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii V. Abramchenko 28 dekabrya 2020 № 12712p-P11* [Action plan «Roadmap» for the implementation of an experiment on the establishment of special regulation in the Sakhalin Region in order to create the necessary conditions for the introduction of technologies aimed at reducing greenhouse gas emissions, working out methods for creating a verification system, accounting for emissions and removals of greenhouse gases. Approved by Deputy Prime Minister of the Russian Federation V. Abramchenko on December 28, 2020 No. 12712p-P11]. Available at: https://economy.gov.ru/material/file/faf1abae1e3f2be140971c9e934d0ab/dorozhnaya_karta.pdf (accessed 20.11.2022).

Authors' information

Sakhanov Viktor Vladimirovich — Cand. Sci. (Econ.), Deputy General Director for Special Projects of SSC LPC, buil. 3a, 5, Nizhnyaya Syromyatnicheskaya st., 105120, Moscow, Russia, sakhanov@rambler.ru

Korotkov Sergey Aleksandrovich — Cand. Sci. (Biology), BMSTU (Mytishchi ranch), Institute of Forest Science RAS, skorotkov-71@mail.ru

Fitchin Andrey Aleksandrovich — Deputy Head of the Department of analytical Information Processing of Roslesinforg, fitchin.gizelking@yandex.ru

Stonozhenko Leonid Valer'evich — Cand. Sci. (Agricultural), Head of the Department of forest accounting, Forest Use and Ecology, VIPKLH, stonozhenko@mgul.ac.ru

Popova Akmaral Dulatovna — Chief specialist of Avialesookhrana, aigenova@aviales.ru

Received 05.12.2022.

Approved after review 18.01.2023.

Accepted for publication 28.03.2023.

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

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛЕСНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ФОРМИРУЮЩИХСЯ НА СКАЛЬНИКАХ ПОСЛЕ ПОЖАРА

А.В. Грязькин¹✉, О.И. Гаврилова², Тун Чэн¹, Е.А. Семенова¹

¹ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», Россия, 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер, д. 5, литера У

²ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Россия, 185096, г. Петрозаводск, Республика Карелия, пр. Ленина, д. 33

lesovod@bk.ru

Установлено, что в зависимости от лесообразующей породы и условий произрастания, восстановление лесной экосистемы на гари растягивается на длительный период. Выявлено замедленное накопление органического вещества на скальниках, с чем и связано затянутое во времени развитие всех компонентов леса. Показано, что спустя 15 лет после пожара, на месте сгоревшего сосняка сформировались молодняки с преобладанием сосны березы и осины. Охарактеризована структура вновь сформированного фитоценоза, в котором общая численность древесных пород достигает 4,5 тыс. экз./га. Указано на преобладание подроста высотой более 2 м. Зафиксировано наличие в составе подчиненного яруса фитоценоза кустарниковых пород — рябины обыкновенной, ивы козьей, можжевельника обыкновенного, жимолости лесной и ирги круглолистной. Охарактеризован состав живого напочвенного покрова. Указано, что из 21 вида растений, встречаемость более 50 % имеют лишайники, вереск обыкновенный, политрихум можжевельниковый, ожика волосистая, иван-чай и луговик извилистый.

Ключевые слова: гарь, постпирогенные сукцессии, компоненты леса, подрост, подлесок, живой напочвенный покров

Ссылка для цитирования: Грязькин А.В., Гаврилова О.И., Чэн Тун, Семенова Е.А. Структурные особенности лесных фитоценозов формирующихся на скальниках после пожара // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 18–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-18-25

Лесные пожары инициируют существенные изменения в структуре любых фитоценозов [1–7]. В первую очередь воздействию огня подвергается растительность нижних ярусов — живой напочвенный покров, подрост и подлесок. В то же время страдает и корневая система верхнего яруса — древостоя. Лесной пожар приводит к изменению структуры и строения почвы, педомезофауны [8–11]. Известно, что восстановление лесной экосистемы, в зависимости от лесорастительных условий, может продолжаться от нескольких до десятков лет [12–15]. При этом восстановительный процесс может быть поэтапным. Сукцессии протекают с различной интенсивностью. На первом этапе происходит восстановление коренных видов в составе живого напочвенного покрова, когда пионерные виды (синантропные, сорные растения и т. д.) сменяются лесными видами [12, 16–21]. Первый этап смены растительности — самый короткий. Значительно более длинный срок занимает восстановление древесных растений из состава подлесочных пород. Практически одновременно с подлеском появляется и подрост лесообразующих пород [8, 13, 22–24]. Формирование полноценного древостоя на постпирогенных землях, происходит в течение 40...80 лет

в зависимости от лесообразующей породы. В целом формирование лесных экосистем на гаях имеет свои особенности по сравнению с другими категориями земель.

Цель работы

Цель работы — выявление особенностей восстановления лесной экосистемы на гаях после сгоревшего сосняка лишайникового.

Объекты и методика исследований

Объектом исследований послужила гарь 15-летней давности на территории Прионежского лесничества Республики Карелия. Пройденная пожаром лесная экосистема — сосняк лишайниковый на выходах скальных пород с редким подростом сосны под пологом материнского древостоя.

Учет подроста, подлеска и живого напочвенного покрова (ЖНП) проводили на круговых учетных площадках по 10 м². При этом для подроста и подлеска указывали видовой состав, численность, распределение по группам высот и по виталитету. Для ЖНП указывали встречаемость и проективное покрытие по видам. Отдельно учитывали фитомассу растений в составе ЖНП.

Количество растений кукушкиного льна, политрихума можжевельникового и сфагнумов определяли

по следующей методике. Количество растений подсчитывали на 1 дм² в трех повторностях. Полученное среднее значение переводили на 1 м². Для крупных растений численность определяли прямым подсчетом на 1 м². Для таких растений, как лишайники и зеленые мхи учитывали только фитомассу. Для большинства видов подсчет численности которых возможен, была определена и масса 100 растений. Для растений, произрастающих пучками (вейник, луговик, мятлик) учитывали количество пучков и их общую массу. При этом для всех видов растений были установлены встречаемость и проективное покрытие. С учетом этих количественных характеристик устанавливали состав ЖНП. В формулу состава включали не более пяти видов, преобладающих в данном фитоценозе.

Результаты и обсуждение

Спустя 15 лет после пожара на месте сосняка лишайникового начал формироваться лесной фитоценоз характерной структуры. На начальном этапе на гари сформировался ЖНП, включающий в себя травяно-кустарничковый и мохово-лишайниковый ярусы. Несмотря на это, сохранились локальные пятна разного размера со скальными обнажениями. По местам произрастания ЖНП появляется подрост основных лесобразующих пород и подлесок. В составе подраста преобладают сосна и береза (рис. 1).



Рис. 1. Подрост сосны и березы на опытном участке
Fig. 1. Pine and birch undergrowth on the experimental plot

Т а б л и ц а 1

Численность, структура по высоте и встречаемость подраста, экз./га

Number, height structure and occurrence of undergrowth, ind./ha

Русское и латинское название вида	Жизнеспособный			Нежизнеспособный			Сухой			Итого
	кр	ср	мел	кр	ср	мел	кр	ср	мел	
Осина (<i>Populus tremula</i> L.)	74	109	33	29	116	226	25	96	74	782
Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	742	428	307	–	96	75	–	17	742	2407
Ель европейская (<i>Picea abies</i> L.)	–	–	16	–	–	–	–	–	–	16
Береза бородавчатая (<i>Betula verrucosa</i> Ehrh)	444	214	130	–	25	38	–	12	444	1307
Ольха серая (<i>Alnus incana</i> L.)	–	4	8	–	–	–	–	–	–	12
Итого подраста	1560	751	470	29	237	329	25	125	1260	4524

Примечание. Здесь и далее: кр — крупный (более 150 см), ср — средний (51–150 см), мел — мелкий (до 50 см)

Осина, ольха серая и ель встречаются sporadически, преимущественно в микропонижениях, там, где накапливается органическое вещество в виде опада. Общая численность подраста — 4524 экз./га (табл. 1).

Преобладает крупный подрост сосны, березы и осины, размах варьирования по высоте — от 0,2 до 5 м. Доля мелкого подраста составляет около 10 %. Ольха и ель представлены экземплярами высотой от 0,1 до 1,5 м. Для этих пород характерно существенное преобладание мелкого

подраста — более 80 %. При этом структура по возрасту подраста березы и сосны сильно дифференцирована, встречаются особи в возрасте от 3 до 15 лет. По жизненному состоянию все древесные породы представлены преимущественно жизнеспособным подростом. Доля сухого подраста составляет около 25 % и состоит главным образом из погибших особей сосны — 759 экз./га., или более 60 % численности сухого подраста всех лесобразующих пород. Погибших экземпляров ольхи и ели не выявлено. В составе нежизнеспособного

Т а б л и ц а 2

Численность подлеска, структура по высоте и виталитету, экз./га
Number of undergrowth, height and vitality structure, ind./ha

Русское и латинское название вида	Жизнеспособный			Нежизнеспособный			Сухой			Итого
	кр	ср	м	кр	ср	м	кр	ср	м	
Ирга круглолистная (<i>Amelanchier ovalis</i> Medik.)	–	13	4	–	–	–	–	–	–	17
Ива (<i>Salix</i> sp.)	29	33	17	–	–	–	–	8	29	87
Рябина (<i>Sorbus aucuparia</i> L.)	17	101	67	–	4	8	4	25	17	226
Можжевельник (<i>Juniperus communis</i> L.)	–	8	4	–	–	–	–	–	–	12
Жимолость настоящая (<i>Lonicera xylosteum</i> L.)	–	8	–	–	–	–	–	–	–	8
Итого подлеска	46	155	92	–	4	8	4	33	46	350

Т а б л и ц а 3

Проективное покрытие и встречаемость видов в составе живого напочвенного покрова
Projective cover and occurrence of species in the living ground cover

Русское и латинское название вида	Проективное покрытие, %	Встречаемость, %	Коэффициент значимости вида	Место в составе живого напочвенного покрова
Брусника (<i>Vaccinium vitisidaea</i> L.)	15,0	25	375	5
Вейник лесной (<i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth)	2,0	37,5	75	10
Вереск обыкновенный (<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull.)	21,7	87,5	1899	3
Земляника лесная (<i>Fragaria vesca</i> L.)	0,6	12,5	8	–
Золотарник (<i>Solidago virgaurea</i> L.)	1,9	37,5	71	11
Иван-чай (<i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.)	3,2	62,5	200	6
Клевер ползучий (<i>Trifolium repens</i> L.)	0,6	12,5	8	–
Кукушкин лен обыкновенный (<i>Polytrichum commune</i> Hedw.)	0,6	12,5	8	–
Кульбаба скальная (<i>Leontodon saxatilis</i> Lam.)	0,6	12,5	8	–
Линнея северная (<i>Linnaea borealis</i> f. <i>arctica</i> Wittr.)	0,6	12,5	8	–
Лишайники (<i>Lichenes</i> sp. L.)	22,9	87,5	2004	2
Луговик извилистый (<i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer)	4,4	87,5	385	4
Марьянник лесной (<i>Melampyrum sylvaticum</i> L.)	2,5	50	125	9
Мятлик луговой (<i>Poa pratensis</i> L.)	2,6	50	130	8
Ожика волосистая (<i>Luzula pilosa</i> (L.) Willd.)	3,1	62,5	194	7
Осот полевой (<i>Sonchus arvensis</i> L.)	0,6	12,5	8	–
Политрихум можжевельниковый (<i>Polytrichum juniperinum</i> (Hedw.)	31,3	100	3130	1
Ситник тонкий (<i>Juncus tenuis</i> Willd.)	0,6	12,5	8	–
Сфагнум (<i>Sphagnum</i> sp. L.)	0,6	12,5	8	–
Тростник обыкновенный (<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.)	1,3	12,5	16	13
Черника обыкновенная (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.)	1,3	25	33	12

подроста преобладает осина — 371 экз./га, или более 62 % общего количества нежизнеспособного подроста всех лесообразующих пород. Состав подроста по численности особей можно

отобразить следующей формулой — 54С29Б17Ос, ед. Е, Олс.

Таким образом, в ходе полевых исследований установлено, что особенностью структуры

подроста, сформировавшегося на гари, является наличие значительного количества отпада. В то же время для всех пород характерно преобладание жизнеспособного подроста. Для целевой породы постпирогенные условия оказались оптимальными — от общей численности подроста сосны доля растений выше 1,5 м достигает 51 %. В последние годы (2020–2022) величина годового прироста у отдельных особей высотой более 3 м, может превышать 50 см.

По сравнению с подростом, численность подлеска значительно меньше — всего 350 экз./га (табл. 2). В составе подлеска выявлено пять пород, преобладает рябина (226 экз./га) — около 65 %. Остальные виды кустарников представлены единичными экземплярами — от 8 до 87 экз./га. Виталитетная структура характеризуется преобладанием жизнеспособных особей. Суммарная доля сухого и нежизнеспособного подлеска — около 27 %. Преобладает подлесок высотой от 0,51 до 1,5 м. Как и подрост, основная часть подлеска приурочена к микропонижениям, на которых произрастают все компоненты фитоценоза. Состав подлеска: рябина — 65 %, ива — 25, ирга — 5, можжевельник — 3, жимолость — 2 %.

Такой важный компонент леса, как ЖНП, представлен большим количеством видов — более 21 (лишайники и сфагновые мхи в ходе полевых работ по видам не выделялись). Доминируют политрихум можжевельниковый, лишайники, вереск и брусника. Как видно из табл. 3, указанные виды по величине проективного покрытия занимают: политрихум можжевельниковый — 32 %, лишайники — 23, вереск — 22, брусника — 15 %. На долю остальных 17 видов приходится лишь 8 %. Одной из особенностей структуры травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов состоит в доминировании лишь небольшого количества видов в их составе (рис. 2).

Другая особенность нижнего яруса фитоценоза на гари — преобладание в его составе ксерофитных и олиготрофных видов. Установлено также, что в составе ЖНП преобладают гелиофильные растения.

Встречаемость более 50 % имеют шесть видов — лишайники, вереск, политрихум можжевельниковый, ожика волосистая, иван-чай и луговик извилистый. Установлено, что максимальные значения встречаемости и проективного покрытия у преобладающих видов растений не совпадают. По этой причине, с нашей точки зрения, для характеристики удельного веса каждого вида растения целесообразно указывать коэффициент значимости вида, т. е. «вес» каждого вида, который учитывает оба показателя. Значение коэффициента значимости вида определяется как произведение встречаемости и проективного покрытия.



Рис. 2. Определение видового состава и проективного покрытия травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов на гари 15-летней давности

Fig. 2. Determination of the species composition and projective cover of the grass-shrub and moss-lichen layers in the burnt area 15 years ago



Рис. 3. Полное отсутствие растительности на оголенных участках каменных плит, спустя 15 лет после пожара

Fig. 3. The complete absence of vegetation on the bare areas of stone slabs, 15 years after the fire

С учетом величины установленного коэффициента ряд доминирования растений в составе ЖНП по степени убывания будет выглядеть следующим образом: политрихум можжевельниковый, лишайники, вереск, луговик извилистый, брусника, иван-чай и т. д.

Состав ЖНП по величине проективного покрытия следующий: политрихум можжевельный — 32 %, лишайники — 23, вереск — 22, брусника — 15, прочие — 8 %. Если эту формулу составить по значению коэффициента значимости вида, она несколько преобразуется по последовательности видов: политрихум можжевельный, лишайники, вереск, луговик, брусника. Из этого следует, что при изучении структуры ЖНП необходимо фиксировать не только величину встречаемости, но и проективное покрытие вида.

В ходе полевых работ было зафиксировано наличие скальных выходов. На этих обнажениях скальных пород, как правило, отсутствуют все компоненты лесного фитоценоза (рис. 3). Доля оголенных каменных плит на опытном объекте составила около 14 %. Установлено, что подобные участки формируются чаще на склонах разной крутизны и на крупных монолитах, с которых дождями и снегом в постоянном режиме смываются не только опавшие семена, но и органическое вещество.

Через 15 лет после пожара на гаях отмечается лишь начальный этап формирования почвы. Характерная особенность почвообразовательного процесса — приуроченность к выположенным локальным участкам и микропонижениям. Определенное количество органического вещества накапливается и в трещинах скальных пород по обнажениям. В таких трещинах в первую очередь накапливается органическое вещество, появляются мхи, а впоследствии — самосев древесных пород. Травяно-кустарничковая растительность в таких условиях отсутствует.

Выводы

Установлено, что спустя 15 лет после лесного пожара, на месте сгоревшего сосняка начинается формирование лесной экосистемы. Особенностью формирования полноценного лесного фитоценоза на гари является медленное накопление органического вещества. С этим связано и затянутое во времени развитие всех компонентов леса. В данных условиях на опытном участке в составе молодняков преобладают сосна и береза. Осина, ель, ольха серая представлены единичными особями. Общая численность подростов лесообразующих пород составляет более 4,5 тыс./га. Доля растений высотой более 3 м значительна — свыше 30 %. Особенностью структуры формирующегося фитоценоза является преобладание жизнеспособного подростка — более 61 % и наличие большого количества отпада в основном компоненте леса — около 28 %.

Подлесок представлен пятью видами — рябиной, ивой, можжевельником, жимолостью и иргой. Общая численность подлесочных пород —

350 экз./га. Особенностью виталитетной структуры подлеска является преобладание жизнеспособных растений высотой от 0,51 до 1,5 м. Это относится в первую очередь к рябине обыкновенной. В целом в составе подлеска доля отпада не велика — около 13 %.

Живой напочвенный покров формируется из 21 вида сосудистых растений, мхов и лишайников. По проективному покрытию преобладают лишайники, вереск, брусника и политрихум можжевельный. Особенность структуры травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов — доминирование небольшого количества видов и преобладание ксерофитных, олиготрофных и гелиофильных видов.


На опытном участке было выявлено значительное количество выходов скальных пород (около 14 %), на которых отсутствуют все компоненты лесного фитоценоза. Подобные локации формируются, как правило, на микросклонах различной крутизны и на крупных монолитах, с которых осадками смываются не только опавшие семена, но и органическое вещество.

Список литературы

- [1] Буряк Л.В., Лузганов А.Г., Каленская О.П. Влияние низовых пожаров на формирование светлохвойных насаждений юга Средней Сибири. Красноярск: Изд-во СибГТУ, 2003. 195 с.
- [2] Клочихин А.Н. Потенциал предварительного возобновления в сосняках и вероятные типы формирования насаждений // Экологические проблемы Севера. Архангельск: [б. и.], 2001. С. 51–58.
- [3] Колесников Б.П., Санникова Н.С., Санников С.Н. Влияние низового пожара на структуру древостоя и возобновление древесных пород в сосняках черничнике и бруснично-черничном // Горение и пожары в лесу. Красноярск: Изд-во Ин-та леса и древесины СО АН СССР, 1973. С. 301–321.
- [4] Мелехов И.С. Влияние пожаров на лес. М.; Л.: Изд-во и фототиполитограф. Гос. лесотехн. изд-ва, 1948. 126 с.
- [5] McCarthy N., Bentsen N.S., Willoughby I., Balandier P. The state of forest vegetation management in Europe in the 21st century // Eur J. Forest Res., 2011, v. 130, pp. 7–16. DOI:10.1007/s10342-010-0429-5
- [6] Nilsson U., Allen H.L. Short- and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine // Forest Ecology and Management, 2003, no. 1, pp. 367–377.
- [7] Phan Thi My Lan, Nguen Xuan Cuong. Study on sam factors influencing the rate of initiation, proliferation and maturation of embryogenic tissues in *Pinus merkusii* Jung at de Vrise in vitro // Tap chi khoa hoc Lam Nghiep, 2014, sq 4, tr. 3491–3498.
- [8] Грязькин А.В., Беляева Н.В., Кази И.А., Ефимов А.В., Сырников И.А. Особенности роста подростка сосны под пологом древостоев на сухих бедных почвах // Research Science (Banská Bystrica), 2019, № 8. С. 3–6.
- [9] Лежнев Д.В., Глазунов Ю.Б., Коротков С.А., Андреев Г.А. Динамика сосняков сложных в условиях ближнего Подмоскovie // Организмы, популяции и сообщества в трансформирующейся среде: Матер. XVII Междунар. науч. экол. конф., Белгород, 22–24 ноября 2022 г. / под

- ред. Ю.А. Присного. Белгород: Изд-во Белгородского гос. нац. исследовательского ун-та, 2022. С. 102–105.
- [10] Hille M.G., den Ouden, J. Fuel load, humus consumption and humus moisture dynamics in Central European Scots pine stands // *International J. of Wildland Fire*, 2005, v. 14, no. 2, pp. 153–159.
- [11] Kasischke E.S., Christensen N.L., Stocks B.J. Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests // *Ecological Applications*, 1995, no. 5(2), pp. 437–451.
- [12] Коновалова И.С., Коновалов Д.Ю. Эколого-ценотическая активность видов среднетаежной флоры // *ИзВУЗ Лесной журнал*, 2022. № 6. С. 94–106.
- [13] Санников С.Н. Экология и география естественного возобновления сосны обыкновенной / под ред. С.А. Мамаева. М.: Наука, 1992. 263 с.
- [14] Санников С.Н. Лесные пожары как эволюционно-экологический фактор возобновления популяций сосны в Зауралье // *Горение и пожары в лесу*. Красноярск: Изд-во Ин-та леса и древесины СО АН СССР, 1973. С. 236–277.
- [15] Санникова Н.С. Экологическая роль пожаров в сосновых лесах // *Роль экологических факторов в лесообразовательном процессе на Урале*. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1981. С. 49–54.
- [16] Буряк Л.В., Каленская О.П. Влияние пожаров на формирование насаждений Нижнего Приангарья. Пушкино: Изд-во ВНИИЛМ, 2020. 140 с.
- [17] Гаврилова О.И., Колганов Е.С., Пак К.А. Оценка успешности самовозобновления сосны на гари // *Лесотехнический журнал*, 2020. Т. 10. № 4 (40). С. 142–149.
- [18] Санникова Н.С., Санников С.Н., Кочубей А.А., Петрова И.В. Естественное возобновление сосны на гаях в лесостепи Западной Сибири // *Сибирский лесной журнал*, 2019. № 5. С. 22–29. DOI: 10.15372/SJFS20190503
- [19] Санникова Н.С., Санников С.Н., Кочубей А.А., Петрова И.В. Естественное возобновление сосны на гаях в лесостепи Западной Сибири // *Сибирский лесной журнал*, 2019. № 5. С. 22–29
- [20] Kukavskaya E.A., Soja A.J., Petkov A.P., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Conard S.G. Fire emissions estimates in Siberia: Evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption // *Canadian J. of Forest Research*, 2013, v. 43, no. 5, pp. 493–506. DOI: 10.1139/cjfr-2012-0367
- [21] Weber M.G., Flannigan M.D. Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate impact on fire regimes // *Environmental Review*, 1997, no. 5, pp. 145–166.
- [22] Hannerz M.I.B., Almqvist C., Hörnfeldt R. Timing of seed dispersal in *Pinus sylvestris* stands in central Sweden // *Silva Fennica*, 2002, v. 36 (4), pp. 757–765.
- [23] Le Canh Nam, Liru The Trung, Bui The Hoang, Luon Van Dung, va Pham Xuan Nguen. The forest structure and ecological characteristics of *Pinus dalatensis* de Ferre in Bidoup Nui Ba national Park, Lam Dong province // *Tap chi khoa hoc Lam Nghiep*, 2016, sq 2, tr. 4315–4325.
- [24] Маслаков Е.Л. Формирование сосновых молодняков. М.: Лесная пром-сть, 1984. 168 с.

Сведения об авторах

Грязькин Анатолий Васильевич  — д-р биол. наук, профессор кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», lesovod@bk.ru

Гаврилова Ольга Ивановна — д-р с.-х. наук, профессор кафедры технологии и организации лесного комплекса ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», ogavril@mail.ru

Чэн Тун — аспирант кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», tongc9199@gmail.com

Семенова Екатерина Игоревна — аспирант кафедры лесоводства ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова», ekaterinasemyonova@bk.ru

Поступила в редакцию 26.12.2022.

Одобрено после рецензирования 21.03.2023.

Принята к публикации 28.03.2023.

STRUCTURAL FEATURES OF FOREST PHYTOCOENOSIS FORMED ON ROCK PLANTS AFTER A FIRE

A.V. Gryazkin^{1✉}, O.I. Gavrilova², Tong Cheng¹, E.И. Semenova¹

¹Saint-Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, 5, letter U, Institut'sky lane, 194021, St. Petersburg,

²Petrozavodsk State University, 33, Lenin av., Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

lesovod@bk.ru

It has been established that, depending on the forest-forming species and growing conditions, the restoration of the forest ecosystem in the burnt area is extended for a long period. A feature of the formation of a full-fledged forest phytocoenosis after the forest fire is the delayed accumulation of organic matter. This is also connected with the time-delayed development of all components of the forest. Under these conditions, 15 years after the fire, young trees with a predominance of pine and birch were formed on the site of the burnt pine forest. The undergrowth of aspen, spruce and gray alder is represented by single individuals. The total amount of undergrowth of natural origin reaches 4.5 thousand trees /ha. The undergrowth with a height of more than 2 m prevails. The undergrowth includes five types of shrub species such as mountain ash, willow, juniper, honeysuckle and juneberry. The total number of understory species is 350 trees/ha. More than 21 plant species have been identified as part of the living ground cover. The occurrence of lichens, heather, polytrichum juniperus, hairy oja, willow-tea and meandering meadow grass is more than 50 %. Lichens, heather, lingonberry and polytrichum juniperus predominate in the protective coating. The composition of the herbage is polytrichum juniperus — 32 %, lichens — 23 %, heather — 22 %, lingonberries — 15 %, others — 8 %. The purpose of the research is to identify the features of the forest ecosystem regeneration after the forest fire after the burnt lichen pine. The object of research was a 15-year-old young forest after the forest fire in the territory of the Prionezhsky forestry of the Republic of Karelia.

Keywords: burned area, post-pyrogenic successions, forest components, young generation of trees, undergrowth, living ground cover

Suggested citation: Gryaz'kin A.V., Gavrilova O.I., Cheng Tong, Semenova E.A. *Strukturnye osobennosti lesnykh fitosenozov formiruyushchikhsya na skal'nikakh posle pozhara* [Structural features of forest phytocoenosis formed on rock plants after a fire]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 18–25.


DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-18-25

References

- [1] Buryak L.V., Luzganov A.G., Kalenskaya O.P. *Vliyanie nizovykh pozharov na formirovanie svetlokhvoynnykh nasazhdeniy yuga Sredney Sibiri* [Influence of ground fires on the formation of light coniferous plantations in the south of Central Siberia]. Krasnoyarsk: SibGTU, 2003, 195 p.
- [2] Klochikhin A.N. *Potentsial predvaritel'nogo vozobnovleniya v sosnyakakh i veroyatnye tipy formirovaniya nasazhdeniy* [Potential of preliminary regeneration in pine forests and probable types of plantation formation]. *Ekologicheskie problemy Severa* [Ecological problems of the North]. Arkhangelsk, 2001, pp. 51–58.
- [3] Kolesnikov B.P., Sannikova N.S., Sannikov S.N. *Vliyanie nizovogo pozhara na strukturu drevostoya i vozobnovlenie drevesnykh porod v sosnyakakh chernichnike i brusnichno-chernichnom* [The influence of ground fire on the structure of the forest stand and the renewal of tree species in blueberry and lingonberry-bilberry pine forests]. *Gorenie i pozhary v lesu* [Burning and fires in the forest]. Krasnoyarsk: Institute of Forest and Wood SO AN SSSR, 1973, pp. 301–321.
- [4] Melekhov I.S. *Vliyanie pozharov na les* [The impact of fires on the forest]. Moscow-Leningrad: Publishing house and photo-type printing press State Forest Engineering publishing house, 1948, 126 p.
- [5] McCarthy N., Bentsen N.S., Willoughby I., Balandier P. The state of forest vegetation management in Europe in the 21st century. *Eur J. Forest Res.*, 2011, v. 130, pp. 7–16. DOI:10.1007/s10342-010-0429-5
- [6] Nilsson U., Allen H.L. Short- and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 2003, no. 1, pp. 367–377.
- [7] Phan Thi My Lan, Nguen Xuan Cuong. Study on sam factors influencing the rate of initiation, proliferation and maturation of embryogenic tissues in *Pinus merkusii* Jung at de Vrise in vitro. *Tap chi khoa hoc Lam Nghiep*, 2014, sq 4, tr. 3491–3498.
- [8] Gryaz'kin A.V., Belyaeva N.V., Kazi I.A., Efimov A.V., Symikov I.A. *Osobennosti rosta podrosta sosny pod pologom drevostoev na sukhikh bednykh pochvakh* [Features of the growth of pine undergrowth under the canopy of forest stands on dry poor soils]. *Research Science (Banská Bystrica)* [Research Science (Banská Bystrica)], 2019, no. 8, pp. 3–6.
- [9] Lezhnev D.V., Glazunov Yu.B., Korotkov S.A., Andreev G.A. *Dinamika sosnyakov slozhnykh v usloviyakh blizhnego Podmoskov'ya* [Dynamics of complex pine forests in the conditions of the near Moscow region]. *Organizmy, populyatsii i soobshchestva v transformiruyushcheysya srede: mater. XVII Mezhdunarodnoy nauchnoy ekologicheskoy konferentsii, Belgorod, 22–24 noyabrya 2022 g.* [Organisms, populations and communities in a transforming environment: mater. XVII International Scientific Ecological Conference, Belgorod, November 22–24, 2022]. Ed. Yu.A. Prisny. Belgorod: Belgorod State National Research University, 2022, pp. 102–105.
- [10] Hille M.G., den Ouden, J. Fuel load, humus consumption and humus moisture dynamics in Central European Scots pine stands. *International J. of Wildland Fire*, 2005, v. 14, no. 2, pp. 153–159.
- [11] Kasishche E.S., Christensen N.L., Stocks B.J. Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests. *Ecological Applications*, 1995, no. 5(2), pp. 437–451.
- [12] Konovalova I.S., Konovalov D.Yu. *Ekologo-tsenoticheskaya aktivnost' vidov srednetaezhnoy flory* [Ecological and cenotic activity of species of the middle taiga flora]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2022, no. 6, pp. 94–106.

- [13] Sannikov S.N. *Ekologiya i geografiya estestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovnoy* [Ecology and geography of natural renewal of Scotch pine]. Ed. S.A. Mamaev. Moscow: Nauka, 1992, 263 p.
- [14] Sannikov S.N. *Lesnye pozhary kak evolyutsionno-ekologicheskii faktor vozobnovleniya populyatsiy sosny v Zaural'e* [Forest fires as an evolutionary-ecological factor in the renewal of pine populations in the Trans-Urals]. Gorenje i pozhary v lesu [Burning and fires in the forest]. Krasnoyarsk: Institute of Forest and Wood SO AN SSSR, 1973, pp. 236–277.
- [15] Sannikova N.S. *Ekologicheskaya rol' pozharov v sosnovykh lesakh* [Ecological role of fires in pine forests]. Rol' ekologicheskikh faktorov v lesoobrazovatel'nom protsesse na Urale [The role of environmental factors in the forest formation process in the Urals]. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1981, pp. 49–54.
- [16] Buryak L.V., Kalenskaya O.P. *Vliyaniye pozharov na formirovaniye nasazhdeniy Nizhnego Priangar'ya* [Influence of fires on the formation of plantations in the Lower Angara region]. Pushkino: VNIILM, 2020, 140 p.
- [17] Gavrilova O.I., Kolganov E.S., Pak K.A. *Otsenka uspekhnosti samovozobnovleniya sosny na gari* [Evaluation of the success of self-renewal of pine trees in the burnt areas]. Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering Journal], 2020, v. 10, no. 4 (40), pp. 142–149.
- [18] Sannikova N.S., Sannikov S.N., Kochubey A.A., Petrova I.V. *Estestvennoye vozobnovlenie sosny na garyakh v lesostepi Zapadnoy Sibiri* [Natural regeneration of pine on burned areas in the forest-steppe of Western Siberia]. Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forest Journal], 2019, no. 5, pp. 22–29. DOI: 10.15372/SJFS20190503
- [19] Sannikova N.S., Sannikov S.N., Kochubey A.A., Petrova I.V. *Estestvennoye vozobnovlenie sosny na garyakh v lesostepi Zapadnoy Sibiri* [Natural regeneration of pine on burned areas in the forest-steppe of Western Siberia]. Sibirskiy lesnoy zhurnal [Siberian Forest Journal], 2019, no. 5, pp. 22–29
- [20] Kukavskaya E.A., Soja A.J., Petkov A.P., Ponomarev E.I., Ivanova G.A., Conard S.G. Fire emissions estimates in Siberia: Evaluation of uncertainties in area burned, land cover, and fuel consumption. *Canadian J. of Forest Research*, 2013, v. 43, no. 5, pp. 493–506. DOI: 10.1139/cjfr-2012-0367
- [21] Weber M.G., Flannigan M.D. Canadian boreal forest ecosystem structure and function in a changing climate impact on fire regimes. *Environmental Review*, 1997, no. 5, pp. 145–166.
- [22] Hannerz M.I.V., Almqvist C., Hörnfeldt R. Timing of seed dispersal in *Pinus sylvestris* stands in central Sweden. *Silva Fennica*, 2002, v. 36 (4), pp. 757–765.
- [23] Le Canh Nam, Liru The Trung, Bui The Hoang, Luon Van Dung, va Pham Xuan Nguen. The forest structure and ecological characteristics of *Pinus dalatensis* de Ferre in Bidoup Nui Ba national Park, Lam Dong province. *Tap chi khoa hoc Lam Nghiep*, 2016, sq. 2, tr. 4315–4325.
- [24] Maslakov E.L. *Formirovaniye sosnovykh molodnyakov* [Formation of young pine forests]. Moscow: Lesnaya prom-st [Forestry], 1984, 168 p.

Authors' information

Gryaz'kin Anatoliy Vasil'evich  — Dr. Sci. (Biology), Professor, Saint-Petersburg State Forest Technical University, lesovod@bk.ru

Gavrilova Ol'ga Ivanovna — Dr. Sci. (Agriculture), Professor of the Department of Technology and Organization of the Forestry Complex of PetrSU, ogavril@mail.ru.

Cheng Tong — pg. of the Department of Forestry, St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, tongc9199@gmail.com

Semenova Ekaterina Igorevna — pg. of the Department of Forestry, St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, ekaterinasemyonova@bk.ru

Received 26.12.2022.

Approved after review 21.03.2023.

Accepted for publication 28.03.2023.

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

ВОЗОБНОВЛЕНИЕ СОСНЫ ПИЦУНДСКОЙ (*PINUS BRUTIA* VAR. *PITYUSA* (STEVEN) SILBA) НА ЗАПОВЕДНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ ГОРНОГО КРЫМА

В.П. Коба¹✉, А.Н. Салтыков², Н.А. Макаров¹, О.О. Коренькова¹

¹ФГБУН «Ордена Трудового Красного знамени Никитский ботанический сад — Национальный научный центр РАН», Россия, 298648, Республика Крым, г. Ялта, пгт. Никита, Никитский с-к, д. 52

²ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», Институт «Агротехнологическая академия», Россия, 295007, Республика Крым, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4

kobavp@mail.ru

Установлено, что подрост сосны пицундской (*Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba) на территории горельников распределяется неравномерно, его плотность изменяется в пределах 2,9...8,2 тыс. шт./га., максимальная достигает 15 тыс. шт./га. Выделены ландшафтно-ценоотические зоны динамики процессов возобновления коренных древостоев *P. pityusa*. Выявлено увеличение численности подроста вблизи групп и одиночных растений, которые не были ликвидированы при проведении санитарных рубок на горельниках. Возможность роста и развития подроста на данных участках определялась влиянием фитогенного поля уцелевших деревьев, обеспечивающих защиту молодых растений *P. pityusa* от действия негативных факторов внешней среды. Определено, что относительно равномерное снижение плотности подроста наблюдается при движении от стены материнского древостоя на расстояние, кратное 2–3 величинам его средней высоты. Представлено влияние временного разрыва в хронологии прохождения лесных пожаров на возрастную и пространственную структуру подроста *P. pityusa*. Общая оценка специфики возрастной структуры позволила установить, что активизация естественного возобновления и формирование ценопопуляций подроста *P. pityusa* происходят в течение 2–3 лет после пожара. Установлено, что антропогенное вмешательство в природные процессы возобновления коренных сообществ снижает возможности реализации биоценоотических процессов поддержания целостности и восстановления лесного сообщества видами, способными к устойчивому существованию в сложившихся условиях. Показано сокращение биоценоотического пространства доминирования *P. pityusa* определяющего формирование насаждений порослевого происхождения с преобладанием дуба пушистого (*Quercus pubescens* Willd.) *n*-генерации, что в значительной степени снижает продуктивность, устойчивость и биологическое разнообразие лесных сообществ ландшафтного заказника «Мыс Айя».

Ключевые слова: *Pinus pityusa*, древостои, возобновление, подрост, численность, горельники

Ссылка для цитирования: Коба В.П., Салтыков А.Н., Макаров Н.А., Коренькова О.О. Возобновление сосны пицундской (*Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba) на заповедных территориях Горного Крыма // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 26–35. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-26-35

Основное назначение государственных заповедников состоит в сохранении биологического разнообразия, поддержании в естественном состоянии и целостности природных комплексов и объектов охраняемых территорий. Во многих развитых странах показатель соотношения заповедных территорий к площади того или иного региона является одной из главных характеристик экологической оптимизации взаимодействия в системе человек — природа. В Европейских странах данный показатель в среднем составляет 18 %, в США — 12 %, в странах Африки и Азии не более 4 % [1–4].

На Западе при формировании природоохранных объектов часто используют систему и принципы организации национальных парков, которые наряду с задачами сохранения природ-

ных комплексов призваны обеспечить широкую просветительскую деятельность, развитие базовых представлений в социуме в области экологии, специфике природных явлений и антропогенно обусловленных процессов изменения окружающей среды. При этом в условиях рыночной экономики с приоритетом решения коммерческих вопросов уровень заповедного режима часто не в полной мере обеспечивает сохранность природных комплексов и объектов. Определенные проблемы также сопутствуют проведению системных наблюдений и научных исследований в решении задач поддержания биологического разнообразия на охраняемых территориях [5–9].

В Крыму находится один из самых известных в России заповедников, который был создан в 1923 г. и имел первоначальное название «Крымский заповедник». Впоследствии сеть заповедников на территории Крымского полуострова

значительно увеличилась. В настоящее время оно достигло семи, общая занимаемая ими площадь — 1415 км² [10]. Различный статус заповедных территорий определяет специфику их охраны, возможности финансового обеспечения мероприятий по поддержанию природных комплексов в их изначальном ненарушенном состоянии, предупреждению негативных явлений, связанных с деятельностью человека [11].

В Горном Крыму сосна пицундская (*Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba) естественно произрастает в двух достаточно удаленных один от другого районах — в западной части на мысе Айя и в восточной — г. Караул-Оба и урочище Новый Свет. В 1982 г. был создан ландшафтный заказник «Мыс Айя» на площади 1132 га. В его состав вошли все естественные древостои *P. pityusa* мыса Айя. Искусственные насаждения данного вида имеются и в других заповедных территориях Крымского полуострова. В настоящее время одним из актуальных вопросов сохранения *P. pityusa* в Крыму является изучение процессов семенного возобновления, особенностей роста этого вида на разных стадиях онтогенеза.

Цель работы

Цель работы — изучение особенностей возобновления коренных древостоев и искусственных насаждений *P. pityusa* в условиях заповедных территорий Горного Крыма, анализ состояния и динамики роста вида на первых этапах формирования древостоя.

Объект и методы исследований

Исследования процессов естественного возобновления *P. pityusa* были выполнены в период 2007–2022 гг. На первом этапе для изучения особенностей дифференциации семенного возобновления в связи с динамикой условий произрастания в урочище Аязьма в Балаклаве были заложены пробные площади под пологом коренных древостоев и за его пределами на пустоши горельников. При формировании сети опытных объектов и проведении полевых исследований использовали методические положения и подходы полевой геоботаники, фитоценологии и лесоведения П. Грейг-Смита [12], Ю.А. Злобина [13], С.С. Пятницкого [14], С.Н. Санникова [15] и И.Б. Кучерова [16]. Сеть учетных площадок размером 1×1 (м²) в количестве 248 шт. была размещена с использованием системы трансектов. Под пологом материнских насаждений, пройденных низовыми пожарами, заложено 50 и 198 площадок размещено на открытых пространствах горельников. На втором этапе проведения исследований система пробных площадей была расширена. С учетом изменения плотности цено-

популяций и субценопопуляционных фрагментов подроста *P. brutia* var. *pityusa* размер пробных площадей был увеличен до 10×10 м². На учетных площадках и пробных площадях измеряли биометрические показатели подроста: высоту (см), прирост верхушечной оси за последний год (см), диаметр шейки корня (см), возраст растений (лет), размер кроны (см). Впоследствии наблюдения были продолжены в целях оценки динамики пространственно-возрастной структуры подроста и молодняков *P. pityusa*. Для каждого растения на пробной площади были выполнены аналогичные измерения, за исключением того, что диаметр стволов подроста определялся на уровне 1,3 м от земной поверхности, поскольку высота растений увеличилась. При этом дополнительно были заложены пробные площади в государственном Карадагском природном заповеднике.

Результаты и обсуждение

Маршрутные обследования ландшафтного заказника «Мыс Айя» показали, что на его территории преобладают спелые и перестойные чистые по составу насаждения *P. pityusa*. Незначительную площадь занимают древостои с небольшим участием можжевельника высокого (*Juniperus excelsa* M. Bieb.) и дуба пушистого (*Quercus pubescens* Willd.) Большую часть насаждений составляют древостои IV–V класса бонитета, запас древесины в возрасте спелости изменяется в пределах 100–150 м³/га, при средней полноте насаждений 0,5–0,6. Жизнеспособный подрост *P. pityusa* приурочен преимущественно к насаждениям, пройденным лесными пожарами. За пределами пирогенного ряда естественное возобновление имеет фрагментарный характер.

Лесные пожары в сосняках Южного берега Крыма наблюдаются с определенной периодичностью [17–22]. Динамика реализации пирогенных явлений в различных районах Горного Крыма характеризуется хронологической синхронностью, о чем свидетельствуют материалы Книги учета лесных пожаров на территории Севастопольского лесничества, Ялтинского горно-лесного заповедника и национального парка «Крымский» (рис. 1). Наиболее вероятно, это связано с изменением режима увлажненности.

Пожары 1996 и 2001 гг. причинили наибольший ущерб лесным насаждениям Горного Крыма. Так, например, в 1996 г. на территории Севастопольского лесничества площадь, пройденная огнем, составила 128 га, в том числе в Чернореченском участковом лесничестве — 60,1 га, из которых 40 га было охвачено верховыми пожарами. В 2000 г. площадь поврежденных огнем древостоев на территории Севастопольского лесничества составила 67 га, в 2001 г. — 60 га.

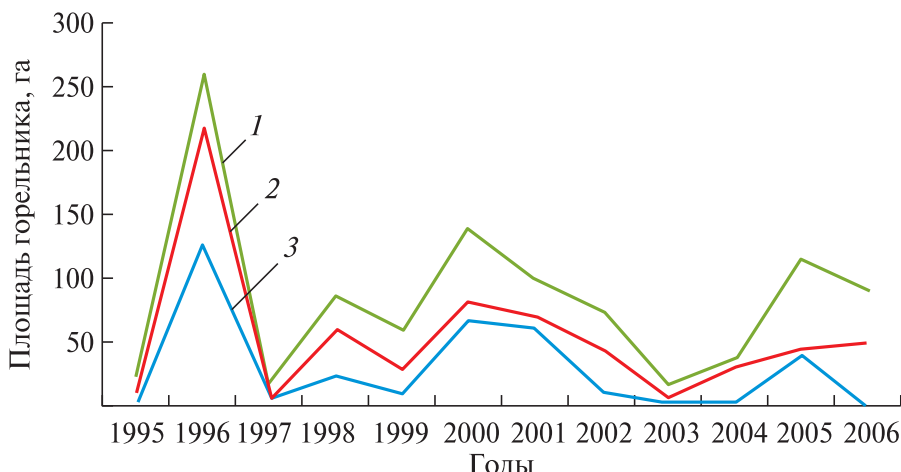


Рис. 1. Площади горельников Севастопольского лесничества, Ялтинского горно-лесного заповедника и Национального парка «Крымский»: 1 — Севастопольское лесничество; 2 — Ялтинский горно-лесной заповедник; 3 — Национальный парк «Крымский»

Fig. 1. The burnt areas of Sevastopol Forestry, Yalta Mountain Forest Reserve and «Krymsky» National Park: 1 — Sevastopol Forestry; 2 — Yalta Mountain Forest Reserve; 3 — «Krymsky» National Park

Т а б л и ц а 1

Биометрическая оценка подроста *P. pityusa* на горельниках ландшафтного заказника «Мыс Айя», по данным наблюдений 2007–2008 гг.

Biometric assessment of *P. pityusa* undergrowth in the burnt area of the landscape reserve «Cape Aya», based on observations in 2007–2008

Объект/год наблюдений	Высота, см	Диаметр ствола, см	Количество шт./га
Горельник 2001 г.			
1/2007	132,2 ± 9,69	1,0 ± 0,12	2900
2/2007	89,9 ± 7,87	0,9 ± 0,08	8180
1/2008	139,9 ± 3,66	0,9 ± 0,05	14700
2/2008	135,7 ± 2,73	0,6 ± 0,02	14100
6/2008	125,6 ± 4,09	0,71 ± 0,07	10400
Горельник 1996 г.			
3/2008	28,5 ± 16,92	2,9 ± 0,29	5400
4/2008	191,3 ± 6,30	1,0 ± 0,06	6900
5/2008	208,6 ± 5,98	1,4 ± 0,08	10800
7/2008	183,7 ± 10,29	0,8 ± 0,12	1600
8/2008	192,3 ± 26,90	2,2 ± 0,58	600

На территории Чернореченского участкового лесничества в 2001 г. площадь лесных пожаров составила 53 га, верховым пожаром было уничтожено 31,4 га древостоев *P. pityusa*. Наиболее пирогенно неблагонадежной является прибрежная часть лесничества, где расположен ландшафтный заказник «Мыс Айя». На данной территории низовые пожары в насаждениях *P. pityusa* часто переходят в верховые, причиняя значительный ущерб.

Временной разрыв в хронологии прохождения лесных пожаров оказывает влияние на возрастную и пространственную структуру подроста *P. pityusa*. Исследования, проведенные в ландшафтном заказнике 2007–2008 гг. на территории пожаров 1996 и 2001 гг., показали, что подрост *P. pityusa* на горельниках встречается повсеместно, однако его размещение по площади крайне неравномерно. Количество подроста изменяется от 2,9 до 8,2 тыс. шт./га., максимальная плотность достигает 15 тыс. шт./га (табл. 1).

Численность растений по отдельным учетным площадкам значительно варьирует: она может вдвое превышать средний показатель, при этом доля площадок в границах системно расположенных трансект, где подрост *P. pityusa* отсутствовал, изменяется от 44 до 73 %. Относительно равномерное снижение плотности подроста наблюдается при движении от стены материнского древостоя на расстояние, кратное 2–3 величинам его средней высоты. Вблизи стены древостоя на удалении 15–16 м количество подроста составило 14,1...14,7 тыс. шт./га (на объектах исследования 3 и 4 в 2008 г.). С увеличением расстояния от стены материнского древостоя до 30...35 м плотность подроста снижается до 3...10 тыс. шт./га (в 2007 г. на объекте исследования 1 и в 2008 г. на объекте исследования 6). Данная специфика возобновления сосны на горельниках нами была описана для насаждений *Pinus pallasiana* D. Don южного макросклона Главной гряды Крымских гор [23].

Формирование отдельных локалитетов подроста вне указанной зоны связано в основном с особенностями эдафо-орографических условий

микростаций, в пределах которых сеянцы *P. pityusa* смогли успешно произрастать. Увеличение численности подроста происходит вблизи групп и одиночных растений, которые не были ликвидированы при проведении санитарных рубок на горельниках. Возможность роста и развития подроста на данных участках определялась влиянием фитогенного поля уцелевших деревьев, обеспечивающих защиту молодых растений *P. pityusa* от действия негативных факторов внешней среды [24].

Варьирование численности и биометрических показателей подроста, изменение пространственной структуры ценопопуляций при увеличении расстояния от стены материнского древостоя позволяют выделить три ландшафтно-ценотические зоны динамики процессов возобновления коренных древостоев *P. pityusa*. Первая — с повышенной плотностью подроста, где наиболее интенсивно формируются ценотические условия первых этапов развития лесного моносообщества. Присутствие сопутствующих и второстепенных пород здесь незначительно, однако в связи с высокой плотностью подроста *P. pityusa* впоследствии существенно возрастает внутривидовая конкуренция.

В пределах второй зоны, которую можно характеризовать как переходную от среды лесного биоценоза к условиям открытого пространства, плотность подроста заметно снижается. В границах данного пространства влияние полога материнского древостоя также снижается, что связано с увеличением расстояния от стены материнского древостоя до подроста или с изменением его сомкнутости в результате изреживания либо фрагментации насаждений — образование прогалов и полян. В данной ситуации снижается внутривидовая конкуренция и возрастает уровень межвидового взаимодействия в борьбе за ресурсы многофакторного пространства экологической ниши. На первых этапах роста сеянцев здесь в наибольшей степени проявляется конкуренция по отношению к растениям травяного яруса. При этом все большее значение в реализации подроста приобретает влияние условий ландшафта. Микропонижения, защита от инсоляции в результате затенения различными элементами рельефа, экспозиция и крутизна склонов — все это в большей степени оказывает влияние на динамику естественного возобновления коренных древостоев *P. pityusa*. В результате снижения плотности в данной экологической зоне наблюдается увеличение биометрических показателей подроста.

За переходной следует зона диффузной конкуренции, для которой характерно резкое снижение густоты и сомкнутости крон подроста. В пространстве третьей структурно-функцио-

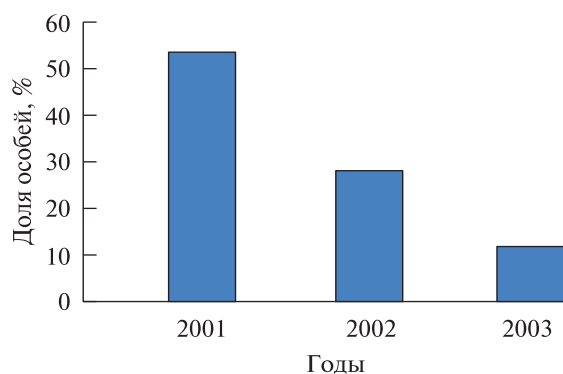


Рис. 2. Возрастные спектры подроста *P. pityusa* на горельниках ландшафтного заказника «Мыс Айя» с доминированием поколения 2001 г.

Fig. 2. Age spectra of undergrowth of *P. pityusa* in the mountain forests of the landscape reserve «Mys Aya», dominated by the 2001 generation

нальной зоны усиливается лимитирующее действие абиотических факторов, связанных со спецификой ландшафта, увеличением температурного, влажностного, инсоляционного градиентов биоценотической среды. Структура фитоценоза формируется с участием сопутствующих древесных растений и кустарников, резко снижается уровень внутривидовой конкуренции.

При изучении возраста подроста *P. pityusa* по количеству мутовок годового прироста верхушечного побега в некоторых случаях у молодых растений в первые десятилетия их развития наблюдалось формирование нескольких верхушечных приростов. Очевидно, что в засушливом климате приморского пояса горно-лесной зоны Крыма различные травоядные животные в качестве кормовой базы используют молодые побеги хвойных растений. В данном случае повреждение подроста *P. pityusa*, наиболее вероятно, связано с объеданием верхушечных побегов косяками (*Capreolus capreolus* L.), которые в этих местах достаточно часто встречаются. Следует отметить, что данное, казалось бы, негативное, явление в определенной степени способствует выживанию подроста в периоды значительного снижения количества годовых осадков за счет сокращения листовой поверхности испарения и изменения аллометрии надземной и подземной частей растений [25]. Общая оценка специфики возрастной структуры позволила установить, что активизация естественного возобновления и формирование ценопопуляций подроста *P. pityusa* происходят в течение 2–3 лет после пожара (рис. 2).

При проведении полевых наблюдений установлено, что за 15-летний период (2007–2022) на территории ландшафтного заказника «Мыс Айя» санитарные рубки были проведены дважды. В результате сохранилась лишь часть семенных деревьев, которая оказалась труднодоступной

Биометрические показатели подроста *P. pityusa* на горельниках ландшафтного заказника «Мыс Айя», по данным наблюдений на 2022 г.

Biometric assessment of undergrowth of *P. pityusa* in the burnt area of landscape reserve «Cape Aya», based on observations for 2022

Объект	Количество, шт./га	Высота, см	Диаметр ствола, см	Возраст, лет	Площадь кроны, м ²
Вариант 1					
1	400	437,5 ± 45,89	8,6 ± 2,11	24,0 ± 2,01	5,5 ± 1,28
2	400	417,5 ± 86,35	7,6 ± 1,99	21,5 ± 0,50	7,0 ± 2,11
3	700	355,7 ± 31,61	5,4 ± 0,79	20,5 ± 1,02	5,8 ± 0,95
4	1200	396,6 ± 34,23	9,2 ± 1,51	21,5 ± 0,26	5,4 ± 0,91
1-4	700	395,2 ± 21,73	7,9 ± 0,84	21,6 ± 0,44	5,8 ± 0,57
Вариант 2					
1	400	330,7 ± 93,03	8,7 ± 2,71	20,1 ± 2,02	5,3 ± 1,95
2	600	497,1 ± 32,27	7,6 ± 0,76	23,9 ± 0,94	8,5 ± 1,09
3	900	541,1 ± 33,64	10,5 ± 1,07	23,9 ± 0,98	14,2 ± 1,76
4	1000	543,0 ± 50,24	9,6 ± 1,31	22,5 ± 0,54	11,6 ± 2,22
1-4	800	487,7 ± 29,92	8,9 ± 0,70	22,7 ± 0,59	10,3 ± 1,08
Вариант 3					
1	500	412,0 ± 60,69	5,4 ± 0,58	22,2 ± 0,37	6,8 ± 1,44
2	900	480,0 ± 35,90	7,0 ± 0,66	21,8 ± 0,43	7,2 ± 1,08
3	1300	426,9 ± 30,71	6,6 ± 0,61	21,7 ± 0,43	5,8 ± 0,70
4	1300	576,15 ± 26,23	9,9 ± 0,65	24,2 ± 0,34	9,0 ± 0,61
1-4	1000	485,5 ± 19,60	7,6 ± 0,42	22,6 ± 0,27	7,3 ± 0,46

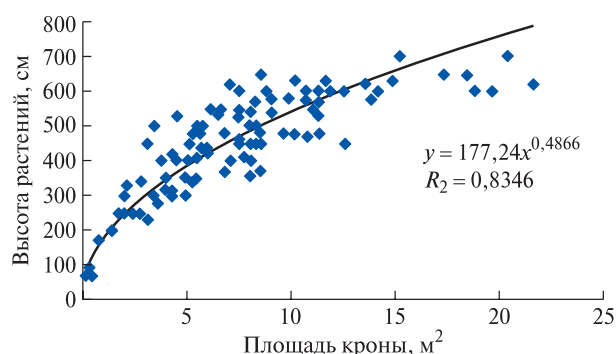


Рис. 3. Взаимосвязь между высотой деревьев и площадью кроны в молодых древостоях *P. pityusa*

Fig. 3. Relationship between tree height and crown area in young stands of *P. pityusa*

для выполнения рубки либо была безупречной с позиции оценки санитарного состояния. В связи с этим сеть пробных площадей увеличили в целях расширения охвата территории горельника, включая участки проведения санитарных рубок.

Возраст молодняков *P. pityusa* на объекте исследования по итогам наблюдений, проведенных в 2022 г., изменялся от $20,1 \pm 2,02$ до $24,2 \pm 0,34$ лет (табл. 2). За 15-летний период на исследуемых объектах произошли существенные изменения биометрических показателей растений. Значительно увеличались диаметр и высота молодняков естественного происхождения, а также увеличилась площадь кроны среднего дерева.

В целом позитивная динамика комплекса биометрических показателей, наличие положительной связи между средней высотой дерева и площадью кроны (рис. 3), хорошее жизненное состояние молодняков свидетельствуют о том, что на данном этапе происходит реализация естественных механизмов восстановления биоценологического пространства природных популяций *P. pityusa*, утраченного в результате пожара.

При этом смыкания кроны растений в границах сложившихся ценопопуляций не произошло. Причиной отсутствия единого кронового пространства является снижение плотности распределения растений, произошедшее после проведения санитарных рубок. Уменьшение численности подроста и изменение структуры его ценопопуляций на территории горельника является следствием проведения лесовосстановительных лесохозяйственных мероприятий, которые были сведены в основном к вырубке деревьев и раскорчевке пней. Такие не вполне рациональные действия привели к усилению эрозийных и оползневых процессов на площади горельника и примыкающих территориях, что способствовало вывалу отдельных не поврежденных огнем деревьев. Образовавшиеся прогалины и поляны осваиваются сопутствующими породами и кустарниками. На пробных площадях отмечено присутствие дуба пушистого (*Q. pubescens*) порослевого происхождения. В настоящее время это единичные экземпляры, но со временем

**Биометрическая оценка подроста *P. pityusa* на опытных объектах
Карадагского природного заповедника**

Biometric assessment of *P. pityusa* undergrowth in the experimental sites of the Karadag Nature Reserve

Объект	Количество растений, тыс. шт./га	Высота, см	Диаметр ствола, см	Средняя площадь кроны, м ²	Общая площадь крон, м ² /га
1	1,6	164,3 ± 41,09	4,7 ± 1,69	2,0 ± 0,84	3234,34
2	1,4	159,0 ± 40,49	5,6 ± 1,59	1,6 ± 0,61	2292,18
3	1,0	159,1 ± 46,58	4,5 ± 1,73	1,9 ± 0,77	1959,38
4	0,9	205,7 ± 64,63	5,9 ± 1,26	4,4 ± 1,01	3944,22
1–4	1,2	169,3 ± 22,72	5,5 ± 0,81	2,1 ± 0,42	2585,37

процессы экологического замещения *P. pityusa* могут усилиться, и численность сопутствующих и второстепенных пород будет возрастать. В том случае, когда влияние санитарных рубок на процессы роста и развития молодняков исключено, площадь кронового пространства подроста и молодняков *P. pityusa* заметно увеличивается.

При обследовании искусственных насаждений *P. pityusa* на территории Карадагского природного заповедника выявлены те же закономерности, что и для ее природных сообществ на мысе Айя — снижение плотности подроста с удалением от стены материнского насаждения и синхронное увеличение среднего диаметра, высоты и крон растений (табл. 3).

Таким образом, антропогенное вмешательство в природные механизмы восстановления коренных сообществ снижает возможности реализации экологических процессов поддержания целостности растительного покрова, следствием которых согласно «правила предварения» или «закона выравнивания среды», изложенного в работах И.Б. Кучеров (1995), является восстановление лесного сообщества видами, способными к устойчивому существованию в сложившихся условиях [16]. В данном случае за сокращением пространства доминирования *P. pityusa* последует формирование насаждений порослевого происхождения со значительным долевым участием *Q. pubescens* *n*-генерации, что окажет влияние на продуктивность, устойчивость и биологическое разнообразие лесных экосистем ландшафтного заказника «Мыс Айя» и Карадагского природного заповедника. Обоснованность данного теоретического положения, как одного из итогов проведенных исследований, была проверена нами при изучении специфики возобновления *P. pityusa* в условиях сухих сугрудов на южных склонах отрогов Крымских гор Карадагского природного заповедника. При выполнении полевых наблюдений было установлено, что естественное возобновление и формирование ценопопуляций подроста *P. pityusa* достаточно успешно происходит и за пределами пирогенного ряда. Жизнеспособный

подрост наблюдался в «окнах» полога материнских насаждений, он активно развивается и на примыкающих залежных землях.

Выводы

Временной разрыв в хронологии прохождения лесных пожаров оказывает влияние на возрастную и пространственную структуру подроста *P. pityusa*. Исследования, проведенные в естественных насаждения мыса Айя, показали, что подрост *P. pityusa* на горельниках встречается неравномерно. Его количество изменяется в пределах 2,9...8,2 тыс. шт./га., максимальная численность растений составляет 15 тыс. шт./га. Относительно равномерное снижение плотности подроста наблюдается при движении от стены материнского древостоя на расстояние, кратное 2–3 величинам его средней высоты. Увеличение численности подроста происходит вблизи групп и одиночных растений, которые не были ликвидированы при проведении санитарных рубок на горельниках.

Выделены три ландшафтно-ценотические зоны динамики процессов возобновления коренных древостоев *P. pityusa*. Первая — с повышенной плотностью подроста, где наиболее интенсивно формируются ценотические условия начальных этапов развития лесного моносообщества. Присутствие сопутствующих и второстепенных пород здесь незначительно, однако существенно возрастает внутривидовая конкуренция. В пределах второй зоны экологическое значение полога материнского древостоя в формировании ценотической среды снижается, возрастает уровень конкуренции с растениями травяного яруса. При этом все большее значение в реализации подроста приобретает влияние ландшафта. В третьей структурно-функциональной зоне усиливается лимитирующее действие абиотических факторов. Состав фитоценоза *P. pityusa* формируется с участием в большей степени сопутствующих древесных растений и кустарников.

Антропогенное вмешательство в природные процессы возобновления коренных сообществ

снижает возможности реализации биоценологических процессов поддержания целостности и восстановления лесного сообщества видами, способными к устойчивому существованию в сложившихся условиях. За сокращением биоценологического пространства доминирования *P. pityusa* последует формирование насаждений порослевого происхождения с преобладающим участием *Q. pubescens* *n*-генерации, что в значительной степени снизит продуктивность, устойчивость и биологическое разнообразие лесных сообществ ландшафтного заказника «Мыс Айя».

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-24-20128.

Список литературы

- [1] Галущенко С.В., Галущенко Н.Н. Строго охраняемые природные территории как основа реальной заповедности. Международный и европейский опыт // Гуманитарный экологический журнал, 2017. Т. 3 (62). № 19. С. 1–11.
- [2] Burivalova Z., Hart S.J., Radeloff V.C., Srinivasan U. Early warning sign of forest loss in protected areas // *Current Biology*, 2021, v. 31, iss. 20, pp. 4620–4626. DOI: 10.1016/j.cub.2021.07.072
- [3] Powlen K.A., Gavin M.C., Jones K.W. Management effectiveness positively influences forest conservation outcomes in protected areas // *Biological Conservation*, 2021, v. 260, pp. 109192. DOI: 10.1016/j.biocon.2021.109192
- [4] Ribeiro M.P., Mello K., Valente R.A. How can forest fragments support Protected Areas connectivity in an urban landscape in Brazil? // *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, pp. 127683. DOI: 10.1016/j.ufug.2022.127683
- [5] Diniz M.F., Dallmeier F., Gregory T., Martinez V., Saldívar-Bellassai S., Benitez-Stanley M.A., Sánchez-Cuervo A.M. Balancing multi-species connectivity and socio-economic factors to connect protected areas in the Paraguayan Atlantic Forest // *Landscape and Urban Planning*, 2022, v. 222, p. 104400. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104400
- [6] Liu Y., Ziegler A., Jie W., Shijing L., Dashan W., Rongrong X., Decha D., Hailong L., Zhenzhong Z. Effectiveness of protected areas in preventing forest loss in a tropical mountain region // *Ecological Indicators*, 2022, v. 136, p. 108697. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108697
- [7] Opuni-Frimpong E., Gabienu E., Adusu D., Opuni-Frimpong N.Y., Dampety F.G. Plant diversity, conservation significance, and community structure of two protected areas under different governance // *Trees, Forests and People*, 2021, v. 4, p. 100082. DOI: 10.1016/j.tfp.2021.100082
- [8] Silva-Pereira I., Meira-Neto J.A.A., Rezende V.L., Eisenlohr P.V. Biogeographic transitions as a source of high biological diversity: Phylogenetic lessons from a comprehensive ecotone of South America // *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2020, v. 44, p. 125528. DOI: 10.1016/j.ppees.2020.125528
- [9] Ullah S.M.A., Tani M., Tsuchiya J., Rahman M.A., Moriyama M. Impact of protected areas and co-management on forest cover: A case study from Teknaf Wildlife Sanctuary, Bangladesh // *Land Use Policy*, 2022, v. 113, p. 105932. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105932
- [10] Позаченюк Е.А., Соцкова Л.М., Калинчук И.В., Шудрик Е.В. Инициатива Крымского экорегиона // *Заповедники Крыма. Биоразнообразие и охрана природы в Азово-Черноморском регионе: Материалы VII Международ. науч.-практ. конф.*, 24–26 октября 2013 г. Симферополь, 2013. С. 144–148.
- [11] Александрова М.А. Формирование правового режима земель особо охраняемых природных территорий в отечественном праве XII–XX веков // *Альманах современной науки и образования*, 2014. Т. 5–6. С. 18–21.
- [12] Грейг-Смит П. Количественная экология растений. М.: Мир, 1967. 358 с.
- [13] Злобин Ю.А. Оценка качества ценопопуляций подростов древесных пород // *Лесоведение*, 1976. Т. 6. С. 72–79.
- [14] Пятницкий С.С. Методика исследований естественного семенного возобновления в лесах левобережной Лесостепи Украины. Харьков: Изд-во Харьков. ун-та, 1959. 38 с.
- [15] Санников С.Н., Санникова Н.С. Экология естественного возобновления сосны под пологом леса. М.: Наука, 1985. 152 с.
- [16] Кучеров И.Б. О принципе дополнителности в геоботанике: методологические предпосылки возникновения комплементарных подходов к изучению растительности // *Журнал общей биологии*, 1995. Т. 56 (4). С. 486–505.
- [17] Коба В.П. Возобновление сосны Палласа на горельниках в Горном Крыму // *Лесоведение*, 2016. Т. 4. С. 270–278.
- [18] Коба В.П. Особенности восстановления древостоев сосны крымской в постпирогенный период // *Экосистемы*, 2017. Т. 11. С. 10–13.
- [19] Левченко К.В., Матвеев С.М. Факторы горимости и послепожарные изменения в горных лесах Крымского заповедника // *Лесотехнический журнал*, 2017. Т. 4. С. 91–100.
- [20] Лукина Л.И., Тохтамыш О.К., Мастепанова О.И. Противопожарное обустройство лесов в Севастопольском лесничестве // *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность: Сб. ст. междунар. науч.-практ. конф.*, 23–26 сентября 2019 г. Севастополь, 2019. С. 926–930.
- [21] Ежегодный доклад о состоянии и об охране окружающей среды города Севастополя за 2019 год. Севастополь, 2020. 316 с.
- [22] Салтыков А.Н. Системная целостность и сходство пространственно-возрастной структуры подростов сосны обыкновенной и сосны крымской // *Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада*, 2021. Т. 141. С. 44–54.
- [23] Коба В.П. К проблеме воспроизводства естественных древостоев *Pinus pallasiiana* D. Don. // *Сб. науч. трудов Государственного Никитского ботанического сада*, 2004. Т. 123. С. 178–186.
- [24] Коба В.П. Возобновление коренных насаждений *Pinus pallasiiana* D. Don после верховых пожаров на фоне динамики абиотических факторов в постпирогенный период // *Растительные ресурсы*, 2004. Т. 40(2). С. 19–30.
- [25] Коба В.П., Жигалова Т.П. Влияние травоядных животных на возобновление сосны крымской в условиях пустоши горельников // *Уч. зап. Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия: Биология*, 2012. Т. 25 (64). № 1. С. 92–97.

Сведения об авторах

Коба Владимир Петрович [✉] — д-р биол. наук, профессор, заведующий лабораторией лесоведения ФГБУН «Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад — Национальный научный центр РАН», kobavp@mail.ru

Салтыков Андрей Николаевич — канд. с.-х. наук, доцент, зав. кафедрой лесного дела и садово-паркового строительства Института «Агротехнологическая академия» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского», saltykov.andrey.1959@mail.ru

Макаров Никита Александрович — аспирант лаборатории лесоведения ФГБУН «Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад — Национальный научный центр РАН», makarov.crimea@yandex.ru

Коренькова Олеся Олеговна — канд. биол. наук, науч. сотр. лаборатории лесоведения ФГБУН «Ордена Трудового Красного Знамени Никитский ботанический сад — Национальный научный центр РАН», o.o.korenkova@mail.ru

Поступила в редакцию 17.08.2022.

Одобрено после рецензирования 05.12.2022.

Принята к публикации 21.03.2023.

RENEWAL OF *PINUS BRUTIA* VAR. *PITYUSA* (STEVEN) SILBA IN RESERVED TERRITORIES OF MOUNTAIN CRIMEA

V.P. Koba^{1✉}, A.N. Saltykov², N.A. Makarov¹, O.O. Korenkova¹

¹Nikita Botanical Gardens — National Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 52, Nikitsky s-k, 298648, Nikita village, Yalta, Republic of Crimea, Russia

²V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 4, Academician Vernadsky av., 295007, Simferopol, Republic of Crimea, Russia

kobavp@mail.ru

It has been established that undergrowth of *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba is unevenly distributed on the territory of the burnt areas, its density varies within 2,9...8,2 thousand units/ha, the maximum reaches 15 thousand units/ha. The landscape-coenotic zones of the dynamics of the processes of renewal of native *P. pityusa* forest stands have been identified. An increase in the number of undergrowth near groups and single plants, which were not eliminated during sanitary felling on burnt areas, was revealed. The possibility of growth and development of undergrowth in these areas was determined by the influence of the phytogenic field of surviving trees, which protect young plants of *P. pityusa* from negative environmental factors. It was determined that a relatively uniform decrease in the density of undergrowth is observed when moving from the wall of the parent stand at a distance that is a multiple of 2–3 values of its average height. The effect of a time gap in the chronology of the passage of forest fires on the age and spatial structure of *P. pityusa* undergrowth is presented. A general assessment of the specifics of the age structure made it possible to establish that the activation of natural regeneration and the formation of coenopopulations of *P. pityusa* undergrowth occur within 2–3 years after the fire. It has been established that anthropogenic interference in the natural processes of renewal of indigenous communities reduces the possibility of implementing biocenotic processes of maintaining the integrity and restoration of the forest community by species capable of sustainable existence under the prevailing conditions. A reduction in the biocenotic space of *P. pityusa* dominance, which determines the formation of stands of coppice origin, with a predominance of *Quercus pubescens* Willd. *n*-generation, which significantly reduces the productivity, sustainability and biological diversity of forest communities of the Cape Aya landscape reserve.

Keywords: *P. pityusa*, stands, regeneration, undergrowth, abundance, burnt forests

Suggested citation: Koba V.P., Saltykov A.N., Makarov N.A., Korenkova O.O. *Vozobnovlenie sosny pitzundskoi (Pinus brutia var. pityusa (Steven) Silba) na zapovednykh territoriyakh Gornogo Kryma* [Renewal of *Pinus brutia* var. *pityusa* (Steven) Silba in reserved territories of Mountain Crimea]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 26–35. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-26-35


References

- [1] Galushchenko S.V., Galushchenko N.N. *Strogo okhranyaemye prirodnye territorii kak osnova real'noy zapovednosti. Mezhdunarodnyy i evropeyskiy opyt* [Strictly protected natural territories as the basis of a real reserve. International and European experience]. *Gumanitarnyy ekologicheskiy zhurnal* [Humanitarian ecological journal], 2017, v. 3 (62), no. 19, pp. 1–11.
- [2] Burivalova Z., Hart S.J., Radeloff V.C., Srinivasan U. Early warning sign of forest loss in protected areas. *Current Biology*, 2021, v. 31, iss. 20, pp. 4620–4626. DOI: 10.1016/j.cub.2021.07.072

- [3] Powlen K.A., Gavin M.C., Jones K.W. Management effectiveness positively influences forest conservation outcomes in protected areas. *Biological Conservation*, 2021, v. 260, pp. 109192. DOI: 10.1016/j.biocon.2021.109192
- [4] Ribeiro M.P., Mello K., Valente R.A. How can forest fragments support Protected Areas connectivity in an urban landscape in Brazil? *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, pp. 127683. DOI: 10.1016/j.ufug.2022.127683
- [5] Diniz M.F., Dallmeier F., Gregory T., Martinez V., Saldivar-Bellassai S., Benitez-Stanley M.A., Sánchez-Cuervo A.M. Balancing multi-species connectivity and socio-economic factors to connect protected areas in the Paraguayan Atlantic Forest. *Landscape and Urban Planning*, 2022, v. 222, p. 104400. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104400
- [6] Liu Y., Ziegler A., Jie W., Shijing L., Dashan W., Rongrong X., Decha D., Hailong L., Zhenzhong Z. Effectiveness of protected areas in preventing forest loss in a tropical mountain region. *Ecological Indicators*, 2022, v. 136, p. 108697. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108697
- [7] Opuni-Frimpong E., Gabien E., Adusu D., Opuni-Frimpong N.Y., Dampety F.G. Plant diversity, conservation significance, and community structure of two protected areas under different governance. *Trees, Forests and People*, 2021, v. 4, p. 100082. DOI: 10.1016/j.tfp.2021.100082
- [8] Silva-Pereira I., Meira-Neto J.A.A., Rezende V.L., Eisenlohr P.V. Biogeographic transitions as a source of high biological diversity: Phylogenetic lessons from a comprehensive ecotone of South America. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2020, v. 44, p. 125528. DOI: 10.1016/j.ppees.2020.125528
- [9] Ullah S.M.A., Tani M., Tsuchiya J., Rahman M.A., Moriyama M. Impact of protected areas and co-management on forest cover: A case study from Teknaf Wildlife Sanctuary, Bangladesh. *Land Use Policy*, 2022, v. 113, p. 105932. DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105932
- [10] Pozachenyuk E.A., Sotskova L.M., Kalinchuk I.V., Shudrik E.V. *Iniitsiativa Krymskogo ekoregiona* [Initiative of the Crimean Ecoregion]. *Zapovedniki Kryma. Bioraznoobrazie i okhrana prirody v Azovo-Chernomorskom regione: Mat. VII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Reserves of Crimea. Biodiversity and nature protection in the Azov-Black Sea region: Mat. VII Intern. scientific-practical. Conf.]*, October 24–26, 2013. Simferopol, 2013, pp. 144–148.
- [11] Aleksandrova M.A. *Formirovanie pravovogo rezhima zemel' osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriy v otechestvennom prave XII–XX vekov* [Formation of the legal regime of lands of specially protected natural areas in domestic law of the XII–XX centuries]. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya* [Almanac of modern science and education], 2014, v. 5–6, pp. 18–21.
- [12] Greig-Smith P. *Kolichestvennaya ekologiya rasteniy* [Quantitative plant ecology]. Moscow: Mir, 1967, 358 p.
- [13] Zlobin Yu.A. *Otsenka kachestva tsenopopulyatsiy podrosta drevesnykh porod* [Assessment of the quality of cenopopulations of undergrowth of tree species]. *Lesovedenie*, 1976, v. 6, pp. 72–79.
- [14] Pyatnitskiy S.S. *Metodika issledovaniy estestvennogo semennogo vozobnovleniya v lesakh levoberezhnoy Lesostepi Ukrainy* [Methodology for researching natural seed regeneration in the forests of the left-bank Forest-Steppe of Ukraine]. Kharkov: Kharkov Publishing House university, 1959, 38 p.
- [15] Sannikov S.N., Sannikova N.S. *Ekologiya estestvennogo vozobnovleniya sosny pod pologom lesa* [Ecology of natural regeneration of pine under the forest canopy]. Moscow: Nauka, 1985, 152 p.
- [16] Kucherov I.B. *O printsipe dopolnitel'nosti v geobotanike: metodologicheskie predposylki vznikeniya komplementarnykh podkhodov k izucheniyu rastitel'nosti* [On the principle of complementarity in geobotany: methodological prerequisites for the emergence of complementary approaches to the study of vegetation]. *Zhurnal obshchey biologii* [Journal of General Biology], 1995, v. 56 (4), pp. 486–505.
- [17] Koba V.P. *Vozobnovlenie sosny Pallas na gorel'nikah v Gornom Krymu* [Renewal of Pallas pine on burnt forests in the Mountainous Crimea]. *Russian Journal of Forest Science [Lesovedenie]*, 2016, v. 4, pp. 270–278.
- [18] Koba V.P. *Osobennosti vosstanovleniya drevostoev sosny krymskoy v postpirogennyi period* [Peculiarities of restoring stands of Crimean pine in the post-pyrogenic period]. *Ekosistemy* [Ecosystems], 2017, v. 11, pp. 10–13.
- [19] Levchenko K.V., Matveev S.M. *Factory gorimosti i poslepozharnye izmeneniya v gornykh lesakh Krymskogo zapovednika* [Flammability factors and post-fire changes in the mountain forests of the Crimean Reserve]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering Journal], 2017, v. 4, pp. 91–100.
- [20] Lukina L.I., Tokhtamysh O.K., Mastepanova O.I. *Protivopozharnoe obustroystvo lesov v Sevastopol'skom lesnichestve* [Fire-fighting arrangement of forests in the Sevastopol forestry]. *Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost'* [Ecological, industrial and energy safety], 2019, pp. 926–930.
- [21] *Ezhegodnyy doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy goroda Sevastopolya za 2019 god* [Annual report on the state and environmental protection of the city of Sevastopol for 2019]. Sevastopol, 2020, 316 p.
- [22] Saltykov A.N. *Sistemnaya tselostnost' i skhodstvo prostranstvenno-vozrastnoy struktury podrosta sosny obyknovlennoy i sosny krymskoy* [System integrity and similarity of the space-age structure of the undergrowth of Scots pine and Crimean pine]. *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* [Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden], 2021, v. 141, pp. 44–54.
- [23] Koba V.P. *K probleme vosproizvodstva estestvennykh drevostoev Pinus pallasiana D. Don.* [On the problem of reproduction of natural stands of *Pinus pallasiana* D. Don.]. *Sbornik nauchnykh trudov Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada* [Collection of scientific works of the State Nikitsky Botanical Garden], 2004, v. 123, pp. 178–86.
- [24] Koba, V.P. *Vozobnovlenie korenykh nasazhdenij Pinus pallasiana D. Don posle verhovyyh pozharov na fone dinamiki abioticheskikh faktorov v postpirogennyi period* [Restoration of indigenous plantations of *Pinus pallasiana* D. Don after crown fires against the background of the dynamics of abiotic factors in the post-pyrogenic period] *Rastitelnye resursy* [Plant Resources], 2004, v. 40(2), pp. 19–30.
- [25] Koba V.P., Zhigalova T.P. *Vliyaniye travoyadnykh zhivotnykh na vozobnovlenie sosny krymskoy v usloviyakh pustoshi gorel'nikov* [Influence of herbivores on the renewal of the Crimean pine in the conditions of the barren wasteland]. *Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Seriya: Biologiya* [Uchenye zapiski Tavricheskogo natsional'nogo universiteta im. IN AND. Vernadsky. Series: Biology], 2012, v. 25 (64), no. 1, pp. 92–97.

The work was carried out with the financial support of the RGNF grant No. 22-24-20128.

Authors' information

Koba Vladimir Petrovich  — Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Laboratory of Forest Science of the FSBSI «Order of the Red Banner of Labor Nikitsky Botanical Garden — National Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», kobavp@mail.ru

Saltykov Andrey Nikolaevich — Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forestry and Landscape Construction of the Institute «Agrotechnological Academy», V.I. Vernadsky Crimean Federal University, saltykov.andrey.1959@mail.ru

Makarov Nikita Aleksandrovich — pg. of the Laboratory of Forest science of the Order of the Red Banner of Labor Nikitsky Botanical Garden — National Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, makarov.crimea@yandex.ru

Korenkova Olesya Olegovna — Cand. Sci. (Biology), Researcher of the Laboratory of Forest science of the Order of the Red Banner of Labor Nikitsky Botanical Garden — National Research Center of the RAS, o.o.korenkova@mail.ru

Received 17.08.2022.

Approved after review 05.12.2022.

Accepted for publication 21.03.2023.

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

СЕМЕНОШЕНИЕ КЕДРА КОРЕЙСКОГО (*PINUS KORAIENSIS* SIEB. ET ZUCC.) ПРИ ЕГО ИНТРОДУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ЛЕСОСТЕПИ ВОРОНЕЖСКОЙ ОБЛАСТИ

С.В. Левин

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии»,
Россия, 394087, г. Воронеж, ул. Ломоносова, д. 105

leslesovik63@yandex.ru

Представлены материалы исследований интродукции кедра корейского в условиях лесостепи Воронежской области. Определено полное соответствие процессов его жизнедеятельности условиям интродукции. Установлено влияние фактора размещения деревьев на территории — свободного или в составе иных хвойных пород на семеношение. Выявлено увеличение урожайности деревьев при применении искусственного опыления к ним по сравнению с недоопыленными. Обращено внимание на момент формирования многовершинной кроны дерева путем образования на вершине центрального проводника «пустой» шишки. Указано на высокую перспективность выращивания породы в данных условиях с получением как лесоводственного, так и экономического эффекта. Дан прогноз урожайности культур кедра корейского при соблюдении определенных условий технологии. С их учетом при создании лесосеменного объекта кедра корейского с 1 га лесокультурной площади можно получать урожай с момента возраста прививки в 25 лет в количестве 123 кг орешков.

Ключевые слова: интродукция, кедры корейский (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) и сибирский (*Pinus sibirica* du Tour.), привитые и не привитые деревья, шишки, семеношение, урожайность

Ссылка для цитирования: Левин С.В. Семеношение кедра корейского (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) при его интродукции в условиях лесостепи Воронежской области // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 36–47. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-36-47

Кедр корейский распространен в бассейнах рек Бурея и Амур и в прибрежных районах Дальнего Востока России, а также в северо-восточных районах Китая, северной части Корейского полуострова, в высокогорных районах Японских островов. Общемировая площадь смешанных насаждений кедра корейского составляет примерно 50 млн га, среди которых на северо-восточные районы Китая приходится около 50...60 % (смешанные насаждения кедра корейского, восстановленные в условиях естественной регенерации после вырубки) [1–3].

Кедр корейский является экономически важной породой вследствие биологических свойств и экономической значимости. Орехи кедра корейского имеют высокую экономическую ценность и являются здоровой пищей, богатой питательными веществами. Основными местами сбора орехов кедра корейского являются: Дальневосточный федеральный округ России, китайские провинции Хэйлуцзян и Цзилинь, а также Северная Корея.

Объем добычи орехов в мире в среднеурожайный год составляет 80 000...100 000 т, а в урожайный год — 160 000...180 000 т. Мировой спрос на орехи кедра корейского составляет более 200 000 т, из них в Китае — около 54 500 т.

Объем употребляемой в пищу людьми зеленой органической пищи постоянно увеличивается. В несколько раз повысилось доверие и увеличился спрос потребителей на продукцию, сделанную на основе безопасного и питательного сырья кедра корейского: масло, протеиновые напитки и масляные капсулы из орехов. Находят применение и другие виды продуктов из кедра: косметические средства, функциональные пищевые продукты, моющие средства, тонкие химикаты, фармацевтические препараты.

Кедрово-широколиственные леса с эдификаторным доминированием кедра корейского (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.), приуроченные к наиболее освоенной части российского Дальнего Востока, постоянно испытывают техногенный и антропогенный пресс и систематическое воздействие лесных пожаров. Всего в формации кедрово-широколиственных лесов содержится типов: в южной части Хабаровского края — 13, северной части Хабаровского края — 2, южной части Приморского края — 22, северной части Приморского края — 3, КНР — 2, КНДР — 2 [4]. Сокращение их естественного ареала и снижение ресурсного потенциала определяют задачи создания культур кедра корейского различного назначения. Наряду с одновременным сохранением их устойчивости и способностью в полной мере

выполнять средообразующие функции это требует разработки технологий повышения общей продуктивности и урожайности в зависимости от назначения насаждений, в том числе за пределами ареала породы.

Поскольку основной из главных задач интродукции древесных растений является повышение продуктивности и качественного состава лесов, по отношению к кедр корейскому как лесообразующей породе она применима [5].

В некоторых странах кедр корейский является объектом интродукции более 170 лет. В сеть государственных географических культур Российской Федерации, а также в архивы клонов и опытные культуры он был вовлечен по ограниченному количеству происхождений лишь в 1970-х годах. в Центральном, Центрально-Черноземном, Северо-Западном районах европейской части России, в Среднем Поволжье, и в Южной Сибири [6]. Проведенные исследования позволяют оценить перспективы интродукции кедра корейского, в частности, вид рекомендован для массовой интродукции в леса южной и средней частей Сибири и как декоративное дерево — в антропогенные ландшафты [7].

К сожалению, практически отсутствуют ценные опытно-производственные объекты с проверенными стабильно высокими показателями роста и семеношения, несмотря на 90-летнюю историю культивирования кедра корейского на Дальнем Востоке и почти 50-летнюю давность первых селекционных мероприятий [8]. Вопросы развития кедра корейского на Дальнем Востоке уделяли внимание А.В. Великов, В.В. Потенко [2], Н.Е. Кабанов [4], Е.А. Никитенко [8], А.Н. Гриднев, Л.С. Мамедова [9], Н.В. Кречетова, В.И. Штейникова [18, 24], Т.П. Орехова [20] и др. Анализ литературных источников выше упомянутых авторов показал, что опыт создания лесных культур в условиях естественного ареала еще недостаточно обобщен, в частности:

- не решены проблемы подготовки почвы и оптимальной густоты создаваемых культур;
- недостаточно изучены особенности роста искусственных насаждений в различных условиях местопроизрастания;
- не установлена оптимизация породного состава насаждений, где отрицательные межвидовые и внутривидовые взаимоотношения пород сведены к минимуму [9].

Первый обобщенный анализ произрастания кедра корейского в условиях лесостепной зоны Воронежской обл. представлен А.В. Лукиным [10]. В этой работе отмечено, что по сравнению с сосной обыкновенной — эталоном (100 %) по показателям роста, а именно, высоте и диаметру, кедровым соснам свойственны параметры,

приведенные в процентах относительно высоты: у кедра корейского 59...63, сибирского 48...82, европейского 36...49; относительно диаметра стволов: 54...57, 30...112, 48...52 соответственно.

Лесостепная зона, как и степная, отличается высокими значениями солнечной радиации, особенно прямой, большой продолжительностью вегетационного периода и в то же время нередко скудной влагообеспеченностью почвы и низкой влажностью воздуха. Для повышения биологической устойчивости хвойных насаждений в таких условиях необходима высокая сомкнутость древесного полога, раннее смыкание крон, а также формирование сложных многоярусных древостоев, по возможности с подлеском [11], чему следует уделять повышенное внимание. Сравнительный анализ особенностей роста и развития кедров корейского и сибирского при их произрастании в лесостепной зоне в пределах Воронежской обл. раскрывает их видовую специфику [12–15], отдавая предпочтение развитию кедра корейского.

Жизнеспособность интродуцируемых растений определяется их способностью к генеративному развитию. Если растение способно к семеношению и развитию полноценных семян, то его жизнедеятельность вполне соответствует условиям интродукции и можно прогнозировать высокую перспективность выращивания такого растения в данных условиях [16].

Цель работы

Цель работы — сравнительный анализ исследований репродуктивного развития привитого и непривитого материала кедра корейского в пределах лесостепной зоны Воронежской обл.

Материал и методы

Объекты исследования размещены в Воронежской обл.: в Правобережном участковом лесничестве Пригородного лесничества в кв. № 56 (условно «лесной участок») и кв. № 57 (условно «лесопарк»), а также на территории Семилукского коллекционно-маточного дендрария (ранее территория ЦНИИЛГИС — ныне ВНИИЛГИСбиотех; условно Семилукский коллекционно-маточный дендрарий).

На территории Семилукского КМД, непривитые деревья кедра корейского размещены отдельными деревьями и куртинами на участках № 1–4. Их посадка осуществлялась непривитыми саженцами под меч Колесова рядами с северо-запада на юго-восток. Семеношение периодическое на участках №№ 1, 2, 4. Семена взяты из Тырминского лесхоза Хабаровского управления лесами. На момент исследования их возраст составлял: на участке №№ 1, 4 — 43 года; участке №№ 2, 3 — 36 лет.



а



б

Рис. 1. Искусственное опыление (а) и семеношение кедра корейского (б) в кв. № 57 Правобережного участкового лесничества Пригородного лесничества («лесопарк») **Fig. 1.** Artificial pollination (а) and seed production of Korean pine (б) in the compartment No. 57 of the Pravoberezhny section of the Prigorodnoye forestry («forest park»)

На территориях кв. № 56 и № 57 деревья кедр корейского — это прививки на кедре сибирском. Их посадка проводилась семилетними саженцами в дно мелких борозд под меч Колесова. На территории «лесного участка» единично размещены деревья кедр корейского среди гибридов кедр сибирского с удалением от них в среднем на расстояние 1,5 м. Более свободное размещение наблюдаем на территории «лесопарка». На этих участках проводилось искусственное опыление (рис. 1, а) на размещенных, отдельных или расположенных куртинами деревьях пыльцой, взятой с деревьев на объекте в Семилукском КМД. Техника опыления по отношению к деревьям была осуществлена одинаково за короткий промежуток времени. На момент обследования их возраст составил 34 года. Семеношение ежегодное (рис. 1, б).

Ход развития деревьев кедр корейского на участках рассматривался в работах, где обосновывается перспективность выращивания породы на территории области [12–15]. В процессе исследования осуществлялся сбор шишек с последующим получением данных по ним и семенам. Статистическую обработку материалов осуществляли с помощью программы Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Семенное размножение — это динамический процесс, протекающий под влиянием многочисленных и разнообразных факторов окружающей среды и имеющий свои регуляторные механизмы, которые обеспечивают направленность и устойчивость этого явления.

Ранее считалось, что хорошим семенным годом считается тот год, когда с 1 га заготавливают 0,8...1,0 т товарного ореха с деревьев кедр корейского. Подтверждением этих данных можно считать пример урожайности в лесонасаждении опытного участка Бирской лесной дачи, на котором преобладающее количество кедровых деревьев относилось к VI классу возраста со средним диаметром ствола 32 см, а на 1 га приходилось 151 дерево кедр корейского, из числа которых плодоносящих было 137 (доля участия 90,7 %). Со всех плодоносящих деревьев собрано 11 930 шишек (87,1 шт. на одно дерево), при обработке которых получено 580 кг орехов (масса семян в одной шишке 48,6 г) [17].

Периодичность семеношения кедр обычно составляет 3–4 года. Молодые деревья начинают

Результаты сбора шишек по объектам (2019)

Cones collection results by site (2019)

Объект	Количество, шт.				Участие в семеношении, %
	Деревья	Семеносящие деревья	Шишки	Шишки на семеносящее дерево	
«Лесопарк»	16	7	47	6,71	43,8
«Лесной участок»	3	2	26	8,67	66,7
Семилукский КМД	64	14	61	4,36	21,9
В среднем	27,7	8	44,67	6,58	44,1

семеносить в условиях сомкнутого леса с 60...80 лет, на участках с разреженным древостоем значительно раньше — в 25...30 лет, а в условиях на свету — в 15 лет. Размер шишек в кроне одного дерева зависит от их количества на побегах [18–20]. Если на них развивается 3–4 шишки, то они, как правило, мелкие, если 1–2, то они чаще всего крупные. Средняя длина шишки кедр в Чугуевском районе — 17...20 см, ширина — 10...14 см, отдельные шишки с молодых деревьев в урожайные годы достигали 32 см [20]. Максимум семеношения кедр корейского отмечается в возрасте 250...270 лет [21].

По данным табл. 1 видно, что на привитых кедрях (территории «лесопарка» и «лесного участка») образуется большее число шишек на одно дерево по сравнению с непривитыми деревьями (Семилукский КМД).

Также можно утверждать, что размещение деревьев по территории (свободное или в составе иных хвойных пород) оказывает влияние на семеношение. Так, при свободном размещении на территории «лесопарка» число шишек на одно дерево варьировалось от 4 до 12 шт. при наличии трех деревьев с микростробилами. На территории «лесного участка» при единичном размещении деревьев кедр корейского среди гибридов кедр сибирского и удалении дерева кедр корейского в среднем на расстояние 1,5 м от них, на одно дерево кедр корейского приходилось от 2 до 12 шт. шишек при наличии двух деревьев с микростробилами (рис. 2, б, отмечен стрелкой).

Иная картина с семеношением наблюдалась на территории Семилукского КМД. Здесь степень участия деревьев в семеношении была лишь 21,88 %, при различиях по самим участкам: № 1 — 36,36; № 2 — 17,39; № 4 — 66,67 %. У находящихся под пологом деревьев кедр корейского не наблюдалось семеношения (участок № 3) (рис. 3), несмотря на общий возраст с расположенными рядом семеносящими деревьями (участки № 1, 2, 4) (см. рис. 2, 3).

Объяснения этого представлены в работе Г.В. Кузнецовой [22], где автор также отмечает, что сравнительный анализ особенностей роста

и сохранности климатипов кедровых сосен при интродукции показал значительную их географическую изменчивость, обусловленную разными наследственными свойствами и неодинаковой реакцией на новые условия произрастания.

Процесс семеношения, несмотря на низкую степень участия деревьев в пределах Семилукского КМД, весьма ощутим, если его сравнивать более детально по объектам за год (табл. 2) по таким показателям, как масса полных семян в шишке (38,50 г), их количество (65,1 шт.), общее число семян в шишке (84,3 шт.) и параметры шишки при ее длине (122,7 мм) и ширине (82,5 мм). Результативность процесса семеношения на территории Семилукского КМД связана с его более богатыми почвенными условиями (выщелоченный чернозем (D_2) в отличие от темно-серой лесной (C_2) других участков почвы). В публикациях 1940 г. приведены указания по перспективе разведения кедр корейского в степной зоне по понижениям неморозобойных балок [23], которые покрыты разновидностями черноземовидных почв.

При этом превышения перечисленных показателей (масса полных семян в шишке, их количество, общее число семян в шишке и параметры шишки при ее длине и ширине) над средними величинами составили (в процентах): 26,8; 33,19; 24,01; 7,41 и 5,5 соответственно. Показатель по массе полных семян в Семилукском КМД (609,8 г) уступает таковому на «лесном участке» (683,5 г) на 10,78 %, по причине более низкой полнотелности семян — на 14,67 % ниже по сравнению с «лесным участком». Масса 1000 семян, по литературным источникам, составляет: в Приморском крае от 350 до 870 г, в Хабаровском — от 300 до 850 г. Число семян обычно коррелирует с размерами шишки [24].

Оптимальным вариантом по семеношению, а именно, по соотношению таких показателей, как параметры шишки, их полнотелность и масса 1000 шт. полных семян, следует признать семеносящие деревья «лесного участка». По состоянию на 2019 г. статистически обработанные данные по объектам представлены в табл. 3.



Рис. 2. Размещение кедра корейского на территории Семилукского КМД: *a* — участок № 1; *б* — лесной участок

Fig. 2. Placement of the Korean pine on the territory of the Semiluk KMD: *a* — plot No. 1; *б* — forest plot



Рис. 2. Размещение кедра корейского на территории Семилукского КМД: *a* — участок № 2; *б* — под пологом (участок № 3); *в* — размещение кедра в куртине деревьев сосны румелийской (участок № 4)

Fig. 3. Placement of Korean pine on the territory of Semiluk KMD: *a* — plot No. 2; *б* — under the canopy (plot No. 3); *в* — the placement of cedar in a clump of Balcan pine trees (plot No. 4)

Т а б л и ц а 2

Показатели семеношения кедр корейского на территории Воронежской обл. (2019)

Korean pine seed production in Voronezh region (2019)

Объект	Масса полных семян в шишке, г	Пустые семена, шт.	Полные семена, шт.	Полнозернистость, %	Всего семян, шт.	Масса полных семян 1000 шт, г	Ширина шишки, мм	Длина шишки, мм
«Лесопарк»	18,4 ± 1,4	32,0 ± 2,7	31,1 ± 2,3	49,3 ± 3,1	63,1 ± 3,1	594,1 ± 5,5	75,1 ± 0,8	108,7 ± 1,2
«Лесной участок»	34,2 ± 2,1	6,0 ± 1,3	50,5 ± 3,4	89,3 ± 2,2	56,5 ± 3,3	683,5 ± 6,5	77,0 ± 0,7	111,3 ± 1,4
Семилукский КМД	38,5 ± 2,2	19,1 ± 2,1	65,1 ± 3,9	76,2 ± 2,5	84,3 ± 4,2	609,8 ± 12	82,5 ± 0,9	122,7 ± 1,5
В среднем	30,7 ± 1,4	21,1 ± 1,6	50,6 ± 2,5	69,4 ± 2,1	71,7 ± 2,5	618,4 ± 6,6	78,9 ± 0,6	115,7 ± 1,0

Т а б л и ц а 3

Статистические показатели семеношения кедр корейского (2019)

Korean pine seed production statistics (2019)

Показатель	Масса семян в шишке, г	Пустые семена, шт.	Полные семена, шт.	Полнозернистость, %	Всего семян, шт.	Масса полных семян 1000 шт., г	Ширина шишки, мм	Длина шишки, мм
По «лесопарку»								
В среднем	18,4	32,0	31,1	49,3	63,1	594,1	75,1	108,7
Стандартная ошибка	1,4	2,7	2,3	3,1	3,1	5,5	0,8	1,2
Стандартное отклонение	9,5	18,6	15,9	21,4	21,5	37,8	5,3	8,5
Уровень надежности (95,0 %)	2,8	5,5	4,7	6,3	6,3	11,1	1,6	2,5
По «лесному участку»								
В среднем	34,2	6,0	50,5	89,3	56,5	683,5	77,0	111,3
Стандартная ошибка	2,1	1,3	3,4	2,2	3,3	6,5	0,7	1,4
Стандартное отклонение	10,9	6,5	17,3	11,4	17,1	33,0	3,7	7,1
Уровень надежности (95,0 %)	4,4	2,6	7,0	4,6	6,9	13,3	1,5	2,9
По Семилукскому КМД								
В среднем	38,5	19,1	65,1	76,2	84,3	609,8	82,5	122,7
Стандартная ошибка	2,2	2,1	3,9	2,5	4,1	12,0	1,0	1,5
Стандартное отклонение	17,1	16,9	31,3	20,0	32,9	95,2	7,7	12,0
Уровень надежности (95,0 %)	4,29	4,25	7,88	5,05	8,29	23,98	1,93	3,01

В целом под данным табл. 2–4 видно, что параметры самих шишек (ширина и длина) изменяются по всем объектам: по ширине от 46 до 96 мм и по длине от 90 до 152 мм. Низкие размеры свойственны деформированным шишкам (Семилукский КМД и «лесной участок»), составившим лишь 2,1 % (3 шт.) общего количества собранных шишек на объектах (134 шт.), а также шишкам с низким числом полнозернистых семян — «череззерницей» на территории «лесопарка».

Шишки кедр сибирского на территории «лесопарка» и Семилукского КМД с середины июля

активно срываются и обгрызаются белками, сводя на нет все усилия по выращиванию и без этого неполнозернистых «орешков». У кедр корейского данная проблема не наблюдается, кроме того, вид не страдает от выявленных в «лесопарке» пузырчатой ржавчины (*Cronartium ribicola*) на сосне веймутовой и хермеса (*Pineus cembrae*) на кедре сибирском.

В отношении динамики семеношения кедр корейского наблюдаем, что у него семеношение ежегодное в случаях с привитыми деревьями (табл. 5).

Т а б л и ц а 4

**Параметры шишек кедр корейского по объектам на территории
Воронежской обл. (сбор 2019 г.)**

Parameters of Korean pine cones by sites in Voronezh region (collection 2019)

Объект	Ширина шишки, мм			Длина шишки, мм		
	наибольшая	наименьшая	средняя	наибольшая	наименьшая	средняя
«Лесопарк»	90,00	66,00	75,1 ± 0,8	125,00	90,00	108,7 ± 1,2
«Лесной участок»	84,00	68,00	77,0 ± 0,7	125,00	100,00	111,3 ± 1,4
Семилуцкий КМД	96,00	46,00	82,5 ± 0,9	152,00	96,00	122,7 ± 1,5
В среднем	—	—	78,9 ± 0,6	—	—	115,7 ± 1,0

Т а б л и ц а 5

Показатели семеношения кедр корейского в «лесопарке» (сбор 2017–2019 гг.)

Seed production parameters of Korean pine cones in the «forest park» (collection 2017–2019)

Сбор	Масса полных семян в шишке, г	Пустые семена, шт.	Полные семена, шт.	Полнозернистость, %	Всего семян, шт.	Масса полных семян 1000 шт., г	Ширина шишки, мм	Длина шишки, мм
Сбор 2017 г.	3,10	43	4,44	14,27	47,44	679,44	65,06	93,66
Сбор 2018 г.	22,98	26,31	33,23	55,96	59,54	689,92	70,54	109,23
Сбор 2018 г (искусственное опыление)	60,97	10,00	102,21	90,45	112,21	589,29	74,07	114,57
Сбор 2019 г.	18,40	32,04	31,09	49,33	63,13	594,06	75,09	108,68

Как видно, в 2017 г. в отличие от 2018 и 2019 гг. наблюдался неурожай «орешков», их число в среднем составляло до 4,44 шт. с массой 3,1 г семян в шишке. Как следствие, при соответствующих низких показателях размеров самой шишки полнозернистость семян составила всего лишь 14,27 % с учетом снижения общего числа семян до 47,44 шт. в среднем. В 2017 г. по отношению к некоторым деревьям была осуществлена внутривидовая гибридизация пыльцой, взятой с деревьев на Семилуцком КМД. В результате в 2018 г. повысилась урожайность в целом по отношению к 2017 г. и по всем показателям по сравнению с неопыленными искусственно деревьями. Так, опыленные деревья превзошли не опыленные искусственно по массе семян в шишке в 2,65 раза, по полным семенам — в 3,08 раза, по полнозернистости семян — на 34,49 %, по общему числу семян — в 2,01 раза при соответствующем увеличении размеров шишки по ширине на 5 % и длине на 14,3 %. При этом наблюдалось снижение массы полных семян 1000 шт. у опыленных деревьев по отношению к неопыленным искусственно на 14,6 % в среднем, изменяясь от 2,8 до 23,8 % от дерева к дереву. Техника опыления была одинаковой за короткий промежуток времени. Что касается сравнения урожайности искусственно неопыленных деревьев в 2018 и 2019 гг., то их показатели близки между собой, кроме массы полных семян 1000 шт.

Рассматривая урожайность кедр корейского по объектам, можно прийти к заключению, что создание биогрупп из привитых деревьев на объектах — перспективная технология, определенная условиями интродукции и биологическими особенностями породы. Урожай кедр корейского оказался следующим: в «лесопарке» — 864 г; на «лесном участке» — 889 г; в Семилуцком КМД — 2352 г.

При расчетах были использованы такие показатели, как масса полных семян в шишке, число деревьев, количество шишек на одно дерево и степень участия в семеношении деревьев, которые позволили сделать обоснованное заключение о конкретной урожайности на участке (г).

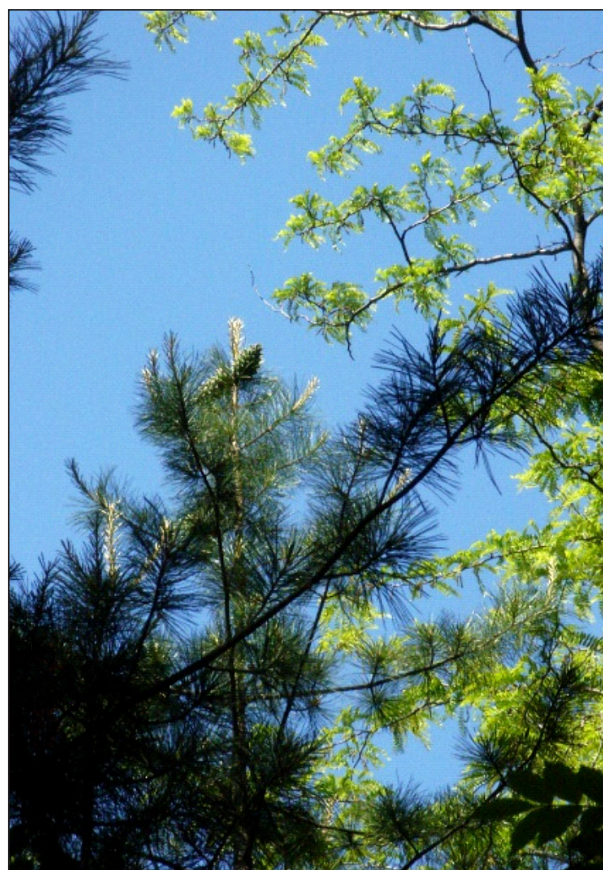
$$Y = M_{\text{ш}} \cdot N \cdot n \cdot \frac{p}{100},$$

где Y — урожайность на участке, г;
 $M_{\text{ш}}$ — масса полных семян в шишке, г;
 N — число деревьев, шт.;
 n — количество шишек на одно дерево, шт.;
 $\frac{p}{100}$ — степень участия в семеношении деревьев (процентное соотношение общего количества растений и семяносящих деревьев).

При перерасчете на одно дерево урожайность по объектам без учета их размещения на площади составит: в «лесопарке» — 54 г; на «лесном участке» — 296,3 г; в Семилуцком КМД — 36,75 г. Эти данные свидетельствуют о том, что для до-



а



б

Рис. 4. Размещение в кроне «пустой» шишки (а) и кедр корейского с гледичией трехколючковой (б)
Fig. 4. Placement in the crown of an «empty» cone (a); placement of Korean cedar with honey locust (б)

стижения значимой урожайности необходимо признать определяющим условием схему размещения деревьев по площади. При этом важна степень освещения, как лимитирующий фактор для семеношения. Кедр корейский уживается практически со многими темнохвойными породами: кедром сибирским, видами пихт [12–15] с учетом определенного их совместного размещения и сторон света. Наиболее благоприятным размещением кедр корейского в условиях интродукции в засушливых регионах следует считать опушечную сторону с северо-запада на юго-восток, где его необходимо высаживать рядами не менее трех в ряду или био группами. Если исключить его опушечное размещение (на южной стороне страдает от ожогов коры ранней весной), то он вполне благоприятно произрастает в составе кедр сибирского или био группами в составе лиственных пород, имеющих ажурную крону вне проекции его кроны. На Семилукском КМД такой породой оказалась гледичия трехколючковая (*Gleditsia triacanthos* L.) (рис. 4, б). По литературным источникам, лучшими кедровниками, дающими наибольший урожай орехов, являются кедровники с липой, кленом и ясенем [20, 24].

При анализе хода текущего прироста в высоту прививок кедр корейского на «лесопарке» внимание было сосредоточено на моменте, когда причиной приостановки развития центрального проводника и последующего отрастания вместо него замещающих боковых побегов, кроме случаев повреждения побега, может быть процесс формирования «пустой» шишки. В этом случае шишка образуется деформированной и без семян. Она может находиться на дереве несколько лет по причине легкой массы и хорошего крепления (рис. 4, а).

Предположительно привой на дереве, в соответствии с процессом онтогенеза растения — это уже стадийно устаревший материал (использовали в качестве привоя при интродукции побеги в возрасте более 150 лет), поэтому такое явление следует считать приспособлением растения к формированию многовершинной кроны в целях активизации семеношения. У деревьев с выявленной особенностью (33,75 % общего количества на объекте) возраст установленного факта варьирует от 11 до 17 лет. В данном случае мы наблюдаем, что дерево переходит на поддержание развития уже не одного, а зачастую двух проводников.

В работе [24] отмечено, что многовершинность образуется при отмирании верхнего побега замещением его побегами из верхней мутовки. Отмирание вершинок периодически повторяется. В результате размеры и плотность кроны вверху из-за побегов становятся очень густыми. С увеличением количества побегов увеличивается количество шишек, но размеры последних уменьшаются. У молодых деревьев шишки вырастают длиной до 20 см и более по 4–5 шишек на дерево; у старых, длиной 6...8 см, — по 350...400 шт. Отсюда на практике принимается решение об удалении центрального проводника применительно к исследуемой породе с возраста прививки 15 лет.

Учитывая ранее полученные данные [12–15] и результаты наших исследований, можно спрогнозировать будущую урожайность культур, при создании которых важно принимать во внимание следующее:

1) культуры создаются привитыми селекционными саженцами различных клонов на самой территории с групповым размещением в посадочном месте не менее 2 шт. с расстоянием между ними до 1 м;

2) исходя из опыта и лесоводственных свойств породы (на момент исследования диаметр кроны не должен быть выше 3 м), изначальное размещение на территории посадочных мест допускается: в ряду — 3 м, в междурядье — 4 м;

3) размещение кулисами культур кедр корейского осуществляется с чередованием их с кулисами из сопутствующих пород, обеспечивая создание микроклимата и противопожарной безопасности на площади;

4) удаление центрального проводника ствола применительно к исследуемой породе проводится с возраста прививки 15 лет;

5) под лесокультурную площадь используются черноземовидные почвы без учета уклона местности северной экспозиции.

Данное размещение позволяет с течением времени стимулировать вследствие группового размещения рост деревьев и соответствующее полноценное опыление на площади.

На территории «лесопарка» первые шишки по их следам на побегах зафиксированы спустя 8 лет после прививки в количестве 1–2 шт. Спустя 12 лет после прививки — их число на деревьях составляет 3–5 шт.

Поскольку семеношение с возраста 12 лет регулярное при среднем числе шишек 3 шт., массе полных семян в шишке 15 г, доле участия в семеношении продуцирующих деревьев 20 % и числе деревьев на единице площади с учетом отпада (10 %) на 1 га — 1125 шт., урожайность культур может составить ~10 кг полных «орешков».

Руководствуясь полученными результатами: при числе шишек на одно дерево 8 шт., массе полных семян в шишке 20 г и числе деревьев на единице площади в 1 га с учетом возможного отпада 1100 шт., доле участия в семеношении продуцирующих деревьев 70 %, с момента возраста прививки 25 лет можно получать урожай 123 кг «орешков».

Можно предположить, что в случае неурожая урожайность культур составит 7,5 кг полных «орешков» с 1 га при числе шишек на одно дерево 5 шт., массе полных семян в шишке 3 г, доле участия в семеношении продуцирующих деревьев 20 % и числе деревьев с учетом возможного отпада на единице площади в 1 га 1100 шт. По официальным данным, средняя орехопродуктивность кедра корейского за 10-летний период для кедровников долинных при полноте 0,8–1,0 и доли кедра в составе древостоя 60...80 % при возрасте 100...150 лет составляет 10 кг/га.

Средняя продуктивность в год обильного урожая больше средней в 3,6 раза (36 кг), в год среднего урожая — в 1,2 раза (12 кг), а в год слабого урожая меньше в 2–3 раза (5 кг) [21].

Выводы

Проведенные исследования по семеношению кедра корейского на территории лесостепной зоны Воронежской обл. указывают на полное соответствие процессов его жизнедеятельности условиям интродукции и, соответственно, на его высокую перспективность выращивания в данных условиях с получением как лесоводственно, так и экономического эффекта.

Список литературы

- [1] Бобров Е.Г. Лесообразующие хвойные СССР. Л.: Наука, 1978. 189 с.
- [2] Великов А.В., Потенко В.В. Генетические ресурсы сосны корейской на Дальнем Востоке России: теоретические основы и прикладные аспекты. М.: Наука, 2006. 174 с.
- [3] Фэнсян С., Чженьчжоу Л., Хайбо Д., Мэйин Г. Технологии выращивания орехоплодных на примере сосны корейской в полусасушливых районах Северо-Востока Китая // Охрана и рациональное использование лесных ресурсов: Материалы X Междунар. форума (Благовещенск, 5–6 июня 2019 г.), в 2 ч., ч.1. Благовещенск: Изд-во Дальневосточного гос. аграрного ун-та, 2019. С. 166–171.
- [4] Кабанов Н.Е. Хвойные деревья и кустарники Дальнего Востока. М.: Наука, 1977. 175 с.
- [5] Дроздов И.И., Дроздов Ю.И. Лесная интродукция. М.: МГУЛ, 2005. 136 с.
- [6] Ирошников А.И., Твеленев М.В. Изучение генофонда, интродукции и селекции кедровых сосен // Лесоведение, 2001. № 4. С. 62–68.
- [7] Кузнецова Г.В. Рост, состояние и развитие кедровых сосен в географических культурах на юге Красноярского края // Хвойные бореальной зоны, 2010. Т. XXVII. № 1–2. С. 102–107.

- [8] Никитенко Е.А. Лесоводственные аспекты интенсификации воспроизводства кедр корейского (*Pinus Koraiensis* (Siebold et Zucc.)) на Дальнем Востоке: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Уссурийск, 2010. 26 с.
- [9] Гринев А.Н., Мамедова Л.С. К вопросу о методике изучения состояния лесных культур кедр корейского на юге Приморского края // Аграрный вестник Приморья, 2014. № 1. С. 51–54.
- [10] Лукин А.В. Основные итоги интродукции видов рода *Pinus* в Центрально-Черноземных областях // Генетика, селекция и интродукция лесных пород: сб. науч. трудов. Вып. 1. Воронеж: Изд-во Центрального научно-исследовательского института лесной генетики и селекции, 1974. С. 101–104.
- [11] Миронов В.В. Экология хвойных пород при искусственном лесовозобновлении. М.: Лесная пром-сть, 1977. 232 с.
- [12] Левин С.В., Пашенко В.И. Лесоводственно-биологические особенности сосны кедровой корейской при ее интродукции на территории Центрально-Черноземного региона России // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2019. № 4 (44). С. 80–91.
- [13] Левин С.В., Пашенко В.И. Перспективы интродукции вида сосны кедровой корейской в защитных лесах малолесной зоны европейской части России // Сохранение лесных генетических ресурсов. Материалы V Междунар. конф.-совещ. ГНПО НПЦ Национальной академии наук Беларуси по биоресурсам, Институт леса Национальной академии наук Беларуси, Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь, Институт леса Национальной академии наук Беларуси, Гомель, 02–07 октября 2017 г. Гомель: ООО Колордрук, 2017. С. 111–114.
- [14] Левин С.В. Адаптация кедр корейского при интродукции в условиях лесостепной зоны ЦЧР // Наука — лесному хозяйству Севера. Сб. науч. трудов ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» / под ред. Н.А. Демидовой. Архангельск: Изд-во Северного науч.-исслед. института лесного хозяйства, 2019. С. 211–221.
- [15] Левин С.В. Развитие кедр корейского при интродукции в условиях лесостепной зоны Центрально-Черноземного района (ЦЧР) России // Охрана и рациональное использование лесных ресурсов. Материалы X Междунар. Форума. Дальневосточный государственный аграрный университет; Управление лесного и степного хозяйства округа г. Хэйхэ, провинции Хэйлунцзян (КНР); Министерство лесного хозяйства и пожарной безопасности Амурской области, Благовещенск — Хэйхэ, 05–06 июня 2019 г. Благовещенск: Изд-во ДальГАУ, 2019. С. 93–97.
- [16] Некрасов В.Н. Основы семеноведения древесных растений при интродукции. М.: Наука, 1973. 276 с.
- [17] Петров М.Ф. Кедровые леса и их использование. М.: Гослесбумиздат, 1961. 131 с.
- [18] Кречетова Н.В., Емлевская А.Т., Сенчукова Т.В., Штейнникова В.И. Семена и плоды деревьев Дальнего Востока. М.: Лесная пром-сть, 1972. 80 с.
- [19] Усенко Н.В. Деревья, кустарники и лианы Дальнего Востока. Хабаровск: Хабаровское книжное изд-во, 1984. 272 с.
- [20] Орехова Т.П. Семена дальневосточных деревянистых растений (морфология, анатомия, биохимия и хранение). Владивосток: Дальнаука, 2005. 161 с.
- [21] Руководство по организации и ведению хозяйства в кедрово-широколиственных лесах Дальнего Востока (кедр корейский). Хабаровск: Изд-во ДальНИИЛХ, 2003. 161 с.
- [22] Кузнецова Г.В. Рост и сохранность географических культур кедр сибирского и кедр корейского в Красноярском крае // Проблемы кедр: сб. науч. трудов. Вып. 4. Томск: Изд-во Томского науч. центра СО АН СССР, 1990. С. 78–82.
- [23] Альбенский А.Б. Разведение быстрорастущих и ценных деревьев и кустарников. М.: Сельхозгиз, 1940. 223 с.
- [24] Кречетова Н.В., Штейнникова В.И. Плодоношение кедр корейского / под ред. К.П. Соловьева. Хабаровск: Хабаровское книжное изд-во, 1963. 60 с.

Сведения об авторе

Левин Сергей Валерьевич — канд. с.-х. наук, науч. сотр. отдела опытных испытаний ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии», leslesovik63@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.08.2022.

Одобрено после рецензирования 07.11.2022.

Принята к публикации 21.03.2023.

KOREAN CEDAR (*PINUS KORAIENSIS* SIEB. ET ZUCC.) SEED PRODUCTION DURING ITS INTRODUCTION IN VORONEZH REGION FOREST-STEPPE

S.V. Levin

All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, 105, Lomonosov st., 394087, Voronezh, Russia
leslesovik63@yandex.ru

The paper presents the research materials of Korean cedar introduction in the forest-steppe conditions of Voronezh region. Full compliance of its vital processes with the conditions of introduction is determined. The influence of the factor of tree placement in the territory — free or as part of other conifers on seed production — has been established. The increase of trees yield was revealed when artificial pollination was applied to them in comparison with non-pollinated trees. Attention was drawn to the moment of formation of multi-top tree crowns by formation of «empty» cone at the top of the central conductor. The high perspectivity of the breed cultivation in these conditions with obtaining both silvicultural and economic effect is pointed out. The forecast of yield of Korean pine crops under certain conditions of technology is given. Taking them into account in the creation of Korean pine seed object from 1 hectare of cultivated area it is possible to obtain the yield from the moment of grafting age in 25 years in the amount of 123 kg of nuts.

Keywords: introduction, Korean cedars (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) and Siberian cedars (*Pinus sibirica* du Tour.), grafted and ungrafted trees, cones, seed production, productivity

Suggested citation: Levin S.V. *Semenoshenie kedra koreyskogo (Pinus koraiensis Sieb. et Zucc.) pri ego introduktsii v usloviyakh lesostepi Voronezhskoy oblasti* [Korean cedar (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) seed production during its introduction in voronezh region forest-steppe]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 36–47. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-36-47

References

- [1] Bobrov E.G. *Lesobrazuyushchie khvoynnye SSSR* [Forest-forming conifers of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1978, 189 p.
- [2] Velikov A.V., Potenko V.V. *Geneticheskie resursy sosny koreyskoy na Dal'nem Vostoke Rossii: teoreticheskie osnovy i prikladnye aspekty* [Korean pine genetic resources in the Russian Far East: theoretical foundations and applied aspects]. Moscow: Nauka, 2006, 174 p.
- [3] Fisyans S., Chzhen'chzhou L., Khaybo D., Meyin G. *Tekhnologii vyrashchivaniya orekhoplodnykh na primere sosny koreyskoy v poluzasushlivykh rayonakh severo-vostoka Kitaya* [Technologies for growing walnuts on the example of Korean pine in semi-arid regions of northeast China]. *Okhrana i ratsional'noe ispol'zovanie lesnykh resursov: mater. X mezhdunar. foruma (Blagoveshchensk, 5–6 iyunya 2019 g.)* [Protection and rational use of forest resources: X int. forum (Blagoveshchensk, June 5–6, 2019), at 2 p., part 1. Blagoveshchensk: Publishing House of the Far Eastern State Agrarian University, 2019, pp. 166–171.
- [4] Kabanov N.E. *Khvoynnye derev'ya i kustarniki Dal'nego Vostoka* [Coniferous trees and shrubs of the Far East]. Moscow: Nauka, 1977, 175 p.
- [5] Drozdov I.I., Drozdov Yu.I. *Lesnaya introduktsiya* [Forest introduction]. Moscow: MGUL, 2005, 136 p.
- [6] Iroshnikov A.I., Tvelenev M.V. *Izuchenie genofonda, introduktsii i selektsii kedrovyykh sosen* [Study of the gene pool, introduction and selection of cedar pines]. *Lesovedenie*, 2001, no. 4, pp. 62–68.
- [7] Kuznetsova G.V. *Rost, sostoyanie i razvitie kedrovyykh sosen v geograficheskikh kul'turakh na yuge Krasnoyarskogo kraya* [Growth, condition and development of cedar pines in geographical crops in the south of the Krasnoyarsk Territory]. *Khvoynnye boreal'noy zony* [Coniferous boreal zone], 2010, v. XXVII. no. 1–2, pp. 102–107.
- [8] Nikitenko E.A. *Lesovodstvennye aspekty intensivatsii vosproizvodstva kedra koreyskogo (Pinus Koraiensis (Siebold et Zucc.)) na Dal'nem Vostoke* [Silvicultural aspects of the intensification of the reproduction of the Korean pine (*Pinus Koraiensis* (Siebold et Zucc.)) in the Far East]. Diss. Cand. Sci. (Agric.) 06.03.02. Ussuriysk, 2010, 26 p.
- [9] Gridnev A.N., Mamedova L.S. *K voprosu o metodike izucheniya sostoyaniya lesnykh kul'tur kedra koreyskogo na yuge Primorskogo kraya* [On the question of the methodology for studying the state of Korean pine forest cultures in the south of Primorsky Krai]. *Agrarnyy vestnik Primor'ya* [Agrarian Bulletin of Primorye], 2014, no. 1, pp. 51–54.
- [10] Lukin A.V. *Osnovnye itogi introduktsii vidov roda Pinus v Tsentral'no-chernozemnykh oblastyakh* [The main results of the introduction of species of the genus *Pinus* in the Central Chernozem Regions]. *Genetika, selektsiya i introduktsiya lesnykh porod: sb. nauch. trudov. Vyp. 1* [Genetics, selection and introduction of forest species: collection of articles. scientific works], iss. 1. Voronezh: Central Research Institute of Forest Genetics and Breeding, 1974, pp. 101–104.
- [11] Mironov V.V. *Ekologiya khvoynnykh porod pri iskusstvennom lesovozobnovlenii* [Ecology of coniferous species during artificial reforestation]. Moscow: *Lesnaya promyshlennost'*, 1977, 232 p.
- [12] Levin S.V., Pashchenko V.I. *Lesovodstvenno-biologicheskie osobennosti sosny kedrovoy koreyskoy pri ee introduktsii na territorii Tsentral'no-Chernozemnogo regiona Rossii* [Silvicultural and biological features of the Korean cedar pine during its introduction on the territory of the Central Black Earth region of Russia]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature management], 2019, no. 4 (44), pp. 80–91.
- [13] Levin S.V., Pashchenko V.I. *Perspektivy introduktsii vida sosny kedrovoy koreyskoy v zashchitnykh lesakh malolesnoy zony evropeyskoy chasti Rossii* [Prospects for the introduction of the Korean pine species in the protective forests of the sparsely

- forested zone of the European part of Russia]. Sokhraneniye lesnykh geneticheskikh resursov. Mater. V Mezhdunarodnoy konferentsii-soveshchaniya GNPO NPTs Natsional'noy akademii nauk Belarusi po bioresursam, Institut lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi, Ministerstvo lesnogo khozyaystva Respubliki Belarus', Institut lesa Natsional'noy akademii nauk Belarusi [Preservation of Forest Genetic Resources. Mater. V International Conference-Meeting of the SNPO SPC of the National Academy of Sciences of Belarus on Bioresources, Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus], Gomel, October 02–07, 2017. Gomel: Kolordruk, 2017, pp. 111–114.
- [14] Levin S.V. *Adaptatsiya kedra koreyskogo pri introduktsii v usloviyakh lesostepnoy zony TsChR* [Adaptation of the Korean pine during introduction in the conditions of the forest-steppe zone of the Central Chernozem Region]. Nauka — lesnomu khozyaystvu Severa. Sb. nauch. trudov FBU «Severnny nauchno-issledovatel'skiy institut lesnogo khozyaystva» [Science to the forestry of the North. Sat. scientific Proceedings of the FBU «Northern Research Institute of Forestry»]. Ed. N.A. Demidova. Arkhangel'sk: Northern Research Institute of Forestry, 2019, pp. 211–221.
- [15] Levin S.V. *Razvitiye kedra koreyskogo pri introduktsii v usloviyakh lesostepnoy zony Tsentral'no-Chernozemnogo rayona (TsChR) Rossii* [Development of Korean pine during introduction in the conditions of the forest-steppe zone of the Central Chernozem region (TsChR) of Russia]. Okhrana i ratsional'noe ispol'zovanie lesnykh resursov. Materialy X Mezhdunarodnogo Foruma. Dal'nevostochnyy gosudarstvennyy agrarnyy universitet; Upravleniye lesnogo i stepnogo khozyaystva okruga g. Kheykhe, provintsii Kheylyuntszyan (KNR); Ministerstvo lesnogo khozyaystva i pozhar moy bezopasnosti Amurskoy oblasti [Protection and rational use of forest resources. Materials of the X International Forum. Far Eastern State Agrarian University; Department of Forestry and Steppe Economy of Heihe District, Heilongjiang Province (PRC); Ministry of Forestry and Fire Safety of the Amur Region], Blagoveshchensk — Heihe, June 05–06, 2019 Blagoveshchensk: DalGAU, 2019, pp. 93–97.
- [16] Nekrasov V.N. *Osnovy semenovedeniya drevesnykh rasteniy pri introduktsii* [Fundamentals of seed science of woody plants during introduction]. Moscow: Nauka, 1973, 276 p.
- [17] Petrov M.F. *Kedrovye lesa i ikh ispol'zovanie* [Cedar forests and their use]. Moscow–Leningrad: Goslesbumizdat, 1961, 131 p.
- [18] Krechetova N.V., Emlevskaya A.T., Senchukova T.V., Shteynikova V.I. *Semena i plody derev'ev Dal'neg Vostoka* [Seeds and fruits of trees of the Far East]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1972, 80 p.
- [19] Usenko N.V. *Derev'ya, kustarniki i liany Dal'neg Vostoka* [Trees, shrubs and lianas of the Far East]. Khabarovsk: Khabarovsk book publishing house, 1984, 272 p.
- [20] Orekhova T.P. *Semena dal'nevostochnykh derevyanistykh rasteniy (morfologiya, anatomiya, biokhimiya i khraneniye)* [Seeds of Far Eastern woody plants (morphology, anatomy, biochemistry and storage)]. Vladivostok: Dalnauka, 2005, 161 p.
- [21] *Rukovodstvo po organizatsii i vedeniyu khozyaystva v kedrovo-shirokolistvennykh lesakh Dal'neg Vostoka (kedr koreyskiy)* [Guidelines for the organization and management of the economy in the cedar-deciduous forests of the Far East (Korean cedar)]. Khabarovsk: DalNIILKh, 2003, 161 p.
- [22] Kuznetsova G.V. *Rost i sokhrannost' geograficheskikh kul'tur kedra sibirskogo i kedra koreyskogo v Krasnoyarskom krae* [Growth and preservation of geographical cultures of Siberian stone pine and Korean stone pine in the Krasnoyarsk Territory]. Problemy kedra: sb. nauch. trudov. Vyp. 4 [Problems of Siberian stone pine: Sat. scientific works. Issue. 4]. Tomsk: Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1990, pp. 78–82.
- [23] Al'benskiy A.B. *Razvedeniye bystrorastushchikh i tsennykh derev'ev i kustarnikov* [Cultivation of fast-growing and valuable trees and shrubs]. Moscow: Selkhozgiz, 1940, 223 p.
- [24] Krechetova N.V., Shteynikova V.I. *Plodonosheniye kedra koreyskogo* [Fruiting of the Korean cedar]. Ed. K.P. Solovyova. Khabarovsk: Khabarovsk Book Publishing House, 1963, 60 p.

Author's information

Levin Sergey Valer'evich — Cand. Sci. (Agriculture), Researcher of the Experimental Testing Department of the All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, leslesovik63@yandex.ru

Received 17.08.2022.

Approved after review 07.11.2022.

Accepted for publication 21.03.2023.

ВЛИЯНИЕ КЛЕНА ЯСЕНЕЛИСТНОГО (*ACER NEGUNDO* L.) НА ЕСТЕСТВЕННОЕ ВОЗОБНОВЛЕНИЕ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В БАРНАУЛЬСКОМ ЛЕНТОЧНОМ БОРУ

А.А. Малиновских

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет», Россия, 656049, Алтайский край, г. Барнаул,
пр. Красноармейский, д. 98

almaa1976@yandex.ru

Рассмотрено влияние клена ясенелистного (*Acer negundo* L.) на естественное возобновление сосны обыкновенной в Барнаульском ленточном бору в разных типах лесорастительных условий. Установлено, что клен ясенелистный образует густой сомкнутый подросток высотой до 10 м во влажных лесорастительных условиях (A_3), а в свежих лесорастительных условиях (A_2) встречается только единично. Определена сомкнутость: подростка из клена в травяном бору — 0,8...1,0 ед., подростка с преобладанием местных видов растений (рябины сибирской, ивы козьей) в травяном бору — не выше 0,5 ед., в свежем бору — не выше 0,2...0,4 ед. Установлено, что в травяном бору с подростком из клена относительная освещенность составляет не более 7,9 %, тогда как в травяном и свежем бору с подростком из местных видов 29,5...47,9 %. Определена густота подростка сосны в свежем бору с подростком из местных видов — 7,5...17,5 тыс. шт./га, что больше в 3–7 раз, чем в травяном бору с подростком из местных видов. Выявлена тесная положительная связь между относительной освещенностью под пологом леса и густотой подростка ($r = 0,830$), поэтому клен ясенелистный считается агрессивной нежелательной породой, лимитирующей освещенность — важнейший экологический фактор, что вызывает исчезновение подростка сосны под пологом леса.

Ключевые слова: ленточные боры, подросток, сосна обыкновенная, клен ясенелистный, освещенность, полог леса, подросток

Ссылка для цитирования: Малиновских А.А. Влияние клена ясенелистного (*Acer negundo* L.) на естественное возобновление сосны обыкновенной в Барнаульском ленточном бору // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 48–56. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-48-56

Успешность процесса естественного возобновления леса зависит от многих факторов, в частности, от структуры насаждения, породного состава, периодичности плодоношения, типа лесорастительных условий и типа леса, хозяйственных мероприятий [1–3]. Вопросы экологии и географии естественного возобновления применительно к сосновым лесам, к которым относятся ленточные боры Западной Сибири, изучены подробно [4–7].

Естественное возобновление сосны обыкновенной в ленточных борах Западной Сибири изучалось неоднократно [8–11]. Наиболее подробное изучение вопросов возобновления и лесовосстановления касается южной и средней частей ленточных боров Западной Сибири, которые подвержены крупным лесным пожарам и требуют проведения мероприятий по воспроизводству. В северной части ленточных боров, расположенной в подзоне южной лесостепи, изучение естественного возобновления охватывает лишь некоторые аспекты [12, 13], хотя именно здесь происходит активное внедрение в естественные лесные сообщества агрессивного инвазионного расте-

ния — клена ясенелистного (*Acer negundo* L.). Он образует густой подросток, способствует изменению микроклимата, влияет на структуру насаждений, препятствует возобновлению сосны, а в отдельных случаях замещает ее [14, 15]. Проблемы внедрения инвазионных видов в естественные и нарушенные местообитания активно изучаются как в России [16–18], так и за рубежом [19–25], однако в отношении ленточных боров Западной Сибири влияние на процесс естественного возобновления главной породы остается слабо изученным.

В связи с этим рассмотрим состав и структуру лесных насаждений в разных типах лесорастительных условий, естественное возобновление сосны обыкновенной, влияние подростка клена ясенелистного на уровень освещенности насаждений под пологом и на естественное возобновление сосны обыкновенной, а также оценим успешность лесовозобновительного процесса.

Цель работы

Цель работы — изучение процесса естественного возобновления сосны обыкновенной в разных типах лесорастительных условий под пологом лесных насаждений, в том числе при

Т а б л и ц а 1

Таксационная характеристика сосновых насаждений

Taxation characteristics of pinetums

Номер постоянной пробной площади	Состав древостоя	Элемент леса	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Класс бонитета	Полнота, ед.	Запас на 1 га, м ³
Травяной бор с подлеском преимущественно из местных видов растений								
1	7СЗС + С + Б	С	95	25	28	II	0,7	290
		С	120	27	40			
		С	150					
		Б	90					
2	6СЗС1Б	С	90	25	28	II	0,6	250
		С	120	28	48			
		Б	90	25	30			
Травяной бор с подлеском из клена ясенелистного								
3	5С4С1Б	С	130	30	48	I	0,5	230
		С	95	26	30			
		Б	95	26	32			
4	9С1Б + С	С	88	26	28	I	0,7	290
		Б	120	26	30			
		С						
5	6СЗС1Б + С	С	130	28	48	II	0,5	220
		С	95	26	32			
		Б	95	26	32			
		С	60					
6	6СЗС1Б + Б	С	130	28	48	II	0,5	220
		С	95	26	36			
		Б	95	25	32			
		Б	60					
Свежий бор с подлеском преимущественно из местных видов растений								
7	7С2С1С	С	95	23	26	II	0,8	280
		С	70	18	18			
		С	120	26	44			
8	6СЗС1С	С	85	20	22	III	0,6	200
		С	130	25	44			
		С	35	14	14			
9	10С + С	С	75	21	20	II	0,8	260
		С	100					
10	8С2С + Б + С	С	85	21	22	III	0,9	310
		С	110	24	36			
		Б	85					
		С	60					

Примечание. Возраст, высота и диаметр даны по элементам леса.

обильном присутствии клена ясенелистного в северной части Барнаульского ленточного бора.

Материалы и методы

Объект исследования — сосновые насаждения в лесном фонде Барнаульского лесничества Алтайского края, расположенные в черте г. Барнаула. Лесной фонд Барнаульского лесничества занимает площадь 26 049 га и полностью отнесен к защитным лесам. Более половины лесного фонда лесничества (15 652 га, или 60,1 %) отнесено к зеленым и лесопарковым зонам. Леса Барнаульского лесничества приурочены к недавно выделенному «Алтае-Новосибирскому району лесостепей и ленточных боров» лесостепной зоны [26].

Изученные сосновые насаждения относятся к двум наиболее распространенным в северной части ленточных боров Западной Сибири типам леса: свежий бор — Свб (свежие лесорастительные условия — А₂), травяной бор — Трб (влажные лесорастительные условия — А₃). Сбор полевого материала проводили на постоянных пробных площадях (ППП), заложенных в разновозрастных сосновых насаждениях I–III класса бонитета (табл. 1).

Таксация на ППП выполнена следующим образом (пример для ППП 1, состав 7СЗС+С+Б):

– 70 % по запасу представлено деревьями сосны 95-летнего возраста (ср. высота 25 м, ср. диаметр 28 см);

– 30 % по запасу представлено деревьями сосны 120-летнего возраста (27 м, 40 см);

Единично участвуют в составе древостоя сосна в возрасте 150 лет, береза в возрасте 90 лет (диаметр и высота для них не указаны, так как их вклад в запас на 1 га крайне мал, важнее показать их присутствие).

Постоянные пробные площади были подобраны и заложены в июле 2018 г., размер каждой составил 0,25 га. Все взрослые деревья пронумерованы, номера указаны краской, изучены их лесоводственно-таксационные показатели. Естественное возобновление сосны обыкновенной изучалось методом учетных площадок (размер 2×2 м), которые закладывались равномерным способом в количестве 25–30 шт. Для изучения видового состава древостоя, подлеска, подроста, живого напочвенного покрова (ЖНП) выполняли полные геоботанические описания (25×25 м²) лесных участков на ППП [27]. Списки видов включают в себя только высшие сосудистые растения. Названия видов на латинском и русском языках приведены по С.К. Черепанову [28]. Замеры освещенности выполняли люксметром Ю-116 в полуденные часы на высоте 1,3...1,5 м в 20-кратной повторности вдоль ходовых линий через 5 м [29].

Результаты исследования

Все изученные участки леса на ППП имеют хорошо развитый ЖНП, в состав которого входят виды растений, характерные для влажных и свежих лесорастительных условий. Во влажных лесорастительных условиях развит ЖНП, состоящий из многолетних травянистых растений, в свежих — ЖНП сформирован кустарничками с участием многолетних трав и зеленых мхов. Однако состав доминантов и субдоминантов ЖНП указывает на постоянство лесорастительных условий и отсутствие критических нарушений лесной среды со стороны рекреантов и лесопользователей (табл. 2).

Наиболее обильно ЖНП развит на ППП № 1 № 2, на которых в травяном бору развит подлесок средней густоты из местных видов (рябины сибирской, ивы козьей и др.). Число видов здесь достигает 53 на 625 м², что в 1,8...2,2 раза выше, чем в травяном бору с густым подлеском из клена ясенелистного и в 1,2...1,7 раза выше, чем в свежем бору с подлеском средней густоты из местных видов. Густой подлесок из клена препятствует росту многих светолюбивых растений, к числу которых относятся опушечные (*Solidago virgaurea* L., *Artemisia gmelinii* Web. и др.) луговые

Т а б л и ц а 2

Краткая характеристика живого напочвенного покрова на постоянных пробных площадях

Brief characteristic of the live ground cover on permanent plots

Номер постоянной пробной площади	Число видов, шт.	Общее проективное покрытие, %	Высота травяного яруса живого напочвенного покрова, см		Преобладающие виды живого напочвенного покрова
			средняя	максимальная	
Травяной бор с подлеском преимущественно из местных видов растений					
1	53	80	25	120	<i>Carex macroura</i> Meinsch., <i>Rubus saxatilis</i> L., <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth
2	52	65	25	110	<i>Carex macroura</i> , <i>Brachypodium pinnatum</i> (L.) Beauv., <i>Calamagrostis arundinacea</i>
Травяной бор с подлеском из клена ясенелистного					
3	29	70	40	150	<i>Carex macroura</i> , <i>Glechoma hederacea</i> L.
4	28	45	40	150	<i>Carex macroura</i>
5	27	40	25	80	<i>Carex macroura</i>
6	24	40	22	60	<i>Carex macroura</i>
Свежий бор с подлеском преимущественно из местных видов растений					
7	45	70	20	100	<i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Iris ruthenica</i> Ker-Gawl., <i>Rubus saxatilis</i>
8	41	45	20	120	<i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Iris ruthenica</i> , <i>Carex ericetorum</i> Poll.
9	32	45	22	110	<i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Iris ruthenica</i>
10	45	25	20	100	<i>Chimaphila umbellata</i> (L.) Barton, <i>Carex ericetorum</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Iris ruthenica</i>

Характеристика подлеска на постоянных пробных площадях

Undergrowth characteristics on permanent plots

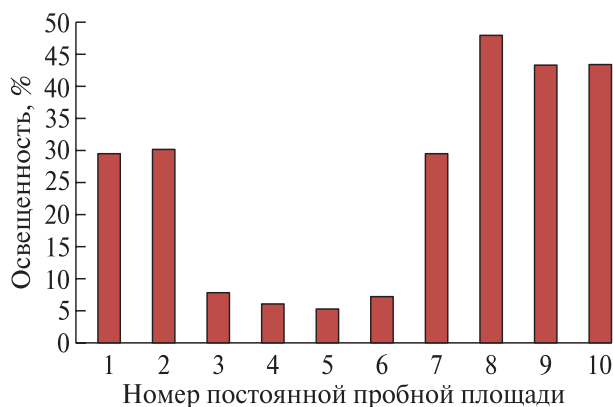
Номер постоянной пробной площади	Число видов на 625 м ² , шт.	Сомкнутость, ед.	Густота, шт./га	Высота, см		Преобладающие виды
				средняя	максимальная	
Травяной бор с подлеском преимущественно из местных видов растений						
1	19	0,5	728	3,5	4,1	<i>Sorbus sibirica</i> Hedl., <i>Salix caprea</i> L., <i>Rubus idaeus</i> L.
2	12	0,5	592	4,2	5,3	<i>Sorbus sibirica</i> , <i>Salix caprea</i> , <i>Rubus idaeus</i>
Травяной бор с подлеском из клена ясенелистного						
3	6	1,0	362	7,5	9,4	<i>Acer negundo</i>
4	7	0,9	325	7,2	10,2	<i>Acer negundo</i>
5	11	0,8	254	6,5	9,3	<i>Acer negundo</i>
6	8	1,0	296	7,6	9,5	<i>Acer negundo</i>
Свежий бор с подлеском преимущественно из местных видов растений						
7	12	0,3	485	4,0	6,2	<i>Sorbus sibirica</i>
8	12	0,3	420	4,2	5,5	<i>Sorbus sibirica</i>
9	13	0,4	550	4,5	6,5	<i>Sorbus sibirica</i>
10	8	0,2	405	3,8	5,4	<i>Sorbus sibirica</i>

(*Poa pratensis* L., *Lathyrus pratensis* L. и др.) и сорные виды (*Erigeron Canadensis* L., *Taraxacum officinale* L. и др.), способствуя поселению теневыносливых видов как лесных (*Viola canina* L., *Lilium pilosiusculum* (Freyn) Miscz.), так и сорных (*Lamium album* L., *Arabis pendula* L. и др.).

Подлесок на ППП характеризуется разными видовым составом, густотой, высотой, сомкнутостью. Параметры подлеска «отражают» тип лесорастительных условий, с одной стороны, с другой — возможность инвазии чужеродных кустарниковых и древесных видов в лесные сообщества Барнаульского ленточного бора (табл. 3).

Видовой состав подлеска на участках леса в свежем и травяном бору определяет его параметры и свойства. Во влажных лесорастительных условиях число видов в составе подлеска — от 6 до 19, что несколько выше, чем в свежих лесорастительных условиях (8...12). Важным лесоводственным показателем является сомкнутость подлеска, которая в травяном бору заметно выше — 0,5...1,0, особенно в насаждениях с подлеском из клена ясенелистного, нежели в свежем бору, где сомкнутость низкая — 0,2...0,4. Густота подлеска не связана напрямую с сомкнутостью, которая определяется чаще всего общими размерами растений и развитием их крон, однако являясь стороной обилия, указывает на условия местопроизрастания. Густота подлеска в травяном бору выше, чем в свежем бору, кроме участков с кленом, который имеет среднюю и максимальную высоту больше, нежели подлесок из местных видов.

Кроме клена ясенелистного нами обнаружено значительное число заносных кустарниковых



Освещенность под пологом лесных насаждений на постоянных пробных площадях

Canopy illumination on permanent plots

и древесных видов растений, не характерных для дендрофлоры ленточных боров. Среди них *Fraxinus pennsylvanica* Marsh., *Cotoneaster lucidus* Schlecht., *Lonicera edulis* Turcz. ex Freyn, *Malus baccata* (L.) Borkh., *Tilia cordata* Mill. и др. Поскольку изученные нами участки расположены в черте г. Барнаула и давно подвержены заносу тех или иных видов, то их участие в составе подлеска очень заметно. В травяном бору с подлеском из преимущественно местных видов доля заносных видов варьирует от 33,3 до 52,6 %. В травяном бору с сомкнутым подлеском из клена ясенелистного присутствие заносных видов составляет 28,6...45,5 %, в свежем бору 25,0...50,0 % общего числа.

Относительная освещенность под пологом лесных насаждений в травяном и свежем бору варьирует в значительных пределах (рисунок).

Т а б л и ц а 4

Распределение подроста сосны по группам высот, шт./га
Distribution of pine undergrowth by height groups, units/ha

Номер постоянной пробной площади	Всходы	Группы высот			Итого подрост
		До 0,5 м	0,6...1,5 м	Более 1,5 м	
Травяной бор с подлеском преимущественно из местных видов растений					
1	200	4500	1000	200	5700
2	–	1000	1300	200	2500
Травяной бор с подлеском из клена ясенелистного					
3	–	–	–	–	–
4	–	–	–	–	–
5	–	–	–	–	–
6	–	–	–	–	–
Свежий бор с подлеском преимущественно из местных видов растений					
7	2800	8850	2650	500	12 000
8	16 400	5600	1680	200	7480
9	200	9250	5760	2500	17 510
10	4400	13 000	800	–	13 800

Т а б л и ц а 5

Распределение подроста сосны по группам качества, шт./га
Distribution of pine undergrowth by quality groups, units/ha

Номер постоянной пробной площади	Всходы	Группа качества			Итого подрост
		Благонадежная	Сомнительная	Неблагонадежная	
Травяной бор с подлеском преимущественно из местных видов растений					
1	200	–	2400	3300	5700
2	–	600	900	1000	2500
Травяной бор с подлеском из клена ясенелистного					
3	–	–	–	–	–
4	–	–	–	–	–
5	–	–	–	–	–
6	–	–	–	–	–
Свежий бор с подлеском преимущественно из местных видов растений					
7	2800	1030	9450	1520	12 000
8	16 400	150	6160	1170	7480
9	200	8080	4270	5160	17 510
10	4400	8000	5450	350	13 800

На изученных участках в травяном бору с подлеском преимущественно из местных видов растений средней (ППП № 1, 2) и в свежем бору с подлеском малой сомкнутости (ППП № 7–10) освещенность находится в пределах 29,5...47,9 % относительно открытого места. В травяном бору с подлеском из клена ясенелистного с высокой сомкнутостью (ППП № 4–6) освещенность составляет не более 7,9 % относительно открытого места. Коэффициент вариации освещенности в травяном бору с подлеском из местных видов составляет 52,5...81,5 %, в травяном бору с подлеском из клена 41,5...46,8 %, в свежем бору — 60,2...98,8 %. Жизнеспособный подрост сосны для устойчивого роста и развития должен

получать под пологом леса не менее 16...20 % относительной освещенности [29, 30].

Естественное возобновление сосны обыкновенной на изучаемых участках леса в травяном и свежем бору происходит неравномерно. На ППП в травяном бору с сомкнутым подлеском из клена ясенелистного возобновление сосны отсутствует (табл. 4).

В условиях травяного и свежего бора преобладает подрост высотой до 0,5 м, его доля варьирует в травяном бору в пределах 40,0...78,9 %, в свежем бору — 52,8...94,2 %. Преобладание группы мелкого подроста указывает в целом на успешный возобновительный процесс под пологом древостоев, кроме ППП № 3–6, где нет естественного возобновления.

**Оценка успешности естественного возобновления сосны обыкновенной
в свежем и травяном бору**

Assessment of natural regeneration success of Scots pine in fresh and herbaceous forests

Номер посто- янной пробной площади	Густота подроста, тыс. шт./га	Оценка		Мероприятия по лесовосстановлению
		По густоте	По встречаемости	
Травяной бор с подлеском преимущественно из местных видов растений				
1	5,7	Средней густоты	Неравномерное	Сохранение подроста
2	2,5	Средней густоты	Неравномерное	Сохранение подроста
Травяной бор с подлеском из клена ясенелистного				
3	–	–	–	Искусственное лесовосстановление
4	–	–	–	Искусственное лесовосстановление
5	–	–	–	Искусственное лесовосстановление
6	–	–	–	Искусственное лесовосстановление
Свежий бор с подлеском преимущественно из местных видов растений				
7	12,0	Густой	Равномерное	Сохранение подроста
8	7,5	Средней густоты	Равномерное	Сохранение подроста
9	17,5	Очень густой	Равномерное	Сохранение подроста
10	13,8	Очень густой	Равномерное	Сохранение подроста

Жизненное состояние подроста сосны на изученных участках леса неравномерное, что связано с конкуренцией со стороны древостоя, подлеска, ЖНП, формирование которых зависит от типа лесорастительных условий и типа леса (табл. 5).

На изученных участках в травяном бору преобладает неблагонадежный подрост — 40,0...57,9 %, это связано с его угнетением со стороны древостоя, подлеска и ЖНП. В свежем бору на двух участках (ППП № 7, 8) преобладает сомнительный подрост — 78,8...82,4 %, что связано с высокой полнотой древостоя и угнетением подроста в биогруппах. На втором месте находится неблагонадежный подрост — 12,7...15,6 %.

Естественное возобновление сосны в изученных типах леса происходит по-разному, так как его ход зависит от нескольких факторов: экологических условий (увлажнения почвы, освещенности и др.), конкуренции со стороны ЖНП, подлеска и древостоя (табл. 6).

В травяном бору возобновление сосны успешно происходит только на двух из шести изученных участков. На участках леса — ППП № 1, 2 густота подроста сосны составляет 2,5...5,7 тыс. шт./га, что соответствует успешному естественному возобновлению леса. На участках леса — ППП № 3–6 возобновление сосны полностью отсутствует по причине высокосомкнутого подлеска из клена ясенелистного, который препятствует появлению всходов и подроста сосны.

В свежем бору, несмотря на меньшее количество влаги в почве, естественное возобновление сосны происходит заметно интенсивнее, чем в травяном бору. Причина этого кроется в уме-

ренно развитом травяно-кустарничковом ярусе и подлеске с низкой сомкнутостью. На этапе всходов и самосева сосновый подрост в свежем бору угнетается меньше, чем на этих же этапах в травяном бору. Густота подроста сосны в свежем бору составляет 7,5...17,5 тыс. шт./га, что в 3–7 раз больше, чем в травяном бору. Между относительной освещенностью под пологом леса и густотой подроста имеется тесная положительная связь ($r = 0,830$). Таким образом, основным фактором, определяющим успешность естественного возобновления главной породы, являются строение насаждений и тип лесорастительных условий.

Выводы

1. Внедрение клена ясенелистного в разновозрастные сосновые насаждения северной части ленточных боров происходит неравномерно и зависит от исходного типа лесорастительных условий. Наиболее активно клен расселяется, образуя сомкнутый подлесок во влажных лесорастительных условиях, которые в наибольшей степени соответствуют его экологическим и биологическим требованиям.

2. Клен ясенелистный формирует на отдельных участках в травяном бору подлесок с высокой сомкнутостью (0,8...1,0), что заметно выше, чем в травяном бору (0,5) и в свежем бору (0,2...0,4) с преобладанием в подлеске местных видов растений (рябины сибирской, ивы козьей).

3. Под полог насаждений с подлеском из клена ясенелистного поступает 5,4...7,9 % количества света от открытого места, а в лесных насажде-

ниях травяного и свежего бора с подлеском из местных видов относительная освещенность заметно выше и составляет 29,5...47,9 %.

4. Между относительной освещенностью под пологом леса и густотой подроста сосны имеется тесная положительная связь ($r = 0,830$). Успешное естественное возобновление сосны происходит в травяном и свежем бору на участках, где нет высокоствольного подлеска из клена ясенелистного.

5. Клен ясенелистный является опасной нежелательной древесной породой, способной полностью прерывать естественное возобновление главной породы (сосны) и в дальнейшем вытеснить ее полностью во влажных лесорастительных условиях северной части ленточных боров.

Список литературы

- [1] Калиниченко Н.П., Писаренко А.И., Смирнов Н.А. Лесовосстановление на вырубках. М.: Лесная пром-сть, 1973. 326 с.
- [2] Мелехов И.С. Биология, экология и география возобновления леса // Возобновление леса. М.: Колос, 1975. С. 4–22.
- [3] Писаренко А.И. Лесовосстановление. М.: Лесная пром-сть, 1977. 250 с.
- [4] Крылов Г.В. Леса Западной Сибири. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 256 с.
- [5] Луганская В.Д., Луганский Н.А. Некоторые экологические особенности возобновления сосны под пологом насаждений // Леса Урала и хозяйство в них, 1978. Вып. 11. С. 31–54.
- [6] Санников С.Н., Санникова Н.С. Экология возобновления сосны под пологом леса. М.: Наука, 1985. 152 с.
- [7] Санников С.Н. Экология и география естественного возобновления сосны обыкновенной. М.: Наука, 1992. 264 с.
- [8] Месоед И.Ю. Основные типы леса и естественное возобновление сосны в средней части зоны ленточных боров // Труды Лебяжинской ЗОНЛЮС. Свердловск; Москва: Гослестехиздат, 1934. Вып. 1. С. 50–72.
- [9] Грибанов Л.Н. Ленточные боры Алтайского края и Казахстана. М.: Сельхозгиз, 1954. 151 с.
- [10] Бугаев В.А., Косарев Н.Г. Лесное хозяйство ленточных боров Алтайского края. Барнаул: Алтайское кн. изд-во, 1988. 312 с.
- [11] Парамонов Е.Г. Хвойные на юге Западной Сибири. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2011. 329 с.
- [12] Ишутин Я.Н. Лесовосстановление на гарях в ленточных борах Алтая. Барнаул: Изд-во Алтайского ун-та, 2004. 114 с.
- [13] Зленко Л.В., Ключников М.В. Влияние низовых пожаров на возобновление сосны в Приобском левобережном районе Алтая. Красноярск: Изд-во СибГТУ, 2013. 115 с.
- [14] Терехина Т.А., Овчарова Н.В., Елесова Н.В. Биологическая и структурная оценка популяций клена ясенелистного

(*Acer negundo* L.) в Барнаульском ленточном бору // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии, 2020. Т. 19. № 2. С. 374–379.

- [15] Черная Книга флоры Сибири. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2016. 440 с.
- [16] Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. Черная книга флоры Средней России: чужеродные виды растений в экосистемах Средней России. М.: ГЕОС, 2010. 512 с.
- [17] Жуков Р.С., Ломоносова Л.М. Клен ясенелистный в городских лесах Москвы // Научное обозрение. Биологические науки, 2016. № 3. С. 49–50.
- [18] Зыкова Е.Ю., Эрст А.С. Находки некоторых редких и адвентивных видов растений в Сибири // Turczaninovia, 2012. Т. 15. № 4. С. 34–40.
- [19] Pyšek P., Pergl J., Essl F., Lenzner B., Dawson W., Kreft H., Weigelt P., Winter M. Naturalized and invasive flora of the world: species diversity, taxonomic and phylogenetic patterns, geographic distribution and global hotspots of plant invasion // Preslia, 2017, v. 89, pp. 203–274.
- [20] Gioria M., Osborne B.A. Resource competition in plant invasions: emerging patterns and research needs // Front. Plant Sci., 2014, v. 5, pp. 1–21.
- [21] Gooden B., French K. Impacts of alien grass invasion in coastal seed banks vary amongst native growth forms and dispersal strategies // Biol. Conserv., 2014, v. 171, pp. 114–126.
- [22] Kumschick S., Gaertner M., Vila M., Essl F. Ecological impacts of alien species: quantification, scope, caveats and recommendations // BioScience, 2015, v. 65, no. 1, pp. 55–63.
- [23] Kleunen van M., Dawson W., Essl F., Pergl J. et al. Global exchange and accumulation of non-native plants // Nature, 2015, v. 525, no. 7567, pp. 100–103.
- [24] Richardson D.M., Pyšek P. Naturalization of introduced plants: ecological drivers of biogeographical patterns // New Phytol, 2012, v. 196, no. 2. pp. 383–396.
- [25] Vila M., Gimeno I. Does invasion by an alien plant species affect the soil seed bank? // J. Veg. Sci., 2007, v. 18, no. 3, pp. 423–430.
- [26] Лесохозяйственный регламент Барнаульского лесничества Алтайского края. Барнаул, 2022. 129 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/550190366> (дата обращения 12.01.2023).
- [27] Методы изучения лесных сообществ. СПб.: Изд-во НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
- [28] Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
- [29] Алексеев В.А. Световой режим леса. М.: Наука, 1975. 228 с.
- [30] Рязанов Р.И., Кабанов С.В. Подпологовая освещенность в старовозрастных сосняках естественного происхождения южной части Приволжской возвышенности и ее влияние на жизненность подроста сосны // Вестник Алтайского государственного аграрного университета, 2011. № 3. С. 54–60.

Сведения об авторе

Малиновских Алексей Анатольевич — канд. биол. наук, доцент кафедры лесного хозяйства, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет», almaa1976@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.08.2022.

Одобрено после рецензирования 09.11.2022.

Принята к публикации 21.03.2023.

INFLUENCE OF ASH-LEAVED MAPLE (*ACER NEGUNDO* L.) ON SCOTS PINE NATURAL RENEWAL IN BARNAUL RIBBON PINE FOREST

A.A. Malinovskikh

Altai State Agricultural University, 98, Krasnoarmeyskiy prospekt, 656049, Barnaul, Altai Region, Russia

almaal1976@yandex.ru

The influence of ash-leaved maple (*Acer negundo* L.) on the natural regeneration of scots pine in the Barnaul ribbon forest in different types of forest growing conditions is considered. It was found that the ash-leaved maple forms a dense, closed undergrowth up to 10 m high in moist forest-growing conditions (A_3), whereas in fresh forest-growing conditions (A_2) it was noted only once. The closeness of the undergrowth of maple in the grass forest is 0,8...1,0 units, while the undergrowth with a predominance of local plant species (Siberian mountain ash, goat willow) in the grass forest has a closeness of no more than 0,5 units, in the fresh forest no higher than 0,2...0,4 units. The undergrowth of maple strongly obscures the components of the forest located under it: living ground cover and undergrowth. The shading of the living ground cover leads to its significant transformation, with a change in the floral composition and structure. Shading of the undergrowth leads to a complete absence of seedlings, self-seeding and the actual undergrowth of the common pine, interrupting the process of natural renewal. Using the obtained values of illumination under the canopy of the forest, it was found that in a grassy forest with a maple understory, the relative illumination is no more than 7,9 %, whereas in a grassy and fresh forest with an undergrowth of local species, 29,5...47,9 %. The density of pine undergrowth in a fresh forest with undergrowth of local species is 7,5...17,5 thousand units/ha, which is 3–7 times more than in a grass forest with undergrowth of local species. There is a close positive relationship between the relative illumination under the forest canopy and the density of undergrowth ($r = 0,830$). Ash-leaved maple acts as an aggressive undesirable breed, which limits the most important environmental factor — illumination, leading to the disappearance of pine undergrowth under the canopy of the forest.

Keywords: ribbon forests, undergrowth, scots pine, ash-leaved maple, illumination, forest canopy, undergrowth

Suggested citation: Malinovskikh A.A. *Vliyaniye klena yasenelistnogo (Acer negundo L.) na estestvennoye vozobnovleniye sosny obyknovennoy v Barnaul'skom lentochnom boru* [Influence of ash-leaved maple (*Acer negundo* L.) on scots pine natural renewal in Barnaul ribbon pine forest]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 48–56. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-48-56

References

- [1] Kalinichenko N.P., Pisarenko A.I., Smirnov N.A. *Lesovosstanovlenie na vyrubkakh* [Reforestation in cuttings]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1973, 326 p.
- [2] Melekhov I.S. *Biologiya, ekologiya i geografiya vozobnovleniya lesa* [Biology, ecology and geography of forest renewal]. *Vozobnovlenie lesa* [Reforestation]. Moscow: Kolos, 1975, pp. 4–22.
- [3] Pisarenko A.I. *Lesovosstanovlenie* [Reforestation]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1977, 250 p.
- [4] Krylov G.V. *Les Zapadnoy Sibiri* [Forests of Western Siberia]. Moscow: AN SSSR, 1962, 256 p.
- [5] Luganskaya V.D., Luganskiy N.A. *Nekotorye ekologicheskie osobennosti vozobnovleniya sosny pod pologom nasazhdeniy* [Some ecological features of pine renewal under the canopy of plantings]. *Les Urala i khozyaystvo v nikh* [Forests of the Urals and households in them], 1978, v. 11, pp. 31–54.
- [6] Sannikov S.N., Sannikova N.S. *Ekologiya vozobnovleniya sosny pod pologom lesa* [Ecology of pine renewal under the forest canopy]. Moscow: Nauka, 1985, 152 p.
- [7] Sannikov S.N. *Ekologiya i geografiya estestvennogo vozobnovleniya sosny obyknovennoy* [Ecology and geography of the natural renewal of scots pine]. Moscow: Nauka, 1992, 264 p.
- [8] Mesoed I.Yu. *Osnovnye tipy lesa i estestvennoye vozobnovlenie sosny v sredney chasti zony lentochnykh borov* [The main types of forest and the natural renewal of pine in the middle part of the belt forest zone]. *Trudy Lebyazhinskoy ZONLOS* [Proceedings of Lebyazhinskaya ZONLOS]. Sverdlovsk; Moscow: Goslestekhizdat, 1934, v. 1, pp. 50–72.
- [9] Griбанov L.N. *Lentochnye bory Altayskogo kraya i Kazakhstana* [Ribbon forests of the Altai Territory and Kazakhstan]. Moscow: Sel'khozgiz, 1954, 151 p.
- [10] Bugaev V.A., Kosarev N.G. *Lesnoe khozyaystvo lentochnykh borov Altayskogo kraya* [Forestry of ribbon hogs of the Altai Territory]. Barnaul: Altai book publishing house, 1988, 312 p.
- [11] Paramonov E.G. *Khvoynye na yuge Zapadnoy Sibiri* [Conifers in the south of Western Siberia]. Barnaul: AltGU, 2011, 329 p.
- [12] Ishutin Ya.N. *Lesovosstanovlenie na garyakh v lentochnykh borakh Altaya* [Reforestation on burning fires in the ribbon forests of Altai]. Barnaul: AltGU, 2004, 114 p.
- [13] Zlenko L.V., Klyuchnikov M.V. *Vliyaniye nizovykh pozharov na vozobnovlenie sosny v Priobskom levoberezhnom rayone Altaya* [The impact of grass-roots fires on the renewal of pine trees in the Priobsky left-bank district of Altai]. Krasnoyarsk: SibGTU, 2013, 115 p.
- [14] Terekhina T.A., Ovcharova N.V., Elesova N.V. *Biologicheskaya i strukturnaya otsenka populyatsiy klena yasenelistnogo (Acer negundo L.) v Barnaul'skom lentochnom boru* [Biological and structural assessment of populations of ash-leaved maple (*Acer negundo* L.) in the Barnaul ribbon forest]. *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii* [Problems of Botany of Southern Siberia and Mongolia], 2020, v. 19, no. 2, pp. 374–379.
- [15] *Chernaya Kniga flory Sibiri* [Black book of Siberian flora]. Novosibirsk: Academic publishing house «Geo», 2016, 440 p.

- [16] Vinogradova Yu.K., Mayorov S.R., Khorun L.V. *Chernaya kniga flory Sredney Rossii: chuzherodnye vidy rasteniy v ekosistemakh Sredney Rossii* [The Black Book of the Flora of Central Russia: Alien Plant Species in the Ecosystems of Central Russia]. Moscow: GEOS, 2010, 512 p.
- [17] Zhukov R.S., Lomonosova L.M. *Klen yasnelistnyy v gorodskikh lesakh Moskvy* [Ash-leaved maple in the urban forests of Moscow]. Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki [Scientific review. Biological sciences], 2016, no. 3, pp. 49–50.
- [18] Zykova E.Yu., Erst A.S. *Nakhodki nekotorykh redkikh i adventivnykh vidov rasteniy v Sibiri* [Findings of some rare and adventitious plant species in Siberia]. Turczaninovia, 2012, v. 15, no. 4, pp. 34–40.
- [19] Pyšek P., Pergl J., Essl F., Lenzner B., Dawson W., Kreft H., Weigelt P., Winter M. Naturalized and invasive flora of the world: species diversity, taxonomic and phylogenetic patterns, geographic distribution and global hotspots of plant invasion. *Preslia*, 2017, v. 89, pp. 203–274.
- [20] Gioria M., Osborne B.A. Resource competition in plant invasions: emerging patterns and research needs. *Front. Plant Sci.*, 2014, v. 5, pp. 1–21.
- [21] Gooden B., French K. Impacts of alien grass invasion in coastal seed banks vary amongst native growth forms and dispersal strategies. *Biol. Conserv.*, 2014, v. 171, pp. 114–126.
- [22] Kumschick S., Gaertner M., Vila M., Essl F. Ecological impacts of alien species: quantification, scope, caveats and recommendations. *BioScience*, 2015, v. 65, no. 1, pp. 55–63.
- [23] Kleunen van M., Dawson W., Essl F., Pergl J. Global exchange and accumulation of non-native plants. *Nature*, 2015, v. 525, no. 7567, pp. 100–103.
- [24] Richardson D.M., Pyšek P. Naturalization of introduced plants: ecological drivers of biogeographical patterns. *New Phytol.*, 2012, v. 196, no. 2, pp. 383–396.
- [25] Vila M., Gimeno I. Does invasion by an alien plant species affect the soil seed bank? *J. Veg. Sci.*, 2007, v. 18, no. 3, pp. 423–430.
- [26] *Lesokhozyaystvennyy reglament Barnaul'skogo lesnichestva Altayskogo kraya* [Forestry regulations of the Barnaul Forestry of the Altai Territory]. Barnaul, 2022, 129 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/550190366> (accessed 12.01.2023).
- [27] *Metody izucheniya lesnykh soobshchestv* [Forest community research methods]. St. Petersburg: NIIKhimii SPbGU, 2002, 240 p.
- [28] Cherepanov S.K. *Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR)* [Vascular plants of Russia and neighboring countries (within the former USSR)]. St. Petersburg: Mir i sem'ya, 1995, 992 p.
- [29] Alekseev V.A. *Svetovoy rezhim lesa* [Forest light mode]. Moscow: Nauka, 1975, 228 p.
- [30] Ryazapov R.I., Kabanov S.V. *Podpologovaya osveshchennost' v starovozrastnykh sosnyakakh estestvennogo proiskhozhdeniya yuzhnoy chasti Privolzhskoy vozvyshennosti i ee vliyanie na zhiznennost' podrosta sosny* [Underground illumination in old-growth pine forests of natural origin in the southern part of the Volga Upland and its influence on the vitality of pine undergrowth]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Altai State Agricultural University], 2011, no. 3, pp. 54–60.

Author's information

Malinovskikh Aleksey Anatol'evich — Cand. Sci. (Biology), Associated Professor of the Altai State Agricultural University, almaa1976@yandex.ru

Received 17.08.2022.

Approved after review 09.11.2022.

Accepted for publication 21.03.2023.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПРОВЕРКИ РУБИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РБ-55

С.Ю. Булатов^{1✉}, В.Н. Нечаев¹, А.Г. Сергеев²

¹ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (НГИЭУ), Россия, 606340, Нижегородская обл., г. Княгинино, ул. Октябрьская, д. 22а

²ООО «Доза-Агро», Россия, 603124, г. Нижний Новгород, ул. ш. Жиркомбината, д. 20

bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Представлено подробное описание конструкции и принципа работы рубительного комплекса РБ-55, разработанного нижегородской фирмой и предназначенного для измельчения древесных материалов. Получены прогнозные зависимости в виде полиномы третьей степени для расчета потребляемой мощности измельчения, спрогнозирована максимальная пропускная способность рубительного комплекса при измельчении горбыля сосны влажностью 23...30 % — 9 м³/ч. Установлены максимальная пропускная способность комплекса РБ-55 при измельчении круглого лесоматериала (ель) влажностью 47,8 % — 23 м³/ч, и суммарная потребляемая мощность электродвигателей — 68,23 кВт. Установлено, что получаемая щепа соответствует марке ПС, предназначенной для изготовления древесно-стружечных плит.

Ключевые слова: измельчение, качество измельчения, пропускная способность, рубительный комплекс, энергозатраты

Ссылка для цитирования: Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Сергеев А.Г. Результаты производственной проверки рубительного комплекса РБ-55 // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 57–68.

DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-57-68

В задачи развития лесопромышленного комплекса входит увеличение переработки низкосортной древесины [1]. Целевыми показателями использования мелкотоварной и неликвидной древесины, биомассы лесосек [2–4] и отходов деревообрабатывающих предприятий являются увеличение производства щепы, соответствующей принятым стандартам [5, 6], для выпуска древесно-стружечных и древесно-волоконистых плит, потребность в которых составляет 8,66 млн м³ [7]. При этом ежегодное количество древесных отходов достигает 200 млн м³. Согласно прогнозам, к 2030 г. рециклинг отходов позволит экономить 40 млн м³ древесины [8]. Помимо компонентов для строительных материалов, имеющих в массе отходов, энергопотенциал служит отличным источником производства биотоплива, а древесные отходы могут использоваться для нужд сельского хозяйства, кожевенной промышленности, фармакологии и т. д. [9–11].

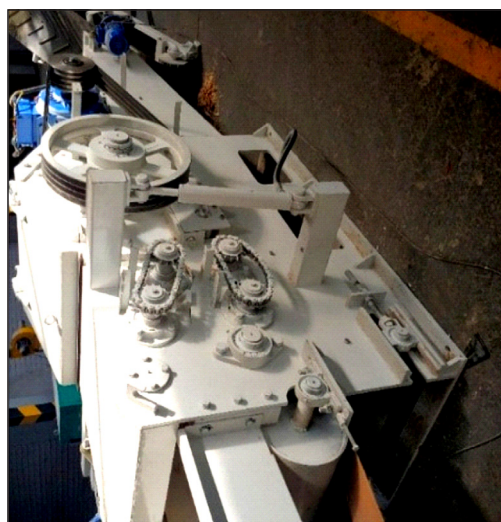
Качество продуктов переработки древесных отходов напрямую зависит от технико-технологической вооруженности предприятий лесопромышленного комплекса. В частности, импортное оборудование дороже отечественного в 2–3 раза, за исключением китайского. Однако в России имеются все ресурсы для создания техники высокого уровня [12]. В «Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» [13]

отмечено, что научные исследования в области разработки и производства отечественной техники, не уступающей импортным аналогам, является актуальной задачей.

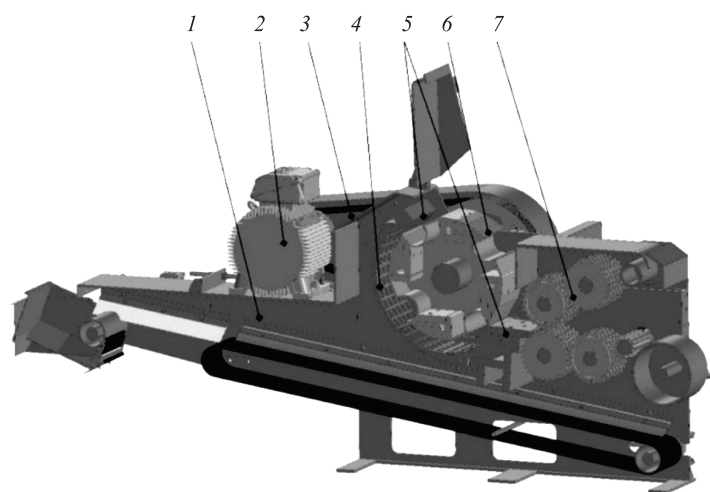
Ключевым звеном в технологической цепочке при переработке древесных отходов являются рубительные машины, требующие научного обоснования параметров и режимов их работы. Как известно, они бывают мобильные [14–16] и стационарные [17], дисковые [18] и барабанные [19–22]. Многие рационализаторские решения по устройству и работе рубительных машин принадлежат следующим российским исследователям: Н.Ф. Баранову [23, 24], А.Я. Волкову [25], В.В. Коробову и Н.П. Рушнову [26], Г.М. Трещикову и Ю.А. Люкину [27] и др. В результатах сравнительных испытаний зарубежных исследователей отмечается, что рубительные машины с дисковым рабочим органом имеют более простую конструкцию, их энергоэффективность на 19 % выше, чем у машин с барабанным измельчителем [19, 20]. Однако производительность последних выше на 8 %, резание происходит равномерно по всей длине ножа, в фракционном составе больше мелкой стружки. В том и другом случае качество щепы, производительность и энергоэффективность измельчителей зависят от типа сырья. По нашему мнению, только в производственных испытаниях можно определить работоспособность машин, провести исследования на разных настроечных параметрах и дать рекомендации по их дальнейшему совершенствованию.



Рис. 1. Общий вид рубительного комплекса РБ-55
Fig. 1. General view of the RB-55 chopping complex



a



б

Рис. 2. Рубительная машина: *a* — общий вид; *б* — 3D модель: 1 — корпус; 2 — электродвигатель; 3 — ременная передача; 4 — сито; 5 — контрножи; 6 — рубительный барабан; 7 — подающий механизм

Fig. 2. Chopping machine: *a* — general view; *б* — 3D model: 1 — housing; 2 — electric motor; 3 — belt drive; 4 — sieve; 5 — counter knives; 6 — chopping drum; 7 — feeding mechanism

ООО «Доза-Агро» разработан комплекс для измельчения древесных материалов, который требует проведения оценки его работоспособности.

Цель работы

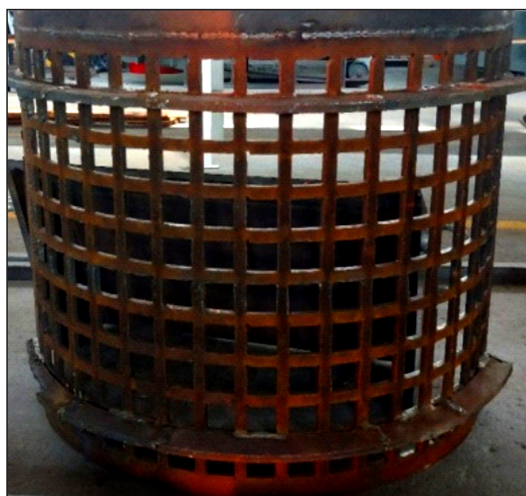
Цель работы — определение рабочих параметров рубительного комплекса РБ-55.

Материалы и методы

Объектом исследования выступал рубительный комплекс РБ-55 — 4К (рис. 1). В его состав входит рубительная машина, механизм подающий материал к рубительной машине, собирающий и выгрузной конвейеры. Последний предназначен для транспортирования измельченного продукта в накопительную емкость. Суммарная установленная мощность электродвигателей комплекса

составляет 67,6 кВт, из них 4,5 кВт приходится на электропривод конвейеров.

Главными элементами рубительной машины (рис. 2) являются установленные в корпусе 1 рубительный барабан 5 с четырьмя ножами, сито 4, подающий механизм 7. Вращение рубительного барабана 6 осуществляется от электродвигателя 2 через ременную передачу 3. Подающий механизм 7 затягивает поступающие с подающего конвейера материалы и подает их к рубительному барабану 6. Материал зажимается между ножами рубительного барабана 6 и контрножами 5, где происходит его перерубание. Перерезанные куски материала вращаются вместе с ножами рубительного барабана 6 и многократно подвергаются измельчению, пока их размеры не окажутся меньше размеров отверстий сита 4 и не



а



б

Рис. 3. Сита рубительной машины: а — 40×40; б — 70×70

Fig. 3. The screens of the chopping machine: а — 40×40; б — 70×70

выведутся из зоны измельчения. Измельченный материал в дальнейшем от рубительной машины отводится собирающим конвейером.

Заводом-изготовителем предусмотрены сита с квадратными отверстиями. При проведении оценки рабочих параметров устанавливались решета с отверстиями 40×40 мм и 70×70 мм (рис. 3). Коэффициент живого сечения решет вычисляли по формуле

$$k = \frac{S_o}{S_p} = \frac{a_o \cdot b_o \cdot N_o}{a_p \cdot b_p},$$

где S_o — площадь отверстий решета, мм²;

S_p — площадь решета, мм²;

a_o, b_o — соответственно длина и ширина отверстий решета, мм;

N_o — количество отверстий, шт.;

a_p, b_p — соответственно длина и ширина решета, мм.

Для решет с отверстиями 40×40 мм и 70×70 мм коэффициент живого сечения составил соответственно

$$k_{40} = \frac{40 \cdot 40 \cdot 216}{1056 \cdot 685} = 0,48;$$

$$k_{70} = \frac{70 \cdot 70 \cdot 77}{1056 \cdot 685} = 0,52.$$

Опыты проводились при следующих установленных настроечных параметрах: диаметр рубильного барабана по концам ножей — 630 мм; частота вращения рубильного барабана — 500 мин⁻¹; зазор между кромкой ножей и кромкой конроножей — 2 мм.

В качестве измельчаемого материала использовался неокоренный горбыль хвойных пород (сосна) влажностью 23...30 % (рис. 4) и круглый лесоматериал (ель) (рис. 5), средней влажностью 47,8 %.

Габаритные размеры горбыля составляли: длина 2000 мм, ширина 150 мм, толщина 25...30 мм. В соответствии с методикой, описанной в ОСТ 13-28-74 рассчитан объем одного горбыля по максимальным размерам (2×0,15×0,025) — 0,0075 м³ и выбран поправочный коэффициент 0,48 [28]. Объем круглого лесоматериала определялся согласно ГОСТ 2708-75 [29].

Оценивалось влияние вида измельчаемого материала и способа его подачи на пропускную способность, энергозатраты и качество измельчения рубительного комплекса. Подачу измельчаемого материала осуществляли последовательно по одной доске (бревну) и параллельно по 2-3 доски (2 бревна) (см. рис. 5) в рубительную машину, изменяя скорость ленты подающего конвейера от минимальной. При этом при последовательной подаче скорость ленты составляла 0,082 м/с, а при параллельной — 0,11 и 0,16 м/с. В процессе измельчения проводился замер суммарной потребляемой мощности W (кВт) рубительного комплекса РБ-55 при различной скорости подачи материала, рассчитывались пропускная способность Q (м³/ч) рубительной машины и удельные энергозатраты $w_{уд}$ (кВт·ч/м³).

После каждого опыта проводился отбор пробы измельченного материала и оценивался его размер. Размер измельченного материала определяли посредством его отсева. Для этого был изготовлен набор сит с квадратными отверстиями размером 5×5, 10×10, 15×15, 20×20, 25×25 мм (рис. 6) в соответствии с ГОСТ 15815-83 [30].

При определении размеров щепы из проб выделялась навеска массой 100 г и отсеивалась на лабораторном севе (РЛ) в течение 5 мин. Далее проводилось взвешивание остатков на каждом

*a**б*

Рис. 4. Общий вид измельчаемого лесоматериала: *a* — горбыль; *б* — лесоматериалы круглые
Fig. 4. General view of the crushed timber: *a* — humpback; *б* — round timber

*a**б*

Рис. 5. Способ подачи измельчаемого материала: *a* — последовательная по одному бревну;
б — параллельная по два бревна

Fig. 5. The method of feeding the crushed material: *a* — sequential for one log; *б* — parallel for two logs

сите и построение графиков. Дополнительно из каждого остатка на сите выбирались наибольшие и наименьшие частицы и определялись их размеры с помощью штангенциркуля ШЦ-I-125-0.1 с погрешностью измерения $\pm 0,03$ мм.

Исследование рабочего процесса разработанного комплекса проводилось на заводе ООО «АСТ Регион» рп. Выездное Нижегородской обл.

Результаты и обсуждение

Результаты опытов представлены в виде графиков, характеризующих влияние пропускной способности рубительного комплекса на его энергетические показатели при измельчении горбыля и круглого лесоматериала. При измельчении горбыля с увеличением пропускной способности



Рис. 6. Набор сит с отверстиями размером (мм): *a* — на расसेве РЛ; *б* — 25×25; *в* — 20×20; *г* — 15×15; *д* — 10×10; *е* — 5×5

Fig. 6. A set of sieves with holes measuring (mm): *a* — on the RL sieving; *б* — 25×25; *в* — 20×20; *г* — 15×15; *д* — 10×10; *е* — 5×5

происходит рост потребляемой мощности W и при пропускной способности $Q = 6,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ мощность составляет около 38 кВт (рис. 7). При этом наблюдается резкое снижение удельных энергозатрат $w_{\text{уд}}$. В диапазоне $Q = 0,64 \dots 6,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ данный показатель снижается с 15,3 до 5,9 кВт·ч/м³.

Изменение суммарной потребляемой мощности поддается достаточно полному описанию двумя зависимостями (рис. 8):

– полиномом третьей степени

$$y = 0,335Q^3 - 4,5771Q^2 + 21,852Q - 2,4084, \quad R^2 = 1; \quad (1)$$

– логарифмической функцией

$$y = 12,353 \ln(Q) + 15,933, \quad R^2 = 0,9952. \quad (2)$$

Для описания изменения удельных энергозатрат также можно применить две функции (рис. 9):

– полином третьей степени

$$y = 0,081Q^3 - 0,7048Q^2 - 0,3685Q + 15,8; \quad R^2 = 1; \quad (3)$$

– экспоненциальную функцию

$$y = 17,251e^{-0,168Q}; \quad R^2 = 0,9909. \quad (4)$$

Коэффициенты детерминации в уравнениях третьей степени (1) и (3) составляют единицу, т. е. эти уравнения точнее описывают изучаемый процесс.

По уравнениям (1) и (3) можно спрогнозировать потребление электроэнергии исследуемой и аналогичных рубительных машин в зависимости от подачи измельчаемого материала.

По уравнениям построены прогнозные характеристики суммарной потребляемой мощности (см. рис. 8) и удельных энергозатрат (см. рис. 9).

На рис. 8 линиями 3, 4 отмечены номинальные мощности электродвигателей комплекса и рубительной машины. Из графиков видно, что при расчете энергетических показателей по полиному третьей степени максимальная нагрузка электродвигателей возможна при измельчении соснового горбыля влажностью 25...30 % с пропускной способностью 9 м³/ч (см. рис. 8). При этом расчетные удельные энергозатраты составляют 11,5 кВт·ч/м³ (см. рис. 9). При расчетах энергетических показателей рубительного комплекса по уравнениям (2) и (4) показатели пропускной способности получаются завышенными.

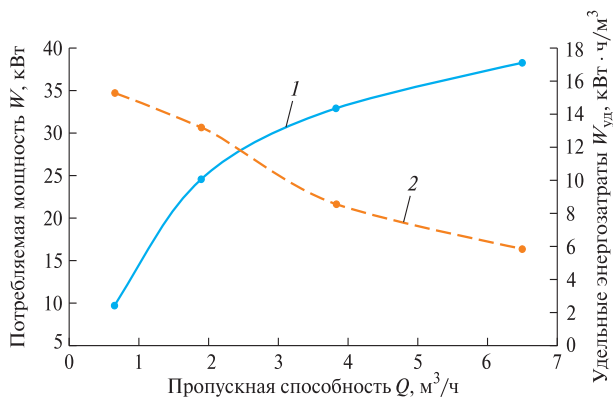


Рис. 7. Влияние пропускной способности рубительной машины на энергетические показатели: 1 — полная потребляемая мощность; 2 — удельные энергозатраты
Fig. 7. The impact of the capacity of the chopping machine on energy indicators: 1 — total power consumption; 2 — specific energy consumption

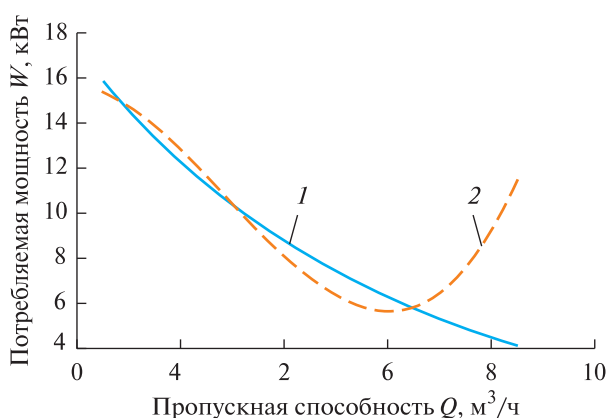


Рис. 9. Изменение расчетных удельных энергозатрат: 1 — экспоненциальная функция; 2 — полином третьей степени
Fig. 9. Variation of calculated specific energy consumption: 1 — exponential function; 2 — polynomial of the third degree

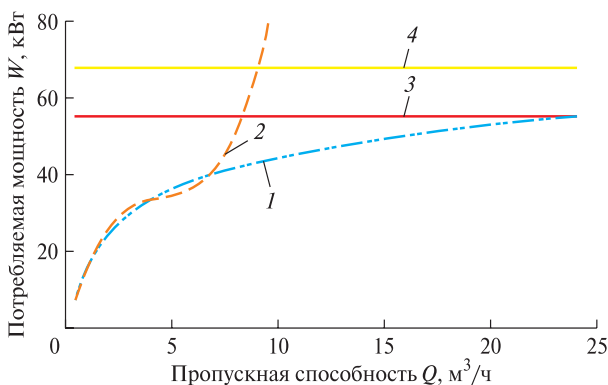


Рис. 8. Изменение расчетной полной потребляемой мощности: 1 — логарифмическая функция; 2 — полином третьей степени; 3 — установленная мощность электродвигателя рубительной машины; 4 — установленная суммарная мощность электродвигателей рубительного комплекса
Fig. 8. Variation of calculated total power consumption: 1 — logarithmic function; 2 — third-degree polynomial; 3 — installed chipper motor power; 4 — installed total power of chipper motors

Так, при достижении установленной мощности двигателя рубительной машины в 55 кВт пропускная способность составит 24 м³/ч. Из проведенного анализа можно сделать вывод, о том, что для описания изменения энергетических затрат в зависимости от пропускной способности рубительного комплекса РБ-55 лучше применять полиномы третьей степени (1) и (3).

При проведении опытов были отобраны пробы измельченного материала, общий вид которых приведен на рис. 10.

Из отобранных проб выбирались навески массой 100 г и проводился их рассев, результаты которого представлены в виде графиков (рис. 11).

Анализ графиков показывает, что наибольший остаток наблюдается на сите с отверстием 5×5 мм (см. рис. 11). Независимо от пропускной способности масса остатка на данном сите превышает 50 % всей навески. С увеличением пропускной способности крупность измельчения увеличивается.

Из остатков на ситах выбраны граничные куски измельченного материала и штангенциркулем определены их размеры (табл. 1). На сите 25×25 мм наблюдалось только по одному такому куску. На дне сита указаны размеры максимальных кусков, на всех остальных — размеры минимальных и максимальных кусков.

При измельчении горбыля не удалось достичь максимально возможной пропускной способности при полной загрузке установленной мощности электродвигателей, поэтому принято решение увеличить коэффициент живого сечения решета с 0,48 до 0,52 путем увеличения размеров отверстий с 40×40 мм до 70×70 мм. Для равномерной загрузки машины в качестве сырья использовались бревна ели.

Проведена серия опытов по определению максимальной пропускной способности. Входными параметрами в ходе опытов выступали: схема подачи материала, объем материала и скорость ленты (табл. 2). На выходе фиксировались время измельчения, потребляемая мощность, а также оценивалась пропускная способность.

По данным табл. 2 построены графики изменения фиксируемых показателей в зависимости от скорости движения ленты подающего конвейера рубительного комплекса (рис. 12, 13).

Как видно из графиков (см. рис. 12) с увеличением скорости подачи растет пропускная способность комплекса. Ее максимально зафиксиро-



Рис. 10. Образцы проб измельченного материала при пропускной способности рубительной машины (м³/ч): а — 0,64; б — 1,87; в — 3,82; г — 6,5

Fig. 10. Samples of crushed material samples at throughput (m³/h): а — 0,64; б — 1,87; в — 3,82; г — 6,5

ванное значение составило 23 м³/ч при скорости подачи 0,21 м/с бревна длиной 4 м. При этом и потребляемая мощность принимает максимальное значение 68,23 кВт. Основной электродвигатель работает в режиме перегрузки порядка 8 %. Однако по удельным энергозатратам наблюдается минимальное значение из всех проведенных опытов, которое составило 2,97 кВт·ч/м³ (см. рис. 13). Как видно из табл. 2 на пропускную способность также влияют способ подачи, длина и объем измельчаемого бревна. Более короткие и тонкие бревна затягиваются и измельчаются быстрее, поэтому пропускная скорость возрастает. Так, например, незначительное падение пропускной способности в опыте № 7 (см. табл. 2) примерно на 9,7 % объясняется увеличением объема бревна на 32 %. При параллельной подаче процесс нестабилен, так как наблюдается периодическое застревание одного из бревен, что влечет рост времени измельчения и, как следствие, снижение пропускной способности. Исходя из наблюдений,

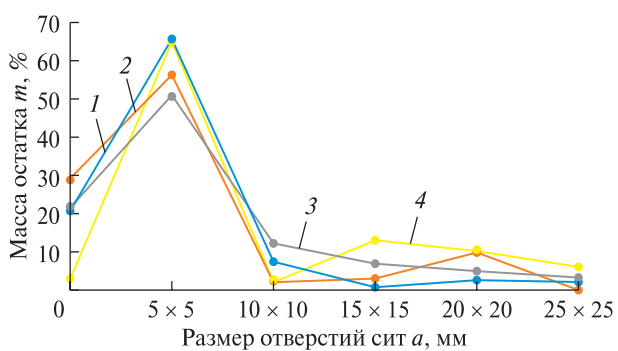


Рис. 11. Распределение измельченного материала по ситам при разной пропускной способности машины Q (м³/ч): 1 — 0,64; 2 — 1,87; 3 — 3,82; 4 — 6,5

Fig. 11. Distribution of crushed material by sieves Q (m³/h): 1 — 0,64; 2 — 1,87; 3 — 3,82; 4 — 6,5

при параллельной загрузке желательно, чтобы подаваемый материал имел одинаковую высоту, а для круглого материала, соответственно, одинаковый диаметр.

Т а б л и ц а 1

Размеры характерных кусков измельченного материала, выбранных по остаткам на ситах (для горбыля) при разной пропускной способности машины Q ($\text{м}^3/\text{ч}$)
Dimensions of characteristic pieces of crushed material selected from the residues on the sieves (for slabs) at different throughputs of the machine Q ($\text{м}^3/\text{ч}$)

Размер отверстий сита, мм	Размеры характерных кусков (длина×ширина×толщина), мм			
	$Q = 0,64$	$Q = 1,87$	$Q = 3,82$	$Q = 6,5$
25×25	40×30×10	–	80×15×15	47×30×17
20×20	80×12×8	40×25×4 75×22×10	50×29×10 90×16×2	33×17×5 94×19×3
15×15	23×18×3 32×20×2	25×22×2 90×8×1	25×22×7 50×18×2,5	19×15×4 64×18×5
10×10	20×18×3 130×15×6	23×18×4 42×14×5	18×15×3 150×12×4	16×15×4 50×17×6
5×5	100×9×2	70×7×4	110×5×2	82×18×2,5
Дно сита	43×4×1	57×2×1,5	70×3×3	62×3×2

Т а б л и ц а 2

Исходные параметры и результаты эксперимента при последовательной и параллельной* подачах бревен на загрузочный ленточный транспортер
Initial parameters and results of the experiment with sequential and parallel* feed of logs to the loading conveyor

Регистрируемый показатель	Номер опыта						
	1	2	3	4	5	6	7
Длина бревна, L , м	6	6	6	3	2	4	6
Количество бревен, шт.	1	1	1	2	2	1	1
Объем материала, V , м^3	0,194	0,174	0,255	0,184	0,1	0,147	0,194
Скорость ленты, v , м/с	0,082	0,11	0,11	0,11	0,16	0,21	0,21
Время измельчения, t , с	60	57	66	54	27,5	23	33,3
Пропускная способность, Q , $\text{м}^3/\text{ч}$	11,64	10,99	13,91	12,27	13,09	23	20,97
Потребляемая мощность, W , кВт	36,87	51,26	46,46	57,19	63,68	68,23	66,56

*Последовательная подача — № 1–3, № 6, 7; параллельная — № 4, 5.

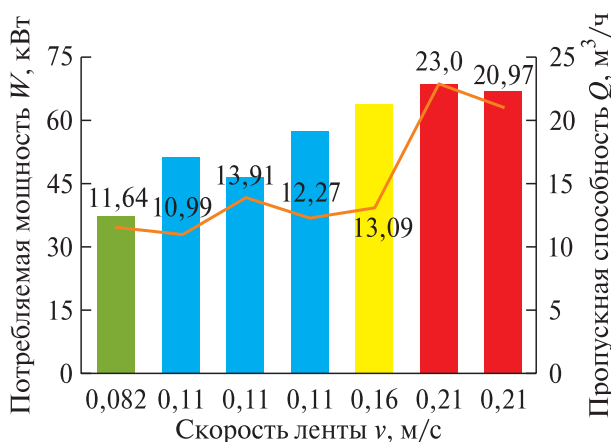


Рис. 12. Влияние скорости ленты и объема подачи материала на потребляемую мощность

Fig. 12. The influence of the belt speed and the amount of material supply on the power consumption

Изменение пропускной способности рубительного комплекса РБ-55 при измельчении круглого лесоматериала, как и в случае с горбылем, с допустимой степенью точности описывается полиномом третьей степени (рис. 14)

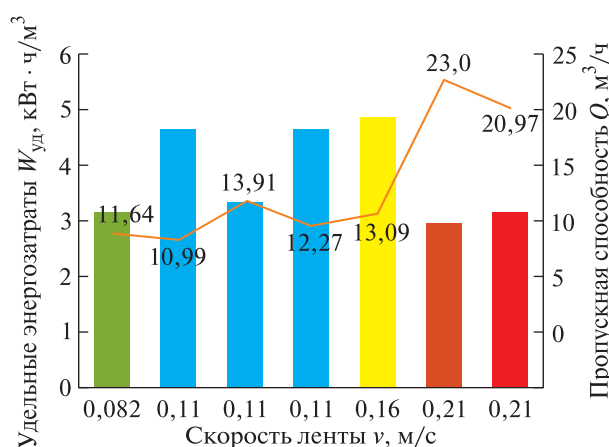


Рис. 13. Изменение удельных энергозатрат в зависимости от скорости ленты и подачи материала

Fig. 13. Change in specific energy consumption depending on the speed of the belt and the material supply

$$Q = 14093v^3 - 5124,7v^2 + 618,32v - 12,374, \quad R^2 = 1. \quad (5)$$

Фракционный состав в среднем аналогичен фракционному составу измельченного на сите

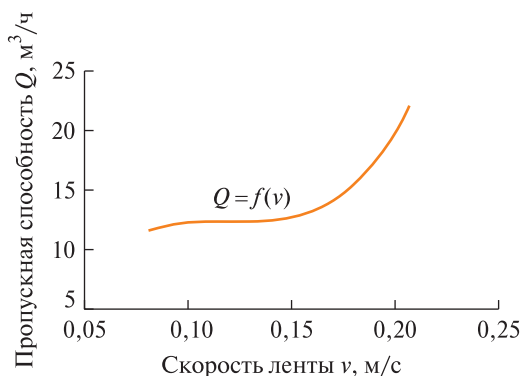


Рис. 14. Теоретическая зависимость пропускной способности рубительного комплекса РБ-55 от скорости ленты при измельчении круглого лесоматериала

Fig. 14. Theoretical dependence of the throughput of the RB-55 chopping complex on the belt speed when grinding round timber

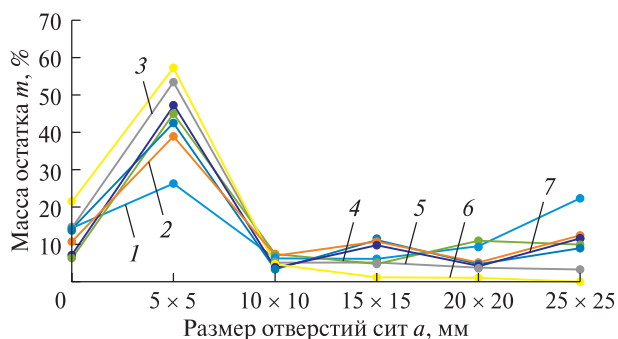


Рис. 15. Распределение измельченного материала по ситам при разной пропускной способности машины Q (м³/ч): 1 — 11,64; 2 — 10,99; 3 — 13,91; 4 — 12,27; 5 — 13,09; 6 — 23; 7 — 20,97

Fig. 15. Distribution of crushed material by sieves Q (m³/h): 1 — 11,64; 2 — 10,99; 3 — 13,91; 4 — 12,27; 5 — 13,09; 6 — 23; 7 — 20,97

Т а б л и ц а 3

Размеры характерных частиц измельченного материала, выбранных по остаткам на ситах (для круглого лесоматериала (ель)) при разной пропускной способности машины Q (м³/ч)

Size of characteristic particles of crushed material selected from residues on sieves (for round timber (spruce)) at different machine capacities Q (m³/h)

Размер отверстий сита, мм	Размеры характерных частиц (длина×ширина×толщина), мм						
	Q = 11,64	Q = 10,99	Q = 13,91	Q = 12,27	Q = 13,09	Q = 23	Q = 20,97
25×25	110×27×20	140×27×18	53×35×5	—	100×27×7 85×28×6	50×40×6 95×19×17	90×21×14 60×45×8
20×20	90×12×3 70×20×4 50×20×7	63×20×4 57×30×4	70×16×6 75×15×4 34×28×4	60×16×5	55×20×10 60×20×4 58×25×3	70×20×5 67×20×14 50×20×10	35×30×6
15×15	30×15×6 30×18×8 31×19×3	20×15×7 30×15×7 25×17×8	25×20×4 35×15×5 40×20×1	33×23×20	84×10×6 26×17×2 20×16×4	60×20×6 94×10×1	56×20×4 30×30×3 24×21×3
10×10	18×16×5 27×14×6 17×16×1	20×10×6 25×9×7 25×17×8	35×11×4 18×15×5 25×9×6	23×9×7 34×7×4 30×10×6	19×17×2 20×12×9 21×15×5	23×11×10 16×14×3 21×17×5	25×11×5 20×19×3
5×5	7×8×3 5×5×2 11×6×1	6×5×3 10×5×1 10×6×2	9×7×4 7×5×4 14×5×2	5×5×3 5×5×4 6×5×2	10×6×3 7×6×2 15×5×3	9×5×4 10×7×3 10×5×3	20×5×2 10×6×3 15×18×2

40×40 мм горбыля (рис. 15, табл. 3), т. е. можно утверждать незначимость для фракционного состава измельченной древесины такого параметра, как величина отверстий сита.

Таким образом, получаемая по ГОСТ 15815–83 щепа соответствует марке ПС, предназначенной для изготовления древесно-стружечной плиты.

Выводы

1. Построены прогнозные зависимости в виде полинома третьей степени, позволяющие рассчитать потребляемую мощность измельчения от пропускной способности рубительного комплекса.

2. По выведенным зависимостям спрогнозирована максимальная пропускная способность рубительного комплекса при измельчении горбыля сосны влажностью 23...30 % — 9 м³/ч.

3. Пропускная способность рубительного комплекса РБ-55 при измельчении круглого лесоматериала (ель) также описывается полиномом третьей степени.

4. Максимальная пропускная способность комплекса РБ-55 при измельчении круглого лесоматериала (ель) влажностью 47,8 % достигает 23 м³/ч. При этом суммарная потребляемая мощность электродвигателей составляет 68,23 кВт.

5. Щепа, получаемая на рубительном комплексе РБ-55, соответствует марке ПС, предназначенной для изготовления древесно-стружечной плиты.

Список литературы

[1] Государственная программа Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности» от 15 апреля 2014 г. URL: <https://base.garant.ru/70643464/> (дата обращения 07.08.2022).

- [2] Баклагин В.Н. Обоснование технологических решений, повышающих эффективность производства щепы энергетического назначения на лесосеке: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Петрозаводск, 2011. 24 с.
- [3] Коробов В.В., Рушнов Н.П. Переработка низкокачественного сырья (проблемы безотходной технологии). М.: Экология, 1991. 288 с.
- [4] Пискунов М.А. Системы машин и себестоимость получения топливной щепы из лесосечных отходов: опыт зарубежных стран и его приложение для России // Вестник КрасГАУ, 2013. № 8. С. 238–243.
- [5] ГОСТ 15815–83. Щепка технологическая. Технические условия. Введ. 01.01.85. М.: Госстандарт России, 1985. 15 с.
- [6] ISO 17225-4:2021. Твердое биотопливо. Спецификации и классы топлива. Часть 4. Сортированная древесная щепка (Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 4: Graded wood chips). Введ. 19.02.2021. Женева, 2021. 10 с.
- [7] Галактионов О.Н. Совершенствование сквозных технологических процессов лесосечных работ с рециклингом лесосечных отходов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01: защищена: 25.03.2016. Петрозаводск, 2016. 315 с.
- [8] Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 января 2018 г. № 84-р. Москва, 2018. С. 1–59. URL: <https://docs.cntd.ru/document/556353696> (дата обращения 07.08.2022).
- [9] Бакуров Е.В. Обработка низкотоварной древесины на комплексах лесопромышленных предприятиях // Системы. Методы. Технологии, 2019. № 2 (42). С. 100–104.
- [10] Михайлов К.Л., Гушин В.А., Тараканов А.М. Организация сбора и переработки лесосечных отходов и дров на лесосеке // Лесной журнал, 2016. № 6. С. 98–109.
- [11] Суханов Ю.В., Соколов А.П., Герасимов Ю.Ю. Оценка экономической эффективности систем машин для производства топливной щепы в Республике Карелия // Resources and Technology, 2013. № 10 (1). С. 1–23.
- [12] Шегельман И.Р., Скрышник В.И., Кузнецов А.В., Васильев А.С. Тенденции развития современного лесного машиностроения // Инженерный вестник Дона, 2016. № 2. С. 30.
- [13] Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года от 11 февраля 2021 года №312-р. Москва, 2018. 102 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573658653> (дата обращения 07.08.2022).
- [14] Spinelli R., Marchi E. Trends and perspectives in the desing of mobile wood chippers // Croat. J. for. Eng., 2021, v. 42(1). DOI:10.5552/crojfe.2021.787
- [15] Spinelli R., Hartsough B. A survey of Italian chipping operations // Biomass and Bioenergy, 2001, v. 21(6), pp. 433–444. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00050-2)
- [16] Spinelli R., Visser R.J.M. Analyzing and estimating delays in wood chipping operations // Biomass and Bioenergy, 2009, v. 33(3), pp. 429–433. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.003>
- [17] Gard Timmerfors J., Sjölund T., Jönsson L.J. New drum-chipping technology for a more uniform size distribution of wood chips // Holzforschung, 2020, v. 74(2), pp. 116–122. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0279>
- [18] Фокин С.В., Ахметов Э.А. О перспективных конструкциях рубительных машин // Аграрный научный журнал, 2020. № 7. С. 85–88.
- [19] Spinelli R., Cavallo E., Eliasson L., Facello A. Comparing the efficiency of drum and disc chippers // Silva Fennica, 2013, v. 47, no. 2, article id 930. <https://doi.org/10.14214/sf.930>
- [20] Spinelli R., Magagnotti N. A tool for productivity and cost forecasting of decentralised wood chipping // Forest Policy and Economics, 2010, v. 12(3), pp. 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2009.10.002>
- [21] Spinelli R., Magagnotti N. The effect of raw material, cut length, and chip discharge on the performance of an industrial chipper // Forest Products J., 2013, v. 62(7–8), pp. 58–589. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-12-00083.1>
- [22] Spinelli R., Magagnotti N. Using disposable chipper knives to decrease wood fuel processing cost // Fuel Processing Technology, 2014, v. 126, pp. 415–419. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.05.026>
- [23] Баранов Н.Ф., Фуфачев В.С., Ступин И.В. Определение силы затягивания материала ножом рубительной машины // Аграрная наука Евро-Северо-Востока, 2016. № 1 (50). С. 70–75.
- [24] Патент № 2626172 Российская Федерация, МПК В27L 11/00. Рубительная машина / Баранов Н.Ф., Фуфачев В.С., Ступин И.В.; заявитель и патентообладатель Минсельхоз России ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» / № 2015155891. Бюл. № 21. 9 с.
- [25] А. с. 1782746 СССР, МПК В27L 11/00. Барабанная рубительная машина / Волков А.Я. № 4872008/15; заявл. 18.07.90; опубл. 23.12.92. Бюл. №47. 3 с.
- [26] А. с. 1437230 СССР, МПК В27L 11/02. Барабанная рубительная машина для измельчения древесных отходов / Трещиков Г.М., Люкин Ю.А. № 4256231/29-15; заявл. 03.06.87; опубл. 15.11.88. Бюл. № 42. 3 с.
- [27] Коробов В.В., Рушнов Н.П. Переработка низкокачественного сырья (проблемы безотходной технологии). М.: Экология, 1991. 288 с.
- [28] ОСТ 13-28–74 Горбыль деловой хвойных и лиственных пород. Введ. 18.07.1974. М.: Минлесхоз, 1974. 5 с.
- [29] ГОСТ 2708–75 Лесоматериалы круглые. Таблица объемов. М.: Стандартинформ, 2006. 37 с.
- [30] ГОСТ 15815–83 Щепка технологическая. Технические условия. М.: Госстандарт России, 1985. 15 с.

Сведения об авторах

Булатов Сергей Юрьевич [✉] — д-р. техн. наук, доцент, профессор кафедры технического сервиса ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (НГИЭУ), bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Нечаев Владимир Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры технических и биологических систем ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет» (НГИЭУ), nechaev-v@list.ru

Сергеев Александр Георгиевич — канд. техн. наук, генеральный директор ООО «Доза-Агро», office@dozaagro.ru

Поступила в редакцию 14.10.2022.

Одобрено после рецензирования 15.11.2022.

Принята к публикации 21.03.2023.

RESULTS OF RB-55 CHOPPING COMPLEX PRODUCTION INSPECTION

S.Y. Bulatov^{1✉}, V.N. Nechaev¹, A.G. Sergeev²

¹Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics (GBOU VO «NGIEU»), 22a, Oktyabrskaya st., 606340, Knyaginino, Nizhny Novgorod reg., Russia

²LLC «Dose-Agro», 20, Zhirkombinata highway st., 603124, Nizhny Novgorod, Russia

bulatov_sergey_urevich@mail.ru

A detailed description of the design and principle of the RB-55 chopping complex operation, developed at a Nizhny Novgorod company and designed for grinding wood materials, is presented. Predictive dependences in the form of a third-degree polynomial for calculating the grinding power consumption are obtained, the maximum throughput of the chopping complex is predicted when chopping pine slabwood with a humidity of 23...30 % — 9 m³/h. The maximum throughput capacity of the RB-55 set for grinding round wood (spruce) with a humidity of 47,8% is 23 m³/h, and the total power consumption of electric motors is 68,23 kW. It is established that the resulting chips correspond to the brand of PS intended for the chipboard manufacture.

Keywords: grinding, grinding quality, throughput, chopping complex, energy consumption


Suggested citation: Bulatov S.Y., Nechaev V.N., Sergeev A.G. *Rezultaty proizvodstvennoy proverki rubitel'nogo kompleksa RB-55* [Results of RB-55 chopping complex production inspection]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 57–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-57-68

References

- [1] *Gosudarstvennaya programma Rossiyskoy Federatsii «Razvitie promyshlennosti i povyshenie ee konkurentosposobnosti» ot 15 aprelya 2014 g* [The State Program of the Russian Federation «Industrial Development and Increasing its Competitiveness» dated 15 April 2014]. Available at: <https://base.garant.ru/70643464/> (accessed 07.08.2022).
- [2] Baklagin V.N. *Obosnovanie tekhnologicheskikh resheniy, povyshayushchikh effektivnost' proizvodstva shchepy energeticheskogo naznacheniya na leseke* [Substantiation of technological solutions that increase the efficiency of the production of wood chips for energy purposes at the logging site: author]. Dis. Cand. Sci. (Tech.) 05.21.01. Petrazovodsk, 2011, 24 p.
- [3] Korobov V.V., Rushnov N.P. *Pererabotka nizkokachestvennogo syr'ya (problemy bezotkhodnoy tekhnologii)* [Processing of low-quality raw materials (problems of non-waste technology)]. Moscow: Ecology, 1991, 288 p.
- [4] Piskunov M.A. *Sistemy mashin i sebestoimost' polucheniya toplivnoy shchepy iz lesechnykh otkhodov: opyt zarubezhnykh stran i ego prilozhenie dlya Rossii* [Machine systems and the cost of obtaining fuel chips from logging waste: the experience of foreign countries and its application for Russia]. *Vestnik KrasGAU*, 2013, no. 8, pp. 238–243.
- [5] GOST 15815–83 *Shchepa tekhnologicheskaya. Tekhnicheskie usloviya* [Chips technological. Specifications]. Introduction 01.01.85. Moscow: Gosstandart of Russia, 1985, 15 p.
- [6] ISO 17225-4:2021 *Tverdoe biotopливо. Spetsifikatsii i klassy topliva. Chast' 4. Sortirovannaya drevesnaya shchepa (Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 4: Graded wood chips)* [Solid biofuels. Specifications and classes of fuel. Part 4. Sorted wood chips (Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 4: Graded wood chips)]. Introduction 19.02.2021. Geneva, 2021, 10 p.
- [7] Galaktionov O.N. *Sovershenstvovanie skvoznykh tekhnologicheskikh protsessov lesechnykh rabot s retsiklingom lesechnykh otkhodov* [Improvement of end-to-end technological processes of logging operations with recycling of logging waste]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01, 2015, 315 p.
- [8] *Strategiya razvitiya promyshlennosti po obrabotke, utilizatsii i obvezvrezhivaniyu otkhodov proizvodstva i potrebleniya na period do 2030 goda ot 25 yanvarya 2018 g. № 84-r.* [Strategy for the development of industry for the processing, recycling and disposal of production and consumption waste for the period up to 2030 dated 25 January 2018 no. 84-r.] Moscow, 2018. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/556353696> (accessed 07.08.2022).
- [9] Bakurov E.V. *Obrabotka nizkotovarnoy drevesiny na kompleksakh lesopromyshlennykh predpriyatiyakh* [Processing of low-value wood at the complexes of timber industry enterprises]. *Sistemy Metody Tekhnologii* [Systems Methods of Technology], 2019, no. 2 (42), pp. 100–104.

- [10] Mikhaylov K.L., Gushchin V.A., Tarakanov A.M. *Organizatsiya sbora i pererabotki lesosechnykh otkhodov i drov na lesoseke* [Organization of collection and processing of logging waste and firewood at the logging site]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2016, no. 6, pp. 98–109.
- [11] Sukhanov Yu.V., Sokolov A.P., Gerasimov Yu.Yu. *Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti sistem mashin dlya proizvodstva toplivnoy shchepy v Respublike Kareliya* [Evaluation of the economic efficiency of machine systems for the production of fuel chips in the Republic of Karelia]. *Resources and Technology* [Resources and Technology], 2013, no. 10 (1), pp. 1–23.
- [12] Shegel'man I.R., Skrypnik V.I., Kuznetsov A.V., Vasil'ev A.S. *Tendentsii razvitiya sovremennogo lesnogo mashinostroeniya* [Trends in the development of modern forestry engineering]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2016, no. 2, p. 30.
- [13] *Strategiya razvitiya lesnogo kompleksa Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda ot 11 fevralya 2021 goda №312-r*. [Strategy for the development of the forest complex of the Russian Federation until 2030 dated February 11, 2021 No. 312-r]. Moscow, 2018, 102 p. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573658653> (accessed 07.08.2022).
- [14] Spinelli R., Marchi E. Trends and perspectives in the desing of mobile wood chippers. *Croat. J.for. Eng.*, 2021, v. 42(1). DOI:10.5552/crojfe.2021.787
- [15] Spinelli R., Hartsough B. A survey of Italian chipping operations. *Biomass and Bioenergy*, 2001, v. 21(6), pp. 433–444. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(01\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(01)00050-2)
- [16] Spinelli R., Visser R.J.M. Analyzing and estimating delays in wood chipping operations. *Biomass and Bioenergy*, 2009, v. 33(3), pp. 429–433. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.003>
- [17] Gard Timmerfors J., Sjölund T., Jönsson L.J. New drum-chipping technology for a more uniform size distribution of wood chips. *Holzforschung*, 2020, v. 74(2), pp. 116–122. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0279>
- [18] Fokin S.V., Akhmetov E.A. *O perspektivnykh konstruksiyakh rubitel'nykh mashin* [On promising designs of chippers]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agrarian scientific journal], 2020, no. 7, pp. 85–88.
- [19] Spinelli R., Cavallo E., Eliasson L., Facello A. Comparing the efficiency of drum and disc chippers. *Silva Fennica*, 2013, v. 47, no. 2, article id 930. <https://doi.org/10.14214/sf.930>
- [20] Spinelli R., Magagnotti N. A tool for productivity and cost forecasting of decentralized wood chipping. *Forest Policy and Economics*, 2010, v. 12(3), pp. 194–198. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2009.10.002>
- [21] Spinelli R., Magagnotti N. The effect of raw material, cut length, and chip discharge on the performance of an industrial chipper. *Forest Products J.*, 2013, v. 62(7–8), pp. 58–589. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-12-00083.1>
- [22] Spinelli R., Magagnotti N. Using disposable chipper knives to decrease wood fuel processing cost. *Fuel Processing Technology*, 2014, v. 126, pp. 415–419. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.05.026>
- [23] Baranov N.F., Fufachev V.S., Stupin I.V. *Opredelenie sily zatyagivaniya materiala nozhom rubitel'noy mashiny* [Determination of the pulling force of the material by the knife of the chipper]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* [Agrarian science of the Euro-North-East], 2016, no. 1 (50), pp. 70–75.
- [24] Baranov N.F., Fufachev V. S., Stupin I. V. *Rubitel'naya mashina* [Chipping machine]. Patent 2626172 RF, MPK B27L 11/00. / № 2015155891. Zayavitel' i patentoobladatel' Ministerstvo sel'skogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Vyatskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya» [Patent 2626172 RF, IPC B27L 11/00. No. 2015155891. Applicant and patent holder Ministry of Agriculture of the Russian Federation Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Vyatka State Agricultural Academy»]. *Bull.* no. 21, 9 p.
- [25] Volkov A.Ya. *Barabannaya rubitel'naya mashina* [Drum chipper]. A. s. 1782746 SSSR, MPK B27L 11/00. № 4872008/15 [Certificate of authorship 1782746 USSR, IPC B27L 11/00, no. 4872008/15], Appl. 18.07.90; publ. 23.12.92, bull. no. 47, 3 p.
- [26] Treshchikov G.M., Lyukin Yu.A. *Barabannaya rubitel'naya mashina dlya izmel'cheniya drevesnykh otkhodov* [Drum chipper for wood waste shredding]. A. s. 1437230 SSSR, MPK B27L 11/02. № 4256231/29-15 [Certificate of authorship 1437230 USSR, IPC B27L 11/02, no. 4256231/29-15]. Appl. 03.06.87; publ. 15.11.88, bull. no. 42, 3 p.
- [27] Korobov V.V., Rushnov N.P. *Pererabotka nizkokachestvennogo syr'ya (problemy bezotkhodnoy tekhnologii)* [Processing of low-quality raw materials (problems of non-waste technology)]. Moscow: Ecology, 1991, 288 p.
- [28] OST 13-28-74 *Gorbyl' delovoy khvoynykh i listvennykh porod* [Business slab of coniferous and hardwood species]. Introduction 18.07.1974. Moscow: Minleskhoz, 1974, 5 p.
- [29] GOST 2708-75 *Lesomaterialy kruglye. Tablitsa ob'emov* [Round timber. Volume table]. Moscow: Standartinform, 2006, 37 p.
- [30] GOST 15815-83 *Shchepa tekhnologicheskaya. Tekhnicheskie usloviya* [Technological chips. Specifications]. Moscow: Gosstandart of Russia, 1985, 15 p.

Authors' information

Bulatov Sergey Yur'evich  — Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Professor of the Department of Technical Service of the Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, bulatov_sergey_urevich@mail.ru

Nechaev Vladimir Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Technical and Biological Systems of the Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, nechaev-v@list.ru

Sergeev Aleksandr Georgievich — Cand. Sci. (Tech.), General Director of Doza-Agro LLC, office@dozaagro.ru

Received 14.10.2022.

Approved after review 15.11.2022.

Accepted for publication 21.03.2023.

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

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЗАГОТОВКИ ДРЕВЕСИНЫ НА ПРИМЕРЕ ЛЕСНОГО ХАРВЕСТЕРА

К.П. Рукомойников[✉], Т.В. Сергеева, Т.А. Гилязова, Е.М. Царев, П.Н. Анисимов

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», Институт леса и природопользования, Россия, 424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3

rukomojnikovkp@volgatech.net

Целью работы было создание компьютерной модели, позволяющей воспроизвести технологический процесс лесозаготовки с учетом огромного количества всевозможных условий, способных повлиять на конечный результат работы предприятия, получить данные, необходимые для принятия эффективных управленческих и организационных решений по нормированию труда и подготовке нормативной документации. Для этого с помощью метода агентного моделирования в программе AnyLogic была создана имитационная модель производственного процесса. Функционирование предложенной модели осуществляется на основе значимых статистических данных о наиболее важных характеристиках отдельных элементов производственного процесса. В статье приведена демонстрация возможностей моделирования технологических схем работы на лесосеке на этапе проектирования технологической карты без необходимости реальной рубки лесных насаждений. Представлена диаграмма состояний работы харвестера, заложенная в созданную авторами имитационную модель, позволяющая исследователю провести пошаговый анализ работы лесозаготовительной машины. Показана информационно логическая детализация всех блоков диаграммы состояний работы харвестера, позволяющая понять принцип анализа при расчистке площадки для новой рабочей позиции, анализа доступности деревьев на пасеках, обработки стволов деревьев с учетом всех перемещений и организационно-технических простоев в процессе освоения лесосек. Представлена графическая демонстрация выбора деревьев доступных для валки, а также анализа ситуации для перемещения на новую рабочую позицию харвестера. Изложена последовательность ввода данных в модель и принципы фиксации полученных на основе моделирования научных результатов. Созданная имитационная модель позволит лесопользователям осуществлять: сравнение вариантов технологических схем движения харвестера по лесосеке с выбором наилучших организационных и управленческих решений; создание нормативов трудозатрат и нормативов выработки при разработке лесосек в любых природно-производственных условиях для любой модели используемого харвестера в зависимости от вида рубок и породно-качественных характеристик вырубаемых деревьев.

Ключевые слова: имитационное моделирование, программное обеспечение, лесозаготовка, лесосека, технологическая карта

Ссылка для цитирования: Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов П.Н. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 69–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80

Моделированием технологических процессов, в частности, имитационным моделированием в области лесной промышленности, занимались различные ученые. Были проведены подробные исследования по моделированию объемов выработки лесозаготовительных предприятий и трудозатрат на реализацию отдельных составляющих технологического процесса [1–5], расхода топлива лесозаготовительной техники при выполнении технологического цикла лесосечных работ и перебазировок лесосечных машин [6, 7]. Существуют методические подходы к моделированию технологических процессов при решении транспортных задач по транспортировке заготовленного сырья и готовой продукции [8, 9].

Моделирование технологических процессов широко используется на всех стадиях лесозаготовительного производства. В частности, в своей докторской диссертации Ю.В. Пильник [10] предлагает экономико-математическую модель оптимального распределения грузопотоков лесоматериалов, позволяющую разрабатывать мероприятия по формированию единой лесотранспортной сети при поставке лесоматериалов для условий регионов лесозаготовки. Иванников В.А. [11] делает попытку имитировать рациональные структуры транспортных потоков лесоматериалов и модельного ряда лесовозных автопоездов с разработкой модели мультимодальных грузопотоков. А.П. Соколов и Ю.Ю. Герасимов [12, 13] разработали методику синтеза оптимального лесозаготовительного плана, а также алгоритм его

программной реализации в составе компьютерной информационно-вычислительной системы лесозаготовительной логистики. Исследование сотрудников ПетрГУ А.П. Соколова, Е.В. Осипова [14] представляет собой углубленный анализ методов имитационного моделирования. Объектом исследования также являются лесные машины. Для решения поставленной задачи был применен метод дискретно-событийного имитационного моделирования на сетях Петри. Предложенная в работе А.П. Мохирева [15] имитационная модель эффективного планирования деятельности лесозаготовительных предприятий при вывозке древесных ресурсов с лесосек и промежуточных складов отличается возможностью прогнозирования развития технологического процесса комплекса лесотранспортных операций с учетом динамически изменяемых природно-производственных условий многолесных районов РФ.

Имитация технологических процессов лесозаготовительных работ приобретает актуальность при анализе задач применения современной лесозаготовительной техники, на которую в большинстве случаев еще не разработаны нормативы расчета выработки и трудозатрат при планировании

деятельности лесопромышленных предприятий в изменяющихся условиях окружающей среды. Внедрение харвестеров в технологический процесс лесосечных работ предусматривает решение широкого круга задач повышения эффективности их использования [16–18]. Принятие управленческих и организационных решений по нормированию труда и подготовке нормативной документации следует компьютеризировать в зависимости от вида рубок, качественных и количественных характеристик древостоя, технических характеристики используемой техники с максимальным учетом случайных природно-производственных факторов [19–22].

Цель работы

Цель работы — создание компьютерной модели, позволяющей воспроизвести технологический процесс лесозаготовки с учетом огромного количества всевозможных условий, способных повлиять на конечный результат работы предприятия и получить данные, необходимые для принятия эффективных управленческих и организационных решений по нормированию труда и подготовке нормативной документации.

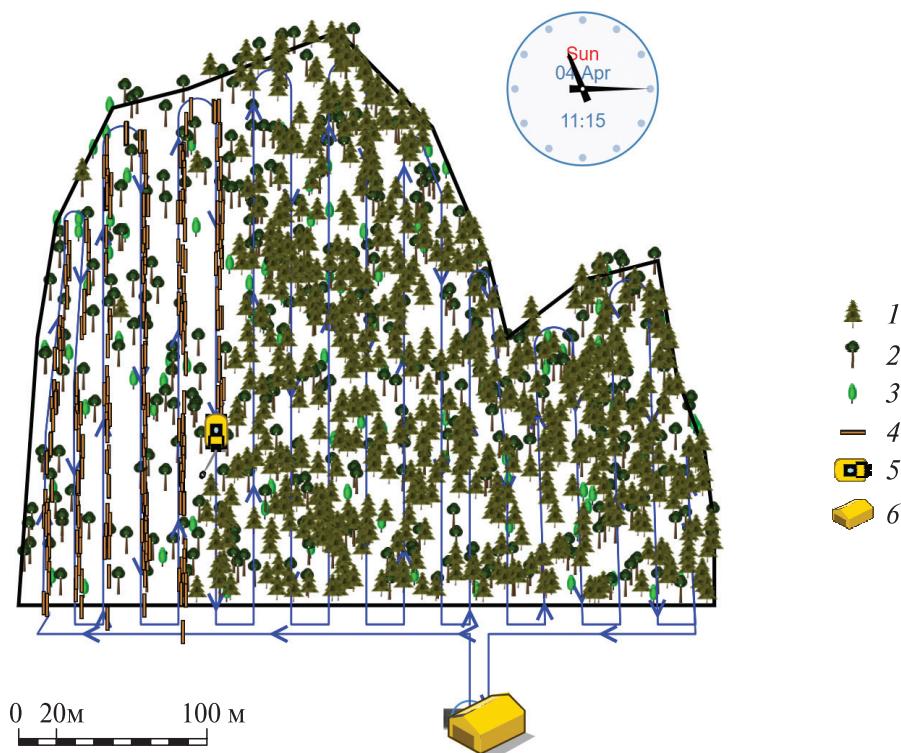


Рис. 1. Пример рабочего окна при запуске имитационной модели функционирования харвестера в программной среде AnyLogic: основные агенты моделирования: 1 — деревья для валки; 2 — деревья, оставляемые на доращивание и подрост; 3 — подлесок; 4 — сортименты; 5 — лесной харвестер; 6 — погрузочный пункт

Fig. 1. An example of the working window when running a simulation model of harvester operations in the AnyLogic software environment: 1 — felling trees; 2 — trees left to complete growing and undergrowth; 3 — undergrowth; 4 — gradings; 5 — forest harvester; 6 — loading point

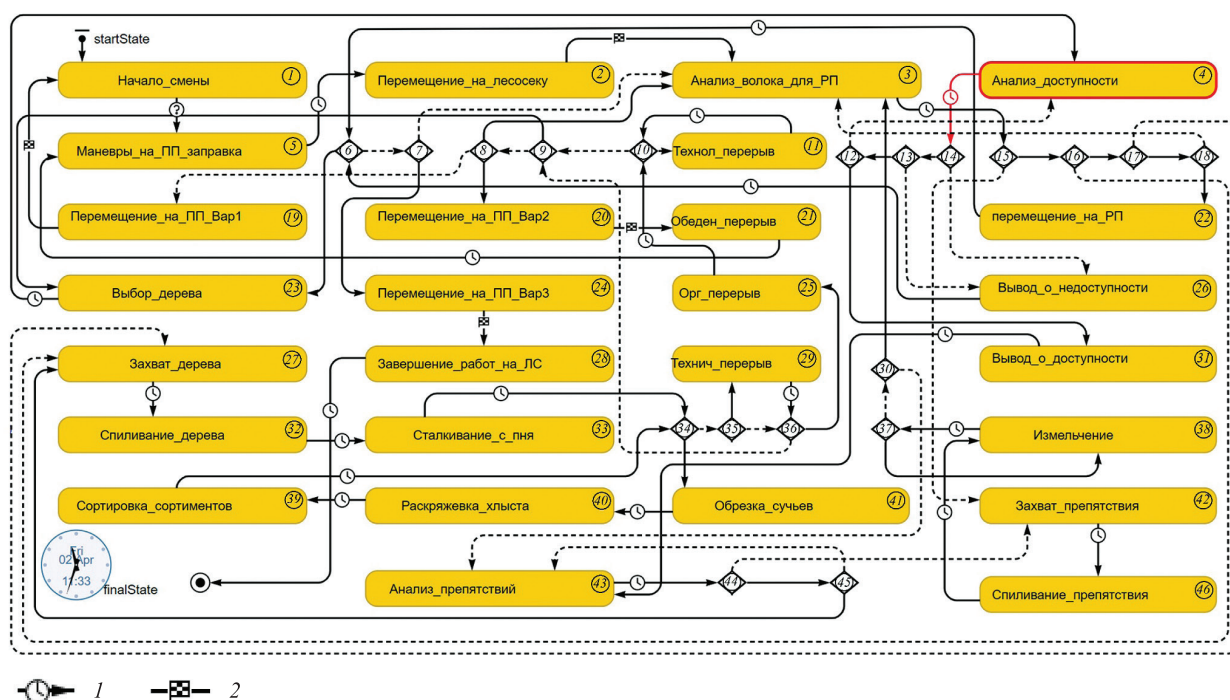


Рис. 2. Диаграмма состояний харвестера в программной среде имитационного моделирования AnyLogic: условные обозначения: 1 — переход по модельному времени; 2 — переход при прибытии агента моделирования; ПП — погрузочный пункт; РП — рабочая позиция харвестера; ЛС — лесосека; Вар1 — вариант первый (для завершения рабочей смены); Вар2 — вариант второй (для обеда); Вар3 — вариант третий (при завершении разработки лесосеки)

Fig. 2. Diagram of harvester states in AnyLogic simulation software environment: 1 — transition according to model time; 2 — transition upon model agent arrival; ПП — loading point; РП — harvester work position; ЛС — harvesting area; Вар1 — variant one (to complete work shift); Вар2 — variant two (for lunch break); Вар3 — variant three (to complete harvesting area)

Материалы и методы

Использование имитационного моделирования как одного из направлений математического моделирования во многих случаях является предпочтительным вариантом анализа технологического процесса реализации исследовательских работ [23]. В описываемом исследовании по разработке имитационной модели работы лесного харвестера выбор среди всех систем имитационного моделирования был сделан в пользу системы компьютерного моделирования AnyLogic [24], позволившей осуществить агентный подход к решению этого вопроса [25] с оценкой действий децентрализованных динамически взаимодействующих агентов технологического процесса, характеризующихся независимым набором параметров и реализацией возможностей системного анализа взаимодействия между ними.

Результаты и обсуждение

С использованием функциональных возможностей среды имитационного моделирования AnyLogic, создана имитационная модель работы харвестера на лесосеке. При анализе различных технических, технологических и

организационных аспектов освоения лесных участков исследователь имеет возможность задать координаты погрузочного пункта, границ лесосеки на карте местности и траекторию движения харвестера, аналогично созданию технологической карты освоения лесосек. Варьируемыми параметрами древостоя на заданной исследователем лесосеке являются количество деревьев целевого компонента рубки на лесосеке, количество деревьев нецелевого компонента рубки (деревья которого должны быть оставлены на дорастивание), и количество деревьев из категории подлесок (деревья, которые могут быть удалены в ходе рубки для повышения доступности деревьев целевого компонента). Размещение всех деревьев на территории лесосеки осуществляется произвольно при каждом запуске программы имитации. Породы и диаметры стволов деревьев всех компонентов распределяются между ними случайным образом на основе указываемых исследователем характеристик формулы породного состава каждого компонента и их размерных параметров.

Пример схемы освоения лесосеки харвестером запущенных в программе имитационного моделирования показана на рис. 1.

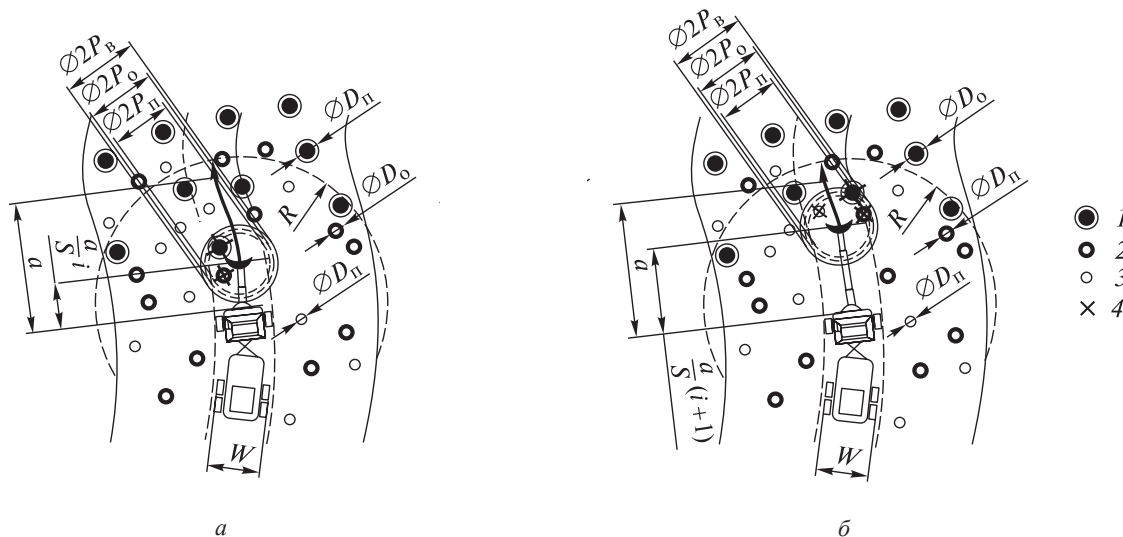


Рис. 3. Схема анализа при расчистке новой рабочей позиции харвестера: *a* — визуализация работы харвестера при выполнении *i* шага пошагового анализа новой рабочей позиции; *b* — визуализация работы харвестера при выполнении *i + 1* шага пошагового анализа новой рабочей позиции; D_b, D_o, D_n — соответственно диаметры деревьев целевого и нецелевого компонента и подлеска, м; P_b, P_o, P_n — соответственно минимально допустимые расстояния от оси харвестерной головки, до осей стволов деревьев целевого и нецелевого компонента и подлеска, м; R — эффективный вылет манипулятора харвестера, м; a — расстояние между рабочими позициями харвестера, м; s — общее число шагов при пошаговом анализе; i — порядковый номер шага при пошаговом анализе; W — ширина харвестера, м.; 1 — деревья целевого компонента; 2 — деревья нецелевого компонента; 3 — подлесок; 4 — удаляемые деревья

Fig. 3. Schematic of the analysis when clearing a new working position of the harvester: *a* — visualization of harvester operation when performing *i* step-by-step analysis of the new working position; *b* — visualization of harvester operation when performing *i + 1* step-by-step analysis of the new working position; D_b, D_o, D_n — diameters of target and non-target component trees and undergrowth, m, respectively; P_b, P_o, P_n — minimum allowable distances from the axis of the harvester head to the axes of the target and non-target components and undergrowth, m, respectively; R — effective reach of the harvester arm, m; a — distance between the working positions of the harvester, m; s — total number of steps in a step-by-step analysis; i — sequential number of steps in a step-by-step analysis; W — harvester width, m; 1 — target component trees; 2 — non-target component trees; 3 — undergrowth; 4 — trees to be removed

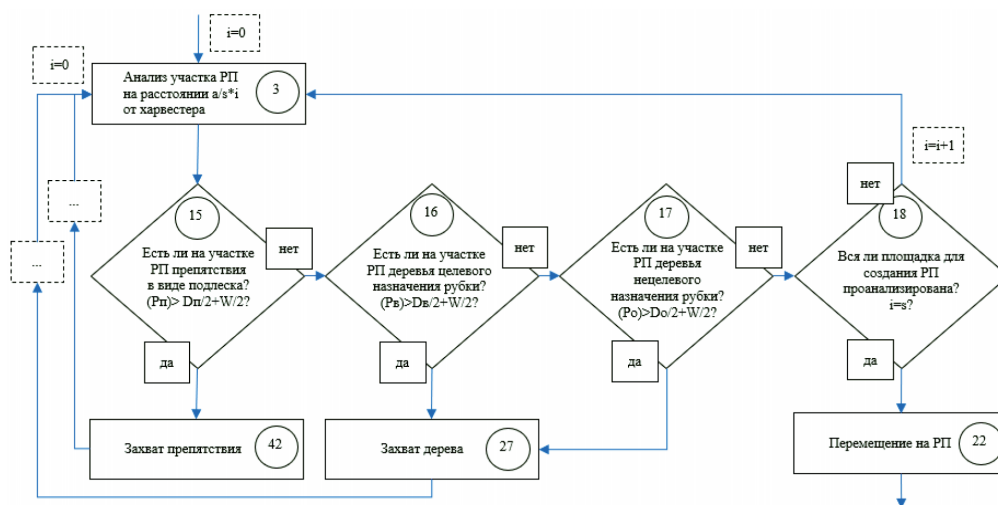


Рис. 4. Детализация блоков диаграммы состояний работы лесного харвестера при расчистке площадки для новой рабочей позиции машины: РП — рабочая позиция; D_b, D_o, D_n — соответственно, диаметры деревьев целевого и нецелевого компонента и подлеска, м; P_b, P_o, P_n — соответственно минимально допустимые расстояния от оси харвестерной головки, до осей стволов деревьев целевого и нецелевого компонента и подлеска, м; s — общее число шагов при пошаговом анализе; i — порядковый номер шага при пошаговом анализе; W — ширина харвестера, м

Fig. 4. Detail block diagram of forest harvester operation when clearing a site for a new working position of the machine: РП — working position; D_b, D_o, D_n — respectively, diameters of trees of target and non-target components and undergrowth, m; P_b, P_o, P_n — respectively, the minimum allowable distances from the axis of harvester head, to the axes of trunks of trees of target and non-target components and undergrowth, m; s — total number of steps in step analysis; i — sequence number of steps in step analysis; W — harvester width, m

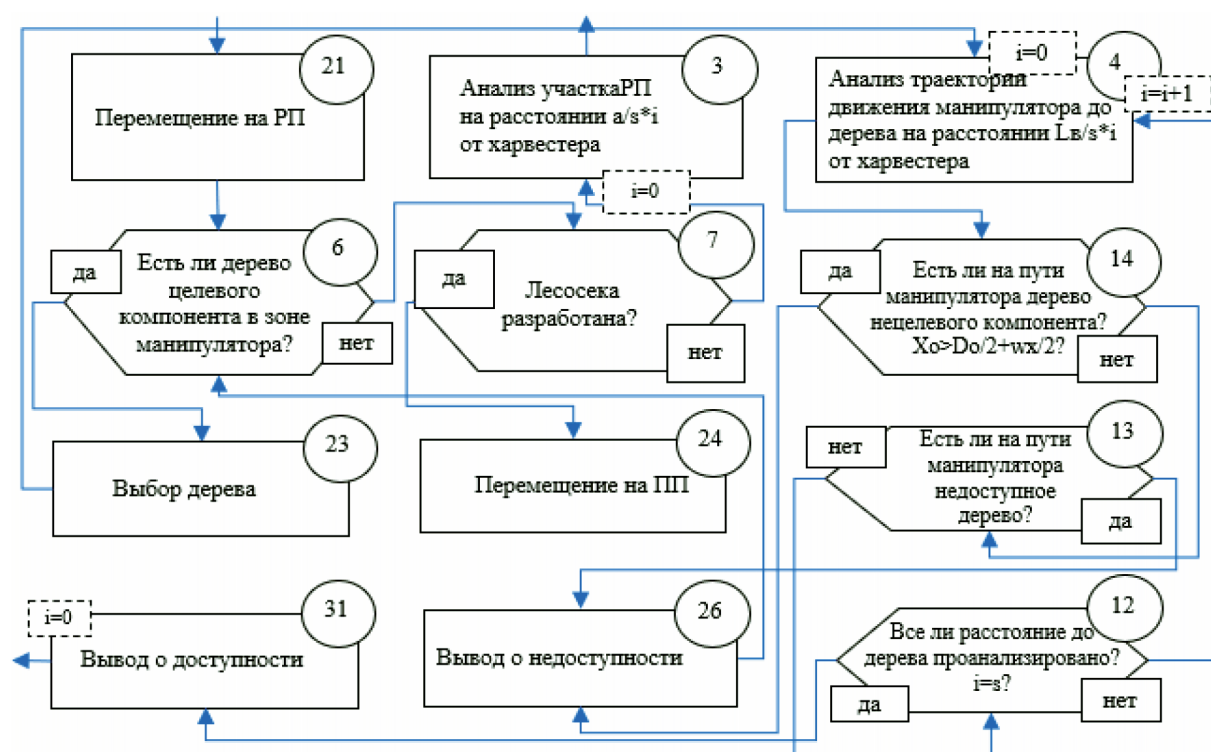


Рис. 5. Детализация блоков диаграммы состояний работы лесного харвестера при анализе неустранимых препятствий на пути движения харвестерной головки до вырубаемого дерева: D_0 — диаметр деревьев нецелевого компонента, м; w_x — ширина харвестерной головки, м; X_0 — расстояние от оси харвестерной головки до ближайшего дерева нецелевого компонента на каждом шаге анализа, м; s — общее число шагов при пошаговом анализе; i — порядковый номер шага при пошаговом анализе; L_b — расстояние до анализируемого дерева, м

Fig. 5. Detail block diagram of forest harvester operation when analyzing intractable obstacles on the path of the harvester head to the tree to be felled: D_0 — diameter of trees of non-target component, m; w_x — width of harvester head, m; X_0 — distance from harvester head axis to the nearest tree of non-target component in each analysis step, m; s — total number of steps in step analysis; i — ordinal number of step in step analysis; L_b — distance to analyzed tree, m

В разработанной нами модели используются технические характеристики харвестера и квалификации оператора: размеры харвестера и харвестерной головки, скоростные характеристики перемещения харвестера и его манипулятора, параметры вылета манипулятора, скорость протаскивания ствола дерева харвестерной головкой, производительность чистого пиления и некоторые другие параметры.

Исследователь может изменять такие организационные параметры, как сменность работы оператора, продолжительность смены и нормируемых перерывов, а также характерные для того или иного предприятия статистические показатели частоты ненормируемых перерывов в работе: технических и организационных.

Составлена диаграмма состояний харвестера, позволяющая отслеживать все этапы его работы в программной среде имитационного моделирования (рис. 2).

В процессе работы харвестера обрабатываются деревья целевого компонента с обеспечением сохранности на полупасеках деревьев нецелевого компо-

нента. Таким образом, могут имитироваться сплошные рубки с сохранением и без сохранения подроста, а также различные виды выборочных рубок.

Одним из основных этапов действий харвестера является анализ доступности вырубаемых деревьев. Такой анализ проводится неизменно при перемещениях на новую рабочую позицию и последующем определении с выбранной рабочей позиции доступности или недоступности находящихся вблизи харвестера деревьев. Согласно схеме, анализ при расчистке рабочих позиций для перемещения харвестера (рис. 3) осуществляется на расстоянии эффективного вылета манипулятора от него. Это расстояние соответствует эффективному вылету его манипулятора. Текущая рабочая позиция харвестера не позволяет далее осуществлять рубку деревьев с одного места и требуется перемещение на новую рабочую позицию с вырубкой всех деревьев, оказавшихся на пути его движения.

На рис. 4. представлена информационно-логическая детализация блоков диаграммы состояний при расчистке рабочих позиций харвестера, позволяющая оценить варианты развития этапов

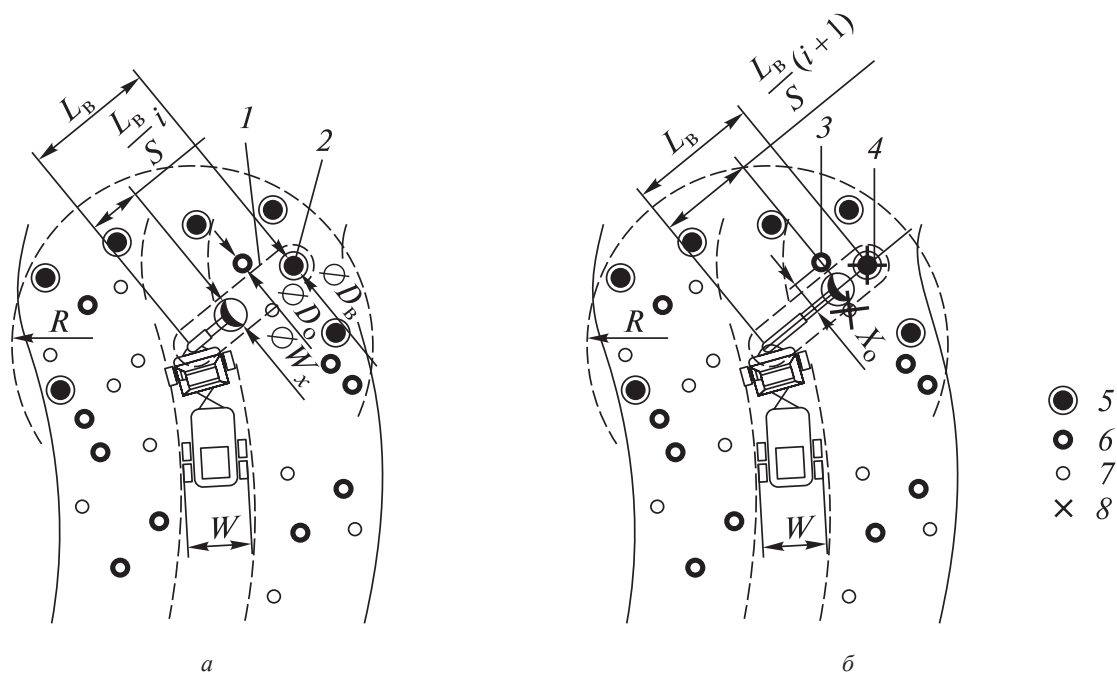


Рис. 6. Схема пошагового анализа доступности деревьев на полупасаках. Анализируемое дерево доступно ($X_0 > D_0/2 + w_x/2$): *a* — визуализация работы харвестера при выполнении *i* шага пошагового анализа доступности деревьев на полупасаках; *б* — визуализация работы харвестера при выполнении *i* + 1 шага пошагового анализа доступности деревьев на полупасаках; L_b — расстояние до анализируемого дерева, м; S — общее количество шагов при анализе, *I* — номер шага при анализе, X_0 — расстояние от оси харвестерной головки до ближайшего дерева нецелевого компонента на каждом шаге анализа, м; D_0 — диаметр ближайшего к харвестерной головке дерева нецелевого компонента, м; w_x — ширина харвестерной головки, м; W — ширина харвестера, м; *I* — зона, ограничивающая доступность дерева; *2, 4* — анализируемое дерево; *3* — ближайшее дерево нецелевого компонента; *5* — деревья целевого компонента; *6* — деревья нецелевого компонента; *7* — подлесок; *8* — удаляемые деревья

Fig. 6. Schematic of a step-by-step analysis of tree availability at half-points. The tree being analysed is available ($X_0 > D_0/2 + w_x/2$): *a* — visualization of the harvester operation when performing *i* step of the step-by-step analysis of tree availability on the half-lots; *б* — visualization of the harvester operation when performing *i* + 1 step of the step-by-step analysis of tree availability on the half-lots; L_b — distance to the analyzed tree, m; S — total number of steps in the analysis, *I* — number of steps in the analysis, X_0 — distance from the harvester head axis to the nearest tree of a non-target component in each analysis step, m; D_0 — diameter of the tree nearest to the harvester head of the non-target component, m; w_x — width of the harvester head, m; W — width of the harvester, m; *I* — area limiting tree availability; *2, 4* — tree to be analysed; *3* — nearest tree of non-target component; *5* — trees of target component; *6* — trees of non-target component; *7* — undergrowth; *8* — trees to be removed

анализа в различных ситуациях. Нумерация блоков на этом и последующих рисунках соответствует нумерации соответствующих блоков исходной диаграммы состояний (см. рис. 2), что позволяет исследователю получить более подробное представление о заложенных в имитационную модель принципах функционирования отдельных ее элементов.

Разработана информационно-логическая детализация блоков диаграммы состояний работы харвестера при анализе неустраняемых препятствий на пути движения манипулятора (рис. 5), а также схема (рис. 6) работы харвестера, позволяющая понять принцип анализа доступности деревьев, заложенных в процесс пошаговой имитации технологического процесса. В тех случаях, когда на траектории движения манипулятора от харвестера к дереву отсутствуют другие деревья нецелевого компонента, дерево переходит в категорию доступных для валки.

Вырубаемые деревья, признанные недоступными с анализируемой рабочей позиции харвестера, переводятся в категорию «недоступные деревья» и впоследствии не подвергаются анализу. После перемещения на новую рабочую позицию все недоступные ранее деревья признаются доступными и в отношении них производится повторный анализ.

Следующие блоки диаграммы реализуют дальнейший анализ подлеска на пути движения харвестерной головки к дереву. Если такие деревья существуют, то осуществляется их удаление с последующим измельчением.

Анализ рис. 7 позволяет сделать вывод о недоступности с текущей рабочей позиции двух деревьев целевого компонента, так как на пути движения манипулятора встречаются деревья нецелевого компонента рубки, которые следует оставить на дорастивание. При этом отмечается доступность пяти деревьев целевого компонента,

Рис. 7. Итоговые результаты анализа доступности деревьев целевого компонента и выбора удаляемых деревьев: 1 — деревья целевого компонента; 2 — деревья нецелевого компонента; 3 — подросток; 4 — удаляемые деревья; 5 — недоступные деревья

Fig. 7. Summary results of target component tree availability analysis and selection of trees to be removed: 1 — target component trees; 2 — non-target component trees; 3 — undergrowth; 4 — trees to be removed; 5 — inaccessible trees

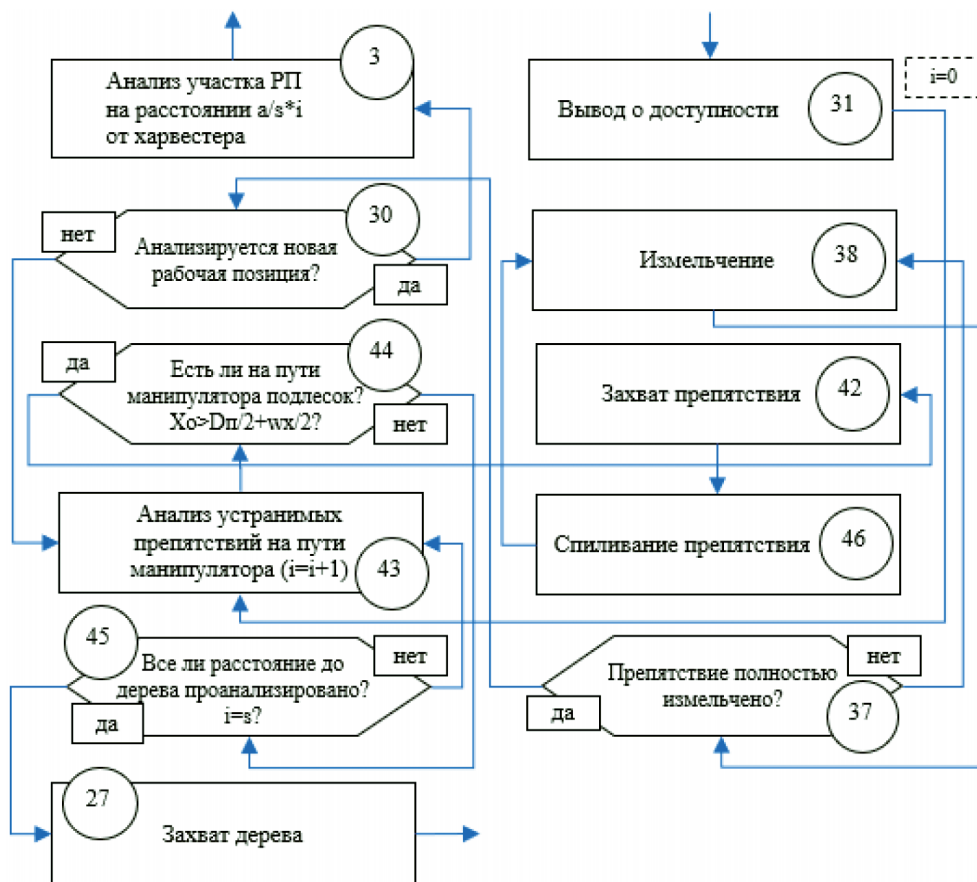
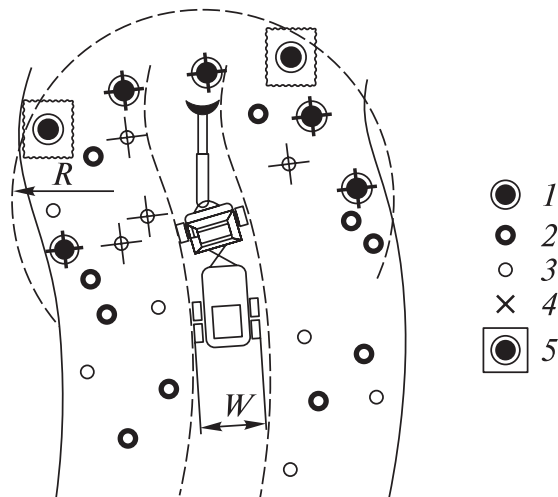


Рис. 8. Детализация блоков диаграммы состояний работы лесного харвестера при анализе и удалении устранимых препятствий на пути движения манипулятора до вырубаемого дерева: РП — рабочая позиция; a — расстояние между рабочими позициями харвестера, м; s — общее число шагов при пошаговом анализе; i — порядковый номер шага при пошаговом анализе; D_n — диаметры подростка, м; w_x — ширина харвестерной головки, м; X_o — расстояние от оси харвестерной головки до ближайшего дерева нецелевого компонента на каждом шаге анализа, м

Fig. 8. Detail of forest harvester operation status diagram blocks when analyzing and removing removable obstacles in the path of manipulator movement to the tree to be felled: РП — working position; a — distance between working positions of harvester, m; s — total number of steps in step-by-step analysis; i — ordinal number of step in step-by-step analysis; D_n — undergrowth diameters, m; w_x — width of harvester head, m; X_o — distance from harvester head axis to the nearest tree of non-target component in each analysis step, m

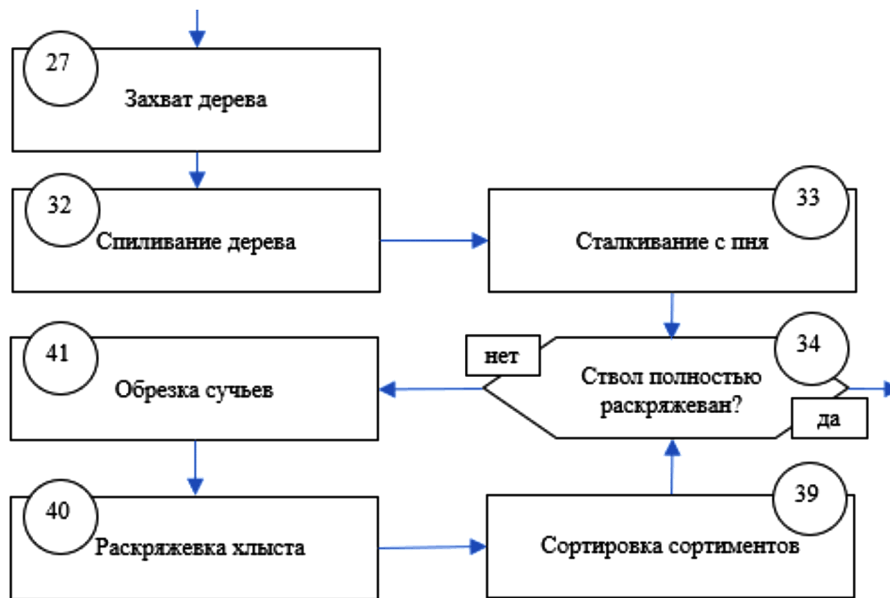


Рис. 9. Детализация блоков диаграммы состояний работы лесного харвестера при имитации процесса обработки ствола дерева
 Fig. 9. Detail block diagram of forest harvester operation state diagram when simulating process of tree trunk processing

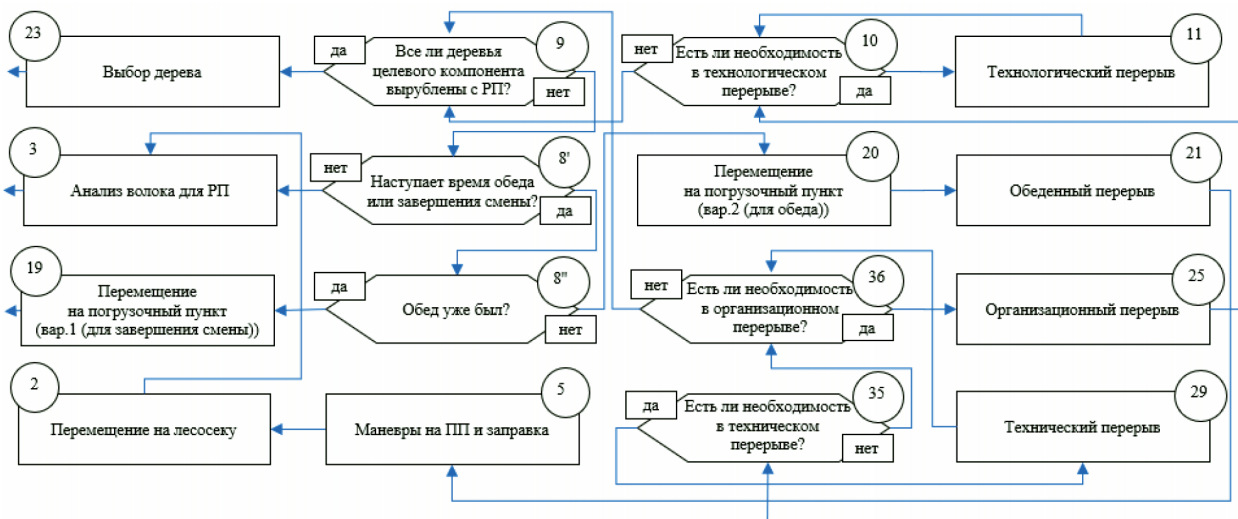


Рис. 10. Детализация блоков диаграммы состояний работы лесного харвестера при анализе перемещений и организационно-технических простоев в процессе разработки лесосеки
 Fig. 10. Detail of the forest harvester operation status diagram blocks when analyzing movements and organizational and technical downtime in the process of timber harvesting

для валки которых необходимо удалить четыре дерева, относящиеся к категории «подлесок».

Разработана информационно-логическая детализация имитации блоков диаграммы состояний работы харвестера при анализе и удалении устранимых препятствий в виде подлеска на пути движения харвестерной головки (рис. 8) и детализация процесса обработки ствола дерева (рис. 9).

В имитационной модели анализируется раскряжевка первоначально на шестиметровые сортименты, а когда это становится невозможным, то последовательно на четырех- и двухметровые

отрезки без учета их качественных признаков. Основные параметры сортиментов определяются с использованием заложенных в модель известных статистических зависимостей [26].

Полученные в результате обработки ствола сортименты переводятся в категорию «бревна» в системе имитационного моделирования с параметрами, автоматически определяемыми в процессе отделения от дерева каждого нового бревна. При этом фиксируется их порода и осуществляется расчет длины сортиментов и диаметров ствола в месте поперечной распиловки. Вершинная часть

измельчается на однометровые отрезки, остающиеся на лесосеке для укрепления волока или на перегнивание. Пересчет общего заготовленного объема бревен выполняется после отделения от ствола каждого нового бревна.

Имитационный процесс анализа перемещений и простоев харвестера представлен в виде информационно-логической детализации блоков диаграммы состояний работы харвестера на рис. 10.

В результате создания описанной имитационной модели авторским коллективом получено свидетельство Российской Федерации на регистрацию программы моделирования работы харвестера [27].

Выводы

Разработанная имитационная модель работы харвестера на базе метода агентного моделирования процессов в системе AnyLogic позволяет проводить симуляцию производственных процессов и оценивать значимость их влияния на результаты функционирования производственных систем, переходя от показателей микроуровня к показателям макроуровня.

Модель предоставляет широкие возможности для анализа эффективности работы харвестера без необходимости реальной рубки лесных насаждений. Следующим этапом моделирования будет являться постановка имитационного эксперимента на описанной модели. При этом возможен анализ влияния на результаты работы как природно-производственных, так и технических и технологических факторов.

Планирование эксперимента на модели предусматривает выделение основных факторных признаков насаждений, влияние которых существенно сказывается на выработке харвестеров. Среди основных признаков окружающей среды, выбранных для дальнейшего анализа, можно выделить необходимость оценки влияния на производительность машин общего запаса леса на одном гектаре, влияния доли вырубаемого компонента и наличия на лесосеке подроста хозяйственно-ценных пород древесины. Экспериментальные исследования на модели также могут быть направлены на выявление степени влияния технических характеристик харвестеров и квалификации операторов на результаты работы и финальный объем заготовленной продукции. Среди основных признаков технического состояния машин, оценку которых выполняют с помощью подготовленного программного обеспечения можно выделить скоростные характеристики движения машины по лесосеке и работы ее манипулятора, характеристики эффективного вылета манипулятора и габаритные параметры харвестера и харвестерной головки.


Созданная программа имитационного моделирования может быть эффективно использована научными и научно-производственными организациями при анализе работы лесных машин, а также производственными предприятиями при выборе техники и технологии для организации работы в лесу.

Список литературы

- [1] Рукомойников К.П., Мохирев А.П. Обоснование технологической схемы лесозаготовительных работ путем создания динамической модели функционирования предприятия // ИзВУЗ Лесной журнал, 2019. № 4. С. 94–107. DOI: 10.17238/issn 0536-1036.2019.4.94
- [2] Mokhiev A., Rukomojnikov K., Gerasimova M., Medvedev S. Finding an effective technological chain of the logging process in the natural and production conditions of the Krasnoyarsk region // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 817 (1), 2020, p. 012025. DOI:10.1088/1757-899X/817/1/012025
- [3] Gerasimov Y., Sokolov A., Fjeld D. Improving cut-to-length operations management in Russian logging companies using a new decision support system // Baltic Forestry, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 89–105.
- [4] Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical model of interaction between forest machine's rover and strengthening soil // IOP Conf. Series: J. of Physics: Conf. Series 1108, 2018. DOI:10.1088/1742-6596/1177/1/012030
- [5] Шегельман И.Р., Васильев А.С. Использование базы знаний как инструмента синтеза патентоспособных решений, повышающих эффективность возобновления леса сеянцами и саженцами лесных культур // Инженерный вестник Дона, 2020. № 7 (67). С. 206–215.
- [6] Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Волдаев М.Н., Царев Е.М., Анисимов С.Е. Компьютерная симуляция разработки лесосек с использованием валочно-сучкорезно-раскряжевочных машин // Системы. Методы. Технологии, 2022. № 2 (54). С. 108–113.
- [7] Рукомойников К.П., Купцова В.О. Обоснование норм расхода топлива многооперационных лесозаготовительных машин на примере харвестера // ИзВУЗ Лесной журнал, 2020. № 3(375). С. 117–127. DOI 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127
- [8] Mokhiev A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the optimal route of wood transportation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, v. 226, p. 012053. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012053
- [9] Gerasimov Y.Y., Sokolov A.P., Karjalainen T. GIS-based decision-support program for planning and analyzing short-wood transport in Russia // Croatian J. of Forest Engineering, 2008, v. 29, iss. 2, pp. 163–175.
- [10] Пильник Ю.Н. Методы и алгоритмы синтеза организационных структур формирования сетевых грузопотоков лесоматериалов многоуровневых транспортно-технологических систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2019. 340 с.
- [11] Иванников В.А. Совершенствование системы формирования грузопотоков лесоматериалов на смежных видах транспорта: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2019. 340 с.
- [12] Герасимов Ю.Ю., Катаров В.К., Ковалёва Н.В., Рожин Д.В., Соколов А.П., Слюнёв В.С. Совершенствование системы оптимального проектирования сети лесных автомобильных дорог // Ученые записки Петрозаводского государственного университета, 2013. № 8 (137). С. 70–76.

- [13] Соколов А.П. Комплексное освоение лесосырьевых баз: обоснование технологий и параметров процессов на основе логистического подхода: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Петрозаводск, 2015. 329 с.
- [14] Соколов А.П., Осипов Е.В. Имитационное моделирование производственного процесса заготовки древесины с помощью сетей Петри // Лесотехнический журнал, 2017. Т. 7. № 3 (27). С. 307–314. DOI: 10.12737/article_59c2140d704ae5.63513712
- [15] Мохирев А.П. Обоснование доступности древесных ресурсов путем моделирования структуры лесотранспортных потоков (на примере Красноярского края РФ): дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Красноярск, 2021. 402 с.
- [16] Куницкая О.А., Чернуцкий Н.А., Дербин М.В., Рудов С.Е., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Машинная заготовка древесины по скандинавской технологии. СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. 192 с.
- [17] Лаурила Я., Кучин А.В., Лебедев В.Д. Лесозаготовительные машины PONSSE. Архангельск: Изд-во И.А. Васильев, 2020. 144 с.
- [18] Будник П.В. Синтез технико-технологических решений комплексного освоения ресурсов древесины: обоснование технологий и параметров процессов на основе логистического подхода: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.01. Петрозаводск, 2021. 469 с.
- [19] Национальное общество имитационного моделирования URL: <http://simulation.su/ru.html> (дата обращения 01.12.2021).
- [20] Yaoxiang Li. Modeling operational forestry problems in central Appalachian hardwood forests. Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports, 2005, 4166, 144 p. URL: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/4166> (дата обращения 18.02.2022).
- [21] Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of harvester productivity in selective and boom-corridor thinning of young forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, v. 27, no. 1, pp. 56–73. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2011.628335> (дата обращения 16.02.2022).
- [22] Суханов Ю.В., Селиверстов А.А., Соколов А.П., Сюнев В.С. Имитационное моделирование работы харвестера: алгоритмы и реализация // Уч. зап. Петрозаводского государственного университета, 2012. № 8–2(129). С. 49–51.
- [23] Ovaskainen H. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. *Dissertationes Forestales*, 2009, 79 p. URL: <http://www.metla.fi/dissertationes/df79.htm> (дата обращения 28.02.2022).
- [24] The AnyLogic Company. URL: <https://www.anylogic.ru/> (дата обращения 25.02.2022).
- [25] Boero R., Morini M., Sonnessa M., Terna P. Agent-based models of the Economy: from theories to applications. London: Palgrave Macmillan, 2015. 232 p.
- [26] Кочегаров В.Г., Бит Ю.А., Меньшиков В.Н. Технология и машины лесосечных работ. М.: Лесная пром-сть, 1990. 392 с.
- [27] Рукомойников К.П., Сергеева Т.В., Гилязова Т.А., Царев Е.М., Анисимов С.Е., Комисар В.П. Программа моделирования работы харвестера. Свидетельство о государственной регистрации компьютерной программы, №2022614531, РФ, 2022.

Сведения об авторах

Рукомойников Константин Павлович  — д-р техн. наук, профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий Института леса и природопользования ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», rukomojnikovkr@volgatech.net

Сергеева Татьяна Владиславовна — аспирант Института леса и природопользования ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», sergeeva2010t@mail.ru

Гилязова Татьяна Аркадьевна — аспирант Института леса и природопользования ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», tat-gilyazova@yandex.ru

Царев Евгений Михайлович — д-р техн. наук, профессор кафедры лесопромышленных и химических технологий Института леса и природопользования ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», CarevEM@volgatech.net

Анисимов Павел Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», AnisimovPN@volgatech.net

Поступила в редакцию 17.03.2022.

Одобрено после рецензирования 17.08.2022.

Принята к публикации 21.03.2023.

MODELING OPERATION OF FOREST HARVESTER IN ANYLOGIC SIMULATION SYSTEM

K.P. Rukomoynikov✉, T.V. Sergeeva, T.A. Gilyazova, E.M. Tsarev, P.N. Anisimov

Volga State University of Technology, 3, Lenin Square, 424000, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, Russia

rukomojnikovkp@volgatech.net

The purpose of the work is to create a computer model that allows to reproduce the technological process of logging, taking into account a huge number of various conditions that can affect the final result of the enterprise, to obtain the data necessary for making effective managerial and organizational decisions on labor standardization and the preparation of regulatory documentation. To do this, using the agent-based modeling method, a simulation model of the production process was created in the AnyLogic program. The functioning of the proposed model is carried out on the basis of significant statistical data on the most important characteristics of individual elements of the production process. The article demonstrates the possibilities of modeling technological schemes of work at the cutting site at the design stage of the technological map without the need for real felling of forest plantations. The diagram of the conditions of the harvester's work is presented, embedded in the simulation model created by the authors, which allows the researcher to conduct a step-by-step analysis of the work of the logging machine. An information-logical detailing of all blocks of the harvester work state diagram is shown, which allows understanding the principle of analysis when clearing the site for a new working position, analyzing the availability of trees in apiaries, processing of tree trunks, taking into account all movements and organizational and technical downtime in the process of developing forest cuttings. The reader is presented with a graphical demonstration of the choice of trees available for felling, as well as an analysis of the situation for moving to a new working position of the harvester. The sequence of data entry into the model and the principles of fixing the scientific results obtained on the basis of modeling are outlined. The created simulation model will allow forest users to compare the options for the technological schemes of the harvester's movement along the forest cutting with the choice of the best organizational and management solutions; creation of labor standards and production standards for the development of forest cuttings in any natural and production conditions for any model of the harvester used, depending on the type of felling and the species and quality characteristics of the felled trees.

Keywords: simulation, software, logging, felling area, chart

Suggested citation: Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Tsarev E.M., Anisimov P.N. *Imitatsionnoe modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa zagotovki drevesiny na primere lesnogo kharvestera* [Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 69–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80

References

- [1] Rukomoynikov K.P., Mokhired A.P. *Obosnovanie tekhnologicheskoy skhemy lesozagotovitel'nykh robot putem sozdaniya dinamicheskoy modeli funktsionirovaniya predpriyatiya* [Substantiation of the technological scheme of logging operations by creating a dynamic model of the functioning of the enterprise]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2019, no. 4, pp. 94–107. DOI: 10.17238/issn 0536-1036.2019.4.94
- [2] Mokhired A., Rukomoynikov K., Gerasimova M., Medvedev S. Finding an effective technological chain of the logging process in the natural and production conditions of the Krasnoyarsk region. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 817 (1), 2020, p. 012025. DOI:10.1088/1757-899X/817/1/012025
- [3] Gerasimov Y., Sokolov A., Fjeld D. Improving cut-to-length operations management in Russian logging companies using a new decision support system. *Baltic Forestry*, 2013, vol. 19, no. 1, pp. 89–105.
- [4] Khitrov E.G., Andronov A.V. Mathematical model of interaction between forest machine's rover and strengthening soil. *IOP Conf. Series: J. of Physics: Conf. Series* 1108, 2018. DOI:10.1088/1742-6596/1177/1/012030
- [5] Shegel'man I.R., Vasil'ev A.S. *Ispol'zovanie bazy znaniy kak instrumenta sinteza patentosposobnykh resheniy, povyshayushchikh effektivnost' vozobnovleniya lesa seyantsami i sazhehtsami lesnykh kul'tur* [Using the knowledge base as a tool for the synthesis of patentable solutions that increase the efficiency of reforestation with seedlings and saplings of forest crops]. *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*, 2020, no. 7 (67), pp. 206–215.
- [6] Rukomoynikov K.P., Sergeeva T.V., Gilyazova T.A., Voldaev M.N., Tsarev E.M., Anisimov S.E. *Komp'yuternaya simulyatsiya razrabotki lesoshek s ispol'zovaniem valочно-suchkorezno-raskryazhevochnykh mashin* [Computer simulation of the development of cutting areas using felling-lopping-cutting machines]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2022, no. 2 (54), pp. 108–113.
- [7] Rukomoynikov K., Kuptcova V. Substantiation of Fuel Consumption Rates of a Harvester. *Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]*, 2020, no. 3, pp. 117–127. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-117-127
- [8] Mokhired A., Gerasimova M., Pozdnyakova M. Finding the optimal route of wood transportation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, v. 226, p. 012053. DOI: 10.1088/1755-1315/226/1/012053
- [9] Gerasimov Y.Y., Sokolov A.P., Karjalainen T. GIS-based decision-support program for planning and analyzing short-wood transport in Russia. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2008, v. 29, iss. 2, pp. 163–175.
- [10] Pil'nik Yu.N. *Metody i algoritmy sinteza organizatsionnykh struktur formirovaniya setevykh gruzopotokov lesomaterialov mnogourovnevnykh transportno-tekhnologicheskikh sistem* [Methods and algorithms for the synthesis of organizational structures for the formation of network cargo flows of timber in multilevel transport and technological systems]. *Dis. Dr. Sci. (Tech.)* 05.21.01. Voronezh, 2019, 340 p.

- [11] Ivannikov V.A. *Sovershenstvovanie sistemy formirovaniya gruzopotokov lesomaterialov na smeznykh vidakh transporta* [Improving the system of formation of cargo flows of timber on adjacent modes of transport]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Voronezh, 2019, 340 p.
- [12] Gerasimov Yu.Yu., Katarov V.K., Kovaleva N.V., Rozhin D.V., Sokolov A.P., Syunev V.S. *Sovershenstvovanie sistemy optimal'nogo proektirovaniya seti lesnykh avtomobil'nykh dorog* [Improving the system of optimal design of the network of forest roads]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta], 2013, no. 8 (137), pp. 70–76.
- [13] Sokolov A.P. *Kompleksnoe osvoenie lesosyr'evykh baz: obosnovanie tekhnologiy i parametrov protsessov na osnove logisticheskogo podkhoda* [Comprehensive development of timber bases: substantiation of technologies and process parameters based on a logistic approach]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Petrozavodsk, 2015, 329 p.
- [14] Sokolov A.P., Osipov E.V. *Imitatsionnoe modelirovanie proizvodstvennogo protsessa zagotovki drevesiny s pomoshch'yu setey Petri* [Simulation modeling of the production process of wood harvesting using Petri nets]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2017, v. 7, no. 3 (27), pp. 307–314. DOI: 10.12737/article_59c2140d704ae5.63513712
- [15] Mokhiev A.P. *Obosnovanie dostupnosti drevesnykh resursov putem modelirovaniya struktury lesotransportnykh potokov (na primere Krasnoyarskogo kraya RF)* [Justification of the availability of wood resources by modeling the structure of forest transport flows (on the example of the Krasnoyarsk Territory of the Russian Federation)]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Krasnoyarsk, 2021, 402 p.
- [16] Kunitskaya O.A., Chernutskiy N.A., Derbin M.V., Rudov S.E., Grigor'ev I.V., Grigor'eva O.I. *Mashinnaya zagotovka drevesiny po skandinavskoy tekhnologii* [Machine harvesting of wood according to Scandinavian technology]. St. Petersburg: Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2019, 192 p.
- [17] Laurila Ya., Kuchin A.V., Lebedev V.D. *Lesozagotovitel'nye mashiny PONSSE* [PONSSE forestry machines]. Arkhangel'sk: I.A. Vasiliev Publishing House, 2020, 144 p.
- [18] Budnik P.V. *Sintez tekhniko-tekhnologicheskikh resheniy kompleksnogo osvoeniya resursov drevesiny: obosnovanie tekhnologiy i parametrov protsessov na osnove logisticheskogo podkhoda* [Synthesis of technical and technological solutions for the integrated development of wood resources: substantiation of technologies and process parameters based on a logistic approach]. Dis. Dr. Sci. (Tech.) 05.21.01. Petrozavodsk, 2021, 469 p.
- [19] *Natsional'noe obshchestvo imitatsionnogo modelirovaniya* [National Society for Simulation]. Available at: <http://simulation.su/ru.html> (accessed 01.12.2021).
- [20] Yaoxiang Li. Modeling operational forestry problems in central Appalachian hardwood forests. Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports, 2005, 4166, 144 p. Available at: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/4166> (accessed 18.02.2022).
- [21] Sängstuvall L., Bergström D., Lämås T., Nordfjell T. Simulation of harvester productivity in selective and boom-corridor thinning of young forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2012, v. 27, no. 1, pp. 56–73. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2011.628335> (accessed 16.02.2022).
- [22] Sukhanov Yu.V., Seliverstov A.A., Sokolov A.P., Syunev V.S. *Imitatsionnoe modelirovanie raboty kharvestera: algoritmy i realizatsiya* [Simulation modeling of the harvester operation: algorithms and implementation]. *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 8–2(129), pp. 49–51.
- [23] Ovaskainen H. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. *Dissertationes Forestales*, 2009, 79 p. Available at <http://www.metla.fi/dissertationes/df79.htm> (accessed 28.02.2022).
- [24] The AnyLogic Company. Available at: <https://www.anylogic.ru/> (accessed 25.02.2022).
- [25] Boero R., Morini M., Sonnessa M., Terna P. *Agent-based models of the Economy: from theories to applications*. London: Palgrave Macmillan, 2015. 232 p.
- [26] Kochegarov V.G., Bit Yu.A., Men'shikov V.N. *Tekhnologiya i mashiny lesosechnykh rabot* [Technology and machines of logging operations]. Moscow: Lesnaya prom-st', 1990, 392 p.
- [27] Rukomoynikov K.P., Sergeeva, T.V., Gilyazova, T.A., Tsarev E.M., Anisimov S.E., Komisar V.P. *Programma modelirovaniya raboty harvestera* [Harvester Simulation Program]. Certificate of state registration of the computer program, no. 2022614531, Russian Federation, 2022.

Authors' information

Rukomoynikov Konstantin Pavlovich✉ — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Forestry and chemical technologies of the Institute of forest and nature management, Volga State University of Technology, rukomojniovkp@volgatech.net

Sergeeva Tat'yana Vladislavovna — pg., Volga State University of Technology, sergeeva2010t@mail.ru

Gilyazova Tat'yana Arkad'evna — pg., Volga State University of Technology, tat-gilyazova@yandex.ru

Tsarev Evgeniy Mikhaylovich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the Department of Forestry and chemical technologies of the Institute of forest and nature management, Volga State University of Technology, CarevEM@volgatech.net

Anisimov Pavel Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Volga State University of Technology, AnisimovPN@volgatech.net

Received 17.03.2022.

Approved after review 17.08.2022.

Accepted for publication 21.03.2023.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ЛЕСА С ПОМОЩЬЮ МНОГООПЕРАЦИОННОЙ МАШИНЫ

С.П. Карпачев[✉], М.А. Быковский

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

karpachevs@mail.ru

Представлена концептуальная модель лесной многооперационной машины для уборки захламленности, вызванной естественным отпадом деревьев. Рассмотрен технологический процесс санитарной очистки леса, минимизирующий ручной труд с помощью машины и лебедки, в том числе технология уборки отпада с переработкой его на дрова в лесу. Приведено два варианта работы многооперационной машиной совместно с лебедкой: последовательная, когда машина перерабатывает древесину отпада по мере поступления ее от лебедки и параллельная, когда лебедка и машина работают независимо друг от друга. Установлено, что производительность на уборке захламленности при параллельной работе машины и лебедки выше на 7...14 %, чем при их последовательной работе. Выявлено, что производительность многооперационной машины при параллельной работе машины и лебедки возрастает на 53...55 %. Определено, что загрузка машины, при совместной работе с лебедкой, составляет менее 50 % рабочего времени. Рекомендована совместная работа лебедки и машины при близких производительностях, в случае если производительность лебедки сильно отличается от производительности машины, то они должны работать раздельно.

Ключевые слова: естественный отпад в лесу, лесная многооперационная машина, лебедка, дрова, имитационное моделирование, математическая модель

Ссылка для цитирования: Карпачев С.П., Быковский М.А. Моделирование технологии очистки леса с помощью многооперационной машины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 81–90. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-81-90

В настоящей статье рассматривается проблема уборки захламленности леса, вызванной естественным отпадом в лесу. Под естественным отпадом в лесу (далее — отпад) будем понимать отмершие деревья в результате естественного изреживания древостоя, вызванного старением, заболеванием и повреждением (рис. 1).

По санитарным нормам, согласно Федеральному закону от 30.03.1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», если объем отпада превышает 20 м³/га, проводятся лесопатологические обследования и назначаются санитарные мероприятия по уборке захламленности леса. Ежегодный объем отпада в лесу значителен. Только в Московской обл. объем таких деревьев составляет около 3 млн м³.

Часть отпада традиционно используется местным населением для производства дров (рис. 2). Однако, по экологическим причинам, величина изъятия отпада из леса не должна превосходить предельно допустимого значения. Так, в еловых древостоях предельное значение изъятия такой древесины составляет не более 40 % запаса древостоя.

Вследствие малых объемов отпада, технологии его сбора и переработки на основе исполь-



Рис. 1. Древесина отпада в лесу (Тверская обл., фото автора)
Fig. 1. Woody debris in the forest (Tver reg., photo by the author)

зования существующих лесозаготовительных и лесохозяйственных машин малоэффективны, поэтому широко используется ручной инструмент. Основным таким инструментом для разделки отпада в настоящее время являются бензопилы. Деревья отпада очищают от сучьев и веток, распиливают на бревна длиной 1–1,5 м. Бревна вручную укладывают в поленницы и оставляют для перегнивания в лесу.

Ветки и сучья отпада могут быть измельчены и разбросаны в лесу, как показано на рис. 3.



Рис. 2. Разделка и укладка распиленной стволовой части отпада в поленицы [27]

Fig. 2. Cutting and stacking of sawn stem part of debris in woodpiles [27]



Рис. 3. Измельчение и разбрасывание в лесу верхних частей отпада [28]

Fig. 3. Chopping and scattering in the forest the topwood of debris [28]



Рис. 4. Навесной древокольный процессор Naarva S23 [26]

Fig. 4. Naarva S23 mounted woodsplitting processor [26]

Недостатком технологии сбора и переработки отпада является то, что эти работы слабо механизированы и основаны на использовании ручного труда.

В настоящее время появились лесные машины, позволяющие механизировать переработку стволовой части отпада на дрова. В качестве базового оборудования, например, используются навесные древокольные процессоры, закрепленные на манипуляторе трактора, такие как процессор Naarva S23 (рис. 4) [26].

Следует отметить, что навесные древокольные процессоры предназначены для переработки на дрова только стволовой части отпада. Вершинная часть, сучья и ветки отпада сбрасываются на землю. Таким образом, применение известных древокольных процессоров позволяет перерабатывать только часть отпада и не решает проблему полной очистки леса от захламленности. Проблема заключается в том, что часть древесины отпада не пригодна для переработки на дрова. Это не только верхинки, сучья и ветки, но и стволовая часть отпада, поражения гнилью. Объем такой древесины может составлять значительную часть от общего объема отпада.

Цель работы

Цель работы — предложить концептуальную модель лесной многооперационной машины и на ее основе технологический процесс, который минимизирует ручной труд и позволяет проводить полную уборку захламленности леса от отпада с учетом санитарных и экологических требований.

Объекты и методика исследований

Концептуальная модель предлагаемой лесной многооперационной машины (далее — машины) для очистки леса от отпада представляет собой модернизированную лесную машину на основе универсального тракторного процессора, конструкция которого запатентована авторами статьи [7]. Машина работает совместно с трелевочной лебедкой.

Технологическая схема уборки захламленности леса от отпада с помощью машины и лебедки приведена на рис. 5.

Перед началом работ по уборки захламленности леса (см. рис. 5), лебедку 1 устанавливают на рабочей площадке I волока (это дорога, по которой передвигается машина и лебедка) рядом с машиной 5. Лебедкой 1 управляет оператор 2. Очистка леса от отпада проводится по рабочим лентам шириной a и длиной l . Длина рабочей ленты определяется пределами досягаемости грузового троса 4 лебедки 1.

Вальщик 3 чокерует подготовленный отпад 7 и трелюет его на рабочую площадку в пачки 8. Отпад

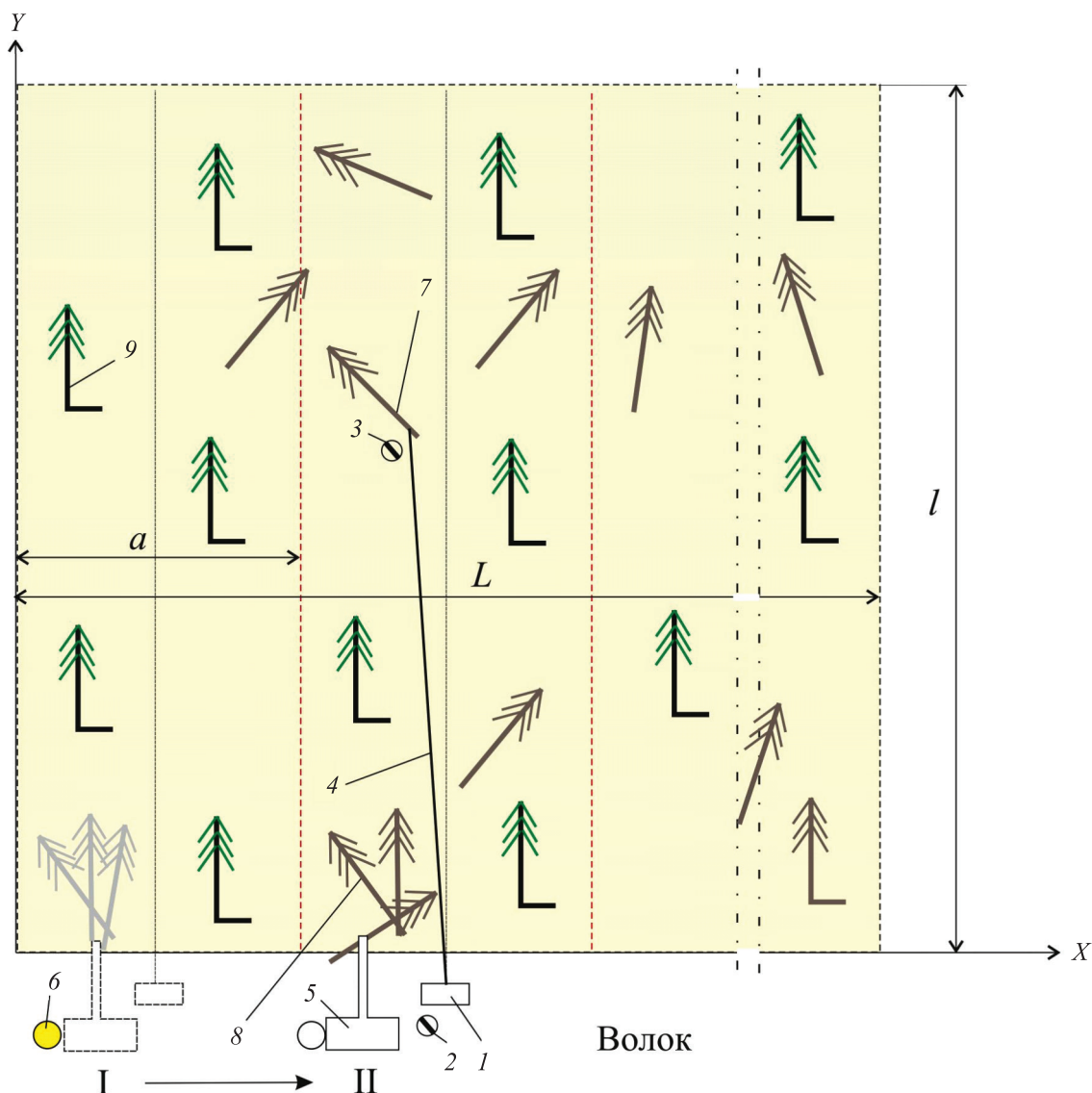


Рис. 5. Технологическая схема уборки захламленности леса от отпада с помощью машины и лебедки: 1 — лебедка; 2 — оператор лебедки; 3 — вальщик с бензопилой; 4 — грузовой трос лебедки; 5 — машина; 6 — съемная емкость с дровами; 7 — отпад; 8 — стрелеванная лебедкой пачка отпада; 9 — здоровое растущее дерево
Fig. 5. Technological scheme of debris removal from forest with the help of machine and winch: 1 — winch; 2 — winch operator; 3 — chainsaw operator; 4 — winch cargo cable; 5 — machine; 6 — removable fuelwood reservoir; 7 — debris; 8 — debris bundle, pulled by winch; 9 — healthy growing tree

из пачки 8 поштучно захватывает машина 5 и перерабатывает на дрова (стволовую часть отпада), и на щепу (вершинную часть и ветки отпада). Дрова сбрасывают в съемную емкость 6 и после ее заполнения оставляют на рабочей площадке волока. После переработки всего отпада с рабочей ленты, лебедка 1 и машина 5 перемещаются по волоку к следующей ленте от рабочей площадки I к рабочей площадке II.

Операции трелевки отпада 7 лебедкой 1 могут быть технологически совмещены с работой машины 5, то есть выполняться совместно (последовательно). Лебедка 1 трелюет на рабочую площадку отпад 7 поштучно, который сразу

после доставки перерабатывается машиной 5. В этом случае лебедка 1 может размещаться на машине 5.

Эти операции могут выполняться независимо друг от друга, то есть трелевка отпада 7 лебедкой 1 может выполняться параллельно с операциями по переработке отпада машиной 5. Лебедка 1 доставляет на рабочую площадку отпад 7, который укладывают в пачку 8. Машина 5 приступает к переработке отпада из пачек 8 после окончания работы лебедки 1 на участке.

В статье приводятся результаты исследований работы машины с лебедкой по совместной и независимой схеме.

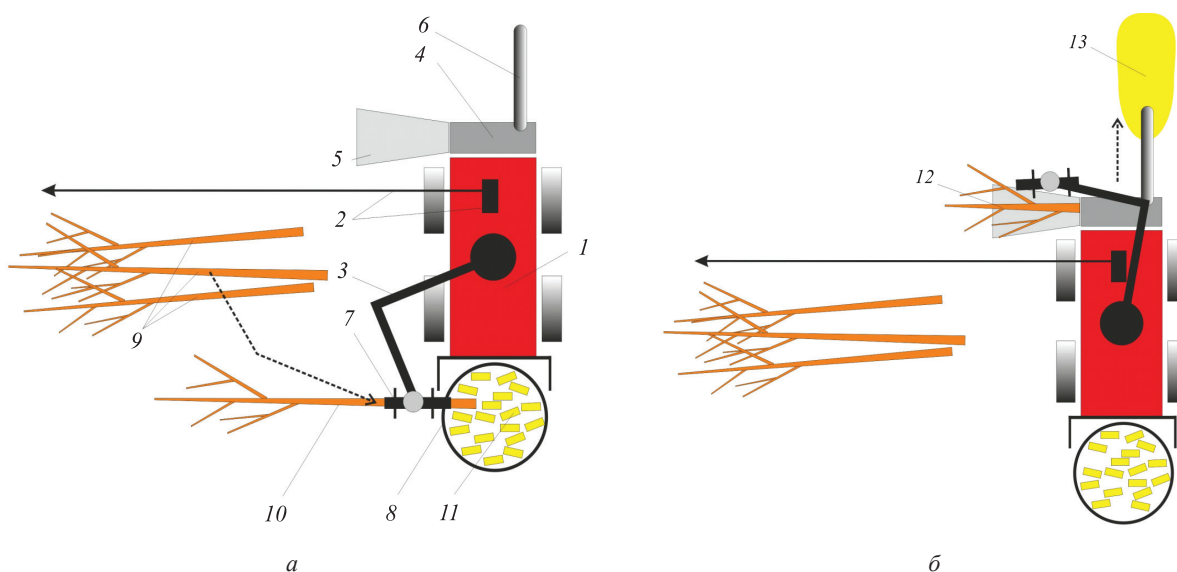


Рис. 6. Работа машины по переработке отпада на дрова и щепу: *a* — цикл производства дров; *б* — цикл производства щепы; 1 — базовый трактор; 2 — лебедка с тросом; 3 — манипулятор; 4 — рубительная машина; 5 — подающий стол; 6 — пневмопровод; 7 — навесной древокольный процессор; 8 — съемная емкость для дров; 9 — пачки отпада; 10 — одиночное дерево отпада; 11 — дрова; 12 — верхинная часть отпада; 13 — щепа

Fig. 6. Work of the machine on debris processing into firewood and chips: *a* — cycle of firewood production; *б* — cycle of wood chip production; 1 — basic tractor; 2 — winch with rope; 3 — manipulator; 4 — chipper; 5 — feeding table; 6 — pneumatic pipe; 7 — mounted wood processor; 8 — removable capacity for firewood; 9 — stacks of deadwood; 10 — single tree of deadwood; 11 — wood; 12 — topwood part of debris; 13 — chips

Работа машины по переработке отпада на дрова и на щепу представлена на рис. 6.

Порядок работы машины с отпадом был принят следующий (см. рис. 6, *a*, *б*).

Отпад 10 из пачки 9 с помощью манипулятора 3 поштучно захватывают навесным древокольным процессором 7. Затем ствольную часть отпада перерабатывают на дрова 11, которые сбрасывают в съемную емкость для дров 8.

Вершинную часть отпада с ветками и сучьями 12 манипулятор 3 переносит и сбрасывает на подающий стол 5. Транспортер подающего стола направляет верхинную часть отпада в окно рубительной машины 4. Измельченная древесина 13 с помощью пневмопровода 6 разбрасывается на землю, например, на волок перед трактором для укрепления грунта.

В исследованиях работы машины с лебедкой нами применялись методы имитационного моделирования с использованием математических моделей [1–8].

В математических моделях каждому сгенерированному i -му отпаду задавались координаты X_i и Y_i его положения на участке. Поскольку участок разбит на рабочие ленты, то координата X_i определяла номер рабочей ленты, в которую попадает i -й отпад. В исследованиях, для получения статистически значимых результатов, число рабочих

лент при ее ширине $a = 10$ м было принято равным 1000. Координата Y_i важна для определения времени цикла трелевки. В модели координаты X_i и Y_i задавались как случайные величины, распределенные по равномерному закону на интервалах $X_i \in [0; 1000]$, $Y_i \in [0; l]$.

В исследованиях было принято, что операции валки и трелевки выполняет один рабочий с бензопилой. За один раз трелюется одно дерево отпада. Часовую производительность ($\Pi_{1_час}$) на валке, трелевке и укладке отпада в пачку можно представить, как сумму стрелеванных за час отпада в объеме получаемых из них дров

$$\forall \sum_{j=1}^n t_j \cdot \sum_{i=1}^{N_j} t_{ji} = T_{\text{час}} \Rightarrow \Pi_{1_час} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{N_j} q_{ji}, \quad (1)$$

где t_j — время цикла перебазирования лебедки на j -ю ленту, с;

t_{ji} — время цикла работы вальщика на обработке i -го отпада на j -й рабочей ленте, с;

$T_{\text{час}}$ — время часа в секундах, равное 3600 с;

n — число стоянок лебедки в течение одного часа;

N_j — число отпада на j -й ленте;

q_{ji} — объем дров, получаемых с i -го отпада на j -й ленте, м³.

Продолжительность цикла в расчете на i -й отпад на j -й ленте определялось по формуле

$$t_{ji} = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)_{ji}, \quad (2)$$

где t_1 — время на подготовку отпада к трелевке, с;
 t_2 — время на грузовую трелевку отпада, с;
 t_3 — время на холостой ход троса лебедки, с;
 t_4 — время на укладку отпада в пачку, с.

Время на грузовую трелевку i -го отпада и время на холостой ход троса лебедки определяется координатой Y_{ji} положения отпада на участке, при этом индекс j указывает, что i -й отпад находится на j -й ленте.

$$(t_2 + t_3)_{ji} = 2 \frac{Y_{ji}}{v}, \quad (3)$$

где Y_{ji} — координата Y_i -го отпада на j -й ленте, м;
 v — скорость грузового и холостого хода троса лебедки, м/с.

Часовую производительность машины на переработке отпада на дрова и на щепу ($\Pi_{2_час}$) можно представить, как сумму объемов полученных дров

$$\forall \sum_{j=1}^n t_j \cdot \sum_{i=1}^{N_j} t_{ji} = T_{час} \Rightarrow \Pi_{2_час} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{N_j} q_{ji}, \quad (4)$$

где t_j — время цикла переезда машины на j -ю ленту, с;

t_{ji} — время цикла работы машины на обработке i -го отпада на j -й ленте, с;

$T_{час}$ — время часа в секундах, равное 3600 с;

n — число стоянок машины в течение одного часа;

N_j — число отпада на j -й ленте;

q_{ji} — объем дров, получаемых с i -го отпада на j -й ленте, м³.

Продолжительность цикла работы машины в расчете на i -й отпад на j -й ленте определялось по формуле

$$t_{ji} = (t_1 + t_2 + t_3)_{ji}, \quad (5)$$

где t_1 — время на подвод манипулятора к штабелю, захват отпада, поворот манипулятора к контейнеру с дровами, с;

t_2 — время на переработку отпада на дрова, с;

t_3 — время на поворот манипулятора к рубительной машины и сброску вершинки на подающий стол рубительной машины, с.

Время на переработку стволовой части i -го отпада на дрова навесным древокольным процессором машины зависит от длины стволовой части отпада, пригодной для получения дров. В работе это время определялось как случайное число, распределенное по экспоненциальному закону со средним значением

$$t_2 = \frac{l_{ств_i}}{l_{др}} \cdot (t_{21} + t_{22}), \quad (6)$$

где $l_{ств_i}$ — длина стволовой части i -го отпада, пригодная для переработки на дрова, м;

$l_{др}$ — длина дров;

t_{21} — среднее время на отрез от стволовой части отпада чурака, длина которого соответствует размерам дров, с;

t_{22} — среднее время на надвигание и раскол чурака на дрова, с.

Для каждого сгенерированного i -го отпада задавали диаметр d_i и высоту H_i дерева отпада, а также объем получаемых дров из стволовой части отпада q_i .

Высота i -го дерева отпада устанавливалась в зависимости от его диаметра d_i (в см) по формуле [10]

$$H_i = 1,462 \cdot d_i^{0,8667}, \text{ м} \quad (7)$$

Диаметр i -го отпада определялся как случайное число, распределенное по закону *beta*-распределения, которое было установлено в результате обработки экспериментальных данных. Пример экспериментального распределения деревьев по диаметрам приведен на рис. 7.

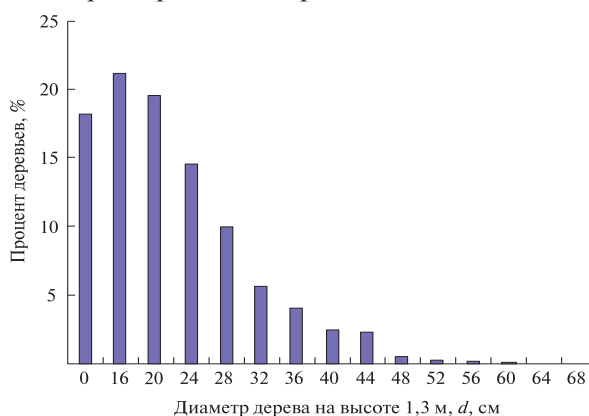


Рис. 7. Пример экспериментального распределения деревьев по диаметрам

Fig. 7. Example of an experimental distribution of trees by diameter

Объем дров, которые получали со стволовой части одного отпада, в исследованиях определяли в зависимости от объема стволовой части. В модели объем получаемых дров с i -го отпада q_i устанавливали по длине $l_{ств_i}$ и диаметру d_i стволовой части, пригодной для получения дров

$$q_i = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \cdot l_{ств_i}, \quad (8)$$

Длина стволовой части отпада, пригодная для получения дров, зависит от многих факторов (поражение гнилью, временем нахождения на земле и т. д.). В исследованиях эта длина была оценена 50 % от высоты дерева отпада.

В модели время циклов работы лебедки и машины разыгрывались, как случайные числа, распределенные по экспоненциальному закону. Средние значения этих величин были рассчитаны по вышеприведенным формулам (2), (3), (5), (6) и частично определены путем хронометража.

В исследованиях технологический процесс моделировался с учетом природно-производственных факторов [9–11, 13–25].

Результаты и обсуждение

Проведено исследование влияния на выходные показатели совместной и независимой работы лебедки и машины на санитарных мероприятиях по уборке захламленности леса и переработке отпада на дрова и щепу.

Число отпада на j -й рабочей ленте зависит от запаса отпада на 1 га. В модели рассматривался участок размером $L \times l$, при этом длина участка l была принята равной длине грузового каната лебедки. Длина грузового каната лебедки варьировалась на трех уровнях $l = 50, 75, 100$ м. Ширина участка была определена из расчета достаточного числа отпада для накопления значимой статистики в экспериментах $L = 10\,000$ м. Ширина одной рабочей ленты была принята равной $a = 10$ м (см. рис. 5). Запас отпада N на 1 га варьировал от 20 до 60 м³/га. Матрица планирования экспериментов приведена в таблице.

Матрица планирования экспериментов

Experiment-planning matrix

Номер эксперимента	Длина рабочей ленты, равная максимальной длине троса лебедки l , м	Запас отпада на участке N , м ³ /га
1	50	20
2	50	40
3	50	60
4	75	20
5	75	40
6	75	60
7	100	20
8	100	40
9	100	60

Результаты исследований были статистически обработаны и представлены в виде зависимостей, приведенных на графиках рис. 8–10.

Из рис. 8 видно, что производительность при совместной работе лебедки и машины с увеличением запаса отпада на участке растет при всех принятых значениях длины рабочей ленты. Эта зависимость хорошо описывается логарифмической кривой. Рост производительности при изменении запаса отпада с 20 до 60 м³/га относительно небольшой и составляет 10...15 %. Так, например, для длины рабочей ленты 50 м при запасе

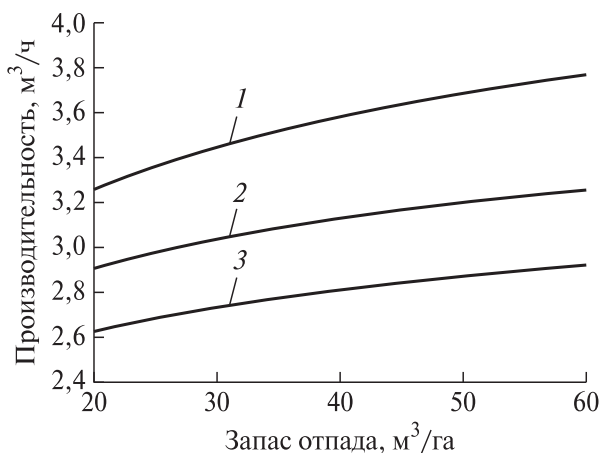


Рис. 8. Производительность лебедки и машины при их совместной работе в зависимости от запаса отпада (цифрами обозначена длина рабочей ленты): 1 — 50 м; 2 — 75 м; 3 — 100 м

Fig. 8. Performance of winch and machine when they work together as a function of the debris margin (the numbers indicate the length of the working belt): 1 — 50 m; 2 — 75 m; 3 — 100 m

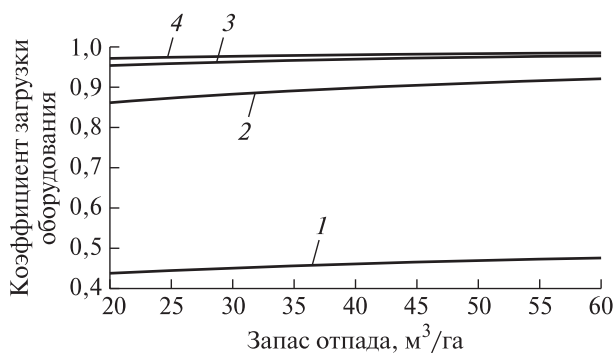


Рис. 9. Коэффициенты загрузки лебедки и машины при их совместной и независимой работе при длине рабочей ленты 100 м в зависимости от запаса отпада: 1 — машины при ее совместной работе; 2 — лебедки при ее совместной работе; 3 — машины при ее независимой работе; 4 — лебедки при ее независимой работе

Fig. 9. Load factors of winch and machines at their joint and independent work with the length of working belt 100 m depending on the fall-out margin: 1 — machine at its joint work; 2 — winch at its joint work; 3 — machine at its independent work; 4 — winch at its independent work

отпада 20 м³/га, производительность совместной работы лебедки и машины равна 2,6 м³/ч, при запасе 60 м³/га — 2,9 м³/ч. Рост равен 11,3 %. Причем, наибольший рост производительности наблюдается на начальном промежутке изменения запаса отпада. Так, при изменении запаса отпада с 20 м³/га до 40 м³/га, рост производительности будет равен почти 8 %, а с 40 до 60 м³/га — 3,5 %.

График на рис. 8 позволяет оценить влияние на производительность длины рабочей ленты. С увеличением длины ленты производительность при совместной работе лебедки и машины

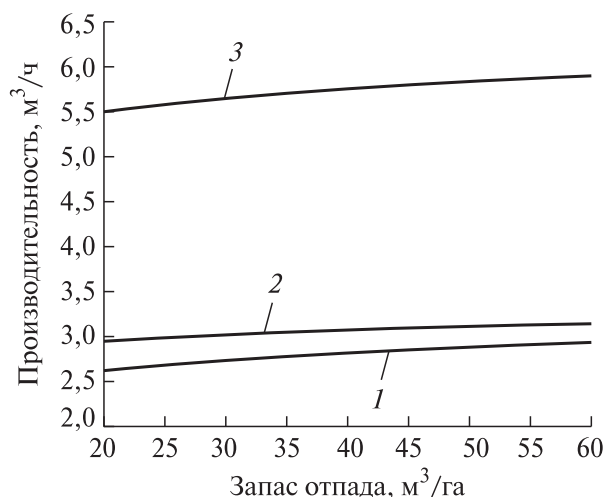


Рис. 10. Производительность лебедки и машины при их совместной и независимой работе при длине рабочей ленты 100 м в зависимости от запаса отпада: 1 — лебедки и машины при их совместной работе (производительность лебедки и машины в этом случае одинаковы); 2 — лебедки при ее независимой работе; 3 — машины при ее независимой работе

Fig. 10. Outputs of winch and machines at their joint and independent work with the length of working belt 100 m depending on the slope margin: 1 — winch and machine at their joint work (capacity of winch and machine in this case is the same); 2 — winch at its independent work; 3 — machine at its independent work

уменьшается. Так, например, при запасае 60 м³/га для длины ленты 50 м производительность составляет почти 3,8 м³/ч, для ленты длиной 100 м — 2,9 м³/ч. Производительность уменьшилась на 24 %.

На рис. 9 приведены коэффициенты загрузки лебедки и машины при их совместной и независимой работе для длины ленты в 100 м в зависимости от запаса отпада. Значения коэффициентов с увеличением длины ленты незначительно растут. Это объясняется относительным уменьшением простоев, связанных с перебазировкой лебедки и машины от одной рабочей стоянки к другой.

Анализ коэффициентов загрузки при совместной работе оборудования показывает, что машина работает менее 40...45 % времени, простои превышают 60 % времени, а лебедка работает 85...95 % времени. Простои машины при ее совместной работе с лебедкой вызваны меньшей производительностью лебедки.

В случае независимой работы оборудования, машина и лебедка работают более 96 % времени. При независимой работе лебедки и машины загрузка лебедки больше, чем машины при всех длинах рабочих лент.

Рост загрузки оборудования при независимой работе лебедки и машины приводит к повышению производительности по сравнению с совместной их работой. Пример изменения производитель-

ности лебедки и машины при их совместной и независимой работе в зависимости от запаса отпада при длине рабочей ленты 100 м приведен на рис. 10.

Из рис. 10 видно, что производительность при совместной работе лебедки и машины изменяется одинаково с 2,5 до 2,8 м³/ч. При независимой работе оборудования, в тех же самых условиях, производительность лебедки изменяется с 2,9 до 3,0 м³/ч, а машины — с 5,5 до 6,0 м³/ч. Производительность лебедки при независимой от машины работе повышается по сравнению с производительностью при ее совместной работе с машиной примерно на 7...14 %, при этом производительность машины, когда она работает независимо от лебедки, повышается на 53...55 %.

Выводы

Для уборки захламленности леса предложена концептуальная модель машины с трелевочной лебедкой и на их основе технологический процесс, который минимизирует ручной труд и позволяет полностью проводить санитарную очистку леса от отпада с учетом экологических требований. Исследования совместной и независимой работы лебедки и машины на уборке захламленности леса позволили сделать следующие выводы:

1. Производительность и загрузка лебедки, и машины при их совместной работе изменяется следующим образом:

- с увеличением запаса отпада производительность растет при всех принятых значениях длины рабочей ленты участка. Рост производительности относительно небольшой и составляет 10...15 % при изменении запаса с 20 до 60 м³/га.

- с увеличением длины рабочей ленты (длина грузового троса лебедки) производительность уменьшается. Уменьшение составляет 20...24 %.

- загрузка машины равна 40...45 %. Простои машины превышают 60 % времени.

- загрузка лебедки равна 85...95 %.

2. Производительность и загрузка лебедки, и машины при их независимой работе изменяется следующим образом:

- производительность лебедки при независимой работе выше, чем при совместной работе на 7...14 %.

- производительность машины при независимой работе повышается на 53...55 % по сравнению с совместной работой с лебедкой.

- загрузка машины и лебедки превышает 96 % и с ростом запаса отпада на участке приближается к 100 %.

3. Исследования совместной и независимой работы лебедки и машины на уборке захламленности леса позволили сделать следующие рекомендации:

– если производительность лебедки близка к производительности машины, то можно рекомендовать совместную работу лебедки и машины. Лебедка в этом случае может быть размещена на машине и управляться оператором машины.

– если производительность лебедки сильно отличается от производительности машины, то лебедка и машина должны работать независимо. Лебедка в этом случае является отдельным механизмом с собственным приводом и управляется отдельным рабочим.

Список литературы

- [1] Шелгунов Ю.В. Машины и оборудование лесозаготовок, лесосплава и лесного хозяйства. М.: Лесная промышленность, 1982. 520 с.
- [2] Spinelli R., Hartsough B. A survey of Italian chipping operations // *Biomass and Bioenergy*, 2001, v. 21(6), pp. 433–444.
- [3] Ширнин Ю.А. Технология и оборудование лесопромышленных производств. Ч. 1. Лесосечные работы. М.: МГУЛ, 2004. 445 с.
- [4] Eliasson L., von Hofsten H., Johannesson T., Spinelli R., Thierfelder T. Effects of sieve size on chipper productivity, fuel consumption and chip size distribution for open drum chippers // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2015, v. 36(1), pp. 11–17.
- [5] Mihelic M., Spinelli R., Poje A. Production of Wood Chips from Logging Residue under Space-Constrained Conditions // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2018, v. 39(2), pp. 223–232.
- [6] Виногоров Г.К. Лесосечные работы. М.: Лесная промышленность, 1981. 272 с.
- [7] Karpachev S.P., Bykovskiy M.A. Universal tractor processor for working in forests of different ages // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, v. 574 (1), no. at. 012037. DOI:10.1088/1755-1315/574/1/012037
- [8] Салминен Э.О., Гуров С.В., Большаков Б.М. Размещение волоков на заболоченных участках // *Лесная промышленность*, 1988. № 3. С. 32–33.
- [9] Барановский В.А., Некрасов Р.М. Системы машин для лесозаготовок. М.: Лесная промышленность, 1977. 248 с.
- [10] Magagnotti N., Spinelli R. Good practice guidelines for biomass production studies; WG2 Operations research and measurement methodologies. Sesto Fiorentino, Italy: COST Action FP-0902 and CNR Ivalsa, 2012, 52 p.
- [11] Рыжков А.Е., Проказин Н.Е. Система добровольной лесной сертификации PEFC-FCR, оценка лесопользования, лесопользования и цепочки поставок лесопроductии на соответствие международным требованиям. М.: PEFCFCR, 2016. 254 с.
- [12] Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2007, v. 28(1), pp. 1–9.
- [13] Григорьев И.В., Жукова А.И. Координатно-объемная методика трассирования при освоении лесосек трелевочной // *ИЗВУЗ Лесной журнал*, 2004. No 4. С. 40–44.
- [14] Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia // *Biomass and Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.
- [15] 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> (дата обращения 01.02.2022).
- [16] Сюнев В.С. Сравнение технологий лесосечных работ в лесозаготовительных компаниях Республики Карелия. Йоенсуу: НИИ леса Финляндии METLA, 2008. 126 с.
- [17] Макаренко А.В., Быковский М.А., Лаптев А.В. Эффективность выполнения технологических операций при проведении выборочных рубок леса // Актуальные проблемы развития лесного комплекса. Материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф., 01–02 декабря 2015 г., Вологда. Вологда: Изд-во ВГТУ, 2016. С. 32–37.
- [18] Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средащадящие технологии разработки лесосек в условиях северо-западного региона Российской Федерации. СПб.: Изд-во СПбГЛТА, 2008. 174 с.
- [19] Герц Э.Ф. Оценка технологии лесопользования на лесосечных работах. Екатеринбург: Изд-во УГЛТУ, 2003. 120 с.
- [20] Макаренко А.В. Оптимизация размещения сети трелевочных волоков на лесосеке // Лесозаготовительное производство: проблемы и решения. Материалы Междунар. науч.-техн. конф., 26–28 апреля 2017 г., Минск. Минск: Изд-во БГТУ, 2017. С. 233–237.
- [21] Галактионов О.Н. Технологический процесс лесозаготовок и ресурсы лесосечных отходов. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2007. 95 с.
- [22] Кузнецов В.И. Представляем фирму «Лестехком» — новое качество лесозаготовительной техники // *Лесная промышленность*, 2006, № 1. С. 12–14.
- [23] Пискунов М.А. Распределение проходов форвардера и построение оптимальных схем расположения трелевочных волоков на лесосеке // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Лес. Экология. Природопользование*, 2017. № 2 (34). С. 37–48.
- [24] Григорьев И.В. Снижение отрицательного воздействия на почву колесных тракторов обоснованием режимов их движения и технологического оборудования. СПб.: Изд-во СПбГЛТА, 2006. 236 с.
- [25] Дербин В.М., Дербин М.В. Технология работы харвестера при выборочных рубках // *Лесотехнический журнал*, 2016. № 2. С. 69–75. DOI: 10.12737/19956
- [26] Naarva S23. URL: <https://www.pentinpaja.fi/en/naarva-tuote/naarva-s23/> (дата обращения 01.02.2022).
- [27] Правительство Московской области. URL: <https://mosreg.ru/upload/iblock/2cf/04.jpg/> (дата обращения 01.02.2022).
- [28] РГАУ-МСХА имени К.А.Тимирязева. URL: https://www.timacad.ru/uploads/images/20200206/1580985058_8N5B4144.jpg/ (дата обращения 01.02.2022).

Сведения об авторах

Карпачев Сергей Петрович [✉] — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), karpachevs@mail.ru

Быковский Максим Анатольевич — канд. техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), bykovskiy@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 10.11.2022.

Одобрено после рецензирования 18.01.2023.

Принята к публикации 21.03.2023.

MODELLING FOREST CLEARING TECHNOLOGY WITH MULTI-OPERATOR MACHINE

S.P. Karpachev [✉], **M.A. Bykovskiy**

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

karpachevs@mail.ru

A conceptual model of a forest multi-operator machine for clearing debris caused by tree mortality is presented. A technological process of sanitary forest clearing that minimizes manual labour with the help of a machine and a winch is considered, including the technology of litter removal with its processing into firewood in the forest. Two variants of multi-operating machine's work with a winch are given: sequential, when the machine processes the wood from the fell as it is received from the winch, and parallel, when the winch and machine work independently of each other. It is established that the productivity at debris removal at parallel operation of the machine and winch is higher by 7...14 % than at their consecutive operation. It is revealed that the productivity of a multi-operator machine when the machine and a winch work in parallel increases by 53...55 %. It is determined that the load of the machine, when working together with a winch, is less than 50 % of working time. It is recommended that the winch and the machine work together at close capacities, if the winch capacity is very different from the machine capacity, then they should work separately.

Keywords: dead and fallen trees fall away, forest multi-operation machine, winch, firewood, simulation modeling, mathematical model

Suggested citation: Karpachev S.P., Bykovskiy M.A. *Modelirovanie tekhnologii ochildki lesa s pomoshch'yu mnogoooperatsionnoy mashiny* [Modelling forest clearing technology with multi-operator machine]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 81–90. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-81-90

References

- [1] Shelgunov Yu.V. *Mashiny i oborudovanie lesozagotovok, lesosplava i lesnogokhozyaystva* [Machines and equipment of logging, timber rafting and forestry]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Timber industry], 1982, 520 p.
- [2] Spinelli R., Hartsough B. A survey of Italian chipping operations. *Biomass and Bioenergy*, 2001, v. 21(6), pp. 433–444.
- [3] Shirnin Yu.A. *Tekhnologiya i oborudovanie lesopromyshlennykh proizvodstv. Ch. 1. Lesosechnye raboty* [Technology and equipment of forest industry. Part 1. Logging work]. Moscow: MGUL, 2004, 445 p.
- [4] Eliasson L., von Hofsten H., Johannesson T., Spinelli R., Thierfelder T. Effects of sieve size on chipper productivity, fuel consumption and chip size distribution for open drum chippers. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2015, v. 36(1), pp. 11–17.
- [5] Mihelic M., Spinelli R., Poje A. Production of Wood Chips from Logging Residue under Space-Constrained Conditions. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2018, v. 39(2), pp. 223–232.
- [6] Vinogorov G.K. *Lesosechnye raboty* [Logging work]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1981, 272 p.
- [7] Karpachev S.P., Bykovskiy M.A. Universal tractor processor for working in forests of different ages. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2020, v. 574 (1), no. at. 012037. DOI:10.1088/1755-1315/574/1/012037
- [8] Salminen E.O., Gurov S.V., Bol'shakov B.M. *Razmeshchenie volokov na zabolochennykh uchastkakh* [Placement of portages on wetlands]. *Lesnaya promyshlennost' [Forestry]*, 1988, no. 3, pp. 32–33.
- [9] Baranovskiy V.A., Nekrasov R.M. *Sistemy mashin dlya lesozagotovok* [Systems of machines for logging]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest industry], 1977, 248 p.
- [10] Magagnotti N., Spinelli R. Good practice guidelines for biomass production studies; WG2 Operations research and measurement methodologies. Sesto Fiorentino, Italy: COST Action FP-0902 and CNR Ivalsa, 2012, 52 p.
- [11] Ryzhkov A.E., Prokazin N.E. *Sistema dobrovol'noy lesnoy sertifikatsii PEFCFCR, otsenka lesoupravleniya, lesopol'zovaniya i tsepochki postavok lesoproduksii na sootvetstvie mezhdunarodnym trebovaniyam* [PEFCFCR voluntary forest certification system/assessment of forest management, forest use and supply chain of forest products for compliance with international requirements]. Moscow: PEFC-FCR, 1916, 254p.
- [12] Spinelli R., Nati C., Magagnotti N. Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2007, v. 28(1), pp. 1–9.

- [13] Grigor'ev I.V., Zhukova A.I. *Koordinatno-ob'emnaya metodika trassirovaniya pri osvoenii lesosek trelevkoy* [Coordinate volumetric tracing technique in the development of skidding sites]. *Lesnoy Zhurnal* (Russian Forestry Journal), 2004, no. 4, pp. 40–44.
- [14] Gerasimov Y., Karjalainen T. Energy wood resources in Northwest Russia. *Biomass and Bioenergy*, 2011, no. 35, pp. 1655–1662.
- [15] 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> (accessed 01.02.2022).
- [16] Syunev V.S. *Sravnienie tekhnologiy lesosechnykh rabot v lesozagotovitel'nykh kompaniyakh Respubliki Kareliya* [Comparison of logging technologies in logging companies of the Republic of Karelia]. Joensuu: Finnish Forest Research Institute METLA, 2008, 126 p.
- [17] Makarenko A.V., Bykovskiy M.A., Laptev A.V. *Effektivnost' vypolneniya tekhnologicheskikh operatsiy pri provedenii vyborochnykh rubok lesa* [The efficiency of technological operations during selective logging] *Aktual'nye problem razvitiya lesnogo kompleksa. Materialy 13-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 01–02 dekabrya 2015 g. Vologodskiy gosudarstvennyy universitet* [Actual problems of the development of the forest complex. Materials of the 13th International Scientific and Technical Conference, December 01–02, 2015. Vologda State University]. Vologda: VSTU, 2016, pp. 32–37.
- [18] Grigor'ev I.V., Zhukova A.I., Grigor'eva O.I., Ivanov A.V. *Sredoshchadyashchie tekhnologii razrabotki lesosek v usloviyakh severo-zapadnogo regiona Rossiyskoy Federatsii* [Mediating technologies for the development of cutting areas in the northwestern region of the Russian Federation]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2008, 174 p.
- [19] Gerts E.F. *Otsenka tekhnologii lesopol'zovaniya na lesosechnykh rabotakh* [Evaluation of forest technology in logging work]. Ekaterinburg: USFU, 2003, 120 p.
- [20] Makarenko A.V. *Optimizatsiya razmeshcheniya seti trelevochnykh volokov na lesoseke* [Optimizing the placement of a network of skidding trails in the cutting area. Logging production: problems and solutions]. *Lesozagotovitel'noe proizvodstvo: problemy i resheniya. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Minsk, BGTU, 26–28 aprelya 2017 g.* [Materials of the international scientific and technical conference, Minsk, BSTU, April 26–28, 2017]. Minsk: BSTU, 2017, pp. 233–237.
- [21] Galaktionov O.N. *Tekhnologicheskii protsess lesozagotovki i resursy lesosechnykh otkhodov* [Technological process of logging and resources of logging waste]. Petrozavodsk: PetrSU, 2007, 95 p.
- [22] Kuznetsov V.I. *Predstavlyаем firmu «Lestekhhom» — novoe kachestvo lesozagotovitel'noy tekhniki* [We represent Lestekhhom, a new quality of logging equipment] *Lesnaya promyshlennost'* [Forest Industry], 2006, no. 1, pp. 12–14.
- [23] Piskunov M.A. *Raspredelenie prokhodov forwardera i postroyeniye optimal'nykh skhem raspolozheniya trelevochnykh volokov na lesoseke* [Distribution of forwarder passes and the construction of optimal layouts of skidding tracks in the cutting area]. *Vestnik Volga State University of Technology. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Forest. Ecology. Nature use], 2017, no. 2 (34), pp. 37–48.
- [24] Grigor'ev I.V. *Snizhenie otritsatel'nogo vozdeystviya na pochvu kolesnykh traktorov obosnovaniem rezhimov ikh dvizheniya i tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Reducing the negative impact on the soil of wheeled tractors by justifying the modes of their movement and technological equipment]. St. Petersburg: SPbGLTA, 2006, 236 p.
- [25] Derbin V.M., Derbin M.V. *Tekhnologiya raboty kharvestera pri vyborochnykh rubkakh* [The technology of the harvester's work in selective felling]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Engineering Journal], 2016, no. 2, pp. 69–75. DOI: 10.12737/19956
- [26] Naarva S23. Available at: <https://www.pentinpaja.fi/en/naarva-tuote/naarva-s23/> (accessed 01.02.2022).
- [27] Government of the Moscow Region. Available at: <https://mosreg.ru/upload/iblock/2cf/04.jpg/> (accessed 01.02.2022).
- [28] Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy. Available at: https://www.timacad.ru/uploads/images/20200206/1580985058_8N5B4144.jpg/ (accessed 01.02.2022).

Authors' information

Karpachev Sergey Petrovich  — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), karpachevs@mail.ru

Bykovskiy Maksim Anatol'evich — Cand. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), bykovskiy@mgul.ac.ru

Received 10.11.2022.

Approved after review 18.01.2023.

Accepted for publication 21.03.2023.

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

ЭВОЛЮЦИОННАЯ НЕЛИНЕЙНАЯ ХИМИЯ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ МЕЗОФАЗНЫХ (ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ) СТРУКТУР ДРЕВЕСИНЫ: ОТ МОРФОГЕНЕЗА ДО РЕГУЛЯЦИИ УГЛЕОБРАЗОВАНИЯ (ОБЗОР)

О.В. Градов

ФГБУН Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (ФИЦ ХФ РАН), Россия,
119334, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4

o.v.gradov@gmail.com

Реконструирована последовательность превращений мезофазных (жидкокристаллических) компонентов древесины от нативного состояния до процессов образования торфа и угля. Рассмотрены отличные по клеточной локализации фитохимические источники мезофаз (от лигнина и таких полисахаридов, как целлюлоза, до липидов). Перечислены критерии, по которым можно обнаружить близость процессов формообразования мезофаз на основе растительного сырья в ходе углеобразования и самоорганизации в данных системах, в том числе с учетом тепловой накачки. Указано значение мембранных и мембраномиметических интерфейсов в регуляции исследуемого комплекса процессов. Рассмотрена применимость геохимических, биогеохимических редокс-критериев и соответствующих им факторов регуляции (аэробные, субаэральные, аэробные режимы) в анализе диагенеза мезофаз. Констатируется, что, в силу специфической регуляции (обратных связей), указанные факторы могут привести к пространственной гетерогенности при углеобразовании, «аутокаталитическим» эффектам и возникновению редокс-колебаний, сопровождающихся локализованной сменой свойств мезофаз — от поддерживающих возгорание до практически «антипиренных». Базируясь на наличии зависимостей свойств соответствующих продуктов от процессов их получения и формообразования, а также (гео)химического их окружения (что свойственно супрамолекулярной и коллоидной химии), можно аннотировать супрамолекулярный и коллоидно-химический подходы к интерпретации ряда феноменов и механизмов формирования ископаемых биогенных мезофаз, что требует рассмотрения в отдельном обзоре.

Ключевые слова: мезофазные (жидкокристаллические) компоненты древесины; коксообразование; углеобразование; фитохимические мезофазные прекурсоры; самоорганизация; мембраномиметики; биогенные мезофазные структуры; геохимические аспекты преобразования мезофаз

Ссылка для цитирования: Градов О.В. Эволюционная нелинейная химия самоорганизующихся мезофазных (жидкокристаллических) структур древесины: от морфогенеза до регуляции углеобразования (обзор) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 91–127. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-91-127

Образование и поведение мезофаз при карбонизации и коксовании как реакционно-диффузионный процесс с регулирующими обратными связями

Сначала 1970-х годов распространяются представления об определяющей роли мезофаз в морфогенезе (диссипативном структурогенезе) коксов и графитов [1, 2]. Задолго до образования графита с достаточно совершенной трехмерной кристаллической структурой органическое вещество в ходе карбонизации проходит через стадию жидкого вязкотекучего или жидкокристаллического мезофазного состояния [3], в силу чего реакционно-диффузионные процессы в термотроп-

ной среде при нагреве [4, 5] и горении оставляют отпечаток в итоговой микроструктуре карбонизата. Применение термина «морфогенез» к жидким кристаллам не является новым, поскольку ранее аналогичная терминология применялась к пространственной организации многокомпонентных смесей жидкокристаллических веществ [6], а также к фазовым переходам в них [7]. Поэтому реакционно-диффузионные (морфогенетические, по Тьюрингу) механизмы являются адекватной формой описания процессов структурной организации и в термотропных жидких кристаллах или мезофазах. Более того, в случае нагрева или горения необходимо рассматривать эти процессы как индуцированную самоорганизацию в температурном фронте, имеющую общие черты с фотоиндуцированной самоорганизацией [8, 9], также наблюдающейся в жидкокристаллических системах под воздействием светового пучка [10, 11].

Поскольку особенности формирования мезофаз зависят от карбонизируемой структуры (в случае смесей горючих веществ — от их пропорции и фазовых характеристик [12]), морфометрические характеристики мезофаз, как и гранулометрический состав итогового карбонизата, коррелируют с размерами микроструктур или дисперсностью карбонизируемой субстанции, с поправками на коалесценцию жидкокристаллических структур (текстур) [13, 14]. Если для порошковых форм веществ гетеродисперсность и морфометрическая анизотропия частиц характеристичны [15], то для жидкокристаллических (мезофазных) форм в контакте с окружающей средой эти параметры не трактуются столь однозначно, однако могут быть вычислены по энергетическим предпосылкам взаимодействия между подлежащей фазой и мезофазой [16]. В то же время для случая формирования мезофазы непосредственно в процессе карбонизации вещества, являющегося прекурсором как мезофазы, так и фазы подложки, с которой она контактирует, для каждого следующего этапа в ходе горения нужен специальный расчет энергетических соотношений, дающий на выходе вычислений (особенно — кинетических) качественно отличные формы мезофазы на подложке (что хорошо соответствует классическим представлениям Марша, сформулированным задолго до появления высокопроизводительных ЭВМ [17]).

Реакционно-диффузионные механизмы в процессах горения, включая механизм коалесценции, должны приводить к образованию фаз сферической геометрии [18], что и наблюдается при их электронно-микроскопическом исследовании [19]. Однако в действительности физико-химические характеристики поверхности фаз, с которыми происходит контакт мезофаз (в частности — гидрофобность/гидрофильность подложки, определяющая краевой угол смачивания/контактный угол [20, 21]), а также многие добавки и внешние поля возмущают поверхность «мезофазных сферул» в процессе коалесценции и затвердевания [22, 23], в результате чего строгой сферической геометрии не формируется. Это свидетельствует о том, что регуляция формообразования данных мезофаз не ограничивается свободной энергией, а сам процесс, действительно, обладает чертами «морфогенезиса», т. е., реакционно-диффузионного процесса. Этот процесс протекает, с участием карбонизируемого прекурсора и продукта его разложения, эмерджентно влияющего на ход процесса (регулирующего его, в терминах теории управления) коалесценции сфер мезофазы непосредственно *in situ* — в процессе ее формирования [24]. Вместе с тем, так как размещение сферул на поверхности гомогенной фазы удовлетворяет

критериям модели сферической упаковки [25, 26], очевидно, что формы пористости изначального вещества и мезофаз на различных этапах их формирования/коалесценции (вносящие существенный вклад в итоговую форму карбонизированных мезофаз), в принципе, не являются идентичными или коррелирующими [27], поскольку межсферные промежутки данных упаковок не идентичны, а сохранение фазового объема после горения не является приближением, адекватным реальности. Этот факт следует учитывать в вычислительных моделях, как минимум, ввиду потерь вещества в ходе газовой выделения, а также схлопывания (коллапса или обрушения стенок) пор в ходе нагрева или горения [28, 29]. Данный «эффект независимости» особенно проявляется в случае многокомпонентных горючих смесей или субстанций, в которых примеси определяющим образом влияют на мезофазные структуры, продуцирующиеся в ходе коксования (формирование коксоподобных, но не в полной мере идентифицируемых с ним, либо «полукоксовых» структур [30]). Поэтому, изучая механизмы формирования мезофаз и иных нестабильных жидкокристаллических образований в горючих системах, акцент следует делать не только на физике (диффузии, контакте и смачивании, коалесценции мезофаз, распространении фронтов), но и на химии горения, приводящей к фиксируемому в опытных изысканиях многообразию мезоморфных структур и их производных.

Рассмотрим механизмы формирования мезофаз в карбонизируемых средах в широком смысле, *sensu lato*, рассматривая комплекс феноменов и эффектов, удачно объединенных в зарубежной литературе формулировкой «development of the mesophase and coke-carbon forms» [31]. Концептуальная и прикладная целесообразность такого рассмотрения обусловлена активностью мезофаз при углекоксовой трансформации [32], определяющей комплекс функциональных свойств кокса как продукта реакционно-диффузионного процесса — от морфологии (см. выше) до реологии, не исключая локальных его термореологических характеристик и микромеханических свойств, в том числе прочность и горячую прочность (CSR) [33]. Любые воздействия, возмущающие эти переменные (фазовое пространство) в ходе подготовки, нагрева и горения, оказывают решающее влияние и на морфологию, а значит — на реакцию с диффузией в данной системе. Как положительный пример регуляции формообразования можно привести формирование игольчатых структур при деформации мезофазы [34]. Как отрицательный (но способный приводить системы к быстрой микроструктурной перестройке из метастабильного состояния мезофаз/мезоморфных фаз) пример можно привести разрушение дальнего порядка

как результат нарушения взаимодействия ароматических колец/стекинга [35] (на стадии предварительной обработки химическими агентами, что отсылает нас к теории действия антипиренов, или на стадии выжигания ряда органических структур до стадии пиролиза, что отсылает нас к химической физике горения и взрыва [36, 37]).

В известной степени, исходный карбонизируемый субстрат также является звеном в сетях регуляции и управления морфологией мезофазных продуктов горения, поскольку, если при карбонизации сохраняется остов и план строения (при частичном замещении) химической структуры, то формы карбонизированных продуктов будут обладать морфизмом (гомеоморфизмом или изоморфизмом) по отношению к исходному субстрату (так называемый эридитарный морфизм). Например, при карбонизации геликоидального полиацетилена мы неизбежно получаем геликоидальный графит, в силу морфостабилизирующей карбонизации продукта синтеза в хиральной нематической мезофазе [38]. Для менее организованных сред возможно сохранение ориентации/анизотропии, как правило, не предусматривавшееся в ранних представлениях [39] (и в настоящее время редокс-стабилизация мезофазы, строго говоря, не означает ее морфологическую стабильность при карбонизации [40]).

Карбонизация и развитие жидкокристаллических мезофаз

Карбонизация и развитие жидкокристаллических фаз/мезофаз в ходе нее являются предметом выраженного систематического интереса, начиная с 1970-х годов, а точнее, с 1972–1973 гг., когда была опубликована в журнале «Fuel» первая работа из серии статей Harry Marsh «Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development» [41]. Аргументируя актуальность исследования жидкокристаллических эффектов в карбонизации угля и угольных смесей, в разработке кокса, Г. Марш (впоследствии лауреат премии Генри Шторха, отметившей его вклад в признание функций мезофазы, а именно нематических нематических жидких кристаллов в превращении угля в кокс в резюме: «In the area of carbonization, Marsh has been responsible for recognizing the role of mesophase (nematic crystals) in the conversion of coal to coke»), автор первой поданной статьи, апеллирует к данным оптической/поляризационной микроскопии. Они демонстрируют наличие анизотропных структур, подобных растущим жидким кристаллам, которые ограничены химической неоднородностью в пластической фазе и зависят от наличия твердых поверхностей (инертных частиц) внутри карбонизирующей системы.

В соответствии со структурными представлениями, первыми были изучены карбонизация (ко-карбонизация = со-карбонизация) ароматических и гетероциклических соединений [42, 43], поскольку наибольшее количество веществ, существующих в жидкокристаллическом состоянии — ароматические соединения, содержащие бензольные кольца с заместителями (в пара-положениях), а производные ароматических соединений, содержащие чередующиеся линейные и циклические (бензольные кольца) группировки, а также заместители (как правило — также в пара-положении), также являются основой жидкокристаллических термотропных сред (которые, в свою очередь, требуют дифференциации от жидкокристаллических реактопластов терморектопластов, исследовавшихся и разрабатывавшихся позже [44–46]).

Исследовалось формирование мезофаз в каменноугольных смолах, а также в образцах, относящихся к различным стадиям физико-геохимической эволюции угля [47]. Известно, что теплотворная способность угля увеличивается по динамической шкале — от лигнита до битуминозного угля с увеличением количества фиксированного углерода и уменьшением влажности и содержания летучих веществ в угле. Поскольку международной системой кодификации углей высокого, среднего и низкого рангов установлена кодовая система показателей, которая использует средний показатель отражения витринита или рефлектограмму отражения витринита, очевидно, что одним из следующих предметов анализа в серии работ должны были стать витриниты, что и было реализовано [48]. Такой подход может быть легко соотнесен с результатами исследования мезофаз/жидкокристаллических веществ углей поляризационно-микроскопическими методами, поскольку, определяя ранг угля по витриниту, достаточно использовать поляризационный петрографический микроскоп (на тринокулярном звене которого установлена микроспектрофотометрическая или микрофотометрическая приставка). В отличие от других показателей — таких, как общий (органический) углерод, состав летучих веществ или теплотворная способность, он не зависит от общего состава угля (например, относительные пропорции различных веществ), а единственное требование для определения ранга — содержание в угле витринита.

Однако именно эта простота и является проблемой и источником артефактов. Во-первых, очевидно, что для многокомпонентных углей формирование мезофаз будет отличаться от точки к точке. Во-вторых, сами витриниты, представляя собой мацералы углей с «гелифицированными» остатками растительных тканей (иногда *sensu lato*

недостаточно доказательно относимыми к жидкокристаллическим образованиям, так как растительные клеточные стенки, исходно присутствовавшие в породе (мацерале), обладали элементами жидкокристаллического строения [49, 50]) без морфометрических признаков/дескрипторов фюзенизации, заведомо предопределяют наличие/отсутствие мезофаз в той или иной области углей, топически соотносимой с их мацеральным или тканевым составом. Таким образом, зависимость формы мезофаз от ранга угля в локальных областях, выявленная в первых работах Гарри Марша, может быть локализована с областями различной термической активности, а также с витринизацией (точнее, витринитизацией, ибо термин «витринизация» претерпел изменение значения в результате некорректного использования в гуманитарных и социально-экономических областях знания). Поэтому мезофаза как продукт комплекса стадий карбонизации не существует в отдельности от остального массива фаз образца — скорее, можно говорить об эвтектической смеси или дифференциальном фазообразовании. И действительно, в одной из работ из того же цикла, в изучении развития анизотропии в угле как результата роста немагических жидких кристаллов из пластической фазы при карбонизации на хорошо моделирующих реальные процессы углефикации образцах, Г. Маршем, Г. Хермоном и Г. Корнфордом была зафиксирована определяющая роль эвтектики в формировании и развитии немагических мезофаз в этих системах [51]. Если говорить о супераддитивном вкладе в теплофизическое поведение мацералов, то вполне очевидно, что смешанные немагические жидкие кристаллы в углях формируют эвтектические зоны, стабильные при более низких температурах, чем отдельные компоненты, а при совместной карбонизации двух (или более) ранговых градаций углей это приводит к качественно отличным реакционно-диффузионным и межфазовым явлениям, морфологически отличающимся такой случай от случаев карбонизации любого из этих углей в отдельности.

Этот доказанный, хотя, в целом, интуитивно-понятный вывод изменил направление исследований группы Марша. Работы по оптическим текстурам карбонизации модельных соединений (аценафтилена, декациклена и других) были разделены. Так, вышла отдельная статья по углям аценафтилена и декациклена [52] и отдельная статья по сокарбонизации этих соединений [53]. В дальнейшем, еще ряд статей имел ярко выраженный мультифазовый «сокарбонизационный» акцент, причем Г. Маршем исследовалась не только сокарбонизация составляющих угля как такового, но и сокарбонизация угля и жидких топлив/

каменноугольных смол [54–56]. Формирование мезофаз при сокарбонизации угля и некоторых доступных органических присадок исследовалось не только по результатам переработки, но и в динамике [57, 58].

Фазовая кинетика процессов в жидкокристаллических системах является чрезвычайно продуктивной областью физико-химических изысканий, объемлющей:

- кинетический анализ процессов полимеризации и деполимеризации в многокомпонентных смесях (особенно в композитных мезофазных структурах) жидких кристаллов;

- процессы фазовой сегрегации;

- воздействие растворителей на морфологию и физические свойства жидкокристаллических образований [59, 60];

- собственно фазовые переходы в жидких кристаллах [61, 62], как равновесные, так и неравновесные;

- мезоскопические физико-химические градиентные эффекты [63, 64], в том числе, неизбежно ведущие к диффузионным, а также сложным реологическим потокам в системе [65]; и т. д.

Поэтому можно считать, что данный комплекс подходов применим и для исследования формирования и реактивного реологического поведения многокомпонентных мезофазных систем, возникающих в карбонизируемых субстанциях, которые рассматриваются в цикле работ Марша и соавт., как и в настоящей статье. Предпосылки для этого можно дополнить кинетическими ограничениями для формирования ультрадисперсных фракций целлюлоз [66], в частности — в ходе диффузионно-лимитируемого разложения остатков растительности, которое, в отсутствие реакционно-диффузионного (кинетического) лимитирования, не позволило бы рассуждать о формировании высокоорганизованных углей, как минимум, в силу более раннего высокодисперсного распада древесины и иных остатков, что давало бы качественно иные мезофазы. О мезофазах с наноцеллюлозным композитным наполнением будет подробнее рассказано в разделе о жидких кристаллах целлюлозы и лигнина («От мезофазной химии горения к мезофазной и коллоидной химии композитных антипиренов»).

Торможение фундаментальных работ в области жидкокристаллической/мезофазной углехимии с 1980-х гг.

Цикл исследований коллектива Марша, посвященный развитию мезофаз при карбонизации, публикация которых продолжилась и в 1980-е годы, шел по двум направлениям:

1) исследование общих закономерностей формирования мезофаз;

2) прикладной скрининг улей и иных топлив.

Согласно мнению специалистов британской угольной науки, прекращение публикации цикла в начале 1980-х годов было связано не с исчерпанием тематики или методической базы, а с закрытием многих шахт и увольнением десятков тысяч специалистов. В эпоху экономии и «тэтчеризма» данная тематика стала невыгодной (частное сообщение д-ра Х. Франкфельда, 2018), в силу чего даже достаточно рентабельные прикладные результаты не могли реализоваться и спасти исследовательскую программу. Тем не менее, отдельные фрагменты ее публиковались до середины 1990-х годов — однако с акцентом не на угольном топливе.

В рамках данной программы исследований статьи длительное время сохраняли фазовый характер, учитывающий явления сокарбонизации [67–70], однако в последних работах акцент уже смещался на сокарбонизацию с топливными смолами. В качестве наиболее значимых примеров результатов и концептуальных обобщений, завершавших этот цикл публикаций, можно перечислить:

– концепцию вариаций в схемах сольватации и сольволиза добавок при ко-карбонизации;

– возможность использования методов анализа микроскопической оптической текстуры коксов в сравнении характеристик эффективности растворителей;

– демонстрацию эффективности взаимодействия донорно-водородных носителей с продуктами термической деполимеризации угля;

– общий мезофазный этап в механизмах сжигания угля и смесей угля для получения кокса;

– установление различий мезофазной динамики растворимых и нерастворимых фракций;

– установление фундаментальной зависимости между молекулярностью фракций топлива и размерами мезофазной текстуры (так, например, низкомолекулярные фракции экстракта углей производят кокс с оптическими текстурами большего размера, чем кокс из исходного экстракта, а фракции с более высокой молекулярной массой производят кокс с текстурами меньшего размера);

– установление влияния реологических параметров/текучести среды на поведение мезофаз и химическую стабильность;

– доказательство идеи, что «эффекты доминирующего партнера» влияют на размер оптической текстуры (то есть установление обратной связи, в которой второстепенный компонент — низкомолекулярный органический или неорганический агент или присадка контролирует развитие морфологии жидких кристаллов);

– идентификацию и анализ механизмов развития мозаичной анизотропии в ходе ко-карбонизации в коксе;

– установление положительной связи/корреляции между температурой обработки угля и выраженностью анизотропных мезофазных доменов в коксе (с выраженной структурой термоиндуцированных потоков) [71–74].

В наши дни почти невозможно представить почему, несмотря на такой солидный бэкграунд с очевидной прикладной ценностью, эти работы были приостановлены.

В 1981 году Марш и Гринт выпустили в свет последнюю публикацию данного цикла, в которой они попытались обратить внимание металлургов на возможность замены коксующихся углей угольным пеком (взаимодействие между углем и смолами на границе раздела частиц угля с образованием кокса с ярко выраженной дисперсной оптической текстурой — результатом ко-карбонизационного взаимодействия между углем и смолой, приводящего к повышению прочности кокса [75]). Однако несмотря на применение методов и инструментальных подходов, использовавшихся для анализа мезофаз, данная работа была наименее посвящена мезофазам и внесла наименьший вклад в понимание (псевдо)жидкокристаллических эффектов, наблюдаемых в углях и коксах при рациональной переработке.

Прекращение «мэтрами» направления работ в основанной ими области с отсутствием логического обоснования причин остановки цикла публикаций и интегрирующего обзора по физике мезоморфного состояния данных веществ привело последователей и других ученых, работавших в смежных направлениях, в состояние неопределенности вектора исследовательской активности. Поскольку «мэтры» в последних работах сделали отход в сторону мезофаз в смолах и пеках, многие рядовые специалисты реактивно переключились на анализ смол, битумов, ряда других жидких продуктов перегонки и жидких видов топлива. Поэтому впоследствии многие авторы неправомерно заключали, что формулировка мезофазных явлений в химии твердого топлива была лишь расширенной *sensu lato* трактовкой текучести и реологических свойств этих фракций и продуктов переработки (что говорит о слабом знакомстве утверждавших это специалистов с физикой, лежащей в основе жидкокристаллического состояния и ее отличиями от иных отраслей физики частично упорядоченных сред — *soft matter physics*).

В середине 1980-х годов появилось весьма небольшое количество работ в области мезофазных смол и их производных, нередко фрагментарно исследованных в ограниченных (по экспериментальным объемам) условиях малых

лабораторных установок. По ряду критериев это, несомненно, давало существенные преимущества по сравнению с масштабными реакторными экспериментами (bulk approach), в том числе возможность проведения работ в термических вакуумных и экспериментальных газовых средах [76]. Начиная с 1990-х годов, после десятилетнего перерыва, появились работы по мезофазам с участием продуктов сокарбонизации, особенно каменноугольных смол и основанных на них горючих композитов [77–83]. Скепсис к вязкостным проявлениям мезофазной активности (скорее всего, по интуитивным причинам, намного меньше, чем когда-то к твердофазной ее реализации в работах Марша с соавт.) перестал оказывать определяющее воздействие на прогресс в этой области исследований. Вероятно, также имел значение факт доказательного исторического приоритета в этой сфере, поскольку еще в конце 1960-х годов проводились работы, доказавшие с помощью методов рентгенодифракционного анализа существование мезофазы на ранних стадиях карбонизации смол [84].

Для периода с начала XXI века и по настоящее время характерен почти исключительный акцент на жидкокристаллических/мезофазных проявлениях в смолах/печах и вязких топливах [85–91]. Фактически не реализованы работы по исследованиям жидкокристаллического состояния в углях, в особенности (в программе-максимум) с привязкой к горизонтам и геохронологическим реперам, эволюционным стадиям, биогеохимическим, а также биоминерализационным дескрипторам соответствующих периодов, а тем более к барогеохимическим/термобарогеохимическим картам разрезов для соотнесения естественных условий углефикации и фюзенизации с какой-то из лабораторных моделей «мезофазной» (или хотя бы опосредованной формированием метастабильных мезофаз) карбонизации. Единственное, что внушает надежду на возможное исправление ситуации, это эквивалентная применимость методов, разработанных для углей Маршем и соавт., и к иным субстанциям топливно-энергетического комплекса, которые также можно проанализировать с учетом данных физико-химических подходов — в частности, представлений о функциях эвтектики и гетеро- или мультифазных потоков в морфогенезе продуктов карбонизации и сокарбонизации [92]. Однако данный подход не является столь продуктивным для (и без того) вязкотекучих систем, за исключением мезофазных композитов, составленных из указанных смол и фрагментов угля или иных твердофазных продуктов его переработки [93] (это является, скорее, новым взглядом на подход статей Марша,

отличающийся от них акцентом на связующей матрице: смоле, пеке). Поэтому для возвращения к исходной идее Марша необходимо вернуться не к идее эвтектики как таковой, а к физическим принципам микрогетерогенной организации сред — прекурсоров жидкокристаллических карбонизатов; или, иными словами, проследить эридарные цепи изменения свойств мезофаз от фитохимии и химии природных соединений до каустобиолитов и других дефинитивных форм геологического генеза.

Фитохимические целлюлозосодержащие прекурсоры жидкокристаллических структур в углях и нативные липидсодержащие ретарданты горения и биоантипирены на их «мезофазной» основе

Вполне очевидно, что основным источником фюзенизуемых угольных систем являются останки содержавших лигнин и целлюлозу тканей растений с сохраняющимся при карбонизации, гелефикации и метаморфизме деталями анатомического строения [94]. В связи с этим, основной анализируемой субстанцией в моделирующем исследовании мезофаз и иных горючих компонент нативного угля должны являться мезофазы, прекурсоры мезофаз в составе нативных биологических систем, содержащих целлюлозы и лигнины, а также продуктов их переработки.

Поскольку многие продукты переработки указанных древесных структур рассматриваются ныне как сырье для синтеза антипиренов, рассмотрим не только горение, но и ингибирование горения нативными мезофазными компонентами древесины и их жидкокристаллическими производными. Можно сказать, что в развитии угольных пластов, градиентных по своим горючим свойствам, «диалектически» сосуществуют, конкурируют и противоборствуют две тенденции:

- 1) на увеличение эффективности горения, в силу обуглероживания (при фюзенизации);
- 2) на понижение эффективности горения (в том числе — в результате заместительной минерализации), или антипиренную активность отдельных структур.

Однако не следует забывать, что фюзениты или семифюзениты могут сами являться продуктами горения древесины, следствием лесных пожаров. Таким образом, имеет место противоборство мезофазных пироэффектов, реализуемых за счет разных типов мезофаз и их переходов, однако отнесение отдельных структур к той или иной стороне этого эмерджентно воз-

никающего комплекса физико-химических противоречий не является абсолютным, а может изменяться в зависимости от регулирующих или детерминирующих ход горения (и поведение отдельных метастабильных фаз/жидкокристаллических состояний) условий окружающей среды. Более того, эволюционные изменения состава прекурсоров отдельных мезофаз, возникавшие в целях адаптации растительности к разным палеоклиматическим и палеометеорологическим условиям среды [95–97] (пример — эволюционное изменение содержания липидов, обладающих характерными жидкокристаллическими/мезофазными свойствами [98, 99], а также их концентрационного либо объемного соотношения с другими жидкокристаллическими субстанциями в составе растительных клеток, включая целлюлозосодержащие матрицы ряда клеточных стенок [100–103]) неизбежно сдвигали как формообразование и мезофазную (и шире — фазовую) морфологию, так и эвтектики и компартиментализацию горючих участков. Эта эволюционная (био)геохимическая гипотеза легко подтверждается в ходе сопоставления ископаемых и современных представителей ряда таксонов, встречающихся в каменноугольных фитофоссилиях [104], а также путем анализа сукцессионных форм угленакопления в разные геологические периоды [105].

Итак, для подтверждения применимости теории жидкокристаллического состояния древесных или растительных горючих структур необходимо анализировать научную литературу, посвященную различным биохимическим компонентам и компартаментам этих структур как жидкокристаллическим образованиям или же веществам, способные к нахождению в таком состоянии. Как указано выше [100–103], клеточные стенки растений включают в себя ориентированные элементы (полисахаридные, особенно целлюлозные), демонстрирующие, *sensu lato*, «жидкокристаллические» оптические/физические свойства. Интенсивные исследования «жидкокристаллических» свойств целлюлозы, ее производных и композитов, как свидетельствует анализ литературных источников, начались в 1950-е годы, после выхода в свет статей Вудса и соавт. [106, 107] о структуре целлюлозы, на одну из которых ссылались Вальтер и соавт. в широко известной статье по жидкокристаллическим системам, основанной на волокнистых полисахаридах (на примере хитина) [108]. Это являлось качественно новым шагом в развитии представлений о структуре и надмолекулярной организации целлюлозы, поскольку, начиная с изысканий Фрей-Висслинга 1930-х гг., обширно цитировавшихся во множестве работ, в науке

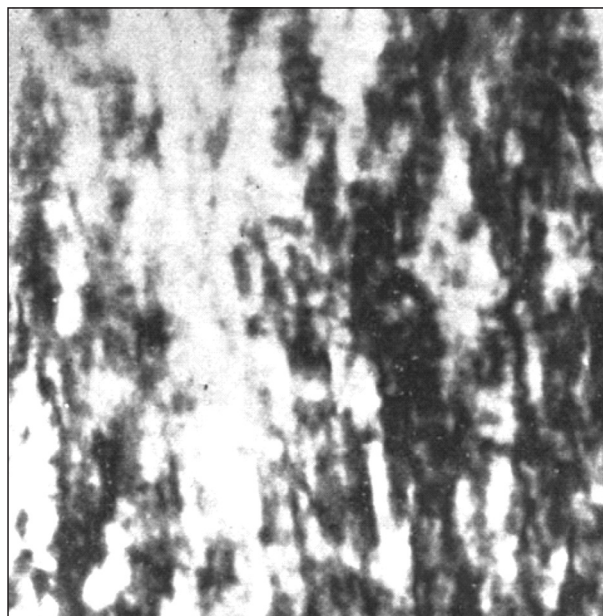


Рис. 1. Двухлучепреломляющий гель в скрещенных поляроидах (x750) (оригинальная иллюстрация из работы Marchessault и соавт. из журнала «Nature», 1959 г.) [108]

Fig. 1. Birefringent gel between crossed polaroids (x750) (original illustration from the work of Marchessault et al. from the journal «Nature», 1959) [108]

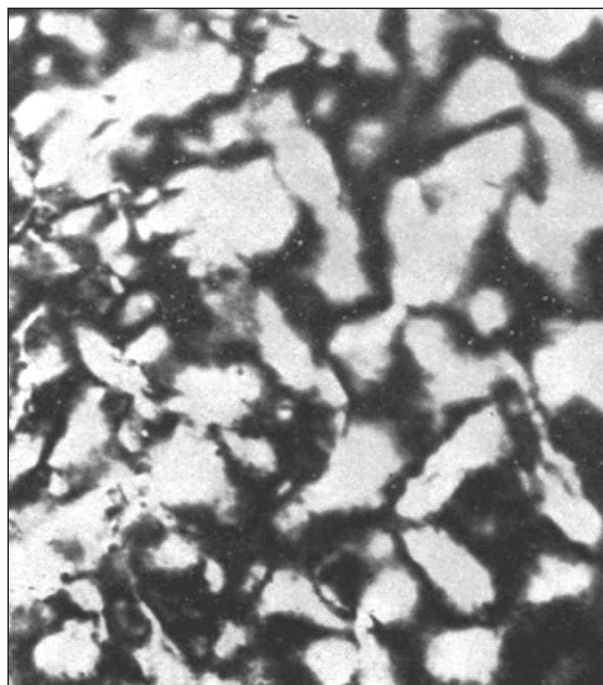


Рис. 2. Высохшая пленка «высоленного» двухлучепреломляющего геля между скрещенными поляроидами (x200) (оригинальная иллюстрация из работы Marchessault и соавт. из журнала «Nature», 1959 г. Очевидно, что ни о какой конкретной фазе речь в статье не идет) [108]

Fig. 2. Dried-down film of «salted out» birefringent gel between crossed polaroids (x200) (original illustration from the work of Marchessault et al. from the journal «Nature», 1959. Obviously, no specific phase is discussed in the article) [108]

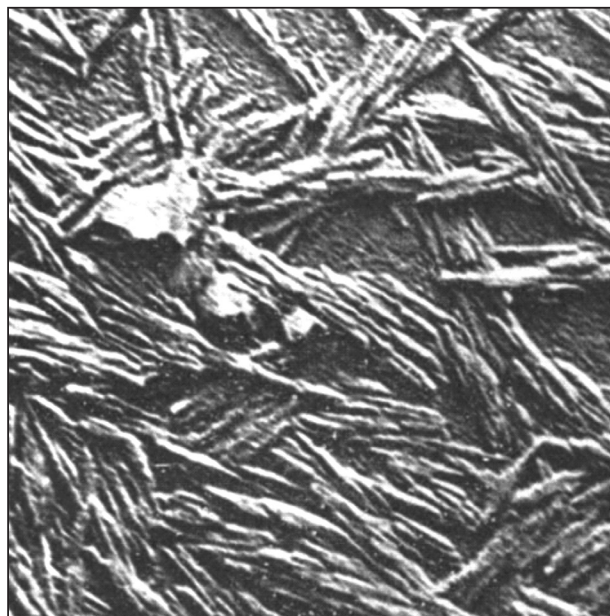


Рис. 3. Электронная микрофотография, полученная методом реплик кристаллитной пленки, сделанной посредством высушивания разбавленной суспензии на стекле (x75,000) (оригинальная иллюстрация из работы Marchessault и соавт. из журнала «Nature» 1959 г.) [108]

Fig. 3. Electron micrograph made by surface replica technique of crystallite film made by drying down dilute suspension on glass (x75,000) (original illustration from the work of Marchessault et al. from the journal «Nature», 1959) [108]

господствовала мицеллярная теория, известная как теория аморфно-кристаллического строения целлюлозы. Ее ни в коем случае нельзя путать с идеями жидкокристаллического строения целлюлозы, так как оригинальная теория Фрей-Вислинга рассматривала целлюлозу, *de facto*, как однофазную кристаллическую систему с наличием дефектов упорядоченности, принимая во внимание чередование кристаллических участков (кристаллитов, мицелл) и аморфных (менее упорядоченных) участков в микрофибриллах целлюлозы, в соответствии с моделью «бахромчатой фибриллы», разработанной для ряда полукристаллических полимеров, надмолекулярная структура которых имеет межмицеллярные участки, рассматриваемые как своеобразные дефекты решетки.

К сожалению, некоторые авторы некорректно цитируют этот эпизод истории науки. Так, в недавней статье [109] авторы из МГТУ им. Н.Э. Баумана, связывая с «неурегулированными структурами наноцеллюлозы» данное событие, пишут, что «Marchessault et al. опубликовали сообщение ..., что дисперсии НКЦ (нанокристаллической целлюлозы), полученные сернокислотным гидролизом, образуют лиотропные жидкокристаллические фазы», а затем «...установлена характерная для самоорганизации водных дисперсий НКЦ

(«наноцеллюлозы» или нанокристаллической целлюлозы) хиральная нематическая (холестерическая) фазовая структура». В действительности, этой конкретике в цитируемой статье нет — всего лишь указаны факты двулучепреломления и ориентации при наблюдении в скрещенных поляроидах (см. рис. 1, рис. 2), а также приведена микрофотография ультрадисперсных волокон целлюлозы (методом реплики, см. рис. 3). Термин «мезофаза» в статье не встречается, а «liquid crystal systems» никак не конкретизируются, встречаясь только в заголовке статьи. Это, действительно, одна из первых работ в данном направлении, однако более подробный анализ (после которого такая форма цитирования была бы правомочной) проводился в работах позднее, причем в них не использовались столь современные термины и подходы, которые в статье [109] приписываются авторами из МГТУ им. Н.Э. Баумана классической работе Marchessault и соавт. [108]. Для того, чтобы в этом убедиться, достаточно проанализировать оптические микрофотографии из оригинальной статьи Marchessault (см. рис. 1, рис. 2).

Подробное изучение мезофазных/жидкокристаллических структур на основе всех нативных полисахаридов не было завершено и к концу XX в. Исследование формирования полисахаридных композитов на различной основе, а также смесей полисахаридов проводилось до 1990-х годов [110], после чего стало очевидным, что прикладная ценность данных работ не окупает вложений (очередной случай, когда развитие исследований диктуют больше экономические, нежели предметные причины), в силу чего работы эти впоследствии не имели заметного фундаментального продолжения. Однако в странах, где на тот момент еще можно было вести работы без привязки их к доминирующему «мейнстриму» и spin-off-коммерциализации (в том числе, в постперестроечном СССР), эти изыскания продолжались.

В 2000-е годы продолжалась публикация статей по фазовым переходам в полисахаридных жидкокристаллических системах, а также в жидкокристаллических системах на основе производных полисахаридов [111]. Исследовались и более фундаментальные с физико-химических позиций вопросы проявления жидкокристаллического состояния в полисахаридных системах с разными мезофазогенными растворителями [112]. Поскольку в основе клеточной стенки растений лежат общеизвестные полисахариды [113–116] (их номенклатура отнюдь не ограничивается целлюлозой, ее производными, формируемыми в естественных физиологических условиях [117–119]), часть из которых не может

выполнять свою функцию вне контакта с целлюлозой (в частности, это касается функции механических тканей), любое исследование формирования жидкокристаллических систем на основе нативной целлюлозы является частным случаем исследования жидкокристаллических свойств не только целлюлозы, но и всех полисахаридов клеточной стенки (особенно, учитывая, что без предобработки не представляется возможным отделить некоторые из них от других).

Исходя из ультраструктурных механизмов, разделение исследований по «естественным жидким кристаллам» на основе целлюлозы и их лабораторным эквивалентам с точки зрения морфометрии и геометрии соответствующих структур (мезофаз, их прекурсоров и депо локализации) обусловлено наличием компартиментализации в биологических источниках целлюлозы (например, так называемые «целлюлосомы» — класс внеклеточных органелл/компартиментов, в которых происходит переработка и деградация полисахаридов, включая целлюлозу [120]) и их отсутствием в тех безмембранных условиях, в которых формируются жидкокристаллические и мезофазные полисахариды в лаборатории.

Как следует из изложенного выше, следует различать исследования в области жидкокристаллического состояния природной целлюлозы (из стенок растительных клеток) и жидкокристаллического состояния ее комплексов и производных. Если с первой частью проблемы все достаточно очевидно, так как формы нахождения целлюлозы в растении исследованы, начиная с работ А. Фрей-Вислинга 1930-х годов, то по состоянию конкретных ее производных до настоящего времени имеют основание вестись дополнительные исследования, дискуссии. Проблема жидкокристаллического состояния композитов, blends и производных целлюлозы, получаемых в лабораторных условиях, не может считаться решенной, вследствие многообразия условий их получения и форм, относимых к разным классам структур, получаемых в этих условиях.

Так, не позднее первой половины 1980-х годов в развитых странах и не позднее конца 1980-х годов в развивающихся странах, повторяющих их рубежные достижения, была актуализирована проблематика лиотропных жидких кристаллов из растворов производных целлюлозы [121, 122]. Отечественные работы, в которых сделаны выводы о реализации лиотропного жидкокристаллического состояния (при росте концентрации растворов) на основе экспериментальных данных, свидетельствующих о доменной структуре соответствующих производных, стали заметны в 2000-е годы [123].

Целлюлозосодержащие мезофазы как объект управления и продукт самоорганизации: условия получения и сопутствующие физические факторы как обратные связи данных нелинейных систем

Обращает на себя внимание тематическая преемственность тенденций в этой области с 1980-х по 2000-е годы [124, 125], свидетельствующая о неполноте знаний и о целесообразности продолжения работ в этой области. Достаточное знание об объекте исследования в релевантных к практике областях достигается лишь тогда, когда, основываясь на исследовании факторов физического/физико-химического воздействия на объект (предмет исследования), можно с достаточной точностью предсказать воспроизводимый отклик объекта на тот или иной сигнал, а следовательно, сделать предмет исследования объектом управления. В данной области исследований это состояние еще не вполне достигнуто, хотя очевидный прогресс имеется.

Известно, в частности, что на основе целлюлозы и ее производных возможно получение различных жидкокристаллических текстур холестериков [126, 127], дискотиков [128], нематиков [129, 130] (последние промышленно интересны как компоненты ультразвуковых излучателей и оптических сенсоров). Однако не существует исчерпывающего (построенного *ab initio*) учения о молекулярной или надмолекулярной инженерии жидких кристаллов, позволяющей заранее, например, на основе дескрипторного анализа QSPR/QSAR-подобных алгоритмов и обучающейся нейросети либо мультифизического моделирования предсказать и запрограммировать класс и морфологию/геометрию структур, мезофаз (то есть процесс их формообразования, в зависимости от условий получения).

Большинство публикуемых работ ограничены эмпирическим подобием и общими апостериорными представлениями, часто необходимыми, но, как правило, недостаточными для выводов с эвристической предсказательной экстраполяционной способностью. Это отличает морфологические подходы в исследованиях жидкокристаллических сред/мезофаз от фазовых подходов в твердотельной кристаллографии, где методиками, восходящими к CALPHAD Л. Кауффмана и «курнаковскому» фазовому анализу, достигнут весьма удовлетворительный уровень предсказательного описания простых структур, моделями типа «реакция с диффузией» достигнут уровень, достаточный для прогностики стационарных минеральных фаз [131, 132], а вычислительными

гидродинамическими методами, учитывающими массоперенос, достигнуто хорошее морфологическое подобие модели и минерального прототипа [133, 134].

Между тем характер приложений жидкокристаллических сред на основе целлюлозы, ее производных и композитов (оптические устройства — такие, как электро-/акустооптические затворы, дефлекторы и модуляторы [135–137], а также общеизвестные жидкокристаллические дисплеи [138–140]) требует на данном уровне развития техники уже не только достижения качественного лабораторного феноменологического подобия явлений (*proof-of-concept*, *proof-of-principles*), а количественного технологического уровня воспроизводимости управления свойствами готовящихся к изготовлению структур. Поэтому с точки зрения целевого программирования свойств материалов, целесообразными являются исследования и технологическая актуализация зависимостей свойств жидкокристаллической целлюлозы и фазово-аналогичных производных от условий среды и внешних полей, действующих на вещество *in situ* в процессе формирования системы с целевыми жидкокристаллическими свойствами. Отечественная школа (в силу сложившихся с советского периода тематических приоритетов), делает акцент на воздействии магнитных и механических внешних полей [141–144], в то время как за рубежом делается акцент на электрических, в том числе высокочастотных и сверхнизкочастотных полях, в которых можно наблюдать формирование ячеистых жидкокристаллических доменов/*cellular structures* [145], для которых поле является не только индуктором периодизма, но и источником накачки, подобно теплу для ячеек Рэлея — Бенара. Исследуются эффекты воздействия данных полей на фазовые и структурные переходы в жидкокристаллических полимерных системах, что эффектно выявляется на производных целлюлозы [141]. Вполне логично в связи с этим, что текстурообразование и формообразование в средах на основе целлюлозы и ее производных, часто интерпретируется как индуцированная самоорганизация. Однако важно различать механизмы, обеспечиваемые энергетической накачкой индуцирующего поля, и механизм, индуцируемый, но не поддерживаемый тем же полем, для того чтобы не ошибиться на стадии идентификации и трактовки характера самоорганизации. Самосборка («консервативная самоорганизация») и неконсервативная (диссипативная) самоорганизация, качественно отличны как по термодинамическим эффектам инициации и поддержания процессов формирования структур, так и по их непосредственным результатам (в первом случае — равновесные, во втором случае — диссипативные структуры).

В связи с этим кажется недоразумением отсутствие разделения разных типов формообразования и консервативной текстурной регуляризации в отдельных исследованиях химии частично упорядоченных сред («*soft matter chemistry*», по аналогии с «*soft matter physics*» [146]), в том числе мезофаз/жидкокристаллических систем. Самосборка макромолекул в растворе, входя в механизм реакционно-диффузионной самоорганизации мезофаз не только диссипативных структур, но и равновесных систем, сама по себе не является достаточной для идентификации путей диссипативной (неконсервативной) самоорганизации. Из анализа некоторых публикаций следует, что авторы понимают критерии термодинамики, однако не придают большого значения терминологическим особенностям, приводящим к их неполному пониманию читателем. Только через призму фазовых переходов в жидких кристаллах, в том числе так называемых индуцированных шумом переходов [147], можно рассматривать эту диалектику в приложении к конкретным соединениям (эфирам целлюлозы, в которых они наблюдались, в том числе [148, 149]) и целлюлозосодержащим композициям.

Управление системой с использованием некоторого фактора накачки и самоорганизация структур (обратимая, в силу бистабильности регулируемых состояний, но не в силу несоответствия неравновесной термодинамике как термодинамике необратимых процессов), индуцируемая и/или накачиваемая данным фактором, являются для частично упорядоченных сред не всегда разделимыми понятиями, поскольку найти точку, относительно которой можно вести траектории управления системой, бывает затруднительным. Однако «сигнальное» управление обеспечивает критерии подобного рода демаркации для кооперативно реагирующих структур (самоорганизация когерентных структур под унифицированной для синхронизируемых звеньев накачкой является распространенным фактом в нелинейной динамике [150]), в частности, для фотоуправляемых материалов на базе жидкокристаллических полимеров [151], локально реагирующих вследствие структурных предпосылок на поступающий сигнал (в отличие от гомогенных и монокристаллических сред, хорошо изученных в физике твердого тела). Как показывает практика, синергизм и антагонизм полей в процессах формирования жидкокристаллических структур и управления им также усложняет проблемы демаркации консервативной и неконсервативной самоорганизации в них. Например, хиральный электрохромизм некоторых полимеров, синтезируемых путем электрохимической полимеризации в жидкокристаллической матрице из производных целлюлозы — особенно

таких, как гидроксипропилцеллюлоза — можно рассматривать одновременно и как «электрически-индуцированную (по накачке) самоорганизацию», и как «темплатную ориентационную самосборку» (по управлению матрицей, в которой работают нековалентные взаимодействия, включая электростатику, потенциально регулируемую полем). Хороший пример системы, где такая демаркация сложно осуществима, приведен в работе [152], безотносительно с представленными выше рассуждениями.

Таким образом, логичным следствием из анализа физики управляемости жидкокристаллических сред на основе целлюлозы и ее производных является вывод о необходимости разделения физических и химических индукторов или факторов обеспечения процессов формирования жидкокристаллических сред и структур. Под «средой» здесь понимают объект исследования, для создания которого не требуется обеспечение накачки (то есть прекурсор либо продукт молекулярной самосборки, но не диссипативной самоорганизации), а среда при выводе из равновесия может быть субстратом для самоорганизации диссипативных надмолекулярных структур.

Знак вывода из равновесия, строго говоря, не имеет значения, поэтому можно говорить о выведении системы из равновесия, беря эффект «по скаляру». Доказано, что можно выводить систему из термодинамического равновесия в двух направлениях — в сторону увеличения (первый путь) либо уменьшения запаса энергии. Второй путь принято называть отрицательным возбуждением [153], для реализации которого достаточно заменить источник теплового излучения (или иной «накачки») на охладитель. Тогда частицы, находящиеся в соответствии с распределением Больцмана на высоких уровнях энергии, переходят не вверх по энергетической шкале, а вниз (хорошим примером этого перехода может считаться классическая отрицательная люминесценция [154]).

Не исключено, что множество явлений низкотемпературного формообразования в низкоразмерных системах и системах с размерными эффектами, а также крионанохимические механизмы, работающие при их получении [155], в том числе для целлюлозы и иных полисахаридов [156], используют инициацию (однако не накачку!) отрицательным выведением из равновесия или же «отрицательным возбуждением». Тем не менее, не следует путать случаи отрицательного выведения из состояния равновесия при самоорганизации и механизмы консервативной самоорганизации или самосборки, просто не требующие энергозатрат. В силу вышеизложенного, представляется возможным рассматривать управ-

ляющее действие условий среды на формирование жидкокристаллических и мезофазных сред интегрально, с термодинамических позиций, не прибегая к расшифровке химизма, но «сводя к термодинамике» как положительные, так и отрицательные стимулы к самоорганизации в среде. Для этого используется химический потенциал — термодинамическая функция, работающая с переменным числом частиц, из которой возможно вывести изменение энтальпии и энергии Гиббса (изменение которой в процессе химической реакции равно изменению внутренней энергии системы) при изменении числа частиц. С точки зрения анализа реакционно-диффузионных процессов, как правило, существенным ограничением этого подхода является отказ от рассмотрения влияния химических реакций на массы веществ в системе (так как химические превращения в ней уже учтены при подсчете числа компонентов), но наличие множества химических потенциалов для частиц множества конститuentов, как правило, позволяет избежать противоречий. В случае наличия управления самоорганизацией каким-либо внешним полем рассматривается электрохимический потенциал, а при пространственной неоднородности этого поля учитывается зависимость химического потенциала компонента от напряженности поля. Иначе говоря, очевидна неизбежность тензорного подхода к анализу процессов самоорганизации в анизотропной среде, которую представляет собой комплекс целлюлозных волокон, участвующих в формировании типов мезофазных структур, как в естественном фитохимическом состоянии, так и при карбонизации.

Для любой анизотропной структуры химический потенциал представляет собой тензор второго ранга, зависящий от тензора напряжений. Тензор химического потенциала определим одной скалярной величиной. В силу вышеизложенного, отличие эффектов действия электрохимических условий среды, начиная с pH, на формирование мезофаз можно исследовать с позиций геометрии реакционно-диффузионного процесса. Если исходная структура явно анизотропна (например, волокно или микрофибриллы, если речь идет о нативной целлюлозе), то это затрудняет диффузию к центру с отдаленных концов, а для частицы, деградирующей к сферической форме, скорость проникновения редокс-факторов с любой точки поверхности внутрь эквивалентна, что итеративно приближает ее к сфероидной форме, затем устремляя ее к нульмерной точке (идеально полная диссоциация). То есть, иначе говоря, доказательством от противного к диффузионно-ограниченной агрегации при самоорганизации ветвящихся структур фибрилл целлюлозы может являться детерминируемая итеративными

изменениями их геометрии и часто почти автокаталитическая по формальным кинетическим признакам деградация этих фибрилл до уровня отдельных единиц нуклеации (и ниже — вплоть до полной диссипации). При обращении направления процессов то, что было начальной точкой при развитии, становится конечной точкой инволюции, а то, что являлось морфологией продукта в ходе самосборки, становится, «автокатализатором» (совокупностью цепей обратной связи) его инволюции при диффузии агентов химической деградации (согласно расчетам химического потенциала).

Инволюция, равно как и эволюция, может быть представлена как алгоритм переходов между жидкокристаллическими структурами разных типов вплоть до совсем нежидкокристаллических форм, в зависимости от направленности процесса и локальных условий среды.

Реакционно-диффузионная динамика и мембраномиметические эффекты в формировании жидкокристаллических целлюлозосодержащих комплексов в природе и в эксперименте

С вышеизложенных позиций можно анализировать формирование жидких кристаллов на основе целлюлозы и ее производных в мезофазогенных растворителях. В качестве их примера можно привести уксусную и трифторуксусную кислоту (как правило, для эфиров целлюлозы), этанол и воду [157–162]. Акценты на эффектах растворителей могут быть связаны с тематической спецификой научных школ в СССР [163], так как проблематика жидкокристаллического состояния целлюлозы и ее производных впервые была поставлена в СССР в последней четверти XX в. — незадолго до перестройки, затормозившей развитие работ в этом направлении [164] (несмотря на это изыскания в области жидкокристаллического состояния целлюлозы/целлюлозных микрофибрилл публиковались и в 1990-е годы [165, 166]). Работы активно продвигал чл.-кор. АН СССР Г.А. Крестов в Институте химии неводных растворов АН СССР [167], где были установлены эффекты мезофазогенного растворителя в формировании данных структур [168–171].

Строго говоря, реологические и «гидродинамические» (терминологически корректно относимые к механике континуума) свойства растворов производных целлюлозы, включая нанофлюидику и реологию жидкокристаллического состояния [172], являются столь плотным коррелятом их надмолекулярной химии [173] (однако

не супрамолекулярной химии, *sensu stricto* [174]), реализуемой в растворах с конкретными фазовыми равновесиями [175], что вывод структурной эволюции жидкокристаллических (композитных, в том числе [176]) образований на основе целлюлозы из физической химии ее растворов представляется достаточно логичным и привлекательным. Поскольку первые работы в этом направлении велись еще при чл.-кор. АН СССР Г.А. Крестове [177], данный подход представляется развитием научной традиции. Необходимо отметить, что в современных исследованиях за рубежом подтверждается не только роль единичного растворителя в формировании жидких кристаллов целлюлозы и ее производных, но и роль фазовых характеристик растворителя (или растворителей) в образовании жидких кристаллов определенной формы, отдельных жидкокристаллических текстур. Показано, в частности, что в водосодержащих системах могут формироваться не менее оригинальные микроструктуры, чем в экзотических растворителях [178], а ионная сила среды-раствора и остаточные электролиты регулируют или определяют морфометрический класс структур, соотносимый с физическим типом жидкокристаллической текстуры [179].

В связи с этим, можно интегрировать реологию и химию растворов в реконструкциях реакционно-диффузионных процессов формирования целлюлозосодержащих жидкокристаллических структур и текстур, формируемых путем квазирегулярного «пертайлинга» [180] на основе подобных структурных блоков. В соответствии с представлениями Тьюринга о морфогенезе, специфицированными для жидких кристаллов, реологическая и «гидродинамическая» составляющие адекватны диффузионной компоненте в моделях морфогенеза, а химия растворов задает реакционную компоненту в тех же моделях. Представления об «искусственном морфогенезе» в текстах жидкокристаллических эластомеров (к числу которых относятся и структуры на основе производных целлюлозы [181–183]) кажутся недостаточно строго обоснованными без полного систематического анализа реакционных и диффузионных аспектов динамики данного процесса. Диффузионную часть данных представлений можно разделить на два класса явлений:

1) явления, связанные с мезоскопическим тепломассопереносом и реологическими параметрами, включая набухание матрицы и капиллярность (например, для производных целлюлозы [184, 185]);

2) явления, связанные с переносом молекулярных масштабов — такие, например, как перенос воды или протонов, который может быть зафиксиро-

рован методами ядерного магнитного резонанса.

Однако в реальности четкой границы между ними не существует, в силу структурной гетерогенности целлюлозы и образующихся на ее основе жидкокристаллических систем. Так, например, водный перенос может быть зафиксирован посредством методов и инструментов «рео-ЯМР» [186, 187], при этом в зону получения аналитического сигнала будут попадать мезопоры, через которые осуществляется транспорт, относимый к первому, более крупномасштабному, структурному уровню [188].

Как и в «тьюринговском» биологическом реакционно-диффузионном морфогенезе [189], в котором перенос активатора и ингибитора опосредуется или лимитируется за счет мембран, в формообразовании жидкокристаллических текстур на основе целлюлозы и ее производных и blends, смесей активно проявляют себя мембраномиметически действующие диффузионно-активные пористые поверхности фибрилл целлюлозы, на геометрических особенностях которых формируются интересные процессы, определяющие дальнейшее развитие структур. Можно утверждать, что процессы такого рода имеют эмерджентный характер, так как формирование структуры с использованием механизмов «трансмембранной» диффузии (имитируемой целлюлозным или (лигно)целлюлозосодержащим матриксом) происходит в результате использования поверхности, сформированной или химически функционализированной в реакционно-диффузионном процессе, использующем такой интерфейсный механизм диффузии, и обеспечивает протекание трансмембранной диффузии на вновь формирующихся поверхностях мембраномиметического материала по Фендлеру [190].

Когда помимо целлюлозы или ее производных в систему вводятся дополнительные компоненты, превращающие ее в композит (или же формирующие пространственно разделенные blends с различной «степенью жидкокристаллическости состава среды»), реакционно-диффузионный ход процесса обогащается деталями, обуславливаемыми многофазностью среды, в которой целлюлоза не является единственным компонентом. Такие «мембраны» (*sensu lato*) часто обозначаются в англоязычной литературе терминами «polymer/cellulose liquid crystal composite membrane» [191] (например, polyurethane/cellulose based liquid crystal composite membrane [192] или poly(4-vinyl pyridine)/cellulose based liquid crystal composite membrane [193]), «cellulose/liquid crystal composite membrane» [194], «liquid crystal-embedded cellulose membrane» [195, 196] либо «liquid-crystal cellulose composite membrane» [197].

Очевидно, что эта трактовка вносит «интригующую неопределенность» в поиски соответствующих публикаций, вследствие чего авторы обзоров иногда относят к «жидкокристаллическим мембранам на базе целлюлозы» даже те мембраны, в которых в качестве матрицы используют альтернативный (предварительно синтезированный) жидкий кристалл, а целлюлоза в формируемом композите является не более чем армирующей или же заполняющей фазой, не принимающей участия в формировании жидкокристаллических свойств. Очевидно, что «cellulose/liquid crystal composite membrane», должно быть, композитная пленка, содержащая целлюлозу и жидкокристаллический слой, «liquid crystal-embedded cellulose membrane» есть целлюлозная мембрана под жидкокристаллическим слоем или в жидкокристаллическом слое, а «liquid-crystal cellulose composite membrane» есть жидкокристаллическая мембрана на основе целлюлозосодержащего композита. Однако из цепочки терминов невозможно понять, какой компонент в данной системе обеспечивает жидкокристаллические свойства. Это приводит к путанице, когда постулируется «жидкокристаллический» характер целлюлозных или целлюлозосодержащих мембран, выводимый из свойств целлюлозы и методов структурообразования в содержащих ее системах (или механизмов такого структурообразования). В действительности оказывается, что жидкий кристалл вводился заранее для обеспечения этих свойств или формировался исключительно за счет второго компонента, отличного от целлюлозы. Эмерджентный самоорганизующийся характер таких жидкокристаллических мембраномиметических материалов с точки зрения дискурса «перехода от существующего к возникающему» [198] находится под большим вопросом. Несмотря на формирование динамических паттернов «искусственного морфогенеза» и в этих структурах [199], реакционная часть в таких процессах не подразумевает формирования новых компонент, мезофаз, в силу чего процесс идет как диффузионный — характерный для композитов, обладающих в дальнейшем статической (стационарной) структурой, и blend, диффузионное использование которых ограничено малыми молекулами либо ионами (например, в биомедицинских системах для оксигенации [200]).

К тому же существуют типичные специализированные жидкокристаллические структуры на основе целлюлозы, функционализированные для стабилизации гемостаза и антикоагулянтного действия [201]. При выполнении ими этих целевых функций на них также происходят реакционно-диффузионные процессы, в ко-

торых реакционная часть процесса топически ассоциирована с биохимическим источником массопереноса вещества, не являющегося интактным — в отличие от инертной целлюлозной матрицы, на поверхности которой происходит координационная фиксация. Другими словами, реакционно-интактные жидкокристаллические мембраномиметики, формируемые на основе (или с использованием) целлюлозы, хороши тогда и только тогда, когда дальнейшего использования их реакционной динамики не требуется; в иных случаях, опосредованное диффузией и массопереносом формообразование и реакционная динамика, обуславливающая жидкокристаллические свойства подобных структур, не могут быть разделенными.

Развитие исследований в области жидкокристаллических текстур различных целлюлозосодержащих blends [202] и целлюлозосодержащих жидкокристаллических подложек-матриц (в частности, в экспериментах по сорбции белков на blends-пленках [203]) свидетельствует о необходимости фазового/мезофазного анализа образующихся при обычном смешении и реакционном/реакционно-диффузионном процессе (морфогенезе) структур — аналогично компаративному анализу между формами консервативной и диссипативной или неконсервативной самоорганизации. Описанный эмерджентный подход показывает, что возникновение жидкокристаллических свойств у композитов (или же blends) на основе целлюлозы и некоторых других высокомолекулярных присадок есть следствие структурного взаимодействия между ними [204], то есть:

– во-первых, налицо реакционно-диффузионный характер этого процесса;

– во-вторых, форма и свойство оказываются связанными причинно-следственными связями, проявляемыми в точке возникновения жидкокристаллического свойства и текстурной морфологии.

С нашей точки зрения связь между реологическими свойствами и жидкокристаллическими фазовыми переходами в жидких кристаллах на основе эфиров целлюлозы [205] также указывает на эмерджентный характер данных структур, поскольку фазовые переходы становятся коррелятом изменения реологических и локальных микромеханических свойств. Зависимость от условий получения в конкретной среде (примером чего может являться жидкокристаллическое состояние производных целлюлозы, сопровождающееся обособлением фаз, в нитрометане [206]) является свойством эмерджентных структур, таких, как супрамолекулярные координационные системы и коллоиды.

Различия консервативной и диссипативной самоорганизации жидкокристаллических структур на базе целлюлозы: кооперативность, селективность, конкурентность активатора и ингибитора

Различие жидкокристаллических фаз целлюлозы, ее производных и субпиролитических blends, легко переключаемое изменением микросреды (конформационными факторами, кинетическими ограничениями [207–209]), можно рассмотреть как мультистабильность нелинейной динамической системы. Фрактальная геометрия полимерных жидкокристаллических систем на базе производных целлюлозы [210, 211] также является аргументом в пользу синергетического характера соответствующих структур и текстур мезофаз. Феномены микрофазной сепарации в жидкокристаллических целлюлозосодержащих или содержащих ее производные средах, включая композитные системы [212], также могут быть рассмотрены как явления неравновесной стратификации, а сопутствующие им явления кооперативного дрейфа частиц целлюлозы в градиентных средах и друг к другу при образовании и обособлении фаз могут быть отнесены к явлениям самосборки и самоорганизации, сосуществующим и часто неразделимым в опыте, в силу сонаправленного структурообразующего действия в подобных средах как естественного (из клеточной стенки [213]), так и искусственного характера [214–217].

Особый интерес представляет объединение малых частиц целлюлозы как наномеханизм реализации более сложных феноменов формообразования. Многие размерные эффекты упрощают самоорганизацию, понижая ее энергетические барьеры (включая туннельные механизмы). Переход от феноменов ближнего порядка к дальнему порядку осуществляется, по критериям физики частично упорядоченных сред, при изменении масштабов действия сил (нековалентных взаимодействий) и отдалением от точки/области консервативного порядка и присущей ему самосборки в область хаоса, где порядок не сохраняется. Если характеризовать дисперсность целлюлозы в аспекте самоорганизации морфологий, свойственных жидким кристаллам, то вполне очевидно, что рассуждать следует не о порядке внутри одного кристалла целлюлозы, а о порядке высших масштабов. В настоящее время известно, что как раз такие масштабы сил определяют типы текстур и классы морфологии в жидкокристаллических целлюлозосодержащих системах, даже когда мо-

дифицированная по гидрофобности целлюлоза составляет минорный по содержанию компонент, а вклад ее в процессы жидкокристаллического формообразования не является строго определяющим в отсутствие поверхностно-активных веществ, не будь которых «компартиментализация» мезофаз с диффузионными границами была бы невозможна [218].

В жидкокристаллических пленках либо мембранах на основе целлюлозы и жидкокристаллического состава, иммобилизованного на ней, достижимы высокие параметры структурного порядка, обеспечиваемые снижением степеней свободы в системах пониженной размерности и управляемые полем или составом среды (в том числе в парообразном состоянии) [219–222]. Однако очевидно также то, что жидкокристаллическое упорядочение целлюлозосодержащих наносуперсупервизов с образованием коллоидных фаз может достигать анизотропии параметров не только под действием статических факторов, но и под действием динамики, в том числе микрогидродинамики гетерогенной структурированной среды, которая может описать течение реологически сложных составов, коллоидных дисперсных систем (хорошо визуализирующихся методами PIV-имэджинга скоростей частиц [223, 224]), что свойственно нанокристаллической целлюлозе с типичным коллоидным поведением в ходе жидкокристаллического упорядочения [225, 226]. Подобные течения среды вносят гидродинамический вклад в формирование жидкокристаллических структур на основе целлюлозы (аналогично тому, как вклад в массоперенос вносят и гидродинамические потоки в биоморфогенезе [227, 228], визуализируемые с использованием векторных полей точек переноса, подобных используемым в PIV [229, 230]), обеспечивая векторный перенос и анизотропные деформации в жидкокристаллических пленках с дисперсными, *sensu lato*, нанодисперсными частицами целлюлозы [231].

Несмотря на то что для инициирования формирования целлюлозосодержащих жидких кристаллов не требуется специальных физических либо химических индукторов нуклеации, нуклеация эффективнее происходит на поверхностях, обеспечивающих пониженную размерность продукта и увеличение вероятности адгезии и аутогезии в силу уменьшения степени размерности замощения («текстурного пертайлинга») с кубической до квадратичной. Эффекты облегченного формирования текстур на подложке, лежащие в основе технологий темплатного синтеза, можно отнести к консервативной самоорганизации [232]. Несмотря на равновесный по энергообеспечению (в аспекте отсутствия накачки активной среды и иного вывода среды из равновесного состояния)

характер темплатной нуклеации на поверхности, позволяющий относить ее к консервативной самосборке, а не к самоорганизации, этот механизм свойственен и для термотропных мезофазных целлюлозосодержащих сред и сред на базе производных целлюлозы [233], по определению, податливых к действию вывода из термического равновесия, то есть, легко переводимых в неравновесное состояние. Таким образом, в этих средах также возможна и диссипативная неравновесная самоорганизация, однако ее феномены относятся к более высоким масштабам пространственного порядка и размерам, превосходящим характерный масштаб регулярной текстуры. Для консервативной самосборки свойственен меньший пространственный масштаб, чем для неконсервативной самоорганизации. Иными словами, консервативно можно «самоорганизовать» жидкокристаллический материал, а диссипативно — пространственно упорядоченную структуру. Это свойственно как для сред, темплатных по отношению к (нано) целлюлозе, так и для сред, темплатом для которых являются целлюлоза и жидкокристаллические структуры на ее основе, что обеспечивает «гетерозепитаксиальную» градиентную самосборку, интегрально перерастающую в диссипативную самоорганизацию форм.

Внедрение нанокристаллической целлюлозы (которая используется в процессах формообразования жидкокристаллических текстур) как супрамолекулярного темплата в процессах самосборки в присутствии подходящих прекурсоров — ныне общепринятый технологический процесс. Давно изучены процессы формирования функциональных материалов, полимерных полупроводниковых сред на таких жидкокристаллических носителях с управляющей свойствами материала поверхностью [234, 235]. Откликом среды, определяемым чувствительностью к агенту накачки, можно управлять, таким образом, изменяя характеристики поверхностных слоев, доступных для агентов накачки разного типа/диапазона, что и происходит в «гетерозепитаксиальных» сборках, в которых функционализацию обеспечивает один из компонентов, тогда как другой при этом испытывает подпороговое возбуждение.

В содержащих ультрадисперсную целлюлозу допированных термотропных средах и термопластах, обладающих жидкокристаллическими свойствами, термическое поведение и восприимчивость не могут сводиться к восприимчивости одного управляющего/лимитирующего компонента [236]. Так, вязкость и текучесть в них могут лимитироваться свойствами жидкокристаллических матриц, а суспензии целлюлозы — выполнять функции сорбционно-реакционных центров и «горячих точек» — абсорберов тепло-

вого излучения накачки. Таким образом, распределение функций компонентов гетерогенной среды в реакционно-диффузионных процессах в подобных системах не может быть однородным и инвариантным, независимо от их химического и дисперсного/гранулометрического состава. Более того, при наличии слоев и чередующихся поверхностей с разными параметрами, морфогенез, по очевидным причинам, может иметь большее количество модальностей; или же, при различии свойств компонент, в разных точках будут дифференцировано идти и «катализ», и «ингибирование» процессов формообразования, что наводит на аналогию с распределениями активатора и ингибитора по Тьюрингу. Это, в свою очередь, можно рассматривать в рамках термодинамического подхода и анализа химических потенциалов, как это и делается в рамках настоящего обзора.

Соотношение функций химического носителя (целлюлозы) и физики инициации самоорганизации (тепловой накачки) в искусственных и естественных углекислотных условиях карбонизации

В данной точке настоящего обзора мы подходим к концептуальному обобщению: из рассмотрения тепловой радиации как индуктора отклика и источника накачки в структурной перестройке термотропных жидких кристаллов, рассматриваемых в качестве активных сред, логично делать выводы о функции подобных нативных целлюлозосодержащих сред в структурной перестройке древесины при медленном окислении, горении и иных высокотемпературных процессах, вплоть до формирования и ранних стадий эволюции торфа и угля, считая возможной интеграцию базовых жидкокристаллических представлений в дискурс геохимической тафономии карбонизации древесины (в палеоботанике) и метаморфизма углей.

В настоящее время, к сожалению, изучены преимущественно лишь термотропные свойства жидких кристаллов на основе таких простых производных целлюлозы, как гидроксипропилцеллюлоза [237, 238], этилцеллюлоза [239], ароматические эфиры целлюлозы [240] и пр., причем изучение было проведено в условиях, изначально весьма далеких от условий проявления этих свойств в нативной целлюлозе. Весьма активно исследовались вышеописанные искусственные жидкокристаллические среды с целлюлозными мембранами, целлюлозосодержащие композиты или бленды (например, «liquid crystal/cellulose derivative composite» [241] или «liquid crystal-embedded

cellulose {nitrate} membrane» [242, 243]). К тому же, в ряде случаев использовали матрицы, не обладающие ни малейшим подобием к дендрофитологическому прототипу или продуктам его первичной геохимической переработки (например, изучалась теплопроводность жидкокристаллических эпоксидных резин в композиции с наноцеллюлозой и иными компонентами деревопереработки [244]). В других случаях речь шла о термотропном и лиотропном жидкокристаллическом поведении разветвленных производных целлюлозы, без привязки к возможности реализации подобных структур в ходе угле-/торфообразования [245]. Впрочем, как следует из изложенного выше, отсутствие систематических работ в этой области связано с тем, что задачи сопоставления лабораторных процессов с естественными аналогами-прототипами попросту не ставились, а высшую прикладную ценность имеют продукты переработки целлюлозы (эфиры и пр.), функционализированные для выполнения конкретных промышленных задач, что противоречит или не соотносится с идеей сопоставления результатов с нативными аналогами. Строго говоря, даже методиками «зеленой химии» при подобном уровне концептуальной противоречивости исправить положение нельзя, поскольку в дискурсе анализа поведения естественных мезофаз в условиях углеобразования речь идет не только о простом биомиметическом воспроизведении поведения нативных жидкокристаллических сред, входящих в состав древесного сырья, но также и о воспроизведении его «посмертной истории» в условиях геологического залегания конкретных тафоценозов-карбонизатов, а методы «тафомиметики» и «биогеомиметики» с собственной термобарогеохимической шкалой для таких задач еще не существуют.

Поэтому, как всегда в случаях неполноты знаний, приходится переходить от дедукции к индукции и, абстрагируясь от конкретного химизма носителя, изыскивать формальные физико-химические модели тех или иных процессов. Хороший набор моделей систем с накачкой нам дают неравновесная термодинамика и нелинейная физика, *sensu lato*. С точки зрения нелинейной динамики, модели поведения термотропных систем под действием нагрева могут быть, безотносительно к компонентному химизму, экстраполированы на мезофазные структуры древесных карбонизатов и ископаемых горючих углей. Однако с точки зрения термодинамики изменения в компонентном составе карбонизата следует рассматривать как реакцию компоненту реакционно-диффузионного формообразования в нагреваемых целлюлозосодержащих древесных средах, чему соответствует локальное комплексное изменение

химических потенциалов, зависящее от параметров среды в каждой точке. Тем не менее, подходы, исходящие из первых принципов (*ab initio*), в настоящее время не могут быть использованы для анализа подобных процессов, в особенности, в многокомпонентных средах (не только в силу недостаточности вычислительных мощностей, но и в силу принципиальных ограничений теории и соответствующих моделей).

Например, специальных или адаптированных моделей для самосборки компонент жидкокристаллических носителей и целлюлозных суспензий при нагреве не существует (в настоящей обзорной статье впервые акцентируется потребность в таких моделях), хотя существует целый ряд моделей синтеза наноструктур углеродистых соединений при горении [246–248]. Несмотря на то что в последних работах позиционируется только самосборка структур, энергоемкость фактора инициации данных процессов более соответствует (особенно — при пространственном распространении, нередко подобном по макрокинетике самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу) неконсервативной самоорганизации под тепловой накачкой (несмотря на то, что графены и фуллерены, как таковые, могут рассматриваться как продукты самосборки). В альтернативной трактовке вкладываемую в систему энергию накачки рассматривают как аккумуляруемый ресурс для обеспечения в дальнейшей истории системы диссипативных процессов, не требующих внешней накачки. В пользу этого свидетельствуют работы по самоорганизации энергоемких, в том числе «нанозергетических», материалов при горении [249], а также элементарные оценки энергоэффективности каменных углей, в зависимости от их эволюционного и геологического возраста, фюзенизации, гелификации и битуминизации.

С позиций реакционно-диффузионной теории формообразования в частично-упорядоченных средах в химическом (реакционном) преобразовании растительного материала в уголь можно выделить стадии, соответствующие отличным феноменам коллоидной химии и физики частично упорядоченных сред. При этом их упорядоченность в системе изменяется по мере тафономического разложения древесины, поэтому переход от «soft matter physics» (физики частично упорядоченных сред), включая физику жидкокристаллического состояния, к своеобразной «solid state physics» (физике твердого тела) в геологической эволюции от растительных остатков к углю представляет собой также качественный сдвиг локального порядка этой распределенной системы, воздействующий на дальность порядка в реакционно-диффузионной системе.

Эволюционный и неравновесно-термодинамический подход к реакционно-диффузионной динамике мезофаз карбонизации и их прекурсорных структур в нативном процессе метаморфизма

Согласно общепринятым представлениям, процессы торфообразования и углефикации можно свести к последовательности физико-биогеохимических превращений [250]. Гелификация (превращение лигнино-целлюлозных тканей растений в анаэробных условиях в коллоидные системы, выражающееся в разбухании растительных тканей и превращении их в блестящую аморфную бесструктурную массу), фигурировавшая в старой литературе под названиями «остуднение» и «остуднение», представляет собой переход целлюлозосодержащих структур наряду с их нативным лигниновым матриксом из состояния диссипативных структур — продуктов тюринговского биоморфогенеза — в состояние хаоса. На этой стадии идут обусловленные физико-геохимическими условиями (в конкретных условиях залегания) процессы: ультраструктурное диспергирование тканей и их гумификация, переводящая их в гели разжижения, а при обезвоживании и затвердевании последних — в ксерогели и основную бесструктурную массу. В таких системах целесообразно регистрировать производные наноцеллюлозы и «дисперсного детрита лигносодержащего матрикса». Их наличие, так же как и переход всей системы к хаосу, свидетельствует о перестройке системы с ее «отрицательным выводом из равновесия», в ходе которого из продуктов самоорганизации, морфогенеза образуются в предельной точке твердые геохимические образования — угли — продукты бесструктурной гелевой или хаотической дисперсной самосборки. Как следует из проведенного выше анализа состояний дисперсных целлюлоз, их производных (часть из которых возникает как интермедиаты в процессе гелификации), для реального биоматериала, подвергающегося деградации, не все обстоит так просто. Гель, регистрируемый методами поляризационной микроскопии, на поверку оказывается обладающими хиральностью жидкими кристаллами, в том числе — продуктами пост-мортальной биоконверсии наноцеллюлозы [251]. Переход к хаосу оказывается не полным, а затрагивающим лишь отдельные уровни масштаба диффузии и структурного порядка: «гелифицированные» (*de facto*, совершившие ряд качественно отличных фазовых переходов, в зависимости от топографо-анатомической привязки структур-прекурсоров в растительной ткани) компоненты,

подвергаясь набуханию без перехода в золь, сохраняют в различной степени первоначальную фитоанатомическую структуру, включая претерпевающие лишь небольшое остуднение и набухание (swelling effect) ксилены. Речь идет не о детерминированном процессе, как считали, *ad hoc*, на ранних стадиях развития аналитической углехимии, а о бистабильном или мультистабильном (если учитывать вариации бистабильных механизмов развития) комплексе процессов.

Мультистабильность процессов/химических механизмов гелификации регулируется химическими реакционными факторами среды и процессами переноса, что вводит ее в компетенцию анализа реакционно-диффузионных моделей формообразования. Бифуркационный их переход детерминируется редокс-статусом среды. В отличие от гелификации, протекающей обычно в анаэробных условиях при высокой гидратации (обводнении), при переходе к аэробным (содержащим кислород) сухим условиям сред залегания и «химической тафономии», происходит переход к фюзенизации — обугливанию, сохраняющему видимое строение тканей (габитус). Процессы элювиации (выноса коллоидных компонентов, обеспечивающие обогащение системы устойчивыми к разложению липоидными компонентами) и илловиации (приноса растворенных гуминовых кислот и их производных) совокупно обеспечивают такую мультистабильность пластического обмена, при которой, в зависимости от условий среды, превалирует либо миграция частично упорядоченных сред с весьма высоким содержанием стабильного жидкокристаллического/мембранного мезофазного липоидного компонента, либо миграция в форме продуктов химической конверсии низкой стойкости. Эмерджентный характер этой системы очевиден уже на стадии торфообразования и вплоть до образования бурых углей, но оказывается недоступным опознанию на коллекционном материале высших каменных углей и антрацитов, высших по отношению к последним.

Таким образом, как это следует из представлений о стреле времени в термодинамике необратимых процессов, выведение точки высшего уровня организации прямо из точки низшего уровня организации не представляется возможным. Выведение механизмов самоорганизации форм с известной геометрией или топологией компонентов из форм финальных продуктов их деградации невозможно по тем же причинам. Для богатых жиром продуктов битуминизации и собственно сапропелитов/сапрогумолитов характерны продукты преобразования жидкокристаллических липогенных фаз (мезофаз), поэтому вопрос о значении жидкокристаллических структур в образовании и поддержании морфологической стабиль-

ности не стоит. Тем не менее, в общем случае, можно высказать положение о том, что в рамках «диалектики фюзенизации — гелификации», жидкие кристаллы в формирующихся угольных месторождениях участвуют в реализации процессов, сопряженных с сохранением формы фюзенизуемых растительных остатков/мацералов, лимитированием форм набухания [184, 185] и тафономической деградации структуры растительных прекурсоров углеобразования. Данная концепция подтверждается микроанатомическими корреляциями в метаморфизме угля [252, 253], точно определяющимися не только методами просвечивающей электронной микроскопии [254] и распределением изотопов в образцах [253], но и конформационными данными, полученными методами FTIR-спектроскопии (инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье), рамановской спектроскопии и спектроскопии ЯМР (ядерного магнитного резонанса). В метаморфизме угля, как и при иных фазовых переходах в жидких кристаллах, происходят деформации макромолекулярной структуры [255], сказывающиеся также на анизотропии или ориентированности ее по углам в пространстве. Анизотропия спектральных диаграмм направленности (либо, что функционально эквивалентно, индикатрис отражения и рассеяния), выражение которой в рефлектометрии витринитов известно по ранним работам [256, 257], будучи перенесенной на жидкокристаллические системы, говорит об изменении хиральности и, следовательно, характера фаз.

Явления метаморфизма затрагивают не только производные целлюлозы, но и производные лигнина, входящего в состав тонкой структуры ископаемой древесины (и производных ее химико-тафономического разложения в раннем торфообразовании [258]), а их меньшая исследованность в «жидкокристаллическом аспекте» тафономии, с нашей точки зрения, связана с меньшим количеством работ-прототипов, так как промышленное значение лигнина меньше, чем целлюлозы, а публикаций по его жидкокристаллическому состоянию меньше, чем для промышленного сырья целлюлозы. С другой стороны, это связано с тем, что лигнин способен в естественных условиях участвовать в становлении жидкокристаллических, мезофазных свойств растительного сырья только в комплексе (т. е. композите) с другими компартиментализуемыми компонентами (например, с целлюлозой, в нативном состоянии [259] или же с ее производными [260, 261], влияющими на форму и жидкокристаллическую текстурность blends). Тем не менее в его отсутствие ряд процессов углеобразования просто не мог бы реализоваться, поскольку в ранней (обычно сравнительно низ-

котемпературной и, как правило, не приводящей к спонтанному самовозгоранию в силу низкого калорического эффекта нативной среды [262]) термозависимой стадии надмолекулярного метаморфизма прекурсоров угле-/торфообразования уже необходим отклик термотропных фаз среды, что подразумевает и отклик соформирующего жидкокристаллические структуры лигнина и его аналогов [263] (например, в работе [264], указаны «thermotropic liquid-crystal-forming ...lignin-like model compounds», представленные множеством лигномиметиков для модельных процессов карбонизации). Коротко говоря, полиазеотропные или мультифазные системы, являющиеся локальными продуктами карбонизации, в число которых входят угольные смолы [265], неизбежно содержат лигнин и его производные (в только что цитированной работе [265]: «recent concepts of the growth processes of liquid-crystal structures, also called mesophase systems, during the carbonization of pitch substances is extended to coal carbonization. A basic model is formulated to explain the coal and coal-blend carbonization»).

Этот аспект термотропной реактивности раннего метаморфизма и карбонизации, в том числе — участия в нем разных по реологическим свойствам фракций с ограниченным набуханием и сохранением тканевого габитуса, обусловленным разными биохимическими компонентами прекурсорной древесины (включая лигнин), с нашей точки зрения, хорошо коррелирует с геохимической обстановкой на разных стадиях углеобразования (в особенности при фюзенизации и гелификации). Так, известно, что фюзенизация может быть связана с лесными пожарами на площадях торфообразования, при которых термотропные свойства структуры обуславливают вероятность сохранности или тафономической модификации ее фитогистологического габитуса. В то же время эти процессы окисления и самоокисления можно связать с редокс-статусом среды, так как фюзенизация определяется как тафономический режим преобразования лигнино-целлюлозных тканей (и продуктов их неполной первичной гелификации) в субаэральных условиях с участием аэробных бактерий в твердый необратимый коллоидный субстрат (не соотносимый с нативной коллоидной или мезофазной структурой) с высокой энергоэффективностью.

Дальнейшее рассмотрение эволюции углей должно проводиться с учетом наличия жидкокристаллических структур и их поведения в различных атмосферных и редокс-электрохимических условиях. Известно, что явления самоокисления в эволюции углей низкого ранга [266] сосуществуют с температурной эволюцией метаморфизма углей и торфа, в зависимости от геологического

времени экспозиции и региональной специфики залегания [267, 268], обусловливаемой гетерохронизмом палеофлоры и биогеостратиграфии, в свою очередь, предопределяемой материковыми палеоклиматическими условиями. Как и в случае жидкокристаллических целлюлоз, установлен механизм поведения и формирования соответствующих структур в отличных атмосферных условиях, в том числе, обусловленных собственной эмиссией пластов, в зависимости от «мембраномиметической» газовой проницаемости и пористости среды. Например, исследовано содержание метана в зависимости от градации метаморфизма угля и роль пористости среды и градации метаморфизма в обратимой сорбции-десорбции пропана [269, 270] (т. е. сделан акцент, что рационально, на эмиссии собственных алканов пласта и их эмерджентной, по сути, роли в изменении физико-химических характеристик угля в пласте). Жидким алканам уделяется внимание только в аспекте генезиса петролейных фракций из угля, получение которых возможно при своеобразном межфазовом «метаморфизме» [271, 272]. По критериям атмосферной химии, соответствовавшей геологическим эпохам, можно прямо указать, в рамках принципа актуализма, редокс-корреляты углеобразования, связанные не только с данными атмосферными и десорбируемыми газохимическими компонентами (общеизвестно, например, что метан входит в число основных газов-восстановителей, обуславливающих парниковый эффект), но и с конкретной пористостью, возникающей в ходе интумесцентных процессов самоингибирования мезофазной карбонизации в пласте (отличающейся от пористости исходной углефицирующейся древесины, обусловленной наличием пустотелых клеточных стенок механических тканей). Таким образом, перикарбонизационную/посткарбонизационную пористость (рабочие термины ряда европейских углехимиков) на определенных этапах можно соотносить с геометрией фаз/мезофаз (отчасти «отжигаемых» при карбонизации), а до этого — с собственной содержащей липиды геометрией клеточных стенок (о значении целлюлозы в жидкокристаллическом «поведении» которых изложено выше) и подлежащих мембранно-жидкокристаллических слоев. Переход от стадии к стадии происходит в результате геохимической «метаморфизации» фазовых границ, по которым идет диффузия и на которых сосредоточиваются редокс-процессы: будь-то взаимодействие с атмосферой при газообмене растений или «газовая электрохимия» внутри пласта, с учетом проскока, или контактный перенос редокс-агентов между твердыми фазами и (и/или) мезофазами при обезгаживании и компактизирующей фоссилизации.

Принципы физико-геохимического актуализма применительно к процессам мезофазного диагенеза: анализ с позиций углегеохимии и палеотаксономии

Как следует из изложенного выше, общий профиль процессов углеобразования и жидкокристаллического метаморфизма угольных пластов определялся противоборствующими, но в аспекте конечного результата несомненно, взаимодополняющими редокс-условиями. Торфы формируются в болотах, где обедненная кислородом стоячая вода затрудняет инволюцию, а образующаяся при разложении растительного материала *щелочная* среда вообще прекращает жизнедеятельность аэробных бактерий, уничтоживших его. Фюзенизация идет при субаэральных условиях с участием аэробных бактерий и имеет *окислительный* характер. Структуры и фазовые образования, являющиеся продуктами столь различных процессов и условий, обладают различной горючестью, относятся к разным градациям углей (coal ranks). Термогигрометрические условия среды (т. е. «диалектика» температуры и влажности, обеспечившая соответствие поясов углеобразования и областей манифестации гумидного климата в отдельные геологические эпохи), в свою очередь, привели к сосуществованию в этих поясах углей, различающихся по горючести и воспламеняемости, вследствие отличной гелификации, гумификации и фюзенизации конкретных фитоанатомических компартментов, замещение/метаморфизм которых происходил по-разному в силу исходного различия в биохимическом и фазовом составе. Для отдельных полых клеточных стенок — молекулярных мишеней фюзенизации, сохраняющей габитус, — метаморфизм и воспламеняемость характеризуются микронеоднородностью (так, известно, что в отличие от обычного «аддитивного» поджига исследования методами лазерно-искровой спектроскопии указывают на неодинаковый эффект искры, зависящий от локальных свойств поверхности образца [273]). Различающееся в соответствии с характером фаз метаморфизма изменение элементного состава (в частности, различный уровень снижения концентраций органических элементов — водорода, кислорода, азота) на разных стадиях метаморфизма, витринизации, зависит от исходного локального содержания элементов, различного для разных цитохимических и гистохимических областей палеофитоморфологического исследования одной и той же фитоценологической принадлежности, одного тафоценоза и единого генетического ряда углей.

Принцип геологического актуализма может распространяться также и сверху вниз (top down), т. е. с уровня геологической обусловленности параметров ископаемых на макромасштабах, зависящих от климатических поясов данной геологической эпохи, на уровень биологической обусловленности химизма и локальных параметров ископаемого угля в рамках одного генетического ряда и даже в пределах одного фоссилизованного растения в матрице гумолитов. Процессы диагенеза торфа свидетельствуют о том, что изменения фазового состава (что подразумевает, в том числе, диагенез жидкокристаллических структур клеточных стенок — естественных мезофазосодержащих бленд с лигнином и целлюлозой) могут быть рассмотрены объективно лишь при соблюдении не только субструктурного геолого-палеонтологического актуализма на микромасштабе, сопоставимом с размерами целевых мезофаз, но и гидрогеохимического актуализма, связанного с учетом химии гуматов и локальных эдафологических условий торфяных болот, в которых проходит диагенез мезофаз. В номенклатуру данных условий среды могут входить, в частности:

- динамика водной среды и ее окислительный потенциал;
- положение относительно грунтовых вод и соответствующий ему тип торфа — от низинного до верхового;
- состав и содержание в воде минеральных примесей;
- питательность грунтов;
- характер растительности;
- различия в сочетании и протекании процессов гумификации.

С точки зрения изучения процессов воспламенения угля, зависящих от указанных редокс-условий, целесообразно рассматривать также термо(гео)химический [274, 275] актуализм: «то, что горит в одних редокс-условиях, не обязательно будет гореть в других». То, что еще не сгорело из-за восстановительных условий пласта, воспламеняется в среде, обладающей лучшими окислительными свойствами — в атмосфере. На этом, собственно, и основана вся угольная и торфяная теплотехника.

Процессы, сопутствовавшие образованию угольных поясов, актуальны исключительно в условиях господствовавших там и тогда локальных палеотемператур, или же более глобально — палеоклиматических условий (с учетом переноса различных «редокс-факторов» в атмосфере и гидросфере). Рассмотрение этих процессов без калькирования современных условий на отличающиеся палеохимические условия, как это ни парадоксально, приводит к выводу о сосуществовании возгорающихся и препятству-

ющих возгоранию веществ в угольном пласте (рассматриваемом не с позиций массы выдаваемого на поверхность горючего энергетического сырья, а с позиций реальных условий образования, с варьировавшимся, в зависимости от геологического времени и пространства редокс-статусом). Восстановительная среда чаще порождала условные «антипирены», а окислительная — легкогорючие субстанции, нередко самовозгоравшиеся в ходе их окисления. Лесные пожары, сопутствовавшие диагенезу торфа, могли достигать или не достигать отдельные пласты, а также инициировать или не инициировать горение в них в силу наличия естественных антипиренов и ретардантов воспламенения в них. В связи с этим мы должны осуществить дифференциальный анализ явлений горения и ингибирования, сообразно моделям реакции с диффузией, в которых движущей силой процесса является противодействие активатора и ингибитора. Для этого нужно выделить способствующие и препятствующие горению факторы естественного происхождения, исходя из природы горючих сред и естественных «ретардантов», с точностью до участков компартиментализации, на которых и концентрации указанных веществ, и их фазовое состояние эквивалентны по всему участку.

В отличие от упрощенных (часто самоподобных) моделей самоорганизации, ориентированных на унифицированный по лесу видовой/фитохимический состав древесины [276], современные комплексные модели макроскопической самоорганизации горения для смешанных по видовому (и фитохимическому) составу насаждений предусматривают изменение «горючего базиса» в пространстве и во времени горения, зависящее от режимов горения [277]. Однако уточнения, позволяющего качественно выполнить такое моделирование на уровне ультраструктурно-компартиментализационной организации горючих веществ в тканях деревьев, увы, не было сделано. Специфические ретарданты внутриклеточного генеза в системе выделены не были. Диффузионные характеристики антипиренов для пропитки или адгезионные характеристики ретардантов до сих пор являются предметом эксперимента и предметом «ноу-хау», равно как и многие другие физико-химические дескрипторы соответствующих компонентов древесины и углей, так как QSPR/QSAR-подобные алгоритмы (процедуры построения моделей, позволяющих по структуре химических соединений предсказывать их свойства и производить поиск количественных соотношений «структура-свойство» или «структура-активность», называемые Quantitative Structure-Property Relationship — QSPR или Quantitative Structure-Activity Relationship — QSAR) в эту область еще не дошли.

При этом основная масса работ выполняется на распространенных и стандартных по критериям лесной таксации современных видах хвойных. Исходя из анализа литературы, можно заключить, что модельным объектом тестирования органических и органоминеральных ретардантов и антипиренов являются преимущественно сосны и ели [278–283], что приводит к перекосу интерпретации процессов локального воспламенения в сторону голосеменных, тогда как у покрытосеменных многие структуры и процессы устроены кардинально иначе. Различия процессов горения и эффективностей антипиренов с привязкой к таксономии древесной растительности не изучены до сих пор.

Поскольку подавляющее большинство антипиренов и ретардантов углей можно интерпретировать как минеральные и органические пропитки луба, говорить об использовании собственных защитных сил растения в борьбе с обугливанием, как правило, не приходится, хотя случаи, в которых растение соками и транспирационным обменом нейтрализует горение, локализуя его на уровне коры и смолистых истечений, нередки в лесотехнической практике. Однако в таких случаях, как правило, имеет место интумесценция и вспучивание карбонизируемой фитонатомической структуры поверхности растения (покоробленность его ствола). Активную функцию процессе вспучивания, по современным представлениям, также выполняют термотропные целлюлозосодержащие жидкокристаллические структуры растения, обладающие свойствами реактивного актуатора (примером чего может считаться явление конформационно-обусловленного и связываемого с пьезоэлектрическими свойствами «автоподзавода» спиралей в растительных усиках или целлюлозных жидкокристаллических волокнах, а также наномасштабная ультраструктурная биомеханика теплового движения целлюлозосодержащих жидкокристаллических моторов [284, 285]). Такие нановолокнистые системы могут быть интерпретированы как дальнейшее развитие принципа нанокompозитных антипиренов [286], если их структура содержит не только механически активные волокна целлюлозы, но и инертную матрицу, участвующую в механизме интумесценции.

От мезофазной химии горения к мезофазной и коллоидной химии композитных антипиренов

С точки зрения ультраструктурной анатомии и механики древесины, вышеозначенный комплекс сведений говорит о том, что термомеханику не только самой целлюлозы, но и матрицы лигнина

следует рассматривать на предмет огнезащитного действия, а значит, следует учитывать в анализе не только эффекты армирующей механики, но также и роль интумесцирующего впоследствии слоя растительной матрицы. Так как процессы воспламенения, горения и пиролиза целлюлозы хорошо изучены и табулированы уже около полувека [287, 288], начнем рассмотрение с целлюлозы. Оказывается, что существует обширная номенклатура основанных на целлюлозе и ее производных (например, хлориды целлюлозы [289] и фосфорилированные волокна целлюлозы [290]) ретардантов пламени и «сред защиты от внутреннего перегрева» [291–294]. Нередко эти среды базируются также на минеральных матрицах, таких, как глины и цеолиты/цеолитоподобные аэрогели, нанокремнезем (в том числе, в форме нанокомпозитов) [295–299]. Это обеспечивает определенное подобие геологическим условиям генезиса углей. Дисперсность подобных систем, по очевидным реомеханическим причинам, способна придавать им нестандартные по отношению к bulk matter динамические свойства, в силу чего некоторые из них работают как неньютоновские или бингамовские жидкости, а некоторые и как типичные жидкие кристаллы (жидкокристаллическое поведение естественных глин в этом фазовом и дисперсном состоянии известно с пионерских работ Чухрова по минеральным мезофазам [300, 301]). Из этого, в частности, следует, что и прилегающая к корням растений почва может срабатывать как компонент огне-/теплозащиты, в особенности глубинных корневых слоев, вмещающая в себя пески, суглинки, коллоиды коры выветривания. Сравнение минеральных огнезащитных сред и защитных материалов на базе целлюлозы свидетельствует о действии пыли и газохимической обстановки на эффективность их фильтрующего эффекта, но это же свидетельствует и о возможности сорбционного усиления их эффективности при взаимодействии с дисперсной средой при блокировании микропор, как это имеет место при интумесценции антипиренов [302]. Значение дисперсности целлюлозы в процессах огнезащиты нельзя переоценить — наноцеллюлоза, участвующая как ориентируемый компонент в формировании анизотропных мезофаз и систем, прекурсорных относительно целлюлозо-производных жидких кристаллов, в то же время является наиболее оптимальной для создания нанокомпозитов и мембраномиметиков огнезащитного характера на ее основе [303, 304]. Для данного класса защитных материалов характерны функционализирующие их золь-гель переходы и сохраняются золевые и гелевые компоненты — потенциальные активаторы и инги-

биторы в реакции с диффузией (или переносом в мезофазном формообразовании), в том числе под действием огня и внешнего перегрева [305], включая субкритический пиролиз, характеризующийся интумесценцией [306]. Установлено, в частности, что коэффициент полимеризации целлюлоз или гемицеллюлоз влияет на утерю их механических свойств при огнезащите [307], в связи с чем использование наноструктурных форм целлюлоз является отклонением от этой проблемы. Однако не имеет смысла говорить о выгорании материала, преобразуемого воспламенением в аэрозольно распространяемую систему [308]. Поэтому логично говорить о фазовом и жидкокристаллическом характере процесса выгорания тогда и только тогда, когда мезофаза формируется кооперативно — как композит, бленда, когерентная текстура [309]. Это значит, что в случае исследования нативных антипиренных свойств древесины необходим анализ возможности сонаправленного действия лигнина и целлюлозы в средах огнезащиты.

Оказывается, что лигнин используют в полимерных системах с огнезащитными свойствами [310] (причем уже более 30 лет [311]), но, как правило, лишь в виде производных [312], в составе бленд [313, 314], композитов и пен [315–317] (в том числе — биоразлагаемых [318]), однако это не меняет постановку проблемы, так как в реальной древесине подобных сопутствующих соединений обычно не встречается). Иными словами как минимум в половине случаев речь идет о средах, которые либо в атмосфере при нормальных условиях, либо при нагреве, плавлении, интумесценции и термопластическом поведении демонстрируют свойства мезофаз или жидких кристаллов с термотропными свойствами.

Это заставляет нас взглянуть в область пирохимии и термохимии жидких кристаллов и сырья прекурсорных по отношению к ним систем, включая вторичное сырье типа LCD-панелей [319]. Известно, что многие жидкокристаллические (и становящиеся таковыми при изменении условий) среды используются в качестве термопаст и термопокрытий [320, 321], огнезащитных добавок (fire-retardant additives) [322], а также собственно как ретарданты воспламенения, как в составе бленд, так и самостоятельно [323–326]. Соответственно, расширим интерпретацию жидкокристаллических (и прекурсорных им) ретардантов и антипиренов на более широкий класс систем, введя в него аналогичные биологические лигноцеллюлозосодержащие среды, их почвенные и естественные детритные (дебрисные) присадки. Формирование и реакционно-диффузионную функционализацию структуры при переходе к антипирену или

ретарданту от прекурсоров в таком случае можно отнести к самосборке или самоорганизации (в зависимости от условий процесса, как указано выше).

Такой подход, в свою очередь, дает возможность отнести соответствующие структуры ретарданта к гибридным самоорганизующимся или/и самособирающимся огнезащитным материалам, к которым до сего времени чаще относили только неорганические материалы, включая углеродные структуры, а также неуглеродные низкоразмерные наноматериалы [327–330], реже вводя в этот пул понятие супрамолекулярной самосборки [331], полимерные и композитные структуры [332], включая пены и иные частично упорядоченные среды [333]. Из номенклатуры целлюлозосодержащих сред и древесного сырья в списке самоорганизующихся и самособирающихся сред с огнезащитными и газобарьерными свойствами использовалась гемицеллюлозная геокомпозитная бумага с бентонитовой глиной [334, 335]; остальная номенклатура сырья не была изучена с точки зрения протекания в ней процессов самоорганизации в ходе выполнения огнезащитных функций. Для естественных форм существования целлюлозы или же лигноцеллюлозы такой подход не применялся, а подобающего анализа антиогневых свойств самоорганизующегося материала в системной корреляции с естественным старением древесины (которые, как было показано недавно, известным образом изменяются [336]) не проводилось.

Зависимость самосборки и самоорганизации от дисперсности целлюлозы, т. е., в конечном итоге абстрагирования, от фитохимического и таксономического источника (так как известно, что «нанокристаллиты природной целлюлозы древесного происхождения имеют фиксированный размер для данного сырьевого источника целлюлозы», а «различное сырье дает нанокристаллиты различного размера даже в сопоставимых экспериментальных условиях» [337]), должна быть изучена с привязкой к хемотаксономии и биохимии жидкокристаллического состояния конкретных пород, а, следовательно, и от условий их обработки, приводящих к формированию той или иной дисперсности. Исследования влияния условий кристаллизации и мягкости гидролиза на этот дескриптор также не проводились, хотя известно, что получение целлюлозы в форме «нанокристаллитов требует достаточно мягких условий гидролиза», а «размер образующихся частиц оказывается достаточно неоднородным», так как «на свойства нанокристаллитов целлюлозы, полученных из древесины и других растений, будут влиять» условия протекания реакции, «степень кислот-

ного гидролиза, тип применяемой кислоты и другие условия синтеза» [337]. Принятие коллоидно-химического подхода к дефинированию мезофазных свойств целлюлозосодержащих систем, в частности антипиренов, ставит коллоидно-химическую проблему зависимости состава противоионов от условий получения, что особо важно, поскольку в некоторых условиях внедряют не кислотный, а щелочной каталитический гидролиз для синтеза ретардантов либо антипиренов (хотя в классических работах жидкие кристаллы производных целлюлозы получали в жестких условиях в среде концентрированной серной кислоты).

Коллоидно-химические механизмы представляют собой управляющий фактор не только для размеров или дисперсности, но и для размерности образующихся структур, в силу чего нельзя не согласиться с авторами статьи [109] в точном тезисе, что «фазовое разделение стержнеобразных полиэлектролитов, каковыми являются водные суспензии ... целлюлозы, регулируются четырьмя основными параметрами:

- 1) размером частиц;
- 2) их полидисперсностью;
- 3) поверхностным зарядом;
- 4) ионной силой системы».

Иначе говоря, согласно [109], «необходим тщательный контроль над условиями получения частиц» целлюлозы для обеспечения их «воспроизводимого фазового разделения», в том числе преимущественно «в чистых полиэлектролитных системах», поскольку даже в наиболее «чистой» воде ионная сила ... будет определяться также концентрацией и поверхностным зарядом стержнеобразных частиц», что будет являться критерием «эмерджентности» данной системы (ибо, с одной стороны, условия получения действуют на продукты синтеза, а, с другой стороны, сами продукты синтеза дисперсной системы влияют на условия получения). По мнению авторов статьи [109], все такие параметры «зависят от свойств частиц и, следовательно, от условий их получения».

Исходя из наличия известных зависимостей свойств соответствующих биологических/биогеохимических продуктов, рассмотренных в данном обзоре, от процессов их получения и формообразования, а также гео-химического их окружения (что свойственно супрамолекулярной и коллоидной химии), можно аннотировать супрамолекулярный и коллоидно-химический подходы к интерпретации ряда феноменов и механизмов формирования ископаемых биогенных мезофаз, что, несомненно, не вписывается в тематику настоящей статьи и требует рассмотрения в отдельном обзоре.

Благодарности

Автор благодарит ст. науч. сотр. М.А. Климовича (ИБХФ РАН) за поддержку дискуссии по эволюционным и биогеохимическим аспектам физики жидкокристаллических и мезофазных структур. Автор благодарит инженера Е.Л. Бурьянскую (НИТУ МИСИС, ОДХБП ФИЦ ХФ РАН) за помощь в оформлении списка литературы. Автор благодарит ст. науч. сотр. М.А. Градову (ФИЦ ХФ РАН) за литературную обработку текста.

Работа выполнена в рамках инициативного проекта «Биогеохимическая физика».

Список литературы / References

- [1] White J.L. Role of carbonaceous mesophase in determining morphologies of coke and graphite // American Ceramic Society Bulletin, 1970, v. 49, iss. 4, p. 488.
- [2] White J.L. Mesophase mechanisms in the formation of the microstructure of petroleum coke // ACS Symposium Series, 1976, v. 21, pp. 282–314. DOI: 10.1021/bk-1976-0021.ch021
- [3] Лебедев А.Ю., Собкалов А.В., Ивахнюк Г.К. Склонность горючих материалов к самовозгоранию. Эколого-криминалистический аспект // Пожаровзрывобезопасность, 2011. Т. 20. № 10. С. 11–18. Lebedev A.Yu., Sobkalov A.V., Ivakhnyuk G.K. *Sklonnost' goryuchikh materialov k samovozgoraniyu. Ekologo-kriminalisticheskiiy aspekt* [The tendency of combustible materials to ignite spontaneously. Ecological and forensic aspect]. *Pozharovzryvobezopasnost'* [Fire and explosion safety], 2011, v. 20, no. 10, pp. 11–18.
- [4] Krüger G.J. Diffusion in thermotropic liquid crystals // Physics Reports, 1982, v. 82, iss. 4, pp. 229–269. DOI: 10.1016/0370-1573(82)90025-4
- [5] Ide Y., Ophir Z. Orientation development in thermotropic liquid crystal polymers // Polymer Engineering & Science, 1983, v. 23, iss. 5, pp. 261–265. DOI: 10.1002/pen.760230505
- [6] Langer S.A., Glotzer S.C. Morphogenesis in nematic liquid crystal/polymer materials // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 1997, v. 239, iss. 1-3, pp. 358–362. DOI: 10.1016/S0378-4371(97)00030-7
- [7] Gim M.J., Beller D.A., Yoon D.K. Morphogenesis of liquid crystal topological defects during the nematic-smectic A phase transition // Nature Communications, 2017, v. 8, iss. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1038/ncomms15453
- [8] Blackman L.D., Doncom K.E., Gibson M.I., O'Reilly R.K. Comparison of photo- and thermally initiated polymerization-induced self-assembly: a lack of end group fidelity drives the formation of higher order morphologies // Polymer Chemistry, 2017, v. 8, iss. 18, pp. 2860–2871. DOI: 10.1039/C7PY00407A
- [9] Rosenhauer R., Fischer T., Stumpe J. Light-induced anisotropy of stilbene containing LC polymers and its thermal development by self-organization // Proc. SPIE, 2004, v. 5213, pp. 169–182. DOI: 10.1117/12.506809
- [10] Lee H.K., Kanazawa A., Shiono T., Ikeda T., Fujisawa T., Aizawa M., Lee B. Reversible optical control of transmittance in polymer/liquid crystal composite films by photoinduced phase transition // J. of Applied Physics, 1999, v. 86, iss. 11, pp. 5927–5934. DOI: 10.1063/1.371717
- [11] Gvozдовskyy I., Yaroshchuk O., Serbina M., Yamaguchi R. Photoinduced helical inversion in cholesteric liquid crystal cells with homeotropic anchoring // Optics express, 2012, v. 20, iss. 4, pp. 3499–3508. DOI: 10.1364/OE.20.003499
- [12] Grint A., Marsh H. Carbonization of coal blends: mesophase formation and coke properties // Fuel, 1981, v. 60, iss. 12, pp. 1115–1120. DOI: 10.1016/0016-2361(81)90063-6
- [13] Kapustin S.M., Stolonogov I.I., Syunyaev Z.I., Zaitseva N.P. Coalescence of particles of liquid crystal phase in coking residual petroleum stocks // Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 1983, v. 19, iss. 4, DOI: 10.1007/BF00731007
- [14] Cheng S.X., Chung T.S. Phase separation and coalescence, annihilation of liquid crystal textures during polymerization of main-chain liquid crystalline polyesters // The J. of Physical Chemistry B, 1999, v. 103, iss. 23, pp. 4923–4932. DOI: 10.1021/jp984332q
- [15] El Horr N., Bourgerette C., Oberlin A. Mesophase powders (carbonization and graphitization) // Carbon, 1994, v. 32, iss. 6, pp. 1035–1044. DOI: 10.1016/0008-6223(94)90212-7
- [16] Smith G.W., White J.L., Buechler M. Mesophase/isotropic phase interfacial energy: Determination from coalescence kinetics of mesophase pitch // Carbon, 1985, v. 23, iss. 1, pp. 117–121. DOI: 10.1007/BF00731007
- [17] Marsh H. A Review of the Growth and Coalescence of Mesophase (Nematic Liquid Crystals) to Form Anisotropic Carbon, and Its Relevance to Coking and Graphitization // Proceedings of the 4th Int. Conf. on Carbon and Graphite, London, 1974, pp. 2–38.
- [18] Moriyama R., Hayashi J.I., Suzuki K., Hiroshima T., Chiba T. Analysis and modeling of mesophase sphere generation, growth and coalescence upon heating of a coal tar pitch // Carbon, 2002, v. 40, iss. 1, pp. 53–64. DOI: 10.1016/S0008-6223(01)00070-7
- [19] Chen L., Fei Y., Fan X., Jiang Z. Coalescence of mesophase spheres and microstructure of graphitic carbon revealed by scanning electron microscopy // J. of Materials Science, 2017, v. 52, iss. 21, pp. 12663–12676. DOI: 10.1007/s10853-017-1364-3
- [20] Zheng W.J. The effect of mechanical rubbing on the surface free energy of poly (vinyl) alcohol thin films and the contact angle of a liquid crystal on the rubbed polymer surfaces // Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2007, v. 479, iss. 1, pp. 1041–1049. DOI: 10.1080/15421400701758816
- [21] Marshall K.L., Didovets O., Saulnier D. Contact-angle measurements as a means of probing the surface alignment characteristics of liquid crystal materials on photoalignment layers // Proc. SPIE, 2014, v. 9182, pp. 91820J-2–91820J-1. DOI: 10.1117/12.2062074
- [22] Forrest M., Harry M. Growth and coalescence of mesophase in pitches with carbon black additives and in coal // Fuel, 1983, v. 62, iss. 5, pp. 612–615. DOI: 10.1016/0016-2361(83)90237-5
- [23] Torii T. Effect of magnetic field on the coalescence and growth of carbonaceous mesophase spherules // Current Advances in Materials and Processes, 2000, v. 13, iss. 4, pp. 919–919.
- [24] Choi Y.J., Kim J.H., Lee S.E., Lee Y.S., Lim J.S. Investigation of the coalescence phase between mesophase spheres during mesophase formation // Research Papers of the Korean Institute of Industrial Chemistry, 2019, v. 2019, iss. 1, pp. 437–437.
- [25] Hales T.C. The sphere packing problem // J. of Computational and Applied Mathematics, 1992, v. 44, iss. 1, pp. 41–76. DOI: 10.1016/0377-0427(92)90052-Y
- [26] Valembois A., Fossorier M.P. C. Sphere-packing bounds revisited for moderate block lengths // IEEE Transactions on Information Theory, 2004, v. 50, iss. 12, pp. 2998–3014. DOI: 10.1109/TIT.2004.838090

- [27] Weishauptova Z., Medek J., Vaverkova Z. Study of the porosity of mesophase and its carbonization products // *Carbon*, 1994, v. 32, iss. 2, pp. 311–321. DOI: 10.1016/0008-6223(94)90194-5
- [28] Carroll M.M., Kim K.T., Nesterenko V.F. The effect of temperature on viscoplastic pore collapse // *J. of Applied Physics*, 1986, v. 59, iss. 6, pp. 1962–1967. DOI: 10.1063/1.336426
- [29] Duan Z.P., Wen L.J., Liu Y., Ou Z. C., Huang F.L., Zhang Z.Y. A pore collapse model for hot-spot ignition in shocked multi-component explosives // *International J. of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2010, v. 11, pp. 19–24. DOI: 10.1515/IJNSNS.2010.11.S1.19
- [30] Kumar S., Srivastava M. Influence of presence/addition of asphaltene on semi-coke textures and mesophase development in petroleum feed stocks // *Fuel*, 2016, v. 173, pp. 69–78. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.01.026
- [31] Mehta S., Mitchell G.D., Karpinski J.M. Development of the mesophase and coke-carbon forms during coal carbonization // *Biennial Conf. on Carbon*. Philadelphia, USA, 1981, pp. 198–199.
- [32] Friel J.J. Role of the mesophase during the coal to coke transformation // *Proceedings of the 39th Ironmaking Conference*. Washington, USA, 1980, v. 39, iss. 23, pp. 274–278.
- [33] Moreland A., Patrick J., Walker A. The role of mesophase formation during carbonization in determining coke strength // *Coal Science and Technology*, 1987, v. 11, pp. 729–732.
- [34] Buechler M., Ng C.B., White J.L. Needlelike coke prepared by deformation of carbonaceous mesophase // *Biennial Conf. on Carbon*. University Park PA, USA, 1980, pp. 433–434.
- [35] Ebert L.B., Kastrop R.V., Scanlon J.C. The disruption of aromatic stacking order in mesophase petroleum coke via reductive alkylation // *Materials Research Bulletin*, 1988, v. 23, iss. 12, pp. 1757–1763. DOI: 10.1016/0025-5408(88)90186-9
- [36] Liberman M.A. Introduction to physics and chemistry of combustion: explosion, flame, detonation // *Berlin-Heidelberg, Springer*, 2008, p. 349. DOI: 10.1007/978-3-540-78759-4
- [37] Azatyan V.V. Scientific foundations and effective chemical methods of combustion, explosion, and gas detonation control // *Russian J. of Physical Chemistry A*, 2011, v. 85, iss. 8, pp. 1293–1306. DOI: 10.1134/S0036024411080036
- [38] Goh M., Matsushit S., Akagi K. From helical polyacetylene to helical graphite: synthesis in the chiral nematic liquid crystal field and morphology-retaining carbonisation // *Chemical Society Reviews*, 2010, v. 39, iss. 7, pp. 2466–2476. DOI: 10.1039/b907990b
- [39] Sanada Y., Furuta T., Kimura H., Honda H. Formation of anisotropic mesophase from various carbonaceous materials in early stages of carbonization // *Fuel*, 1973, v. 52, iss. 2, pp. 143–148. DOI: 10.1016/0016-2361(73)90039-2
- [40] Fanjul F., Granda M., Santamaría R., Menéndez R. On the chemistry of the oxidative stabilization and carbonization of carbonaceous mesophase // *Fuel*, 2002, v. 81, iss. 16, pp. 2061–2070. DOI: 10.1016/S0016-2361(02)00189-8
- [41] Marsh H. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. Part 1. The significance of the mesophase during carbonization of coking coals // *Fuel*, 1973, v. 52, iss. 3, pp. 205–212. DOI: 10.1016/0016-2361(73)90080-X
- [42] Marsh H., Foster J. M., Hermon G., Iley M. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. Part 2. Co-carbonization of aromatic and organic dye compounds, and influence of inerts // *Fuel*, 1973, v. 52, iss. 4, pp. 234–242. DOI: 10.1016/0016-2361(73)90051-3
- [43] Marsh H., Foster J.M., Hermon G., Iley M., Melvin J.N. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. Part 3. Co-carbonization of aromatic and heterocyclic compounds containing oxygen, nitrogen and sulphur // *Fuel*, 1973, v. 52, iss. 4, pp. 243–252. DOI: 10.1016/0016-2361(73)90052-5
- [44] Dingemans T., Knijnenberg A., Iqbal M., Weiser E., Stclair T. All-aromatic liquid crystal thermosets: New high-performance materials for structural applications // *Liquid Crystals Today*, 2006, v. 15, iss. 4, pp. 19–24. DOI: 10.1080/14645180701470371
- [45] Iqbal M., Dingemans T.J. Synthesis, characterization and properties of branched all-aromatic liquid crystal thermosets // *High Performance Polymers*, 2010, v. 22, iss. 8, pp. 891–904. DOI: 10.1177/0954008310376677
- [46] Iqbal M., Dingemans T.J. High-performance composites based on all-aromatic liquid crystal thermosets // *Composites Science and Technology*, 2011, v. 71, iss. 6, pp. 863–867. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.01.030
- [47] Marsh H., Dachille F., Iley M., Walker P.L., Whang P.W. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. Part 4. Carbonization of coal-tar pitches and coals of increasing rank // *Fuel*, 1973, v. 52, iss. 4, pp. 253–261. DOI: 10.1016/0016-2361(73)90053-7
- [48] Goodarzi F., Hermon G., Iley M., Marsh H. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 6. Effect of pre-oxidation of vitrinites upon coking properties // *Fuel*, 1975, v. 54, iss. 2, pp. 105–112. DOI: 10.1016/0016-2361(75)90065-4
- [49] Reis D., Vian B., Chanzy H., Roland J. C. Liquid crystal-type assembly of native cellulose-glucuronoxylans extracted from plant cell wall // *Biology of the Cell*, 1991, v. 73, iss. 2–3, pp. 173–178. DOI: 10.1016/0248-4900(91)90100-2
- [50] Roland J. C., Reis D., Vian B. Liquid crystal order and turbulence in the planar twist of the growing plant cell walls // *Tissue and Cell*, 1992, v. 24, iss. 3, pp. 335–345. DOI: 10.1016/0040-8166(92)90050-H
- [51] Marsh H., Hermon G., Cornford C. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 5. Importance of eutectic zones formed from nematic liquid crystals // *Fuel*, 1974, v. 53, iss. 3, pp. 168–171. DOI: 10.1016/0016-2361(74)90004-0
- [52] Mochida I., Marsh H. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 7. Optical textures of cokes from acenaphthylene and decacyclene // *Fuel*, 1979, v. 58, iss. 9, pp. 626–632. DOI: 10.1016/0016-2361(79)90215-1
- [53] Mochida I., Marsh H., Grint A. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 8. The co-carbonization of coals with acenaphthylene and decacyclene // *Fuel*, 1979, v. 58, iss. 9, pp. 633–641. DOI: 10.1016/0016-2361(79)90216-3
- [54] Grint A., Swietlik U., Marsh H. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 9. The co-carbonization of vitrains with Ashland A200 petroleum pitch // *Fuel*, 1979, v. 58, iss. 9, pp. 642–650. DOI: 10.1016/0016-2361(79)90217-5
- [55] Mochida I., Marsh H. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 10. The co-carbonization of coals with solvent-refined coals and coal extracts // *Fuel*, 1979, v. 58, iss. 11, pp. 790–796. DOI: 10.1016/0016-2361(79)90184-4
- [56] Mochida I., Marsh H. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 11. The co-carbonization of low-rank coals with modified petroleum pitches // *Fuel*, 1979, v. 58, iss. 11, pp. 797–802. DOI: 10.1016/0016-2361(79)90185-6

- [57] Mochida I., Marsh H., Grint A. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 12. Mechanisms of the co-carbonization of coals with organic additives // *Fuel*, 1979, v. 58, iss. 11, pp. 803–808. DOI: 10.1016/0016-2361(79)90186-8
- [58] Mochida I., Marsh H. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 13. Kinetic considerations of the co-carbonizations of coals with organic additives // *Fuel*, 1979, v. 58, iss. 11, pp. 809–814. DOI: 10.1016/0016-2361(79)90187-X
- [59] Guymon C.A., Bowman C.N. Kinetic analysis of polymerization rate acceleration during the formation of polymer/smectic liquid crystal composites // *Macromolecules*, 1997, v. 30, iss. 18, pp. 5271–5278. DOI: 10.1021/ma9703970
- [60] Jeong H.K., Kikuchi H., Kajiyama T. Kinetic control of the phase-separated structure and electro-optical switching properties of (polymer/liquid crystal) composite films prepared by a solvent cast method // *New Polymeric Materials*, 1998, v. 5, iss. 2, pp. 103–117.
- [61] Wysocki J.J., Adams J.E., Olechna D.J. Kinetic Study of the Electric Field-Induced Cholesteric Nematic Transition in Liquid Crystal Films: 1. Relaxation to the Cholesteric State // *Liquid Crystals and Ordered Fluids*. Springer, Boston, MA, 1970, pp. 419–445. DOI: 10.1007/978-1-4684-8214-0
- [62] Wysocki J.J. Continued Kinetic Study of the Cholesteric-Nematic Transition in a Liquid Crystal Film // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1971, v. 14, iss. 1–2, t. 71–84. DOI: 10.1080/15421407108083558
- [63] Calderer M.C., Forest M.G., Wang Q. Kinetic theories and mesoscopic models for solutions of nonhomogeneous liquid crystal polymers // *J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2004, v. 120, iss. 1–3, pp. 69–78. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2004.01.015
- [64] Yu H., Ji G., Zhang P. A nonhomogeneous kinetic model of liquid crystal polymers and its thermodynamic closure approximation // *Communications in Computational Physics*, 2010, v. 7, iss. 2, pp. 383. DOI: 10.4208/cicp.2009.09.202
- [65] Yu H., Zhang P. A kinetic hydrodynamic simulation of microstructure of liquid crystal polymers in plane shear flow // *J. of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2007, v. 141, iss. 2–3, pp. 116–127. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2006.09.005
- [66] Honorato-Rios C., Kuhnhold A., Bruckner J.R., Dannert R., Schilling T., Lagerwall J.P. Equilibrium liquid crystal phase diagrams and detection of kinetic arrest in cellulose nanocrystal suspensions // *Frontiers in Materials*, 2016, v. 3, p. 21. DOI: 10.3389/fmats.2016.00021
- [67] Marsh H., Mochida I., Scott E., Sherlock J. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 17. Co-carbonization of a solvent-refined coal with petroleum pitches and hydrogenated coal-extract solution // *Fuel*, 1980, v. 59, iss. 7, pp. 517–519. DOI: 10.1016/0016-2361(80)90181-7
- [68] Yokono T., Marsh H., Yokono M. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 19. Co-carbonization of oxidized coals with model organic compounds // *Fuel*, 1981, v. 60, iss. 6, pp. 507–512. DOI: 10.1016/0016-2361(81)90113-7
- [69] Grint A., Marsh H. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 20. Co-carbonization of a high-volatile caking coal with several petroleum pitches // *Fuel*, 1981, v. 60, iss. 6, pp. 513–518. DOI: 10.1016/0016-2361(81)90114-9
- [70] Ragan S., Marsh H. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 22. Micro-strength and optical textures of cokes from coal-pitch co-carbonizations // *Fuel*, 1981, v. 60, iss. 6, pp. 522–528. DOI: 10.1016/0016-2361(81)90116-2
- [71] Marsh H., Neavel R.C. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 15. A common stage in mechanisms of coal liquefaction and of coal blends for coke making // *Fuel*, 1980, v. 59, iss. 7, pp. 511–513. DOI: 10.1016/0016-2361(80)90179-9
- [72] Marsh H., Mochida I., Macefield I., Scott E. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 16. Carbonizations of soluble and insoluble fractions of coal-extract solution // *Fuel*, 1980, v. 59, iss. 7, pp. 514–516. DOI: 10.1016/0016-2361(80)90180-5
- [73] Marsh H., Gerus-Piasecka I., Grint A. Carbonization and liquid crystal (mesophase) development. 14. Co-carbonization of coals with A240 Ashland petroleum pitch: effects of conditions of carbonization upon optical textures of resultant cokes // *Fuel*, 1980, v. 59, iss. 5, pp. 343–348. DOI: 10.1016/0016-2361(80)90221-5
- [74] Marsh H., Kimber G. M., Rantell T., Scott E. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 18. carbonization of coal-extract solutions (non-hydrogenated): influence of digestion conditions upon optical texture of cokes // *Fuel*, 1980, v. 59, iss. 7, pp. 520–522. DOI: 10.1016/0016-2361(80)90182-9
- [75] Grint A., Marsh H. Carbonization and liquid-crystal (mesophase) development. 21. Replacement of low-volatile caking coal by petroleum pitch in coal blends for metallurgical coke // *Fuel*, 1981, v. 60, iss. 6, pp. 519–521. DOI: 10.1016/0016-2361(81)90115-0
- [76] Park Y.D., Korai Y., Mochida I. Preparation of anisotropic mesophase pitch by carbonization under vacuum // *J. of Materials Science*, 1986, v. 21, iss. 2, pp. 424–428. DOI: 10.1007/BF01145504
- [77] Preiss H., Kretzschmar U., Rossberg M., Ulbricht K. The carbonization of halogenated mesophase pitches // *Fuel*, 1991, v. 70, iss. 9, pp. 1045–1051. DOI: 10.1016/0016-2361(91)90258-C
- [78] Yanagisawa K., Suzuki T. Carbonization of oxidized mesophase pitches originating from petroleum and coal tar // *Fuel*, 1993, v. 72, iss. 1, pp. 25–30. DOI: 10.1016/0016-2361(93)90371-8
- [79] Miyake M., Ida T., Yoshida H., Wakisaka S., Nomura M., Hamaguchi M., Nishizawa T. Effects of reductively introduced alkyl groups and hydrogen to mesophase pitch on carbonization properties // *Carbon*, 1993, v. 31, iss. 5, pp. 705–714. DOI: 10.1016/0008-6223(93)90007-W
- [80] Drbohlav J., Stevenson W.T.K. The oxidative stabilization and carbonization of a synthetic mesophase pitch, part I: The oxidative stabilization process // *Carbon*, 1995, v. 33, iss. 5, pp. 693–711. DOI: 10.1016/0008-6223(95)00011-2
- [81] Drbohlav J., Stevenson W.T.K. The oxidative stabilization and carbonization of a synthetic mesophase pitch, part II: The carbonization process // *Carbon*, 1995, v. 33, iss. 5, pp. 713–731. DOI: 10.1016/0008-6223(95)00012-3
- [82] Liedtke V., Hüttinger K.J. Mesophase pitches as matrix precursor of carbon fiber reinforced carbon: III. Mechanical properties of composites after carbonization and graphitization treatment // *Carbon*, 1996, v. 34, iss. 9, pp. 1081–1086. DOI: 10.1016/0008-6223(96)00057-7
- [83] Kanno K., Fernandez J.J., Fortin F., Korai Y., Mochida I. Modifications to carbonization of mesophase pitch by addition of carbon blacks // *Carbon*, 1997, v. 35, iss. 10–11, pp. 1627–1637. DOI: 10.1016/S0008-6223(97)00123-1
- [84] Honda H., Kimura H., Sanada Y., Sugawara S., Furuta T. Optical mesophase texture and X-ray diffraction pattern of the early-stage carbonization of pitches // *Carbon*, 1970, v. 8, iss. 2, pp. 181–189. DOI: 10.1016/0008-6223(70)90112-0
- [85] Oshida K., Bonnamy S. Primary carbonization of an anisotropic ‘mesophase’ pitch compared to conventional isotropic pitch // *Carbon*, 2002, v. 40, iss. 14, pp. 2699–2711. DOI: 10.1016/S0008-6223(02)00184-7

- [86] Mianowski A., Blazewicz S., Robak Z. Analysis of the carbonization and formation of coal tar pitch mesophase under dynamic conditions // *Carbon*, 2003, v. 41, iss. 12, pp. 2413–2424. DOI: 10.1016/S0008-6223(03)00301-4
- [87] Zhang X., Khor S., Gao D., Sum E. Carbonization chemistry of heating carbon composites containing novolac/furfuryl alcohol resins and carbon black or mesophase pitch as additives // *Materials Chemistry and Physics*, 2012, v. 131, iss. 3, pp. 735–742. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2011.10.044
- [88] Zhang B., Song H., Chen X., Yang W., Li Z., Ma Z. Transformation of Lewis acid during the carbonization and graphitization of mesophase pitches // *J. of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, v. 104, pp. 433–440. DOI: 10.1016/j.jaap.2013.06.001
- [89] Cheng Y., Fang C., Su J., Yu R., Li T. Carbonization behavior and mesophase conversion kinetics of coal tar pitch using a low temperature molten salt method // *J. of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, v. 109, pp. 90–97. DOI: 10.1016/j.jaap.2014.07.009
- [90] Cheng Y., Yang L., Luo T., Fang C., Su J., Hui J. Preparation and characterization of mesophase pitch via co-carbonization of waste polyethylene/petroleum pitch // *J. of Materials Science & Technology*, 2015, v. 31, iss. 8, pp. 857–863. DOI: 10.1016/j.jmst.2015.07.010
- [91] Pan G., Liang W., Liang P., Chen Q. Effect of vacuum-carbonization treatment of soft carbon anodes derived from coal-based mesophase pitch for lithium-ion batteries // *Clean Energy*, 2019, v. 3, iss. 3, pp. 211–216. DOI: 10.1093/ce/zkz011
- [92] Cheng X., Song S. Eutectic effect during mesophase formation in co-carbonization of ethylene tar pitch and polystyrene // *International J. of Mining Science and Technology*, 2012, v. 22, iss. 2, pp. 183–186. DOI: 10.1016/j.ijmst.2011.08.008
- [93] Zubkova V., Prezhdo V. The formation of mesophase composites under influence of the coal-tar pitch during coal carbonization // *Composite Interfaces*, 2005, v. 12, iss. 6, pp. 523–544. DOI: 10.1163/1568554054915174
- [94] Baxter R.W. A study of the vegetative anatomy of the genus *Sphenophyllum* from American coal balls // *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 1948, v. 35, iss. 3, pp. 209–231.
- [95] Brea M., Zucol A.F., Iglesias A. Fossil plant studies from late Early Miocene of the Santa Cruz Formation: paleoecology and paleoclimatology at the passive margin of Patagonia, Argentina // *Early Miocene Paleobiology in Patagonia: High-Latitude Paleocommunities of the Santa Cruz Formation*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012, pp. 104–128. DOI: 10.1017/CBO9780511667381.008
- [96] Liu Y.A., Kung C.C. Plant fossils of late Eocene from Wucheng, Honan and their significance in botany and paleoclimatology // *Chih Wu Hsueh Pao*, 1978, v. 1, pp. 59–65.
- [97] Poynter J.G., Farrimond P., Robinson N., Eglinton G. Aeolian-derived higher plant lipids in the marine sedimentary record: links with paleoclimate, paleoclimatology and paleometeorology: modern and past patterns of global atmospheric transport // *NATO ASI Series. Series C: Mathematical and Physical Sciences*, 1989, v. 282, pp. 435–462. DOI: 10.1007/978-94-009-0995-3
- [98] Luzzati V., Husson F. The structure of the liquid-crystalline phases of lipid-water systems // *The J. of Cell Biology*, 1962, v. 12, iss. 2, pp. 207–219. DOI: 10.1083/jcb.12.2.207
- [99] Kirk G.L., Gruner S.M. Lyotropic effects of alkanes and headgroup composition on the $L\alpha$ -HII lipid liquid crystal phase transition: hydrocarbon packing versus intrinsic curvature // *J. de Physique*, 1985, v. 46, iss. 5, pp. 761–769. DOI: 10.1051/jphys:01985004605076100
- [100] Willison J.H.M., Abeyssekera R.M. A liquid crystal containing cellulose in living plant tissue // *J. of Polymer Science Part C: Polymer Letters*, 1988, v. 26, iss. 2, pp. 71–75. DOI: 10.1002/pol.1988.140260202
- [101] Reis D., Vian B., Chanzy H., Roland J.C. Liquid crystal-type assembly of native cellulose-glucuronoxylans extracted from plant cell wall // *Biology of the Cell*, 1991, v. 73, iss. 2–3, pp. 173–178. DOI: 10.1016/0248-4900(91)90100-2
- [102] Roland J.C., Reis D., Vian B. Liquid crystal order and turbulence in the planar twist of the growing plant cell walls // *Tissue and Cell*, 1992, v. 24, iss. 3, pp. 335–345. DOI: 10.1016/0040-8166(92)90050-h
- [103] Godinho M.H., Canejo J.P., Feio G., Terentjev E.M. Self-winding of helices in plant tendrils and cellulose liquid crystal fibers // *Soft Matter*, 2010, v. 6, iss. 23, pp. 5965–5970. DOI: 10.1039/C0SM00427H
- [104] van der Heijden E., Bouman F., Boon J.J. Anatomy of recent and peatified *Calluna vulgaris* stems: implications for coal maceral formation // *International J. of Coal Geology*, 1994, v. 25, iss. 1, pp. 1–25. DOI: 10.1016/0166-5162(94)90002-7
- [105] Ielpi A. Anatomy of major coal successions: Facies analysis and sequence architecture of a brown coal-bearing valley fill to lacustrine tract (Upper Valdarno Basin, Northern Apennines, Italy) // *Sedimentary Geology*, 2012, v. 265, pp. 163–181. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2012.04.006
- [106] Mukherjee S.M., Sikorski J., Woods H.J. Micellar structure of native cellulose // *Nature*, 1951, v. 167, iss. 4255, pp. 821–822. DOI: 10.1038/167821b0
- [107] Mukherjee S.M., Woods H.J. X-ray and electron microscope studies of the degradation of cellulose by sulphuric acid // *Biochimica et Biophysica Acta*, 1953, v. 10, pp. 499–511. DOI: 10.1016/0006-3002(53)90295-9
- [108] Marchessault R.H., Morehead F.F., Walter N.M. Liquid crystal systems from fibrillar polysaccharides // *Nature*, 1959, v. 184, iss. 4686, pp. 632–633. DOI: 10.1038/184632a0
- [109] Зарубина А.Н., Иванкин А.Н., Кулезнев А.С., Кочетков В.А. Целлюлоза и наноцеллюлоза. Обзор // *Лесной вестник/Forestry bulletin*, 2019. Т. 23. № 5. С. 116–125.
Zarubina A.N., Ivankin A.N. Kuleznev A.S., Kochetkov V.A. *Tsellyuloza i nanotsellyuloza. Obzor* [Cellulose and nano cellulose. Review] // *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 116–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-116-125
- [110] Spontak R.J., El-Nokaly M.A., Bartolo R.G., Burns J.L. Characterization of Lyotropic Polysaccharide Liquid Crystal Blends // *Studies in Polymer Science*. Elsevier, 1992, v. 11, pp. 273–298. DOI: 10.1016/B978-0-444-89397-0.50019-1
- [111] Loshadkin D.V., Khanchich O.A. Study of phase transitions in liquid crystal systems of polysaccharides and their derivatives // *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A. Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2001, v. 367, iss. 1, pp. 597–604. DOI: 10.1080/10587250108028680
- [112] Shipovskaya A.B., Timofeev G.N. Liquid-crystal state in the system polysaccharide-mesophasogenic solvent // *J. of Engineering Physics and Thermophysics*, 2006, v. 79, iss. 1, pp. 143–151. DOI: 10.1007/s10891-006-0078-1
- [113] Gibeaut D.M., Carpita N.G. Biosynthesis of plant cell wall polysaccharides // *The FASEB J.*, 1994, v. 8, iss. 12, pp. 904–915. DOI: 10.1096/fasebj.8.12.8088456

- [114] Gorshkova T.A., Wyatt S.E., Salnikov V.V., Gibeau D.M., Ibragimov M.R., Lozovaya V.V., Carpita N.C. Cell-wall polysaccharides of developing flax plants // *Plant Physiology*, 1996, v. 110, iss. 3, pp. 721–729. DOI: 10.1104/pp.110.3.721
- [115] Lerouxel O., Cavalier D.M., Liepman A.H., Keegstra K. Biosynthesis of plant cell wall polysaccharides: a complex process // *Current opinion in plant biology*, 2006, v. 9, iss. 6, pp. 621–630. DOI: 10.1016/j.pbi.2006.09.009
- [116] Gorshkova T.A., Kozlova L.V., Mikshina P.V. Spatial structure of plant cell wall polysaccharides and its functional significance // *Biochemistry*, 2013, v. 78, iss. 7, pp. 836–853. DOI: 10.1134/S0006297913070146
- [117] Keilich G., Bailey P., Liese W. Enzymatic degradation of cellulose, cellulose derivatives and hemicelluloses in relation to the fungal decay of wood // *Wood Science and Technology*, 1970, v. 4, iss. 4, pp. 273–283. DOI: 10.1007/BF00386403
- [118] Haigler C.H., White A.R., Brown R.M., Cooper K.M. Alteration of in vivo cellulose ribbon assembly by carboxymethylcellulose and other cellulose derivatives // *J. of Cell Biology*, 1982, v. 94, iss. 1, pp. 64–69. DOI: 10.1083/jcb.94.1.64
- [119] Coffey D.G., Bell D.A., Henderson A. Cellulose and cellulose derivatives // *Food Polysaccharides and their applications*. Ed. Stephen A.M. New York, Marcel Dekker, 1995, pp. 123–153. DOI: 10.1201/9781420015164.ch5
- [120] Bayer E.A., Shoham Y., Lamed R. The cellulosome: an exocellular organelle for degrading plant cell wall polysaccharides // *Glycomicrobiology*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2000, pp. 387–439. DOI: 10.1007/0-306-46821-2_14
- [121] Fried F., Gilli J., Seurin M., Sixou P. Experimental results in lyotropic liquid-crystal solutions of cellulose derivatives // *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, v. 186, p. 49.
- [122] Yong H., Li-Sheng C.M., Li L.S. Study on lyotropic liquid-crystal of ethyl cyanoethyl cellulose // *Acta Chimica Sinica*, 1988, v. 46, iss. 4, pp. 367–371.
- [123] Novikov D.V., Krasovskii A.N., Mnatsakanov S.S. Domain structure of cellulose triacetate // *Physics of the Solid State*, 2012, v. 54, iss. 2, pp. 409–413.
- [124] Gilbert R.D., Patton P.A. Liquid crystal formation in cellulose and cellulose derivatives // *Progress in Polymer Science*, 1983, v. 9, iss. 2–3, pp. 115–131. DOI: 10.1016/0079-6700(83)90001-1
- [125] Khanchich O.A., Loshadkin D.V. Liquid crystal systems of cellulose and its derivatives // *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A. Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2001, v. 365, iss. 1, pp. 313–321. DOI: 10.1080/10587250108025309
- [126] Geng Y., Seč D., Almeida P.L., Lavrentovich O.D., Žumer S., Godinho M.H. Liquid crystal necklaces: cholesteric drops threaded by thin cellulose fibres // *Soft Matter*, 2013, v. 9, iss. 33, pp. 7928–7933. DOI: 10.1039/C3SM50900A
- [127] Lan X., Jie X., Peng Y., Bin G. A Study of Cellulose Cholesteric Liquid Crystal Texture from Paper Pulp // *J. of East China Jiaotong University*, 2011, v. 5, pp. 71–76 <https://caod.oriprobe.com/order.htm?id=28907858>
- [128] Li C., Evans J., Wang N., Guo T., He S. Preparation and liquid crystal phase properties of discotic cellulose nanoparticles // *Cellulose*, 2019, v. 26, iss. 18, pp. 9543–9552. DOI: 10.1007/s10570-019-02773-7
- [129] Si-tong L.I.U., Da-wei Z., Guang-zhe P. Ultrasonic effect on lyotropic chiral nematic liquid crystal of cellulose nanocrystal // *Chinese J. of Liquid Crystal & Displays*, 2015, v. 30, iss. 2. DOI: 10.3788/YJYXS20153002.0229
- [130] Santos M.V., Tercjak A., Gutierrez J., Barud H.S., Napoli M., Nalin M., Ribeiro S.J. Optical sensor platform based on cellulose nanocrystals (CNC)-4'-(hexyloxy)-4-biphenylcarbonitrile (HOBC) bi-phase nematic liquid crystal composite films // *Carbohydrate polymers*, 2017, v. 168, pp. 346–355. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.03.078
- [131] Campbell C.E., Kattner U.R., Liu Z.K. The development of phase-based property data using the CALPHAD method and infrastructure needs // *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 2014, v. 3, iss. 1, pp. 158–180. DOI: 10.1186/2193-9772-3-12
- [132] Kattner U.R. The CALPHAD method and its role in material and process development // *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineracao*, 2016, v. 13, iss. 1, p. 3. DOI: 10.4322/2176-1523.1059
- [133] Al-Ghoul M. Generalized hydrodynamics of reaction-diffusion systems and dissipative structures // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2004, v. 362, iss. 1821, pp. 1567–1581. DOI: 10.1098/rsta.2004.1396
- [134] Chi G., Xue C. An overview of hydrodynamic studies of mineralization Author links open overlay panel // *Geoscience Frontiers*, 2011, v. 2, iss. 3, pp. 423–438. DOI: 10.1016/j.gsf.2011.05.001
- [135] Rosu C., Manaila-Maximean D., Godinho M.H., Almeida P.L. Thermally stimulated depolarization currents and optical transmission on liquid crystal/cellulose derivative composite devices // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2003, v. 391, iss. 1, pp. 1–11. DOI: 10.1080/10587250216170
- [136] Maximean D.M., Bărar A., Ganea C.P., Almeida P.L., Dănilă O. Impedance spectroscopy and electro-optic switching times of a liquid crystal hydroxypropyl cellulose network composite // *Proc. SPIE*, 2018, v. 10977, p. 109770P. DOI: 10.1117/12.2326224
- [137] McMaster M., Liu F., Christopherson W., Gross R.A., Singer K. Switchable Liquid Crystal Composite Windows Using Bacterial Cellulose (BC) Mat Substrates // *ACS Applied Polymer Materials*, 2019, v. 1, iss. 4, pp. 636–640. DOI: 10.1021/acsapm.9b00007
- [138] Shao Z., Li Y., Wang, W. Study on Synthesis and Properties of Cellulose Triacetate for Liquid Crystal Display // *Polymer Materials Science and Engineering*, 2007, v. 23, iss. 4, pp. 71–73, 77.
- [139] Maximean D.M., Rosua C., Almeida P., Kunduc S. Developments of cellulose based polymer dispersed liquid crystal devices // *Proc. ECLC*, 2009, p. 015.
- [140] Shimamura S., Hisakado Y., Nishikawa N. Glucose compound, cellulose composition, cellulose film, polarizing plate and liquid crystal display device: U.S. Patent, 8497003, 2013.
- [141] Vshivkov S.A., Rusinova B.V., Kudrevatyh N.V., Galjas A.G., Alekseeva M.S., Kuznecov D.K. Phase transitions of hydroxypropylcellulose liquid-crystalline solutions in magnetic field // *Polymer Science Series A*, 2006, v. 48, iss. 10, pp. 1115–1119. DOI: 10.1134/S0965545X06100142
- [142] Vshivkov S.A., Rusinova E.V. Phase and Structural Transformations of Liquid Crystal Polymer Systems in Mechanical Field // *Polymer Science Series A*, 2008, v. 50, iss. 2, pp. 135–141. DOI: 10.1134/S0965545X08020065
- [143] Вшивков С.А., Русинова Е.В. Фазовые и структурные превращения жидкокристаллических полимерных систем в механическом поле // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*, 2008. Т. 50. № 2. С. 237–244.

- Vshivkov S.A., Rusinova E.V. *Fazovye i strukturnye prevrashcheniya zhidkokristallicheskih polimernykh sistem v mekhanicheskom pole* [Phase and structural transformations of liquid-crystal polymer systems in a mechanical field]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A* [High-molecular compounds. Series A], 2008, v. 50, no. 2, pp. 237–244.
- [144] Вшивков С. А., Галяс А. Г. Фазовые жидкокристаллические переходы полимерных систем в магнитном поле // Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология, 2008. Т. 51. №. 5. С. 78–80.
Vshivkov S.A., Galyas A.G. *Fazovye zhidkokristallicheskie perekhody polimernykh sistem v magnitnom pole* [Phase liquid-crystal transitions of polymer systems in a magnetic field]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2008, v. 51, no. 5, pp. 78–80.
- [145] Ribotta R., Joets A. Defects and interactions with the structures in ehd convection in nematic liquid crystals // *Cellular Structures in Instabilities*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1984, pp. 249–262.
DOI: 10.1007/3-540-13879-X
- [146] Kleman M., Lavrentovich O.D., Friedel J. *Soft Matter Physics. An Introduction*. New York, NY: Springer, 2004, pp. 658. DOI: 10.1007/b97416
- [147] Horsthemke W., Lefever R. *Noise-Induced Transitions: Theory and Applications in Physics, Chemistry, and Biology*. Berlin: Springer-Verlag, 2002, p. 322.
DOI: 10.1007/3-540-36852-3
- [148] Вшивков С.А., Галяс А.Г., Куценко Л.И., Тюкова И.С., Терзиян Т.В., Шепетун А.В. Самоорганизация макромолекул и фазовые жидкокристаллические переходы в растворах эфиров целлюлозы // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*, 2011. Т. 53. № 1. С. 3–8.
Vshivkov S.A., Galyas A.G., Kutsenko L.I., Tyukova I.S., Terziyan T.V., Shepetun A.V. *Samoorganizatsiya makromolekul i fazovye zhidkokristallicheskie perekhody v rastvorakh efirov tsellyulozy* [Self-organization of macromolecules and phase liquid-crystal transitions in solutions of cellulose ethers]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A* [High-molecular compounds. Series A], 2011, v. 53, no. 1, pp. 3–8.
- [149] Vshivkov S.A., Galyas A.G. Mechanism of self-assembly of rigid-chain macromolecules of cellulose ethers in solutions // *Polymer Science Series A*, 2011, v. 53, iss. 11, pp. 1032–1039.
- [150] Gradov O.V., Gradova M.A. Synchronization of photochemical processes and photoinduced self-organization in dispersed semiconductors under optical pumping // *Proc. 3rd International Symposium «Molecular Photonics», 24–29 June 2012, Repino, Russia. St. Petersburg, 2012, p. 156.*
DOI: 10.13140/RG.2.1.3935.9521.
- [151] Shibaev V.P., Bobrovsky A.Y. Liquid crystalline polymers: development trends and photocontrollable materials // *Russian Chemical Reviews*, 2017, v. 86, iss. 11, pp. 1024–1072.
- [152] Goto H., Akagi K. Optically active electrochromism of poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) synthesized by electrochemical polymerization in lyotropic liquid crystal of hydroxypropyl cellulose/water: active control of optical activity // *Chemistry of Materials*, 2006, v. 18, iss. 2, pp. 255–262. DOI: 10.1021/cm050755a
- [153] Степанов Б.И. Основы спектроскопии отрицательных световых потоков. Минск: Изд-во Белорус. гос. ун-та им. В.И. Ленина, 1961. 123 с.
- Stepanov B.I. *Osnovy spektroskopii otritsatel'nykh svetovykh potokov* [Fundamentals of spectroscopy of negative light fluxes]. Minsk: Publishing House of the Belarusian State University, 1961, 123 p.
- [154] Ivanov-Omskii V.I., Matveev B.A. Negative luminescence and devices based on this phenomenon // *Semiconductors*, 2007, v. 41, iss. 3, pp. 247–258.
- [155] Klabunde K., Sergeev G. *Nanochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2013, p. 372.
DOI: 10.1016/B978-0-444-51956-6.X5000-7
- [156] Khoshkava V., Kamal M.R. Effect of drying conditions on cellulose nanocrystal (CNC) agglomerate porosity and dispersibility in polymer nanocomposites // *Powder Technology*, 2014, v. 261, pp. 288–298.
DOI: 10.1016/j.powtec.2014.04.016
- [157] Shipovskaja A.B., Timofeeva G.N. Liquid crystalline state in the polysaccharide-mesophasogenic solvent system // *Engineering Physics J.*, 2006, v. 79, iss. 1, pp. 139–147.
- [158] Вшивков С.А., Адамова Л.В., Русинова Е.В., Сафронов А.П., Древалъ В.Е., Галяс А.Г. Термодинамика жидкокристаллических растворов гидроксипропилцеллюлозы в воде и этаноле // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*, 2007. Т. 49. № 5. С. 867–873.
Vshivkov S.A., Adamova L.V., Rusinova E.V., Safronov A.P., Dreval' V.E., Galyas A.G. *Termodinamika zhidkokristallicheskih rastvorov gidroksipropiltsellyulozy v vode i etanole* [Thermodynamics of liquid-crystalline solutions of hydroxypropyl cellulose in water and ethanol]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A* [High-molecular compounds. Series A], 2007, v. 49, no. 5, pp. 867–873.
- [159] Вшивков С.А., Русинова Е.В. Фазовые жидкокристаллические переходы в деформируемых системах гидроксипропилцеллюлоза этанол и гидроксипропилцеллюлоза уксусная кислота // *Высокомолекулярные соединения. Сер. Б*, 2007. Т. 49. № 9. С. 1741–1744
Vshivkov S.A., Rusinova E.V. *Fazovye zhidkokristallicheskie perekhody v deformiruemyykh sistemakh gidroksipropiltsellyuloza etanol i gidroksipropiltsellyuloza uksusnaya kislota* [Phase liquid crystal transitions in deformable systems hydroxypropyl cellulose ethanol and hydroxypropyl cellulose acetic acid]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya B* [High Molecular Compounds. Series B], 2007, v. 49, no. 9, pp. 1741–1744
- [160] Кондрашина О.В., Артюхов В.Г., Сливкин А.И. Некоторые физико-химические свойства холестерической жидкокристаллической дисперсии, влияющие на ее способность к образованию металлорганических наночастиц // *Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Химия. Биология. Фармация*, 2012. № 1. С. 146–148.
Kondrashina O.V., Artyukhov V.G., Slivkin A.I. *Nekotorye fiziko-khimicheskie svoystva kholstericheskoy zhidkokristallicheskoj dispersii, vliyayushchie na ee sposobnost' k obrazovaniyu metallorganicheskikh nanochastits* [Some physical and chemical properties of cholesteric liquid crystal dispersion affecting its ability to form organometallic nanoparticles]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya* [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy], 2012, no. 1, pp. 146–148.
- [161] Ханчич О.А., Кузнецова С.А. Температурно-концентрационные условия образования жидкокристаллической фазы в простых и сложных эфирах

- целлюлозы в трифторуксусной кислоте // Высокомолекулярные соединения. Сер. А, 2011. Т. 53. № 4. С. 547–552.
- Khanchich O.A., Kuznetsova S.A. *Temperaturno-kontsentratsionnye usloviya obrazovaniya zhidkokristallicheskoj fazy v prostykh i slozhnykh efrakh tsellyulozy v trifloruksusnoj kislyote* [Temperature-concentration conditions for the formation of a liquid-crystalline phase in cellulose ethers and esters in trifluoroacetic acid]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A* [High Molecular Compounds. Series A, 2011], v. 53, no. 4, pp. 547–552.
- [162] Вшивков С.А., Русина Е.В. Влияние природы компонентов на жидкокристаллические переходы в растворах эфиров целлюлозы // Высокомолекулярные соединения. Сер. А, 2018. Т. 60. № 1. С. 66–75.
- Vshivkov S.A., Rusina E.V. *Vliyanie prirody komponentov na zhidkokristallicheskie perekhody v rastvorakh efirov tsellyulozy* [Influence of the nature of components on liquid-crystal transitions in solutions of cellulose ethers]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A* [High Molecular Compounds. Series A], 2018, v. 60, no. 1, pp. 66–75.
- [163] Шиповская А.Б., Тимофеева Г.Н. Жидкокристаллическое состояние ацетатов целлюлозы: от прошлого к настоящему. Опыт саратовской школы // Химические волокна, 2006. № 1. С. 13–17.
- Shipovskaya A.B., Timofeeva G.N. *Zhidkokristallichesкое sostoyanie atsetatov tsellyulozy: ot proshlogo k nastoyashchemu. Opyt saratovskoy shkoly* [Liquid-crystal state of cellulose acetates: from the past to the present. The experience of the Saratov school]. *Khimicheskie volokna* [Chemical fibers], 2006, no. 1, pp. 13–17.
- [164] Куличихин В.Г., Голова Л.К. Жидкокристаллическое состояние целлюлозы и ее производных // Химия древесины, 1985. № 3. С. 9–27.
- Kulichikhin V.G., Golova L.K. *Zhidkokristallichesкое sostoyanie tsellyulozy i ee proizvodnykh* [Liquid crystal state of cellulose and its derivatives]. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of wood], 1985, no. 3, pp. 9–27.
- [165] Kalashnik A.T., Papkov S.P., Rudinskaya G.V., Milkova L.P. Liquid crystal state of cellulose // *Polymer Science USSR*, 1991, v. 33, iss. 1, pp. 107–112. DOI: 10.1016/0032-3950(91)90277-W
- [166] Konovalova L.Y., Negodyaeva G.S., Kalashnik A.T., Rudinskaya G.V., Mil'kova L.P., Pozhalkin N.S., Iovleva M. Sorption studies of hydrated cellulose fibre having a liquid-crystal structure // *Fibre Chemistry*, 1994, v. 26, iss. 3, pp. 170–173. DOI: 10.1007/BF00545628
- [167] Крестов Г.А., Мясоедова В.В., Алексеева О.В., Белов С.Ю. Жидкокристаллическое состояние целлюлозы и ее производных в неводных растворах // Докл. Академии наук СССР, 1987. Т. 293. № 1. С. 174–176.
- Krestov G.A., Myasoedova V.V., Alekseeva O.V., Belov S.Yu. *Zhidkokristallichesкое sostoyanie tsellyulozy i ee proizvodnykh v nevodnykh rastvorakh* [Liquid-crystal state of cellulose and its derivatives in non-aqueous solutions]. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1987, v. 293, no. 1, pp. 174–176.
- [168] Шиповская А.Б., Казмичева О.Ф., Тимофеева Г.Н. Оптическая активность системы ацетат целлюлозы-мезофазогенный растворитель при формировании лиотропной жидкокристаллической фазы // Биофизика, 2006. Т. 51. № 2. С. 256–266.
- Shipovskaya A.B., Kazmicheva O.F., Timofeeva G.N. *Opticheskaya aktivnost' sistemy atsetat tsellyulozy-mezofazogennyi rastvoritel' pri formirovani liotropnoy zhidkokristallicheskoj fazy* [Optical activity of the cellulose acetate-mesophaseogenic solvent system during the formation of a lyotropic liquid crystal phase]. *Biofizika* [Biophysics], 2006, v. 51, no. 2, pp. 256–266.
- [169] Гриншпан Д.Д., Третьякова С.М., Цыганкова Н.Г., Макаревич С.Е., Савицкая Т.А. Фазовые равновесия в системах Na-соль сульфата ацетата целлюлозы-вода-спирт и критерий реализации жидкокристаллического состояния // Журнал физической химии, 2005. Т. 79. № 11. С. 1948–1954.
- Grinshpan D.D., Tretyakova S.M., Tsygankova N.G., Makarevich S.E., Savitskaya T.A. *Fazovye равновесия в системах Na-соль сульфата ацетата целлюлозы-вода-спирт и критерий реализации жидкокристаллического состояния* // *Журнал физической химии*, 2005, T. 79, № 11, C. 1948–1954.
- [170] Шиповская А.Б., Тимофеева Г.Н., Гегель Н.О., Щеголев С.Ю. Фазовое разделение и жидкокристаллическое состояние триацетата целлюлозы в нитрометане // Инженерно-физический журнал, 2008. Т. 81. № 6. С. 1178–1187.
- Shipovskaya A.B., Timofeeva G.N., Gegel' N.O., Shchegolev S.Yu. *Fazovoe razdelenie i zhidkokristallichesкое sostoyanie triatsetata tsellyulozy v nitrometane* [Phase separation and liquid crystal state of cellulose triacetate in nitromethane]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering Physics Journal], 2008, v. 6, pp. 1178–1187.
- [171] Садовой А.В., Шиповская А.Б., Названов В.Ф. Самоорганизация и электрооптические характеристики композита нематический жидкий кристалл-диацетат целлюлозы // Письма в Журнал технической физики, 2008. Т. 34. № 23. С. 15–20.
- Sadovoy A.V., Shipovskaya A.B., Nazvanov V.F. *Samoorganizatsiya i elektroopticheskie kharakteristiki kompozita nematicheskij zhidkiy kristall-diatsetat tsellyulozy* [Self-organization and electro-optical characteristics of the composite nematic liquid crystal-cellulose diacetate]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Letters to the Journal of Technical Physics], 2008, v. 34, no. 23, pp. 15–20.
- [172] Mewis J., Moldenaers P. Rheology of polymeric liquid crystals // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 1996, v. 1, iss. 4, pp. 466–471.
- [173] Semsilar M., Tom J., Ladmiral V., Perrier S. Supramolecular hybrids of cellulose and synthetic polymers // *Polymer Chemistry*, 2012, v. 3, iss. 12, pp. 3266–3275. DOI: 10.1039/C2PY20385E
- [174] Lehn J.M. *Chemistry: Concepts and Perspectives* // Weinheim, Wiley WCH, 1995, pp. 281. DOI: 10.1002/3527607439
- [175] Куличихин В.Г., Макарова В.В., Толстых М.Ю., Васильев Г.Б. Фазовые равновесия в растворах производных целлюлозы и реологические свойства растворов в разных фазовых состояниях // Высокомолекулярные соединения. Сер. А, 2010. Т. 52. № 11. С. 2001–2013.
- Kulichikhin V.G., Makarova V.V., Tolstykh M.Yu., Vasil'ev G.B. *Fazovye равновесия в растворах производных целлюлозы и реологические свойства растворов в разных фазовых состояниях* // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*, 2010, T. 52, № 11, C. 2001–2013.

- [176] Куличихин В.Г., Макарова В.В., Толстых М.Ю., Picken S.J., Mendes E. Эволюция структуры при течении жидкокристаллических растворов гидрокси-пропилцеллюлозы и нанокмозитов на их основе // Высокомолекулярные соединения. Сер. А, 2011. Т. 53. № 9. С. 1494–1512.
Kulichikhin V.G., Makarova V.V., Tolstykh M.Yu., Picken S.J., Mendes E. *Evolutsiya struktury pri techenii zhidkokristallicheskih rastvorov gidroksipropilsellyulozy i nanokompozitov na ikh osnove* [Structural evolution during the flow of liquid-crystalline solutions of hydroxypropylcellulose and nanocomposites based on them]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A* [High-molecular compounds. Series A], 2011, v. 53, no. 9, pp. 1494–1512.
- [177] Алексеева О.В., Мясоедова В.В., Крестов Г.А. Реологические свойства системы целлюлоза-трифторуксусная кислота-хлороформ в жидкокристаллическом состоянии // Журнал физической химии, 1986. Т. 60. № 10. С. 2441–2445.
Aleksееva O.V., Myasoedova V.V., Krestov G.A. *Reologicheskie svoystva sistemy tsellyuloza-trifloroksusnaya kislota-khloroform v zhidkokristallicheskom sostoyanii* [Rheological properties of the cellulose-trifluoroacetic acid-chloroform system in the liquid crystal state]. *Zhurnal fizicheskoy khimii* [Journal of Physical Chemistry], 1986, v. 60, no. 10, pp. 2441–2445.
- [178] Laszkiewicz B. Liquid crystal phenomena in cellulose-NMMO-H₂O system // *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A. Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2000, v. 353, iss. 1, pp. 127–131. DOI: 10.1080/10587250008025653
- [179] Araki J., Kuga S. Effect of trace electrolyte on liquid crystal type of cellulose microcrystals // *Langmuir*, 2001, v. 17, iss. 15, pp. 4493–4496. DOI: 10.1021/la0102455
- [180] Schroeder M. *Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise*. New York: W.H. Freeman, 1992, 429 p
- [181] Mitchell G.R., Guo W., Davis F.J. Liquid crystal elastomers based upon cellulose derivatives // *Polymer*, 1992, v. 33, iss. 1, pp. 68–74. DOI: 10.1016/0032-3861(92)90561-A
- [182] Bae J.W., Sohn E. H., Kang H. Liquid Crystal Alignment Behavior on Rubbed Films of Cellulose Acetate // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2016, v. 626, iss. 1, pp. 215–221. DOI: 10.1080/15421406.2015.1106886
- [183] Lavrentovich O.D. Prepatterned liquid crystal elastomers as a step toward artificial morphogenesis // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, v. 115, iss. 28, pp. 7171–7173. DOI: 10.1073/pnas.1809083115
- [184] Suto S., Ito R., Karasawa M. Die swell of lyotropic liquid crystal: hydroxypropyl cellulose/water system // *Polymer communications (Guildford)*, 1985, v. 26, iss. 11, pp. 335–336. DOI: 10.1002/app.1989.070370312
- [185] Suto S., Yoshida S. Die swell of liquid crystal-forming solutions of hydroxypropyl cellulose through a long capillary die // *Die Angewandte Makromolekulare Chemie: Applied Macromolecular Chemistry and Physics*, 1995, v. 226, iss. 1, pp. 89–99. DOI: 10.1002/apmc.1995.052260109
- [186] Geng Y., Almeida P.L., Feio G.M., Figueirinhas J.L., Godinho M.H. Water-based cellulose liquid crystal system investigated by rheo-NMR // *Macromolecules*, 2013, v. 46, iss. 11, pp. 4296–4302. DOI: 10.1021/ma400601b
- [187] Echeverria C., Almeida P.L., Feio G., Figueirinhas J.L., Rey A.D., Godinho M.H. Rheo-NMR study of water-based cellulose liquid crystal system at high shear rates // *Polymer*, 2015, v. 65, pp. 18–25. DOI: 10.1016/j.polymer.2015.03.050
- [188] Dong R.Y. NMR of cellulose nanocrystals, mesoporous media, and liquid crystal assemblies // *Liquid Crystals*, 2020, v. 47, iss. 13, pp. 1911–1925. DOI: 10.1080/02678292.2019.1613686
- [189] Rauch E.M., Millonas M.M. The role of trans-membrane signal transduction in Turing-type cellular pattern formation // *J. of theoretical biology*, 2004, v. 226, iss. 4, pp. 401–407. DOI: 10.1016/j.jtbi.2003.09.018
- [190] Fendler J.H. (ed.). *Membrane-mimetic approach to advanced materials*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1994. DOI: 10.1007/BFb0020989
- [191] Tu M., Han W., Zeng R., Best S.M., Cameron R.E. A study of surface morphology and phase separation of polymer/cellulose liquid crystal composite membranes // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2012, v. 407, pp. 126–132. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2012.05.019
- [192] Han W., Tu M., Zeng R., Zhao J., Zhou C. Preparation, characterization and cytocompatibility of polyurethane/cellulose based liquid crystal composite membranes // *Carbohydrate polymers*, 2012, v. 90, iss. 3, pp. 1353–1361. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.07.004
- [193] Hong Y.K., Cho B.H. Membrane from Liquid Crystal Composite of Cellulose Acetate and Poly (4-vinyl pyridine) // *Textile Coloration and Finishing*, 1991, v. 3, iss. 2, pp. 43–48.
- [194] Chen L., Li X.G., Wang N.C. Structure and oxygen permselectivity of ethyl cellulose/liquid crystal composite membranes // *Polymeric Materials Science & Engineering, (Chinese)*, 1993, v. 9, pp. 103.
- [195] Dinarvand R., Khodaverdi E., Atyabi F., Erfan M. Thermoresponsive drug delivery using liquid crystal-embedded cellulose nitrate membranes // *Drug Delivery*, 2006, v. 13, iss. 5, pp. 345–350. DOI: 10.1080/10717540500394729
- [196] Atyabi F., Khodaverdi E., Dinarvand R. Temperature modulated drug permeation through liquid crystal embedded cellulose membranes // *International J. of Pharmaceutics*, 2007, v. 339, iss. 1–2, pp. 213–221. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2007.03.004
- [197] Sakaguchi H., Iida T., Saito S., Fukui Y. Color responses of cholesteric liquid-crystal ethyl cellulose composite membranes exposed to fatty-acids and amines // *Chemical Senses*, 1984, v. 9, iss. 1, pp. 82–82.
- [198] Prigogine I. *From being to becoming: time and complexity in the physical sciences*. San Francisco, Freeman and Company, 1981, p. 272.
- [199] Zhang Y., Wan X., Mo M., Li D. Preparation of cellulose nanocrystal film and cholesteric liquid crystal pattern // *J. of Forestry Engineering*, 2017, v. 2, iss. 4, pp. 103–108.
- [200] Li X.G., Huang M.R., Hu L., Lin G., Yang P.C. Cellulose derivative and liquid crystal blend membranes for oxygen enrichment // *European Polymer J.*, 1999, v. 35, iss. 1, pp. 157–166. DOI: 10.1016/S0014-3057(98)00088-3
- [201] Zhao J.P., Zeng R., Zhao J.H., Tu M., Wu H., Zha Z., Zhang J. Study on the blood anticoagulation of heparin-functionalized hydroxypropyl cellulose liquid crystal // *Gongneng Cailiao (J. of Functional Materials)*, 2014, v. 45, iss. 8, pp. 08092–08096. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2014.08.020
- [202] Huang Y., Luo X., Ma D. Effect of the Molecular Weight of Polycaprolactone on the Lyotropic Liquid Crystal Textures of Polycaprolactone / Ethyl Cellulose Blends // *J. of Functional Polymers*, 2001, v. 14, iss. 1, pp. 49–52.

- [203] Gong L., Zeng R., Ye J.Y., Tu M., Zhao J.H., Zhou C.R. Synthesis and characterization of hydroxypropyl cellulose propionate (PPC) liquid crystal and protein adsorption of PPC/PVC blend films // *Gongneng Cailiao* (J. of Functional Materials), 2010, v. 8, pp. 1398–1401.
- [204] Eguchi N., Kawabata K., Goto H. Synthesis of electro-optically active polymer composite of poly [2, 2'-bis (3, 4-ethylenedioxythiophene)-alt-fluorene]/hydroxypropyl cellulose showing liquid crystal structure // *Express Polymer Letters*, 2017, v. 11, iss. 10, pp. 846–851 DOI: 10.3144/expresspolymlett.2017.80
- [205] Vshivkov S.A., Rusinova E.V. Liquid crystal phase transitions and rheological properties of cellulose ethers // *Russian J. of Applied Chemistry*, 2011, v. 84, iss. 10, pp. 1830–1835. DOI: 10.1134/S1070427211100260
- [206] Shipovskaya A.B., Timofeeva G.N., Gegel N.O., Shchegolev S.Y. Phase separation and liquid-crystal state of cellulose triacetate in nitromethane // *J. of Engineering Physics and Thermophysics*, 2008, v. 81, iss. 6, pp. 1222–1231. DOI: 10.1007/s10891-009-0141-9
- [207] Yim C.T., Gilson D.F.R., Kondo T., Gray D.G. Order parameters and side-chain conformation in ethyl cellulose/chloroform liquid crystal phases // *Macromolecules*, 1992, v. 25, iss. 13, pp. 3377–3380. DOI: 10.1021/ma00039a010
- [208] Lirova B.I., Lyutikova E.A. Formation of the liquid crystal state of cellulose diacetate in nitromethane vapor: A fourier IR study // *Russian J. of Applied Chemistry*, 2012, v. 85, iss. 10, pp. 1617–1621. DOI: 10.1134/S1070427212100242
- [209] Honorato-Rios C., Kuhnhold A., Bruckner J.R., Dannert R., Schilling T., Lagerwall J.P. Equilibrium liquid crystal phase diagrams and detection of kinetic arrest in cellulose nanocrystal suspensions // *Frontiers in Materials*, 2016, pp. 21. DOI: 10.3389/fmats.2016.00021
- [210] Rosantsev E.G., Khanchich O.A., Loshadkin D.V. Fractal Geometry of Polymeric Liquid-Crystal System Formation in Cellulose Derivatives // *Russian Polymer News*, 2001, v. 6, pp. 33–37.
- [211] Khanchich O.A., Loshadkin D.V. Liquid-Crystal Phase Formation in Concentrated Cellulose Solutions // *Russian Polymer News*, 2001, v. 6, pp. 8–12.
- [212] Liu D., Li J., Sun F., Xiao R., Guo Y., Song J. Liquid crystal microphase separation of cellulose nanocrystals in wet-spun PVA composite fibers // *RSC Advances*, 2014, v. 4, iss. 58, pp. 30784–30789. DOI: 10.1039/C4RA04063E
- [213] Reis D., Vian B., Chanzy H., Roland J.C. Liquid crystal-type assembly of native cellulose-glucuronoxylans extracted from plant cell wall // *Biology of the Cell*, 1991, v. 73, iss. 2–3, pp. 173–178. DOI: 10.1016/0248-4900(91)90100-2
- [214] Sadovoy A.V., Shipovskaya A.B., Nazvanov V.F. Self-organization and electrooptical characteristics of a nematic liquid crystal-cellulose diacetate composite // *Technical Physics Letters*, 2008, v. 34, iss. 12, pp. 1002–1004. DOI: 10.1134/S1063785008120031
- [215] Sadovoy A.V., Shipovskaya A.B. Transmission and small-angle scattering of light by nematic liquid crystal-cellulose diacetate composite with self-organized structure // *Technical Physics Letters*, 2010, v. 36, iss. 12, pp. 1150–1153. DOI: 10.1134/S1063785010120254
- [216] Lagerwall J.P., Schütz C., Salajkova M., Noh J., Hyun Park J., Scalia G., Bergström L. Cellulose nanocrystal-based materials: from liquid crystal self-assembly and glass formation to multifunctional thin films // *NPG Asia Materials*, 2014, v. 6, iss. 1, p. 80. DOI: 10.1038/am.2013.69
- [217] Han Y., Bizmark N., Abukhdeir N.M., Ioannidis M.A. Dynamics of ethyl cellulose nanoparticle self-assembly at the interface of a nematic liquid crystal droplet // *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2017, v. 19, iss. 36, pp. 24955–24960. DOI: 10.1039/C7CP04421F
- [218] Lochhead R.Y., Welch C.F. Effect of hydrophobically-modified hydroxy ethyl cellulose on the phase morphology and rheology of a model surfactant mesophase system in the liquid crystal regime // *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 2001, v. 222, pp. U377
- [219] Matsumori M., Takahashi A., Tomioka Y., Hikima T., Takata M., Kajitani T., Fukushima T. Photoalignment of an azobenzene-based chromonic liquid crystal dispersed in triacetyl cellulose: single-layer alignment films with an exceptionally high order parameter // *ACS applied materials & interfaces*, 2015, v. 7, iss. 21, pp. 11074–11078. DOI: 10.1021/acsami.5b02577
- [220] Song W., Liu D., Prempeh N., Song R. Fiber alignment and liquid crystal orientation of cellulose nanocrystals in the electrospun nanofibrous mats // *Biomacromolecules*, 2017, v. 18, iss. 10, pp. 3273–3279. DOI: 10.1021/acs.biomac.7b00927
- [221] Shipovskaya A.B., Gegel N.O., Timofeeva G.N. Orientation processes in cellulose acetate under the action of dimethyl sulfoxide vapor // *Russian J. of Applied Chemistry*, 2008, v. 81, iss. 6, pp. 1052–1056. DOI: 10.1134/S1070427208060256
- [222] Gradov O.V., Gradova M.A. Microwave-Induced Self-Organization of Liophilic Colloids During Enhanced Hydrolytic Polymerization // *2020 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). IEEE*, 2020, pp. 932–936. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9242115
- [223] Praisner T.J., Sabatino D.R., Smith C.R. Simultaneously combined liquid crystal surface heat transfer and PIV flow-field measurements // *Experiments in Fluids*, 2001, v. 30, iss. 1, pp. 1–10. DOI: 10.1007/s003480000136
- [224] Efstratiou M., Christy J., Sefiane K. Crystallization-driven flows within evaporating aqueous saline droplets // *Langmuir*, 2020, v. 36, iss. 18, pp. 4995–5002. DOI: 10.1021/acs.langmuir.0c00576
- [225] Facchine E., Jin S., Spontak R., Rojas O., Khan S., Team S. K. Liquid crystal ordering transition and colloidal interactions of cellulose nanocrystals (CNCs) // *APS March Meeting Abstracts*, 2018, v. 2018, pp. E57.006.
- [226] Xu Y., Atrens A., Stokes J.R. A review of nanocrystalline cellulose suspensions: Rheology, liquid crystal ordering and colloidal phase behaviour // *Advances in Colloid and Interface Science*, 2020, v. 275, p. 102076. DOI: 10.1016/j.cis.2019.102076
- [227] Wissler J.H. Bioreactors with laminar and defined gradient hydrodynamics: hydraulic culture of cells for assessment of effectors controlling regenerative tissue morphogenesis in wound healing // *Protides of the Biological Fluids. Elsevier*, 1985, v. 33, pp. 643–650. DOI: 10.1016/B978-0-08-033215-4.50158-8
- [228] Bolkhovitinov A.S. Hydrodynamic Engineering Approaches for Modeling of the Surface Cell Morphogenesis as Applications of Rosen's Optimality Theory // *J. of Medical and Bioengineering*, 2013, v. 2, iss. 4, pp. 279–289. DOI: 10.12720/jomb.2.4.279-289
- [229] Diewald U., Preusser T., Rumpf M. Anisotropic diffusion in vector field visualization on euclidean domains and surfaces // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2000, v. 6, iss. 2, pp. 139–149. DOI: 10.1109/2945.856995

- [230] Gradov O.V., Orehov T.K. Computer-assisted SPIM-like methods (SPIM, mSPIM, MuViSPIM & PIV/LDV/LDA/LDF based on SPIM-like setups) as novel tools for dynamic analysis of supercritical fluid fluxes and oriented complex fluids with soft matter structures // *Computational Nanotechnology*, 2018, iss. 4, pp. 17–24.
- [231] Filip D., Costa I., Figueirinhas J.L., Godinho M.H. Strain-induced matrix and droplets anisotropic deformation in liquid crystalline cellulose dispersed liquid crystal films // *Composite Interfaces*, 2006, v. 13, iss. 4–6, pp. 477–486. DOI: 10.1163/156855406777408539
- [232] Lista M., Orentas E., Areephong J., Charbonnaz P., Wilson A., Zhao Y., Matile S. Self-organizing surface-initiated polymerization, templated self-sorting and templated stack exchange: synthetic methods to build complex systems // *Organic & Biomolecular Chemistry*, 2013, v. 11, iss. 11, pp. 1754–1765. DOI: 10.1039/C3OB27303B
- [233] Perekrestov V.I., Davydenko T.O. Role of interdependence dissipative and conservative self-organization in obtaining low-dimensional 3D-systems // 22nd International Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology», 10–14 Sept. 2012. IEEE, 2012, pp. 667–668.
- [234] Giese M., Blusch L.K., Khan M.K., MacLachlan M.J. Functional materials from cellulose-derived liquid-crystal templates // *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, v. 54, iss. 10, pp. 2888–2910. DOI: 10.1002/anie.201407141
- [235] Risteen B.E., Blake A., McBride M.A., Rosu C., Park J.O., Srinivasarao M., Reichmanis E. Enhanced alignment of water-soluble polythiophene using cellulose nanocrystals as a liquid crystal template // *Biomacromolecules*, 2017, v. 18, iss. 5, pp. 1556–1562. DOI: 10.1021/acs.biomac.7b00121
- [236] Kashyap S., Saxena S.K., Gupta S.J., Mahajan J. Thermal behavior of nano cellulose doped polymer dispersed liquid crystal (PDLC) // *AIP Conference Proceedings*, 2016, v. 1728, iss. 1, p. 020632. DOI: 10.1063/1.4946683
- [237] Ishizaki T., Uenuma S., Furumi S. Thermotropic properties of cholesteric liquid crystal from hydroxypropyl cellulose mixed esters // *Kobunshi Ronbunshu*, 2015, v. 72, iss. 12, pp. 737–745. DOI: 10.1295/koron.2015-0029
- [238] Qin W., Li Z., Li J., Zhang L., Liu R., Liu H. Synthesis and characterization of azobenzene hydroxypropyl cellulose with photochromic and thermotropic liquid crystal properties // *Cellulose*, 2015, v. 22, iss. 1, pp. 203–214. DOI: 10.1007/s10570-014-0479-9
- [239] Huang X., Wang N., Wang W., Zhang H., Mo Z. Studies on the Blends of Thermotropic Liquid Crystal Polymer Ethyl Cellulose and Nylon-1010 // *Acta Polymerica Sinica*, 1995, pp. 709–712.
- [240] Ruan W.H., Shen J.W., Li B.Q. Studies on nucleation of cellulose aromatic ester thermotropic liquid crystal on polyethylene terephthalate // *Chemical J. of Chinese Universities – Chinese*, 1998, v. 19, iss. 3, pp. 469–471.
- [241] Roşu C., Mănăilă-Maximean D., Godinho H.M., Almeida L.P. Thermally stimulated depolarization currents and optical transmission measurements on liquid crystal/cellulose derivative composite devices // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2002, v. 391, pp. 1–11. DOI: 10.1080/10587250216170
- [242] Lin S.Y., Chen K.S., Lin Y.Y. Thermo-responsive function of liquid crystal-embedded cellulose nitrate membrane influenced by the pore size of membrane // *Pharmaceutical and Pharmacological Letters*, 1995, v. 5, iss. 4, pp. 159–161.
- [243] Yousefi A., Khodaverdi E., Atyabi F., Dinarvand R. Thermosensitive drug permeation through liquid crystal-embedded cellulose nitrate membranes // *PDA J. of Pharmaceutical Science and Technology*, 2010, v. 64, iss. 1, pp. 54–62.
- [244] Wang F., Han L., Wang H., Ma C., Liu L., Wang J., Li J., Huang Z. Study on preparation and thermal conductivity of liquid crystal epoxy resin filled with nano-cellulose / BNNSs // *Proc. 2nd International Conf. on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*. Guangzhou, China, 2019, pp. 321–324. DOI: 10.1109/ICEMPE.2019.8727321
- [245] Dong Y.M., Zhao Y.Q., Zeng E.M., Yang L.L., Ge Q., Hu X.L. A Dendronized Cellulose Derivative and Its Thermotropic Liquid Crystal and Lyotropic Cholesteric Liquid Crystal Behaviors // *Advanced Materials Research*, 2011, v. 239, pp. 2620–2623. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.239-242.2620
- [246] Violi A., Izvekov S., Voth G.A. Carbonaceous nanoparticle self-assembly in combustion // *Proc. 4th Joint Meeting of the US Sections of the Combustion Institute*. Pittsburg, USA, 2005. URL: <https://cutt.us/ECfOD>
- [247] Saha B., Shindo S., Irle S., Morokuma K. Quantum chemical molecular dynamics simulations of dynamic fullerene self-assembly in benzene combustion // *ACS Nano*, 2009, v. 3, iss. 8, pp. 2241–2257. DOI: 10.1021/nn900494s
- [248] Thiruvengadathan R., Staley C., Geeson J.M., Chung S., Raymond K.E., Gangopadhyay K., Gangopadhyay S. Enhanced Combustion Characteristics of Bismuth Trioxide-Aluminum Nanocomposites Prepared through Graphene Oxide Directed Self-Assembly // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, v. 40, iss. 5, pp. 729–734. DOI: 10.1002/prop.201400238
- [249] Malchi J.Y. Combustion and self-assembly of nanoenergetic materials. PhD Thesis. The Pennsylvania State University, 2008.
- [250] Francis W. Coal, its formation and composition. New York: St. Martin's Press, 1954, p. 567.
- [251] Linlin D., Wei L., Jun C., Ban L., Shouxin L. Formation, tuning and application of chiral nematic liquid crystal phase based on nanocrystalline cellulose // *Progress in Chemistry*, 2015, v. 27, iss. 7, pp. 861–869. DOI: 10.7536/PC141239
- [252] Rimmer S.M., Yoksoulian L.E., Hower J.C. Anatomy of an intruded coal, I: Effect of contact metamorphism on whole-coal geochemistry, Springfield (No. 5) (Pennsylvanian) coal, Illinois Basin // *International J. of Coal Geology*, 2009, v. 79, iss. 3, pp. 74–82. DOI: 10.1016/j.coal.2009.06.002
- [253] Yoksoulian L.E., Rimmer S.M., Rowe H.D. Anatomy of an intruded coal, II: effect of contact metamorphism on organic $\delta^{13}C$ and implications for the release of thermogenic methane, Springfield (No. 5) Coal, Illinois Basin // *International J. of Coal Geology*, 2016, v. 158, pp. 129–136. DOI: 10.1016/j.coal.2016.03.009
- [254] Xiaoming L.I., Daiyong C.A.O., Demin L.I.U. Structure of different types of coal metamorphism by HTEM // *Mining Science and Technology (China)*, 2010, v. 20, iss. 6, pp. 835–838. DOI: 10.1016/S1674-5264(09)60291-X
- [255] Pan J., Lv M., Bai H., Hou Q., Li M., Wang Z. Effects of metamorphism and deformation on the coal macromolecular structure by laser Raman spectroscopy // *Energy & Fuels*, 2017, v. 31, iss. 2, pp. 1136–1146. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b02176
- [256] Hower J.C., Davis A. Application of vitrinite reflectance anisotropy in the evaluation of coal metamorphism // *Geological Society of America Bulletin*, 1981, v. 92, iss. 6, pp. 350–366. DOI: 10.1130/SPE153-p95

- [257] Thompson R.R., Benedict L.G. Vitrinite reflectance as an indicator of coal metamorphism for cokemaking // *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.*, 1974, v. 153, pp. 95–108.
- [258] Sen J. Fine structure in degraded, ancient and buried wood, and other fossilized plant derivatives // *The Botanical Review*, 1956, v. 22, iss. 6, pp. 343–374. DOI: 10.1007/BF02860822
- [259] Rials T.G., Glasser W.G. Multiphase materials with lignin: 5. Effect of lignin structure on hydroxypropyl cellulose blend morphology // *Polymer*, 1990, v. 31, iss. 7, pp. 1333–1338. DOI: 10.1016/0032-3861(90)90226-O
- [260] Rials T.G., Glasser W.G. Multiphase materials with lignin. IV. Blends of hydroxypropyl cellulose with lignin // *J. of Applied Polymer science*, 1989, v. 37, iss. 8, pp. 2399–2415. DOI: 10.1002/APP.1989.070370827
- [261] Rials T.G., Glasser W.G. Multiphase materials with lignin. VI. Effect of cellulose derivative structure on blend morphology with lignin // *Wood and fiber science*, 1989, v. 21, iss. 1, pp. 80–90.
- [262] Antoshchenko M., Tarasov V., Zakharova O., Zolotarova O., Petrov A. Analysis of metamorphism and tendency of black coals to spontaneous combustion // *Technology Audit and Production Reserves*, 2019, v. 6, iss. 1, pp. 18–25. DOI: 10.15587/2312-8372.2019.191902
- [263] Kaneko T., Kaneko D., Wang S. High-performance lignin-mimetic polyesters // *Plant Biotechnology*, 2010, v. 27, iss. 3, pp. 243–250. DOI: 10.5511/plantbiotechnology.27.243
- [264] Davé V., Prasad A., Marand H., Glasser W.G. Molecular organization of lignin during carbonization // *Polymer*, 1993, v. 34, iss. 15, pp. 3144–3154. DOI: 10.1016/0032-3861(93)90382-K
- [265] Belousova O.A., Pavlovich O.N. Study of separation of the absorptive fraction of coal tar as polyazeotropic mixture // *Coke and Chemistry*, 2011, v. 54, iss. 8, pp. 297–298. DOI: 10.3103/S1068364X11080035
- [266] Markova K., Vladimirov V., Vuchev V. Autoxidation processes during the genesis of low rank coal lithotypes // *Oxidation Communications*, 2006, v. 29, iss. 2, p. 454.
- [267] Zhu C., Xu F., Chen C. Study on thermal evolution and coal metamorphism of the Longfan coal series in Nanton mining area // *Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao (J. of China University of Mining and Technology)*, 1996, v. 25, iss. 4, pp. 38–44.
- [268] Kanana Y.F., Matveyev A.K. Temperature and geologic time in the regional metamorphism of coal // *International Geology Review*, 1989, v. 31, iss. 3, pp. 258–261. DOI: 10.1080/00206818909465878
- [269] Yang Q., Tang D.Z. Effect of coal metamorphism on methane content and permeability of coal in North China // *Earth Science – J. of China University of Geoscience*, 2000, v. 25, iss. 3, pp. 273–278.
- [270] Dudzińska A., Żyła M., Cygankiewicz J. Influence of The Metamorphism Grade and Porosity of Hard Coal on Sorption and Desorption of Propane (Wpływ Stopnia Metamorfizmu I Porowatości Węgla Kamiennych Na Sorpcję I Desorpcję Propanu) // *Archives of Mining Sciences*, 2013, v. 58, iss. 3, pp. 867–879. DOI: 10.2478/amsc-2013-0060
- [271] Castano J.R. Application of coal petrographic methods in relating level of organic metamorphism to generation of petroleum // *AAPG Bulletin*, 1973, v. 57, iss. 4, pp. 772–773. DOI: 10.1306/819A435E-16C5-11D7-8645000102C1865D
- [272] Hood A., Gutjahr C.C.M., Heacock R.L. Organic metamorphism and the generation of petroleum // *AAPG bulletin*, 1975, v. 59, iss. 6, pp. 986–996. DOI: 10.1306/83D91F06-16C7-11D7-8645000102C1865D
- [273] Sheta S., Afgan M.S., Hou Z., Yao S. C., Zhang L., Li Z., Wang Z. Coal analysis by laser-induced breakdown spectroscopy: a tutorial review // *J. of Analytical Atomic Spectrometry*, 2019, v. 34, iss. 6, pp. 1047–1082. DOI: 10.1039/C9JA00016J
- [274] John R.C. Slag, gas, and deposit thermochemistry in a coal gasifier // *J. of the Electrochemical Society*, 1986, v. 133, iss. 1, p. 205. DOI: 10.1149/1.2108525
- [275] Teng T., Wang J.G., Gao F., Ju Y. Complex thermal coal-gas interactions in heat injection enhanced CBM recovery // *J. of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, v. 34, pp. 1174–1190. DOI: 10.1016/j.jngse.2016.07.074
- [276] Drossel B., Schwabl F. Self organization in a forest-fire model // *Fractals*, 1993, v. 1, iss. 4, pp. 1022–1029. DOI: 10.1142/S0218348X93001118
- [277] Scholl A.E., Taylor A.H. Fire regimes, forest change, and self-organization in an old-growth mixed-conifer forest, Yosemite National Park, USA // *Ecological Applications*, 2010, v. 20, iss. 2, pp. 362–380. DOI: 10.1890/08-2324.1
- [278] Tzamtzis N., Pappa A., Statheropoulos M., Fasseas C. Effects of fire retardants on the pyrolysis of *Pinus halepensis* needles using microscopic techniques // *J. of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2002, v. 63, iss. 1, pp. 147–156. DOI: 10.1016/S0165-2370(01)00147-4
- [279] Liodakis S., Vorisis D., Agiovlasis I.P. Testing the retardancy effect of various inorganic chemicals on smoldering combustion of *Pinus halepensis* needles // *Thermochimica Acta*, 2006, v. 444, iss. 2, pp. 157–165. DOI: 10.1016/j.tca.2006.03.010
- [280] Pappa A., Mikedi K., Tzamtzis N., Statheropoulos M. TG-MS analysis for studying the effects of fire retardants on the pyrolysis of pine-needles and their components // *J. of thermal analysis and calorimetry*, 2006, v. 84, iss. 3, pp. 655–661. DOI: 10.1007/s10973-005-7201-y
- [281] Liodakis S., Katsigiannis G., Lymperopoulou T. Ash properties of *Pinus halepensis* needles treated with diammonium phosphate // *Thermochimica Acta*, 2007, v. 453, iss. 2, pp. 136–146. DOI: 10.1016/j.tca.2006.11.022
- [282] Agueda A., Liodakis S., Pastor E., Planas E. Characterization of the thermal degradation and heat of combustion of *Pinus halepensis* needles treated with ammonium-polyphosphate-based retardants // *J. of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2009, v. 98, iss. 1, pp. 235–243. DOI: 10.1007/s10973-009-0134-0
- [283] Liodakis S., Tsapara V., Agiovlasis I. P., Vorisis D. Thermal analysis of *Pinus sylvestris* L. wood samples treated with a new gel-mineral mixture of short- and long-term fire retardants // *Thermochimica Acta*, 2013, v. 568, pp. 156–160. DOI: 10.1016/j.tca.2013.06.011
- [284] Godinho M.H., Canejo J.P., Feio G., Terentjev E.M. Self-winding of helices in plant tendrils and cellulose liquid crystal fibers // *Soft Matter*, 2010, v. 6, iss. 23, pp. 5965–5970. DOI: 10.1039/C0SM00427H
- [285] Geng Y., Almeida P.L., Fernandes S.N., Cheng C., Palfy-Muhoray P., Godinho M.H. A cellulose liquid crystal motor: a steam engine of the second kind // *Scientific Reports*, 2013, v. 3, iss. 1, pp. 1–5. DOI: 10.1038/srep01028
- [286] Gilman J.W., Kashiwagi T., Lichtenhan J.D. Nanocomposites: a revolutionary new flame retardant approach // *SAMPE Journ.*, 1997, v. 33, pp. 40–46.
- [287] Lipska A.E. Isothermal degradation of untreated and fire retardant treated cellulose AT 350C. Naval Radiological Defense Lab San Francisco Calif, 1967, URL: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0658717>
- [288] Garba B., Eboatu A.N., Atta-Elmannan M.A. Note: Effect of flame retardant treatment on energy of

- pyrolysis/combustion of wood cellulose // *Fire and Materials*, 1994, v. 18, iss. 6, pp. 381–383.
DOI: 10.1002/fam.810180605
- [289] Dollimore D., Hoath J. The fire retardant behavior of various chlorides on cellulose // *J. of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1997, v. 49, iss. 2, pp. 649–656.
DOI: 10.1007/BF01996747
- [290] Rol F., Belgacem N., Meyer V., Petit-Conil M., Bras J. Production of fire-retardant phosphorylated cellulose fibrils by twin-screw extrusion with low energy consumption // *Cellulose*, 2019, v. 26, iss. 9, pp. 5635–5651. DOI: 10.1007/s10570-019-02447-4
- [291] Ghanadpour M. Cellulose-based fire retardant material // *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 2014, v. 247, p. 247.
- [292] Cheng B.W. Study on properties and mechanism of eco-friendly fire-retardant cellulose // *Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology*, 2005, v. 25, iss. 1, pp. 1–3.
- [293] Zheng C., Li D., Ek M. Bio-based fire retardant and its application in cellulose-based thermal insulation materials // *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*. American Chemical Society (ACS), 2018, v. 255, URL: <https://cutt.us/yJXYk>
- [294] Gao M., Yan Y. Q. Fire Retardant Cellulose Characterized by Thermal Degradation Behavior // *Advanced Materials Research*, 2011, v. 197, pp. 631–634.
DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.197-198.631
- [295] Liu A., Berglund L.A. Fire-retardant and ductile clay nanopaper biocomposites based on montmorillonite in matrix of cellulose nanofibers and carboxymethyl cellulose // *European Polymer J.*, 2013, v. 49, iss. 4, pp. 940–949.
- [296] Medina L., Carosio F., Berglund L. Mechanically strong and fire-retardant nanocomposite aerogels based on cellulose nanofibers and montmorillonite clay // *Abstract of Papers of the American Chemical Society*, 2016, v. 252, URL: <https://cutt.us/6WDHN>
- [297] Sahoo P.K., Jena D.K. Synthesis and study of mechanical and fire retardant properties of (carboxymethyl cellulose-g-polyacrylonitrile) / Montmorillonite biodegradable nanocomposite // *J. of Polymer Research*, 2018, v. 25, iss. 12, pp. 1–10. DOI: 10.1007/s10965-018-1659-3
- [298] Castro D.O., Karim Z., Medina L., Häggström J.O., Carosio F., Svedberg A., Berglund L.A. The use of a pilot-scale continuous paper process for fire retardant cellulose-kaolinite nanocomposites // *Composites Science and Technology*, 2018, v. 162, pp. 215–224.
DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.04.032
- [299] Liu P., Dai J., Jia H., Wang S. A Study on the Properties of Nano-SiO₂ / Cellulose Fire-retardant Membranes // *Advanced Textile Technology*, 2010, v. 3, URL: <https://cutt.us/TRdF1>
- [300] Чухров Ф.В. Коллоиды в земной коре. АН СССР, 1955. С. 671.
Chukhrov F.V. *Kolloidy v zemnoy kore* [Colloids in the earth's crust]. AN SSSR, 1955, p. 671.
- [301] Perel'man A.I. *Geochemistry of Epigenesis*. New York: Plenum Press, 1967, p. 266.
DOI: 10.1007/978-1-4684-7520-3
- [302] Rasmussen T.V. Insulation materials of cellulose versus mineral wool, fiberglass or Perlite. Exposures to fibers, dust, endotoxin and fire retardant additives during installation // *Ikke angivet — Institutet för Arbetshygien*, 2003, v. 49, pp. 187–188.
- [303] Xu R., Wang H. Y., Sun R., Lei S. Outline of preparation and fire-retardant properties detection of nanocrystalline cellulose fire-retardant membranes // *Guangzhou Chemical Industry*, 2012, v. 22, pp. 8, 9, 28. URL(1). https://caod.oriprobe.com/articles/31453141/Outline_of_Preparation_and_Fire_retardant_Property.htm; URL(2): <https://caod.oriprobe.com/order.htm?id=31453141>
- [304] Bajwa D.S., Rehovsky C., Shojaeiarani J., Stark N., Bajwa S., Dietsberger M.A. Functionalized cellulose nanocrystals: A potential fire retardant for polymer composites // *Polymers*, 2019, v. 11, iss. 8, pp. 1361. DOI: 10.3390/polym11081361
- [305] Takey E., Taussarova B., Burkitbay A. Fire retardant of cellulose textile materials based on sol-gel composition // *Chemical J. of Kazakhstan*, 2018, v. 63, iss. 3, pp. 163–168.
- [306] Bertelli G., Camino G., Marchetti E., Costa L., Locatelli R. Structural studies on chars from fire retardant intumescent systems // *Die Angewandte Makromolekulare Chemie: Applied Macromolecular Chemistry and Physics*, 1989, v. 169, iss. 1, pp. 137–142. DOI: 10.1002/apmc.1989.051690112
- [307] Sweet M.S., Winandy J.E. Influence of degree of polymerization of cellulose and hemicellulose on strength loss in fire-retardant-treated southern pine, 1999, v. 53, iss. 3, pp. 311–317. DOI: 10.1515/HF.1999.051
- [308] Liodakis S., Tsoukala M. Ash leaching of forest species treated with phosphate fire retardants // *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, v. 199, iss. 1–4, pp. 171–182. DOI: 10.1007/s11270-008-9869-7
- [309] Onofrei M.D., Dobos A.M., Stoica I., Olaru N., Olaru L., Ioan S. Lyotropic liquid crystal phases in cellulose acetate phthalate/hydroxypropyl cellulose blends // *J. of Polymers and the Environment*, 2014, v. 22, iss. 1, pp. 99–111. DOI: 10.1007/s10924-013-0618-7
- [310] Mandekar N., Cayla A., Rault F., Giraud S., Salaün F., Malucelli G., Guan J. P An overview on the use of lignin and its derivatives in fire retardant polymer systems // *Lignin – Trends and Applications*, 2018, v. 9, pp. 207–231. DOI: 10.5772/intechopen.72963
- [311] Saxena N.K., Mathur A., Gupta D.R. Fire Retardant Lignin Based Adhesives for Wood Based Materials // *The Fire Engineer*, 1989, v. 1, pp. 23–26.
- [312] Shukla A., Sharma V., Basak S., Ali S.W. Sodium lignin sulfonate: a bio-macromolecule for making fire retardant cotton fabric // *Cellulose*, 2019, v. 26, iss. 13, pp. 8191–8208. DOI: 10.1007/s10570-019-02668-7
- [313] Mandekar N., Cayla A., Rault F., Giraud S., Salaün F., Guan J. Valorization of industrial lignin as biobased carbon source in fire retardant system for Polyamide 11 blends // *Polymers*, 2019, v. 11, iss. 1, p. 180. DOI: 10.3390/polym11010180
- [314] Mandekar N., Malucelli G., Cayla A., Rault F., Giraud S., Salaün F., Guan J. Fire retardant action of zinc phosphinate and polyamide 11 blend containing lignin as a carbon source // *Polymer Degradation and Stability*, 2018, v. 153, pp. 63–74. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.04.019
- [315] Xing W., Yuan H., Yang H., Song L., Hu Y. Functionalized lignin for halogen-free flame retardant rigid polyurethane foam: preparation, thermal stability, fire performance and mechanical properties // *J. of Polymer Research*, 2013, v. 20, iss. 9, pp. 1–12. DOI: 10.1007/s10965-013-0234-1
- [316] Verdolotti L., Oliviero M., Lavorgna M., Iannace S., Camino G., Vollaro P., Frache A. On revealing the effect of alkaline lignin and ammonium polyphosphate additives on fire retardant properties of sustainable zein-based composites // *Polymer Degradation and Stability*, 2016, v. 134, pp. 115–125. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.10.001

- [317] Zhou S., Tao R., Dai P., Luo Z., He M. Two-step fabrication of lignin-based flame retardant for enhancing the thermal and fire retardancy properties of epoxy resin composites // *Polymer Composites*, 2020, v. 41, iss. 5, pp. 2025–2035. DOI: 10.1002/pc.25517
- [318] Chen S., Lin S., Hu Y., Ma M., Shi Y., Liu J., Wang X. A lignin-based flame retardant for improving fire behavior and biodegradation performance of polybutylene succinate // *Polymers for Advanced Technologies*, 2018, v. 29, iss. 12, pp. 3142–3150. DOI: 10.1002/pat.4436
- [319] Wang R., Xu Z. Pyrolysis characteristics and pyrolysis products separation for recycling organic materials from waste liquid crystal display panels // *J. of Hazardous Materials*, 2016, v. 302, pp. 45–56. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.09.038
- [320] Sudhakara P., Kannan P. Diglycidylphenylphosphate based fire retardant liquid crystalline thermosets // *Polymer Degradation and Stability*, 2009, v. 94, iss. 4, pp. 610–616. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2009.01.005
- [321] Guittard F., de Givenchy E.T., Geribaldi S., Cambon A. Highly fluorinated thermotropic liquid crystals: an update // *J. of Fluorine Chemistry*, 1999, v. 100, iss. 1–2, pp. 85–96. DOI: 10.1016/S0022-1139(99)00205-5
- [322] Jackson Jr.W.J., Kuhfuss H.F. Liquid crystal polymers. I. Preparation and properties of p-hydroxybenzoic acid copolyesters // *J. of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 1996, v. 34, iss. 15, pp. 3031–3046. DOI: 10.1002/pola.1996.863
- [323] Du X. H., Zhao C. S., Wang Y. Z., Zhou Q., Deng Y., Qu M. H., Yang B. Thermal oxidative degradation behaviours of flame-retardant thermotropic liquid crystal copolyester/PET blends // *Materials Chemistry and Physics*, 2006, v. 98, iss. 1, pp. 172–177. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2005.09.013
- [324] Deng Y., Zhao C.S., Wang Y.Z. Effects of phosphorus-containing thermotropic liquid crystal copolyester on pyrolysis of PET and its flame retardant mechanism // *Polymer Degradation and Stability*, 2008, v. 93, iss. 11, pp. 2066–2070. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2008.02.022
- [325] Okamoto M., Ichikawa Y., Inoue T., Yamanaka T. Flame-retardant liquid crystal polyester composition, process for preparation thereof and injection-molded article composed thereof. U.S. Patent, no. 5,085,807, 1992.
- [326] Yabuhara T., Tada U., Kameshima T., Nakano S., Nishioka Y., Takase H. Flame-retardant resin compositions comprising thermoplastic resin, thermotropic liquid crystal polymer, and halogen-free phosphazene compound. U.S. Patent, no. 6,518,336, 2003.
- [327] Jing J., Zhang Y., Fang Z.P., Wang D.Y. Core-shell flame retardant/graphene oxide hybrid: a self-assembly strategy towards reducing fire hazard and improving toughness of polylactic acid // *Composites Science and Technology*, 2018, v. 165, pp. 161–167. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.06.024
- [328] Wang X., Zhou S., Xing W., Yu B., Feng X., Song L., Hu Y. Self-assembly of Ni–Fe layered double hydroxide/graphene hybrids for reducing fire hazard in epoxy composites // *J. of Materials Chemistry A*, 2013, v. 1, iss. 13, pp. 4383–4390. DOI: 10.1039/C3TA00035D
- [329] Zhou K., Gao R., Qian X. Self-assembly of exfoliated molybdenum disulfide (MoS₂) nanosheets and layered double hydroxide (LDH): towards reducing fire hazards of epoxy // *J. of Hazardous Materials*, 2017, v. 338, pp. 343–355. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.05.046
- [330] Wang W., Wang X., Pan Y., Liew K. M., Mohamed O. A., Song L., Hu Y. Synthesis of phosphorylated graphene oxide based multilayer coating: Self-assembly method and application for improving the fire safety of cotton fabrics // *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, v. 56, iss. 23, pp. 6664–6670. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b01293
- [331] Shang S., Ma X., Yuan B., Chen G., Sun Y., Huang C., Chen X. Modification of halloysite nanotubes with supramolecular self-assembly aggregates for reducing smoke release and fire hazard of polypropylene // *Composites Part B: Engineering*, 2019, v. 177, p. 107371. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107371
- [332] Wang W., Kan Y., Liu J., Liew K. M., Liu L., Hu Y. Self-assembly of zinc hydroxystannate on amorphous hydrous TiO₂ solid sphere for enhancing fire safety of epoxy resin // *J. of Hazardous Materials*, 2017, v. 340, pp. 263–271.
- [333] Zhao S., Yin L., Zhou Q., Liu C., Zhou K. In situ self-assembly of zeolitic imidazolate frameworks on the surface of flexible polyurethane foam: towards for highly efficient oil spill cleanup and fire safety // *Applied Surface Science*, 2020, v. 506, p. 144700. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144700
- [334] Huang C., Fang G., Tao Y., Meng X., Lin Y., Bhagia S., Ragauskas A. J. Nacre-inspired hemicelluloses paper with fire retardant and gas barrier properties by self-assembly with bentonite nanosheets // *Carbohydrate Polymers*, 2019, v. 225, p. 115219. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.115219
- [335] Xie H., Lai X., Wang Y., Li H., Zeng X. A green approach to fabricating nacre-inspired nanocoating for super-efficiently fire-safe polymers via one-step self-assembly // *J. of Hazardous Materials*, 2019, v. 365, pp. 125–136. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.10.099
- [336] Aseeva R., Serkov B., Sivenkov A. The Change in Fire Behavior of Different Timber Species After Accelerated Artificial Aging // *Fire Behavior and Fire Protection in Timber Buildings*. Springer, Dordrecht, 2014, pp. 259–279.
- [337] Воронова М.И., Сузов О.В., Рублева Н.В., Кочкина Н.Е., Прусова С.М., Гисматулина Ю.А., Будаева В.В., Захаров А.Г. Свойства нанокристаллической целлюлозы, полученной из целлюлоз однолетних растений // *Жидкие кристаллы и их практическое использование*, 2017. Т. 17. № 4. С. 97–105. Voronova M.I., Surov O.V., Rubleva N.V., Kochkina N.E., Prusova S.M., Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V., Zakharov A.G. *Svoystva nanokristallicheskoj tsellyulozy, poluchennoy iz tsellyuloz odnoletnikh rasteniy* [Properties nanocrystalline cellulose obtained from the celluloses of annual plants]. *Zhidkie kristally i ikh prakticheskoe ispol'zovanie* [Liquid crystals and their practical use], 2017, v. 17, no. 4, pp. 97–105.

Сведения об авторе

Градов Олег Валерьевич — ст. науч. сотр., ФГБУН Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (ФИЦ ХФ РАН), o.v.gradov@gmail.com

Поступила в редакцию 15.08.2022.

Одобрено после рецензирования 03.03.2023.

Принята к публикации 27.03.2023.

EVOLUTIONARY NONLINEAR CHEMISTRY OF SELF-ORGANIZING MESOPHASE (LIQUID CRYSTAL) STRUCTURES OF WOOD: FROM MORPHOGENESIS TO REGULATION OF CARBON FORMATION (REVIEW)

O.V. Gradov

N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics (FRC CP) of the Russian Academy of Sciences, CHEMBIO Department, 4, Kosygina st. 119991, Moscow, Russia

o.v.gradov@gmail.com

This work reconstructs the transformation stages of the mesophase (liquid crystal) wood components from their native state to the processes of coke and coal formation. The phytochemical precursors of mesophases (from lignin and polysaccharides, such as cellulose, to lipids) differing in their cell localization are considered separately. Several criteria are listed by which the similarity between the processes of mesophase formation based on the plant raw materials during carbon formation and self-organization in such systems (including the processes proceeding under the thermal pumping) is observed. The role of membrane and membrane-mimetic interfaces in regulation of the above processes is indicated. The applicability of biogeochemical redox criteria (anaerobic, subaerial, aerobic modes) in the analysis of mesophase diagenesis is considered. It is postulated that, due to the specific regulation/feedback, the above factors can lead to the spatial heterogeneity during coal formation, «autocatalytic» effects and the emergence of redox oscillations, accompanied by the localized changes in the properties of mesophases - from those supporting combustion to practically fire retardant. Based on the dependence of the main properties of the corresponding products on the processes of their production and / or formation, as well as their (geo) chemical environment (which is characteristic of supramolecular and colloidal chemistry), it is possible to formulate supramolecular and colloidal chemical approaches to the interpretation of a number of phenomena and mechanisms of the biogenic fossil mesophase formation, which requires consideration in a separate review paper.

Keywords: mesophase (liquid crystal) wood components; coke formation; coke formation; phytochemical precursors of mesophases; self-organization; membrane-mimetic interfaces; biogenic mesophase structure; geochemical role of mesophases

Suggested citation: Gradov O.V. *Evolutsionnaya nelineynaya khimiya samoorganizuyushchikhsya mezofaznykh (zhidkokristallicheskih) struktur drevesiny: ot morfogeneza do regulyatsii ugleobrazovaniya (obzor)* [Evolutionary nonlinear chemistry of self-organizing mesophase (liquid crystal) structures of wood: from morphogenesis to regulation of carbon formation (review)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 91–127. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-91-127

Acknowledgments

The author thanks senior researcher M.A. Klimovich (IBCP RAS) for support of the discussion on evolutionary and biogeochemical aspects of physics of liquid crystal and mesophase structures. The author thanks engineer E.L. Buryanskaya (NRTU MISA, FRC CP RAS) for her help in preparation of the references. The author is grateful to senior researcher M.A. Gradova (FRC CP RAS) for literary processing of the text.

This work was carried out within the initiative project «Biogeochemical physics».

Author's information

Gradov Oleg Valer'evich — Senior Researcher of the Department of Dynamics of Chemical and Biological Processes of FRC CP RAS, o.v.gradov@gmail.com

Received 15.08.2022.

Approved after review 03.03.2023.

Accepted for publication 27.03.2023.

ДРЕВЕСИНА КАК ХИМИЧЕСКОЕ СЫРЬЕ. ИСТОРИЯ И СОВРЕМЕННОСТЬ. V. ДРЕВЕСНАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗА КАК ПРИРОДНОЕ ПОЛИМЕРНОЕ СЫРЬЕ. ЧАСТЬ I

Г.Н. Кононов, А.Н. Веревкин✉, Ю.В. Сердюкова, Д.Д. Хвалько

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

verevkin@mgul.ac.ru

Рассмотрены вопросы истории развития химической переработки облагороженных технических древесных целлюлоз в целях получения на их основе аддитивных соединений, сложных и простых эфиров. Подробно изложена историческая трансформация технологий получения растительного пергамента, фибры, медно-аммиачного волокна, синтеза нитратов, ксантогенатов и ацетатов целлюлозы, а также методов переработки этих производных в целевые продукты и материалы. Приведено историческое описание получения и перспективы применения простых эфиров целлюлозы и модификации гидратцеллюлозных волокон. Настоящая статья является пятой в цикле «Древесина как химическое сырье. История и современность»; предыдущие части опубликованы в журнале «Лесной вестник» / Forestry Bulletin (2020, т. 24 № 1, № 5; 2021, т. 25 № 3; 2022, т. 26 № 1).

Ключевые слова: аддитивные соединения, нитраты целлюлозы, ксантогенаты целлюлозы, ацетаты целлюлозы, простые эфиры целлюлозы, привитые сополимеры

Ссылка для цитирования: Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Хвалько Д.Д. Древесина как химическое сырье. История и современность. V. Древесная целлюлоза как природное полимерное сырье. Часть I // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 128–142. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-128-142

«Целлюлоза» (лат. *cellule*)
А. Броконно, 1818 г.

Целлюлоза является уникальным природным полимером и самым распространенным органическим соединением на Земле. Ежегодно огромная масса углерода (около 10^{10} т), содержащаяся в атмосфере в виде диоксида углерода, с помощью фотосинтеза превращается в растительные углеводы. Они входят в состав тканей растений (в основном, древесных), преимущественно в виде целлюлозы. Содержание углеводов в древесине превышает 40 %. Мировые запасы древесины оцениваются в $1,5 \cdot 10^{11}$ т, четвертая часть которых находится в России. Ежегодный мировой прирост древесины составляет $3,5 \dots 4,5 \cdot 10^9$ т, а потребление — $1,3 \cdot 10^9$ т. Около 15 % заготавливаемой древесины перерабатывается химическими методами, в основном целлюлозно-бумажной промышленностью, для получения «технических целлюлоз».

Основная масса технических целлюлоз, получаемых делигнификацией древесины, используется в целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП), для производства бумаги и картона. На химическую переработку поступает не более 10 % технических целлюлоз.

Технические целлюлозы для химической переработки, так называемые «растворимые целлюлозы», не должны содержать остаточного лигнина и гемицеллюлоз, поэтому они подвергаются отбелке и облагораживанию.

В технологии химической переработки используются следующие виды таких целлюлоз: предгидролизованная сульфатная беленая; сульфитная беленая облагороженная; сульфитно-щелочная беленая; азотнокислотная беленая. Эти технические целлюлозы используют для получения из них аддитивных соединений (растительного пергамента, фибры, медно-аммиачного волокна), нитроцеллюлозы (пороха, волокна, пластмассы, пленок, лаков), вискозы (волокна, нитей, тканей, пленок), ацетилцеллюлозы (волокна, нитей, пленок) и простых эфиров целлюлозы [1].

Цель работы

Цель работы — рассмотрение методов химической переработки технических древесных целлюлоз для получения на их основе аддитивных соединений, сложных и простых эфиров на историческом фоне развития технологий их производства и переработки в целевые продукты.

Аддитивные соединения и их использование

Первым реагентом для химической переработки целлюлозы послужила серная кислота, использованная в 1818 г. А. Браконно, сначала для обработки древесины белого бука, а затем для льняной целлюлозы [2]. В первом случае исследователь подверг древесную целлюлозу гидролизу с получением глюкозы, во втором — получил сернокислые эфиры целлюлозы. Вследствие высокой степени кристалличности льняной целлюлозы, это, скорее всего, были аддитивные соединения ее с серной кислотой [2].

Аддитивные соединения образуются из целлюлозы при получении некоторых материалов при воздействии на нее ряда реагентов: **растительного пергамента** (H_2SO_4), **фибры** ($ZnCl_2$, $CaCl_2 + Ca(CNS)_2$) и **медно-аммиачного волокна** ($[Cu(NH_3)_4](OH)_2$) [3].

Способ получения растительного пергамента был изобретен французами Ж. Пушаром и Л. Фигюе в 1846 г. В промышленном варианте этот процесс был реализован в 1858 г. в Париже [4]. Он заключался в обработке непроклеенной бумаги-основы из хлопчатобумажной тряпичной полумассы 65%-й серной кислотой с последующей промывкой и сушкой.

В настоящее время в качестве основы для получения растительного пергамента используется непроклеенная бумага из 50...75 % сульфатной беленой и 25...50 % сульфитной облагороженной целлюлозы. Для производства так называемого «**крабового пергамента**», предохраняющего крабовые консервы от соприкосновения с металлом, используется бумага из 100 % сульфатной предгидролизной целлюлозы или даже из хлопчатобумажной массы [5].

Процесс получения растительного пергамента на пергаментной машине заключается в обработке бумаги-основы 62–67%-й серной кислотой при температуре 20...30 °С в течение 2...15 с в пергаментирующей ванне с последующим удалением избытка кислоты на отжимном прессе и пропуском пергаментируемого полотна через кислотные ванны. Кислотные ванны соединены по принципу противотока свинцовыми трубами с последующей отмывкой пергамента от серной кислоты до содержания 0,03 % на каскаде промывных спрысковых аппаратов (рис. 1) [6].

Остатки кислоты нейтрализуются пропуском полотна через содовые ванны с последующей промывкой водой, пластификацией 1–1,5%-м раствором хлорида натрия или глицерина, сушкой на сушильных цилиндрах с переменной температурой ~45–85–100–60 °С, охлаждением на холодном цилиндре и каландрированием.

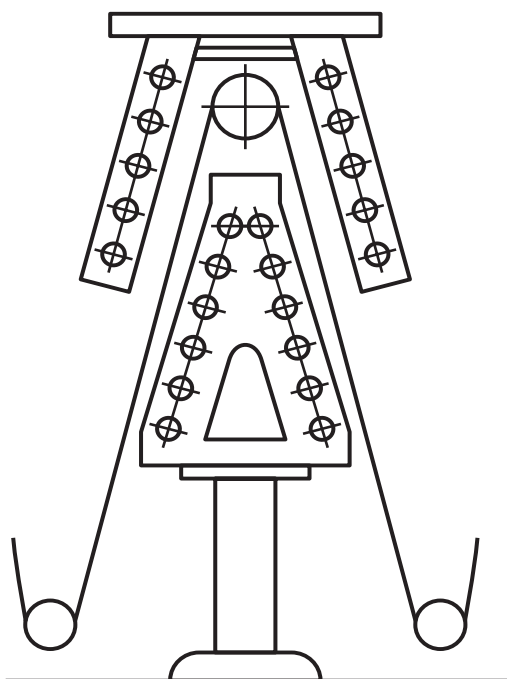


Рис. 1. Схема промывного спрыскового аппарата
Fig. 1. The scheme of the flushing trigger

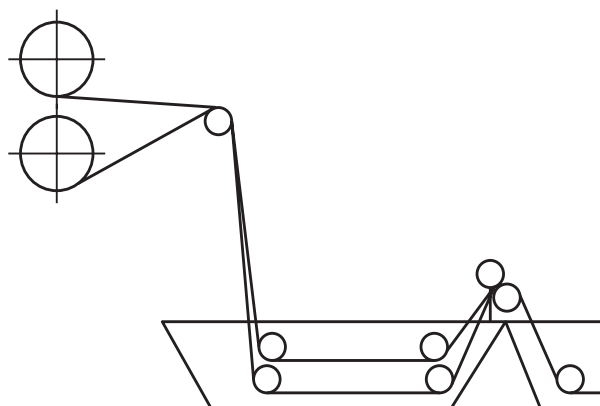


Рис. 2. Схема получения двуслойного пергамента
Fig. 2. The scheme of obtaining a two-layer parchment

В процессе получения растительного пергамента происходит усадка полотна по толщине на 30...40 % и упрочнение в 3–4 раза по сравнению с исходной бумагой [6].

Отечественные машины позволяют изготовлять однослойный пергамент массой от 35 до 140 г/м² со скоростью 100...120 м/мин и производительностью до 825 кг/ч. Изготовление многослойного пергамента массой до 350 г/м² осуществляется на подобных машинах, но с дублированием предварительно пергаментируемых бумажных полотен (рис. 2) [6].

Однослойный растительный пергамент широко используется в качестве упаковочного материала для пищевых продуктов, поскольку он позволяет сохранять их качество, вкус и запах,

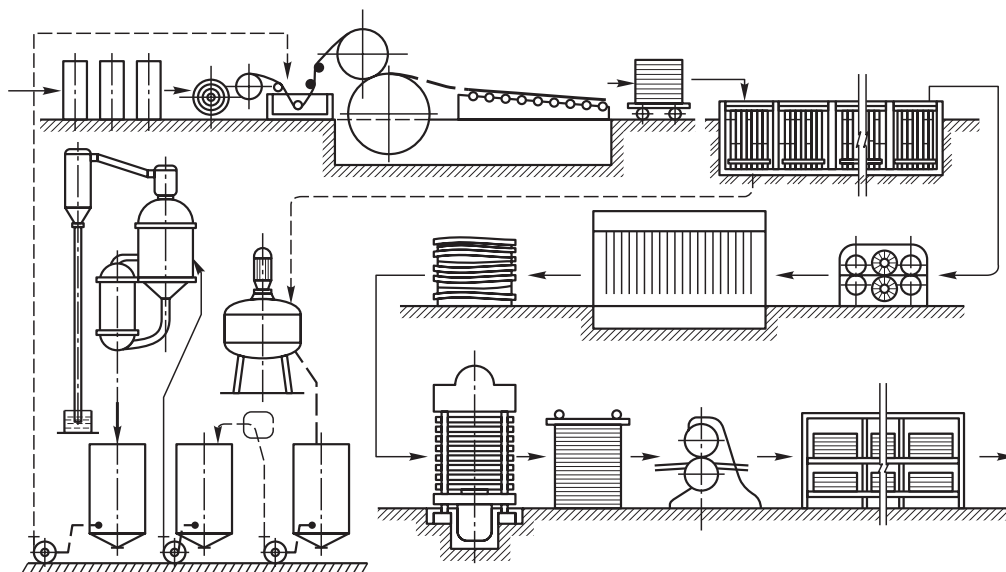


Рис. 3. Схема изготовления листовой фибры периодическим способом
 Fig. 3. The scheme of manufacturing sheet fiber in a periodic way

препятствует высыханию, окислению и пр. Многослойный пергамент используется в машиностроении и приборостроении в качестве диафрагм для осмоса и ультрафильтрации растворов и т. д. [6].

Следующим пластикоподобным материалом на основе целлюлозы является **фибра** (франц. *Fibre* — волокно). Это твердый роговидный монолитный продукт, образованный из большого числа слоев бумаги-основы пергаментированной 69–72%-м раствором хлорида цинка (реже серной кислотой, роданидом и хлоридом кальция).

Производство фибры появилось в 1859 г., когда американец Т. Тейлор предложил делать многослойный растительный материал путем пергаментации бумаги-основы раствором хлорида цинка. Впоследствии были предложены и другие пергаментирующие составы. В технологии получения фибры используется такая же бумага-основа, что и при производстве растительного пергамента. Монолитную листовую фибру выпускают различных марок толщиной от 0,1 до 12 мм с числом слоев пергаментируемых бумаг массой 65...90 г/м² от одного до тридцати и более (рис. 3.).

Большая толщина присуща так называемой **кленной фибре**, изготавливаемой из монолитной фибры склеиванием казеиновым фенолформальдегидным или карбамидоформальдегидным клеем. Однако некоторые предприятия Европы и США выпускают монолитную фибру толщиной до 76 мм.

Кроме листовой фибры из бумаги выпускалась однородная фибра из целлюлозной массы, смешанной с хлоридом цинка методом экструзии в виде трубок диаметром от 3 до 80 мм и стержней различного сечения для электротехнической и радиотехнической промышленности.

К концу 1950-х гг. производство фибры увеличилось в 30 раз. Кроме России ее выпускали еще в девяти странах: США, Англии, Японии, Германии, Франции, Швеции, Италии, Чехословакии и Китае под фирменными названиями «вулканизированная фибра», «Летероид», «Коттонит», «Аргит», «Сполдинг-Армит», «Ледерит», «Ледерштайн», «Хорнекс», «Электрик-Лирлеес» и др.

В середине 1960-х гг. были разработаны непрерывные способы ее производства. Так, в 1967 г. была запущена первая отечественная непрерывно действующая машина «МФН» по производству **рулонной фибры** с установки от 2 до 30 рулонов бумаги-основы, скоростью от 1,5 до 9 м/мин, толщиной вырабатываемой фибры от 0,3 до 2 мм и производительностью до 8 т/сут [6].

К сожалению, бурное развитие пластмасс на основе синтетических полимеров в 1970-е и последние годы привело к резкому сокращению производства фибры, являющейся биоразлагаемым пластиком [6].

Если кратковременное воздействие серной кислоты и хлорида цинка в процессе производства фибры приводят к ограниченному набуханию целлюлозы, то действие на нее куоксама — $[\text{Cu}(\text{NH}_3)(\text{OH})_2]$ (**реактив Швейцера**) ведет к образованию растворимого медно-аммиачного аддитивного соединения целлюлозы, используемого при производстве **медно-аммиачного волокна**.

Медно-аммиачный раствор (дигидроксотетрааммиакат меди) был впервые получен швейцарским химиком и ботаником М.Э. Швейцером в 1857 г., обнаружившим его способность растворять хлопок. В 1882 г. Э. Вестон предложил

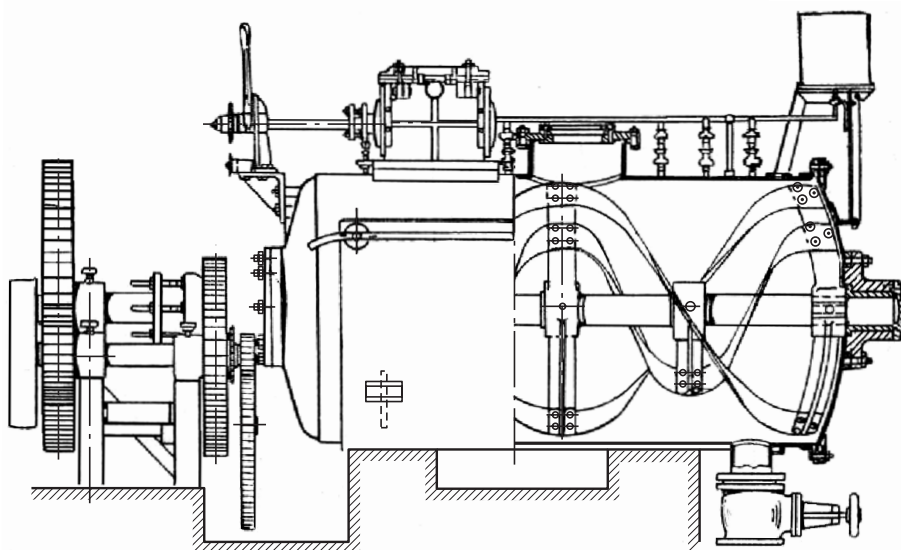


Рис. 4. Аппарат для приготовления медно-аммиачного прядильного раствора
Fig. 4. Apparatus for the preparation of copper-ammonia spinning solution

способ получения из этого раствора мононити для ее использования в производстве ламп накаливания [5]. В 1890 г. Г. Деспайсис взял французский патент на использование медно-аммиачного раствора целлюлозы для изготовления искусственного волокна. Спустя 7 лет, в 1897 г. Г. Паули получил патент на получение текстильной нити из медно-аммиачного раствора и в том же году с участием Э. Фреми и И. Урбана была пущена первая фабрика медно-аммиачного шелка — «**шелка Паули**» в г. Обербрухе (Германия), по методу однованного сернокислотного прядения [7].

В 1901 г. Э. Тиле получил патент на способ формирования медно-аммиачного волокна в воронке с вытягиванием, положивший начало современному двухванному методу прядения водным способом. И в 1904 г. Р. Линкмейгер применил щелочную ванну при прядении вместо водной ванны (щелочной способ) [7, 8].

Промышленное производство медно-аммиачного «**шелка Бемберге**» в США было организовано немецкой фирмой «Bennberg» в 1924–1925 гг., а в России — в 1930-е годы [7, 8].

Современные способы получения медно-аммиачного волокна заключаются в получении в специальном аппарате прядильного раствора путем перемешивания 25%-го водного раствора аммиака, гидроксида меди и влажной целлюлозы в виде рыхлой массы в течение 2–4 ч при температуре не выше 10 °С. Для поддержания температурного режима экзотермического процесса образования аддитивного медно-аммиачного соединения целлюлозы аппарат охлаждается водным раствором поваренной соли (рис. 4.) [7, 8].

После растворения целлюлозы и получения высоковязкого раствора 16...20%-й концентра-

ции, его разбавляют водой в аппаратах объемом 6...8 м³, снабженных интенсивно работающими мешалками в течение 4...6 ч до концентрации 7–8 %.

После усреднения 3–4 партий прядильных растворов в течение 6...8 ч в горизонтальных баках их подвергают фильтрации через плотные никелевые сетки по водному способу или капроновую ткань по щелочному способу. Затем осуществляют деаэрацию растворов под небольшим вакуумом 650...720 мм рт. ст. в течение 20...24 ч и направляют их на мокрое прядение.

В настоящее время используется только двухванный способ мокрого прядения с использованием первой «ванны» с водой и второй — с раствором серной кислоты 1,5–3%-й концентрации. Однованный способ (только с серной кислотой), применяемый ранее, был не экономичен, поэтому в современных производствах не используется.

Формование волокна осуществляется продавливанием отфильтрованного медно-аммиачного раствора целлюлозы через фильеры в первую «ванну» в виде конической воронки с водой, в которой происходит осаждение целлюлозы в струе его раствора с образованием волокна, увлекаемого водой, проходящего через воронку с увеличивающейся скоростью за счет уменьшения площади его сечения. При этом образующееся волокно вытягивается, удлиняясь примерно в 300 раз [9].

Длина воронки для формирования шелковой нити составляет 150 мм с диаметром верхней части 60...70 мм, а для штапельного волокна, соответственно, 500...600 мм при диаметре до 165 мм (рис. 5) [8].

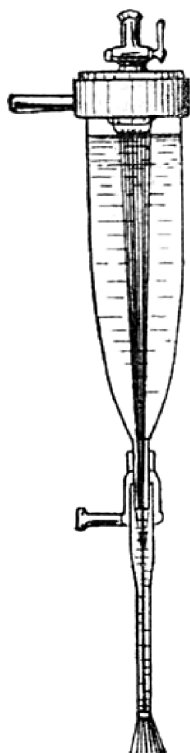


Рис. 5. Воронка для формирования волокна с сильной вытяжкой

Fig. 5. High draw fiber forming funnel

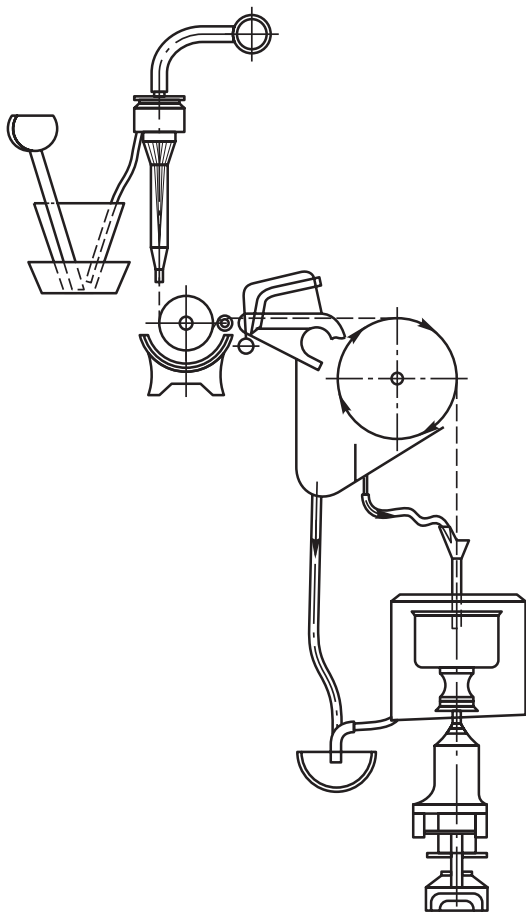


Рис. 6. Схема прядения медно-аммиачного шелка по водному способу

Fig. 6. Scheme of spinning copper-ammonia silk by the water method

Выходящее из воронки волокно поступало во вторую ванну с 1–1,5%-м раствором серной кислоты, в котором происходили разложение аддитивного соединения и образование волокон из регенерированной целлюлозы, формирующихся в центрифуге в шелковую нить, передающуюся на веретено (рис. 6) [9].

Разработке технологий щелочного способа формирования медно-аммиачного волокна, предложенного Р. Линкмейгером, посвящены работы советских инженеров. В 1934–1937 гг. в этом направлении работали М.А. Гартман и В.А. Давыдов. Работы по модернизации технологий были продолжены в 1944–1948 гг. с получением рациональной схемы щелочного прядения и увеличения скорости до 60...100 м/мин по сравнению со скоростью 35...45 м/мин при водном способе [9]. Однако данная технология не применяется у нас в стране вследствие большого расхода реагентов и малой экономичности [8].

Щелочной способ формирования в послевоенное время применялся в Германии и других европейских странах для получения очень тонкой (меньше 10 мкм) медно-аммиачной (гидратцеллюлозной) пленки — «**купрофана**», которая в 2–2,5 раза тоньше целлофана. Процесс протекает с воздушной вытяжкой пленки между литьевой машиной и охладительной ванной с раствором гидроксида натрия, в котором медно-аммиачное соединение целлюлозы превращается в нерастворимое «**соединение Норманна**» — $[(C_6H_8O_5)Cu]Na_2$, разлагаемого серной кислотой в ванной кислочивания с выделением гидратцеллюлозы [10].

Получение нитратов целлюлозы и их использование

Исследование А. Броконно процессов воздействия концентрированных кислот на целлюлозо-содержащие материалы: хлопок, бумагу и древесину, привели его в 1832 г. к получению нитрата целлюлозы путем действия на хлопок концентрированной азотной кислоты. Полученный особый горючий продукт был назван им «**ксилоидином**». Спустя 6 лет, в 1838 г., аналогичные опыты провел Т.-Ж. Пелуз, полностью подтвердив результаты, полученные А. Броконно. А в 1845–1846 гг. К. Шенбейн разработал технический способ нитрования смесью серной и азотной кислот в целях получения основы бездымного пороха «**пироксилина**». Одновременно с К. Шенбейном пироксилин был получен Ф. Беттигером и Ф. Отто, но первые опыты его применения сопровождались взрывами по причине нестабильности продукта и привели к прекращению производства почти повсеместно. Благодаря работам австрийского артиллериста В. Ленка и английского исследователя Ф. Абея в 1865 г. была открыта возмож-

ность стабилизации пироксилина и разработаны промышленные методы производства бездымных порохов. На основе проведенных работ в 1865 г. был создан первый пироксилиновый завод в Англии, затем, в 1877 г., во Франции, в 1881 г. в Германии и в 1891 г. в России. Существенную поддержку производству нитропорохов получило после разработки во Франции Г. Уильямом методики желатинирования нитроцеллюлозы спиртоэфирной смесью.

С 1870 г. начались изыскания мирного применения нитроцеллюлозы, которые привели к разработке методик изготовления из нее нитрошелка, пластических масс, фото- и киноплёнки, лаковых композиций и т. д.

Термин «нитроцеллюлоза» укоренился, поскольку первые исследователи считали ее нитросоединением. Впоследствии А. Бешаном в 1848 г. на основании проведенных экспериментов была предположена эфирная природа этого соединения, окончательно доказанная Й. Эдером лишь в 1880 г.

Были проведены многочисленные исследования и предложены различные теории нитрования целлюлозы. Так, Ч. Кросс, Э. Бивен предполагали образование смешанного серноазотнокислого эфира целлюлозы, переходящего путем омыления в азотный эфир целлюлозы. Г. Уккс и Дж. Белл считали, что сначала образуются серный эфир целлюлозы, который затем разлагается с образованием гидрата целлюлозы, который, в свою очередь, взаимодействует с азотной кислотой с образованием нитрата. Я. Захария и Р. Мюллер полагали, что нитроцеллюлоза является продуктом абсорбции азотной кислоты целлюлозой [11, 12].

Продуктам нитрования целлюлозы, в зависимости от содержания азота, приписывали различные формулы, считая целлюлозу соединением с небольшой молекулярной массой. Например, К. Шенбейн предлагал для нитроцеллюлозы формулу $C_9H_{12}N_4O_{13}$, Т.-Ж. Пелуз — $C_{23}H_{34}O_{17}(N_2O_5)_6$, а Й. Эдер, исходя из содержания азота, различал пять ее различных видов — от динитрата целлюлозы ($C_{12}H_{18}O_9(NO_3)_2$) до гексанинтрата целлюлозы ($C_{12}H_{14}O_4(NO_3)_6$). По П. Вьелю, существовало девять видов нитроцеллюлозы: от тетранитроцеллюлозы ($C_{24}H_{36}O_{16}(NO_3)_4$) до додеканитроцеллюлозы ($C_{24}H_{28}O_8(NO_3)_{12}$) [13].

Великий русский ученый Д.И. Менделеев в 1891–1895 гг. интенсивно работал над изучением нитроцеллюлозы и совершенствованием производства бездымного пороха и заменил сушку нитроцеллюлозы на ее обезвоживание спиртом [13]. Он открыл возможность получения «**пироколлодия**» — однородной нитроцеллюлозы, полностью растворимой в спиртоэфирной смеси. Из нее стали изготавливать порох сначала в России, а потом

и в Америке. Д.И. Менделеев приписывал этому соединению формулу $C_{30}H_{38}(NO_2)_{12}O_{25}$.

Обратимость процесса нитрования целлюлозы изучали в 1907 г. Э. Берль и Клеймо. Результаты этих работ впоследствии были использованы для денитрации нитроцеллюлозы и получения из нее нитрошелка [12].

Начало изучения процессов нитрования древесных целлюлоз было положено работами Шримпфа. Проведенные им в 1919 г. исследования показали, что натронная и сульфидная листовая целлюлозы дают нитрованные продукты, мало отличающиеся от нитроцеллюлоз из хвойной древесины [12].

Долгое время не удавалось получить нитроцеллюлозу с полным замещением все гидроксильных групп, и только в 1933 г. Л. Бушонэ, С. Томм и А. Петипа, применив нитрующую смесь, состоящую из 50 % безводной азотной кислоты, 25 % уксусного ангидрида и 25 % «**ледяной**» уксусной кислоты, получили продукт с максимально возможной массовой долей содержащегося в нитроцеллюлозе эфирного азота $w(N) = 14,14 \%$, что соответствовало степени замещения $g = 300$. Показатель g был введен в 1934 г. У. Финком [12]. Спустя 2 года, в 1935 г., аналогичный продукт был получен Р. Далмоном нитрованием целлюлозы смесью N_2O_5 и CCl_4 (1:2) [12].

Предложенный Финком показатель $g = 100$ для моонитроцеллюлозы, соответствует массовой доле азота в соединении $w(N) = 6,75 \%$; для динитроцеллюлозы $g = 200$, $w(N) = 11,11 \%$; для тринитроцеллюлозы $g = 300$, $w(N) = 14,14 \%$.

В настоящее время нитроцеллюлозные продукты по содержанию азота в них подразделяются на три типа [12, 13]:

1) **коллоксилин**: $w(N) = 11,5\text{--}12,0 \%$ азота; применяется для изготовления нитроглицериновых порохов, целлулоида, пленок и лаков;

2) **пироксилин № 1**: $w(N) = 13,0\text{--}13,5 \%$ азота; применяется в смеси с пироксилином № 2 для изготовления пироксилиновых порохов;

3) **пироксилин № 2**: $w(N) = 12,05\text{--}12,4 \%$ азота; применяется в смеси с пироксилином № 1 для изготовления пироксилиновых порохов, и аналогичен пироколлодию с 12,6 % азота. Смесь пироксилина № 1 и № 2 иногда называют пироксилином № 3.

Тринитроцеллюлоза является неустойчивым и труднорастворимым соединением, поэтому в промышленных масштабах ее не производят [11].

Процесс получения нитратов целлюлозы состоит из следующих стадий: подготовки целлюлозы; приготовления кислотных смесей; нитрования целлюлозы; стабилизации нитратов целлюлозы; снижения вязкости растворов; обезвоживания; упаковки.

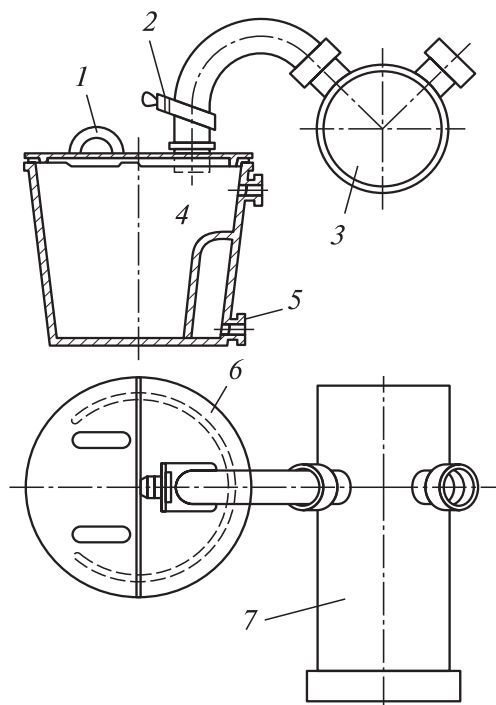


Рис. 7. Нитрационный горшок: 1 — ручка; 2 — задвижка; 3 — отсасывающий трубопровод; 4 — сито; 5 — штуцер для крана; 6 — крышка; 7 — отсасывающий трубопровод

Fig. 7. Nitrate pot: 1 — handle; 2 — gate valve; 3 — suction pipe; 4 — sieve; 5 — valve fitting; 6 — lid; 7 — suction pipe

Исходную хлопковую или древесную целлюлозу высушивали до 1–2%-й влажности, затем распушали или увлажняли до 45%-й влажности, после чего разрыхляли. Приготовление кислотной смеси производилось из концентрированной 90%-й азотной кислоты и 10%-го олеума в соотношении 1:3 [13–15]. Смешивание проводили в смесителях с двумя лопастными вертикальными мешалками, вращающимися в разных направлениях. Нитрование целлюлозы осуществляли в аппаратах разных конструкций при 40-кратном избытке нитрующей смеси в течение 0,5...2,5 ч и температуре 30...40 °С.

Первыми аппаратами для нитрования, введенными в практику Ф. Абелем в 1865 г. были съемными, емкостью 15...20 л. Впоследствии объем этих сосудов увеличился до 300 л и они стали стационарными, снабжались трубой для удаления оксидов азота (рис. 7) [15].

В 1891 г. был предложен, а 1893 г. внедрен на фирме «Селвик и Лланге» способ нитрования целлюлозы с последующим ее отжимом в специальных центрифугах объемом 1000...2000 л, снабженных барабаном с отверстиями. Через эти отверстия во вращающемся при 30...50 об/мин барабане нитрующая смесь многократно фильтровалась сквозь слой целлюлозы, нитруя ее, а

затем сливалась. Полученный нитрат целлюлозы отделяли от остатков нитрующей смеси центрифугированием при скорости вращения барабана 800...1200 об/мин (рис. 8) [15].

По способу Томсона, впервые примененного в Англии в 1905 г., нитрование целлюлозы проводили в специальных чашах, объемом 200 л с двумя керамическими плитами, между которыми помещалась целлюлоза, залитая нитрующей смесью, а на ее поверхность наливался слой воды, вытесняющий смесь после нитрования и промывающий образовавшийся нитрат целлюлозы, одновременно растворяя образовавшиеся оксиды азота (рис. 9) [15].

Начиная с 1916 г. начал распространяться метод нитрования целлюлозы в специальных вертикальных резервуарах — **нитраторах**, объемом 800 л, снабженных лопастными мешалками, вращающимися в различных направлениях со скоростью 20...60 об/мин (рис. 10) [15].

Впоследствии были предложены нитраторы непрерывного действия в виде вращающегося наклонного цилиндрического реактора с внутренней спиральной лентой для перемещения нитруемой целлюлозы и центральной перфорированной трубой для подачи нитрующей смеси, а также в виде каскада реакторов для постадийного нитрования целлюлозы. Наиболее интересный вариант нитратора — в виде кислотной ванны с отсасывающими валиками, внутри которых перемещалась транспортирующая сетка, несущая нитруемое полотно (рис. 11) [15].

Однако вследствие сложности конструкции таких аппаратов их применение так же, как гомогенных способов производства нитратов целлюлозы имело эпизодический характер [12, 13, 15].

По окончании нитрования реакцию массу по трубопроводу переводили в центрифугу для удаления из нее нитрующей смеси, затем выгружали в промежуточные бассейны — «**мурильники**» и направляли на **стабилизацию**. Для коллоксилина она заключалась в кипячении в чанах с подачей острого пара и последующей отмывкой холодной водой. В случае пироксилина, М. Абель в 1865 г. добавил стадии измельчения в специальных голландерах Хорна, а впоследствии в конических мельницах и окончательных многократных горячих и холодных промывках в емкостях объемом 20...35 м³ — «**лаверах**» с планетарными мешалками (рис. 12, 13) [12].

После стабилизации коллоксилин подвергался **отбелке**. По старой технологии отбелка проводилась перманганатом калия в кислой среде с последующей обработкой гидросульфитом натрия и соляной кислотой, а затем промывкой водой. Впоследствии для отбелки стали применять хлорную известь и гипохлорит натрия.

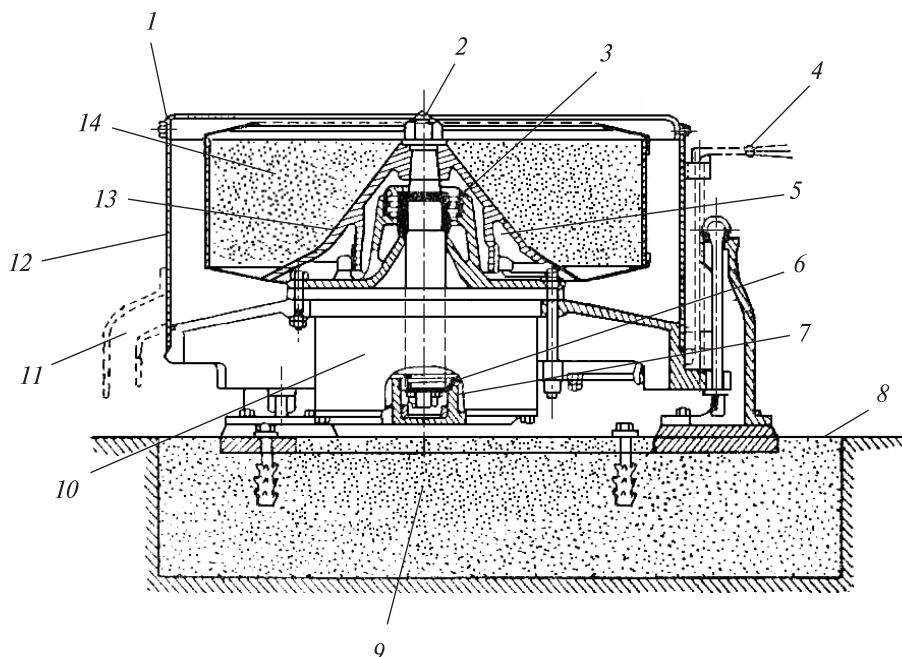


Рис. 8. Нитрационная центрифуга: 1 — оцинкованная стальная крышка; 2 — смазочное отверстие; 3, 6 — подшипник; 4 — тормозная рукоятка; 5 — тормоз с подкладкой Ферродо; 7 — шаровой подпятник; 8 — уровень пола; 9 — бетонный фундамент (при установке на уровне земли); 10 — непосредственно-соединенный мотор; 11 — выводной патрубок; 12 — наружный железный кожух; 13 — конус литой стали; 14 — дырчатый барабан

Fig. 8. Nitration centrifuge: 1 — galvanised steel cover; 2 — lubrication hole; 3, 6 — bearing; 4 — brake handle; 5 — Ferodo pad brake; 7 — ball bearing; 8 — floor level; 9 — concrete foundation (if installed at ground level); 10 — direct-attached motor; 11 — outlet pipe; 12 — outer iron casing; 13 — cast steel cone; 14 — perforated drum

Стабилизированная и при необходимости отбеленная нитроцеллюлоза подавалась на сгустители с фильтрующим барабаном, а затем на центрифугу и выходила с влажностью 24...25 % для колоксилина и 28...30 % для пироксилина [12].

Большие запасы нитроцеллюлозы, оставшиеся после окончания Первой мировой войны, подвергали обработке водой в цилиндрических автоклавах объемом от 5 до 6 м³ или трубчатых аппаратах непрерывного действия — «**трубчатках**», длиной до 12 м и диаметром 10 см при температуре 120...130 °С и повышенном давлении для снижения вязкости и степени нитрования в целях дальнейшего использования при изготовлении нитролаков [12, 13].

Последней стадией технологического процесса было обезвоживание нитроцеллюлозы. В первые годы использования нитроцеллюлозы это осуществлялось сушкой воздухом температурой 30...40 °С, что было чрезвычайно опасно из-за электризации и возможности возгорания нитроцеллюлозы в сухом состоянии. Впоследствии стали использовать вытеснение воды этанолом на центрифугах или прессах. В первом случае содержание спирта в нитроцеллюлозе составляло

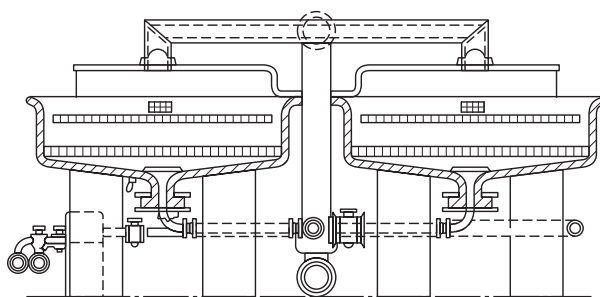


Рис. 9. Нитровальная чаша
Fig. 9. Nitration cup

30...40 %, а во втором — при использовании давления прессования от 15 до 40 МПа — 20...25 % [13].

Полученные волокнистые блоки спиртованной нитроцеллюлозы дробились на медных измельчителях и упаковывались в герметичные стальные оцинкованные бочки для транспортировки. Транспортировка нитроцеллюлозы на перерабатывающие предприятия осуществлялась только во взрывобезопасном спиртованном состоянии для производства порохов и пленок или во влажном состоянии для производства **целлулоида**, лаков, волокон и оболочек [12].

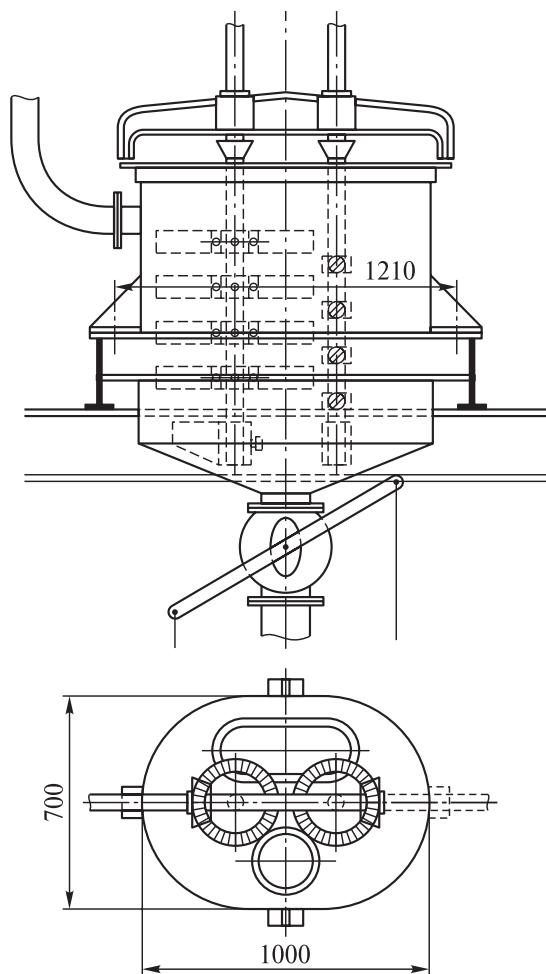


Рис. 10. Нитратор периодического действия
Fig. 10. Nitrator of periodic action

Основным потребителем нитратов целлюлозы было производство порохов и взрывчатых веществ.

Спиртованный пироксилин № 3 в мешателях обрабатывался смесью спирта и эфира с добавлением стабилизаторов; при этом происходила его желатинизация. Из полученной пороховой массы прессованием удалялся растворитель и полученный пироксилиновый порошок подсушивался на воздухе, вымачивался в воде и окончательно сушился при умеренном нагревании.

При гражданском использовании нитратов целлюлозы коллоксилины условно делились на группы в зависимости от получения из них тех или иных материалов. Коллоксилины с содержанием азота от 10,5 до 11,2 % получили название «целлулоидная» или «лаковая шерсть», растворимая в спирте, с содержанием азота 11,3–11,7 % — так называемая «шелковая» шерсть, растворимая в спиртоэфирной смеси, с содержанием азота 11,7–12,4 % — «пленочная шерсть», растворимая в сложных эфирах, но не растворимая в спирте [10].

Старейшей областью гражданского использования нитратов целлюлозы является получение из них волокон и нитей. Первый патент на получение из спиртоэфирных растворов нитроцеллюлозы как искусственного «нитрошелка» был выдан в 1855 г. англичанину Дж. Аудемарсу. В 1862 г. француз Ч. Озанам впервые применил для пряжи нитроцеллюлозных растворов **фильеры** [8]. В 1883 г. англичанин Дж. Суон получил немецкий патент на использование нитроцеллюлозных волокон в лампах накаливания, а в 1885 г. на промышленной выставке в Лондоне были показаны покрывала и салфетки, изготовленные из нити, полученные Дж. Суоном из денитрованного волокна [8]. В 1884 г. Гильярмом де Шардоне было организовано акционерное общество для реализации этой технологии и в 1891 г. в г. Безансоне (Франция) был пущен первый в мире завод производства искусственного нитроволокна [8], получившего название «шелка Шардоне» [7, 11]. Высокая горючесть нитрошелка потребовала применения его денитрации с получением гидратцеллюлозного волокна с остаточным содержанием азота менее 1 % [10]. Начиная с 1890-х годов в ряде стран, включая Россию, были построены фабрики по производству нитрошелка — первого искусственного волокна на основе целлюлозы [10].

Технологический процесс заключался в воздушном прядении через фильеры волокна из спиртоэфирного раствора нитрата целлюлозы с содержанием 11,5 % азота и 20...25 % воды. Наматываемые на шпули нити орошались водой для отмывки растворителя во влажном состоянии и в процессе мотки пряжи волокна подвергались денитрации гидросульфидом натрия, обливались гипохлоритом натрия и высушивались [10]. Производство нитрошелка просуществовало до середины 1930-х годов и было закрыто вследствие нерентабельности, не выдержав конкуренции с вискозным волокном. Просуществовав 14 лет, производство нитрошелка в США было закрыто в 1934 г., а фабрики в Бразилии в начале 1940-х годов были временно переоборудованы на изготовление из нитроцеллюлозы пищевых оболочек для колбасного производства [10]. Даже масштабные работы по рационализации и удешевлению производства нитрошелка, проведенные в России в 1930-е годы, не привели к изменению ситуации [9].

Иногда использовали нитрование целлюлозы для изготовления «стеклянного батиста» обработкой изделий из тончайшей хлопчатобумажной пряжи при низких температурах смесью концентрированной азотной и серной кислот [10].

Следующими по времени появления материалами на основе нитратов целлюлозы стали **пластические массы**.

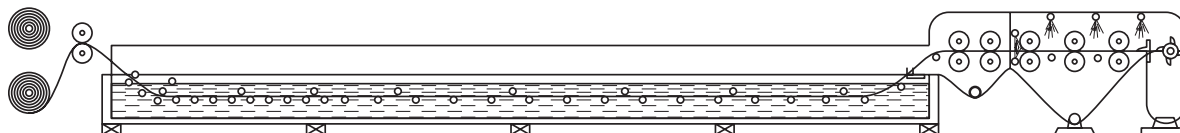


Рис. 11. Нитратор непрерывного действия
 Fig. 11. Continuous nitrator

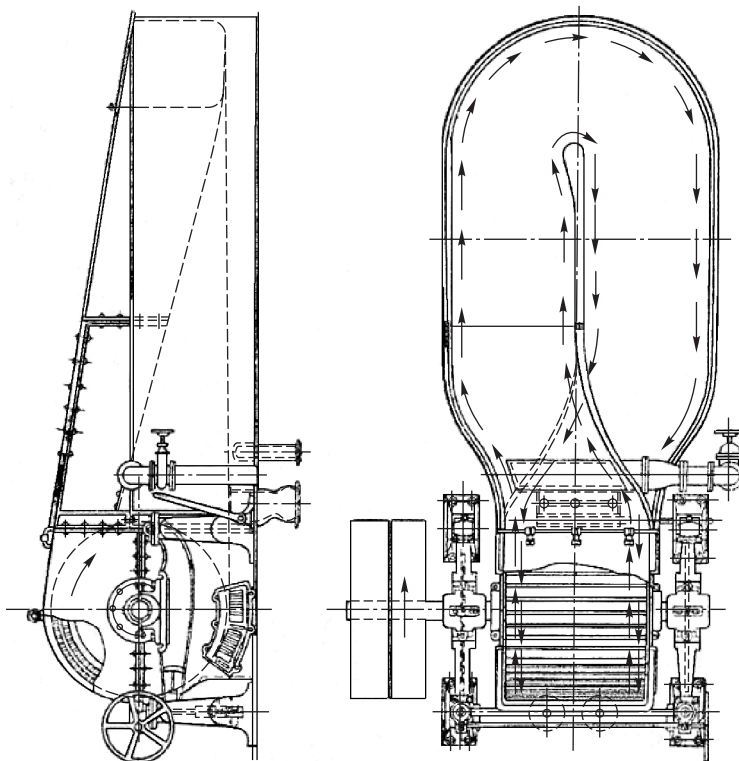


Рис. 12. Голландер Хорна
 Fig. 12. Horn Hollander

В 1865 г. англичанин А. Паркер взял патент на приготовление из нитроцеллюлозы, камфоры, спирта и растительных масел пластической массы — «паркезит», за что был премирован на Парижской выставке в 1867 г.

В этом же году его сотрудник Д. Спилл, несколько изменив состав композиции, получил пластическую массу, названную «ксилонитом». Массовое производство ксилонита в Англии началось в 1877 г. на Ксилонитовой компании, просуществовавшей до 1950-х годов.

В США Дж. Хайат занимался изготовлением бильярдных шаров из **искусственной слоновой кости** — спрессованной бумажной массы, покрытой лаком. Он обратил внимание на работы А. Паркера и, устранив из смеси для изготовления бильярдных шаров растительные масла и значительно увеличив содержание камфоры, получил высококачественную пластмассу, названную им **целлулоидом**. В 1872 г. братьями Хайд была организована **компания по производству**

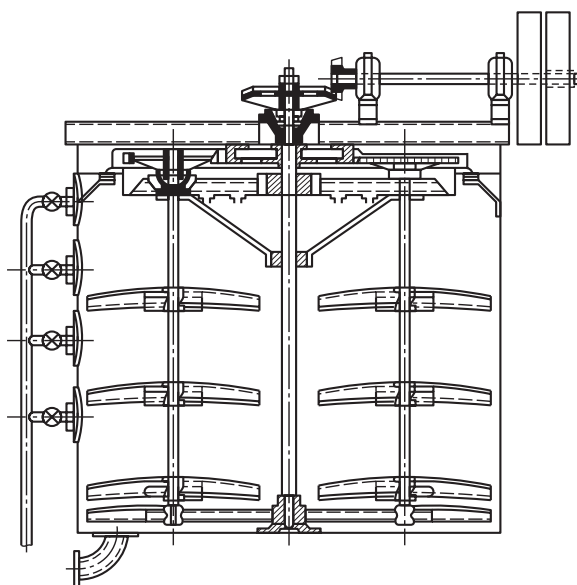


Рис. 13. Лавер с планетарными мешалками
 Fig. 13. Laver with planetary agitators

целлулоида в Нью-Арке, ставшая монополистом производства этой пластмассы вплоть до 1920 г., когда появились фирмы, развившие это производство — «Дюпон» и др.

Во Франции первая целлулоидная фабрика была основана в 1878 г., а затем целлулоидное производство появилось в Германии, Швейцарии, Нидерландах, Италии, Китае и СССР [12].

Целлулоид представляет собой твердый раствор камфоры в нитроцеллюлозе, образуя с ней молекулярное соединение. Для получения целлулоида использовали «целлулоидную шерсть» с добавлением до 30 % этилового спирта и от 16 до 60 % камфоры по отношению к сухому нитрату целлюлозы, в качестве стабилизатора добавляли 1–2 % карбоната. Основными стадиями получения целлулоида являлись смешивание спиртованной нитроцеллюлозы со спиртовым раствором камфоры, вальцевание, прессование в блок, строгание, сушка листов, их выпрямление и полировка.

Смешивание осуществлялось в герметичных смесителях, объемом 100...400 л с мешальными лопастями, вращающимися навстречу друг другу, в течение 2–3 ч при температуре 40...90 °С с последующим удалением избыточного этанола с помощью вакуумного насоса.

Полученная масса для дальнейшей гомогенизации и удаления остаточного спирта до уровня 10...12 % подвергалась вальцеванию в течение 2,5 ч до получения пластин толщиной 8...12 мм. Для окрашивания целлулоида в различные цвета применяли анилиновые красители или цветные пигменты, а для снижения горючести — неорганические и органические антипирены (разные хлориды и сульфаты, казеин, каучук, резинаты и т. д.) на стадиях смешивания и вальцевания.

После вальцевания пластины собирались в пакеты и прессовались в блок-прессах в течение 4 ч при температуре 50...60 °С с подъемом давления от 0,7 до 2 МПа, с последующим охлаждением в течение 4 ч. В результате прессования получались монолитные блоки в виде прямоугольных параллелепипедов или цилиндров массой от 120 до 200 кг и толщиной или диаметром от 100 до 200 мм. Последующее строгание на строгальных и резальных машинах позволяло получать листы — «**пиролины**» толщиной от 0,1 до 20 мм или бесконечную ленту целлулоида толщиной до 3 мм, а также цилиндрические заготовки диаметром от 2 до 60 мм с помощью специальных трубчатых листов. Иногда из сильно вальцованной массы получали целлулоидные трубки разных диаметров с использованием специальных плунжерных листов [11].

Сушка полученных пластин рубок проводилась в специальных вагонетных сушильных камерах коридорного типа в целях удаления оста-

точного спирта в токе, подогретого 35...40 °С воздуха при расчетном времени 12 ч на 0,1 мм толщины. После сушки пластины коротко временно помещались в горячую воду, выпрямлялись и полировались в горячих многоэтажных прессах. Для выпрямления применялось давление 5...15 МПа при температуре 80...90 °С, а для полировки, соответственно, 22,5...30 МПа при 95...100 °С в течение 20...25 мин с последующим охлаждением в течение 15...20 мин.

Полученный целлулоид в виде пластин перерабатывался методами прессования для изготовления деталей оборудования самолетов и автомобилей, декоративных деталей мебели, ванн, поверхностей скольжения лыж, футляров, гребней, рукояток щеток, корпусов ручек и карандашей, оправ очков, пуговиц, деталей ювелирных украшений и т. д. С помощью выдувания паром из сдвоенных пластин получали заготовки сложной формы для изготовления игрушек, кукол, мячей для настольного тенниса и т. д. Толстые пластины, трубки, а также цилиндрические заготовки перерабатывались механическим резанием в различные детали [10].

Кроме целлулоидного метода получения термoplastов из нитроцеллюлозы в 1918 г. на немецкой фабрике в г. Тройсдорфе (Германия) на фирме «RWS» Больке и Лейзифером была разработана технология получения формовочных пресс-композиций без применения летучих растворителей под фирменными названиями «**тролит**», «**лушарид**», «**этролл**» и т. д. Процесс получения таких пресс-композиций заключался в пластификации влажной нитроцеллюлозы с 30 % воды на горячих вальцах с 18...20 % пластификаторов (диметилфталата, и др.) с одновременным добавлением большого количества наполнителя, снижающего горючесть материала (гипс, тяжелый шпат и др.). **Пресс-порошки**, полученные измельчением этих композиций после их охлаждения, использовались для переработки прессованием и экструзией при температуре 125...130 °С и давлении 15...18 МПа. В нашей промышленности такие пресс-композиции с большим содержанием нитроцеллюлозы использовались для облицовки автоштурвалов и другой автомобильной фурнитуры, а с большим содержанием — наполнителей для изготовления малоточных деталей (крышек, заглушек, рукояток и т. д.) [12].

Бурное развитие фотографии в середине XIX в. и появление кинематографа в конце этого столетия повлекли за собой разработку технологий производства из нитроцеллюлозы прозрачных фото и киноплёнок. Материалом для их получения стала «**плёночная шерсть**», которую в проспиртованном состоянии медленно вносили в 3–4%-й раствор камфоры в спиртоэфирной

смеси для достижения 18–22%-й концентрации нитроцеллюлозы в ней.

В качестве спиртового компонента также использовалась смесь метанола с бутанолом или амиловым спиртом. Раствор пропускали через фильтр высокого давления и дегазировали при температурах, близких к температурам кипения растворителей. Полученный раствор подавался на пленочные литьевые машины двух типов: барабанного и ленточного. В первом случае он подавался на полированную поверхность вращающегося барабана диаметром 3–4 м и шириной 1,3–1,4 м со скоростью 15...20 об/мин, нагреваемого внутри горячим воздухом. Затем пленка снималась и пропускалась через сушильную камеру. Во втором случае в пленочной машине ленточного типа проходило формирование и сушка на движущейся закрытой обогреваемой ленте длиной 30 м и шириной 0,7 м со скоростью 25...30 м/мин, с постепенным нагревом в целях дегазации и сушки пленки, с последующей ее резкой и намоткой в рулоны.

Данные технологии позволяли получать пленки толщиной от 0,08 до 0,22 мм, используемые в качестве кино-, фотопленок и лент для магнитной записи.

Более толстые пленки использовались для дублирования с тканью при получении искусственной кожи, а при дублировании с бумагой при производстве моющихся обоев. Процессы дублирования осуществлялись на литьевых машинах, разработанных англичанином Френкелем, в которых формуемый материал изготовлялся на специальной подкладке, скручивался в рулоны вместе с ней, а после их размотки подкладка возвращалась в литьевую машину [10].

Кроме твердых композиций, волокон, пластмасс, пресс-порошков и пленок нитраты целлюлозы использовались для приготовления жидких составов — лаков, эмульсий, клеев и аппретов для тканей и т. д.

Начало применения нитроцеллюлозы в лакокрасочной промышленности относится к 1880 г., когда была установлена возможность применения касторового масла в качестве ее пластификатора, а патент, выданный в 1882 г. Стивенсу на применение в качестве ее растворителя амилацетата можно считать началом производства и применения нитролаков.

Десятью годами позднее был выдан патент У. Крейну на смесь растворителей, названную его именем, для приготовления раствора нитроцеллюлозы, получившего название «цапонлака». Однако эти патенты еще не давали возможности получения качественной пленки лакового покрытия, а пироколлодий, разработанный Д.И. Менделеевым в 1891 г., использовался только как лечебный препарат для заживления ран.

Интенсивное развитие производства нитролаков, начатое в 1918 г., было обусловлено необходимостью использовать большие послевоенные запасы пироксилина. Вскоре из него были получены низковязкие сорта нитроцеллюлозы, что создало благоприятные предпосылки для производства лаков из них.

В связи с низкой концентрацией нитроцеллюлозного пленкообразователя для кистевого нанесения в лаки стали добавлять природные смолы, увеличивающие толщину лакового покрытия при их высыхании. Разработка в середине 1920-х годов методов модифицирования синтетических глифталевых смол высыхающими маслами (алкидные смолы), с которыми нитролаки хорошо совмещались, открыло новое направление в получении комбинированных лаков, развивающееся и в настоящее время [14, 16–27].

Содержание нитратов целлюлозы в комбинированных лаках варьируется от 5 до 20 %, хотя может быть значительно увеличено до 40 % — при изготовлении водных эмульсий на их основе [10].

В настоящее время кроме нитролаков нитраты целлюлозы используют для производства различных видов пороха. Современная потребность отечественной оборонной промышленности в пороховой целлюлозе составляет более 70 000 т в год. Нитрошелк вышел из потребления в середине 1930 г., а целлулоидные пластмассы и нитро кино- и фотопленка были сняты с производства в 1952 г. из-за своей горючести и заменены ацетат целлюлозы.

Список литературы

- [1] Пен Р.З. Технология целлюлозы. Красноярск: Изд-во СИБГТУ, 2006. Т. 1. 343 с.; Т. 2. 349 с.
- [2] Гесс К. Химия целлюлозы и ее спутников / пер. с нем. З. Роговина, А. Пакшвер; под ред. и с доп. проф. П. Шорыгина. Л.: Госхимтехиздат, 1934. 620 с.
- [3] Кононов Г.Н. Дендрохимия. Химия, нанохимия и биогеохимия компонентов клеток тканей и органов древесных растений: в 2 т. М.: МГУЛ, 2015. Т. 1. 480 с.
- [4] Словарь целлюлозно-бумажного производства / Е.М. Беркман, С.М. Вишневецкий, Л.О. Иоффе; под ред. Н.В. Рюхина. М.: Лесная пром-сть, 1969. 299 с.
- [5] Васильев Д.Н. Производство фибры. М.-Л.: Гослесбуиздат, 1959. 170 с.
- [6] Пузырев С.А., Бурова Т.С., Кречетова С.П., Рыжов П.Т. Технология обработки и переработки бумаги и картона. М.: Лесн. пром-сть, 1985. 312 с.
- [7] Разумеев А.А. Справочник по производству искусственного волокна / под ред. А.И. Меоса. М.: ОНТИ, 1937. 516 с.
- [8] Роговин З.А. Основы химии и технологии химических волокон. В 2 т. М.: Химия, 1974. Т. 1. 518 с.
- [9] Роговин З.А. Химия и технология искусственных волокон. М.: Гизлегпром, 1952. 676 с.
- [10] Хувинк Р., Ставерман А. Химия и технология полимеров. В 2 т. М.; Л.: Химия 1966. Т. 2. 1124 с.
- [11] Голдинг Б. Химия и технология полимерных материалов / пер. с англ. В.В. Арнольдова / под ред. Н.Т. Романченко. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 666 с.

- [12] Ушаков С.Н. Эфиры целлюлозы и пластические массы на их основе. Л.: Госхимиздат, 1941. 502 с.
- [13] Закошиков А.П. Нитроцеллюлоза. М.: Оборонгиз, 1950. 372 с.
- [14] Киттель Г. Целлюлозные лаки / под ред. Е.Ф. Беленького. Л.: Госхимиздат, 1957. 327 с.
- [15] Бытенский В.Я., Кузнецова Е.П. Производство эфиров целлюлозы / под ред. Н.И. Кленковой. Л.: Химия, 1974. 206 с.
- [16] Филатова А.Е., Сульман А.М., Шиманская Е.И., Гребенникова О.В., Монжаренко М.А. Влияние свойств полимерной матрицы катализатора на процесс переработки растительной биомассы // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия, 2023. № 1 (51). С. 45–50.
- [17] Хакимова Ф.Х., Носкова О.А., Котельников С.А., Синяев К.А. Получение природного полимерного материала для использования в энергонасыщенных композициях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника, 2019. № 56. С. 72–82.
- [18] Косточко А.В., Валишина З.Т., Дебердеев Р.Я. Особенности структуры и свойств нитратов пеньковой целлюлозы // Пластические массы, 2019. № 9–10. С. 41–44.
- [19] Крюгер Д. Ацетилцеллюлоза и другие органические эфиры целлюлозы / под ред. З.А. Роговина. М.: ГОНТИ, 1938. 448 с.
- [20] Аким Э.Л., Перепечкин Л.П. Целлюлоза для ацетилирования и ацетаты целлюлозы. М.: Лесн. пром-сть, 1971. 232 с.
- [21] Яценкова О.В., Скрипников А.М., Карачаров А.А., Мазурова Е.В., Воробьев С.А., Кузнецов Б.Н. Новый метод получения микрофибриллированной целлюлозы из древесины ели // Химия растительного сырья, 2020. № 1. С. 303–314.
- [22] Степина И.В., Содомон М., Кононов Г.Н., Петухов В.А. Компонентный состав модифицированного растительного сырья // Инженерный вестник Дона, 2022. № 9 (93). С. 223–231.
- [23] Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В. Микелиз древесины, его продукты и их использование // Сб. тезисов докл. Междунар. симп. МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана «Лесной комплекс в цифровой экономике». М.: Научные технологии, 2019. С. 89–90.
- [24] Корнев П.П., Максимов А.А., Баранова А.Е., Осовская И.И. Получение целлюлозы из растительного сырья // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 198–199.
- [25] Никитина З.К., Гордонова И.К. Изучение целлюлазной активности коллекционных штаммов мицелиальных грибов // Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии, 2022. Т. 25. № 11. С. 29–35.
- [26] Минес К. Бензилцеллюлоза и другие простые и сложные эфиры целлюлозы. М.: Гослестехиздат, 1936. 117 с.
- [27] Luginina A.A., Kuznetsov S.V., Alexandrov A.A., Gainutdinov R.V., Petukhov D.I., Voronov V.V., Chernova E.V., Fedorov P.P. High lignin content cellulose nanofibrils obtained from thermomechanical pulp // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, 2022. Т. 13. № 6. С. 698–708.

Сведения об авторах

Кононов Георгий Николаевич — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), академик РАЕН, уч. секретарь секции «Химия и химическая технология древесины» РХО им. Д.И. Менделеева, kononov@mgul.ac.ru

Веревкин Алексей Николаевич — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), verevkin@mgul.ac.ru

Сердюкова Юлия Владимировна — ст. преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), caf-htdip@mgul.ac.ru

Хвалько Даниил Денисович — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), verevkin@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 27.12.2022.

Одобрено после рецензирования 28.02.2023.

Принята к публикации 22.03.2023.

WOOD AS CHEMICAL RAW MATERIAL. HISTORY AND MODERNITY

V. WOOD PULP AS NATURAL POLYMER RAW MATERIAL. PART I

G. N. Kononov, A.N. Verevkin✉, Yu.V. Serdyukova. D.D. Khvalko

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

verevkin@mgul.ac.ru

The history of chemical processing development of the improved technical wood cellulose for the receiving of the additive derivatives, complex and simple ethers on their basis are considered. The historical transformation of technologies for the production of plant parchment, fiber, copper-ammonia fiber, synthesis of cellulose nitrates, xanthogenates and acetates, as well as methods for processing these derivatives into target products and materials is described in detail. The historical description of the preparation and prospects for the use of cellulose esters and modification of cellulose fiber hydrate is given. This article is the fifth in the cycle «Wood as a chemical raw material. History and modernity»; the previous parts were published in the journal *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin* (2020, v. 24, no 1, № 5; 2021, v. 25 no. 3; 2022, v. 26 no. 1).

Keywords: additive compounds, cellulose nitrates, cellulose xanthogenates, cellulose acetates, cellulose esters, grafted copolymers

Suggested citation: Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Khval'ko D.D. *Drevesina kak khimicheskoe syr'e. Istoriya i sovremennost'. V. Drevesnaya tsellyuloza kak prirodnoe polimernoe syr'e. Chast' I* [Wood as chemical raw material. History and modernity. V. Wood pulp as natural polymer raw material. Part I]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 128–142. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-128-142


References

- [1] Pen R.Z. *Tekhnologiya tsellyulozy* [Pulp Technology]. Krasnoyarsk: SIBGTU, 2006, v. 1, 343 p; v. 2, 349 p.
- [2] Gess K. *Khimiya tsellyulozy i ee sputnikov* [Pulp chemistry and its satellites]. Ed. P. Shorygina. Leningrad: Goskhimtekhnizdat, 1934, 620 p.
- [3] Kononov G.N. *Dendrokhiimiya. Khimiya, nanokhiimiya i biogeokhiimiya komponentov kletok tkaney i organov drevesnykh rasteniy* [Dendrochemistry. Chemistry, nanochemistry and biogeochemistry of components of tissue cells and organs of woody plants], in 2 v. Moscow: MGUL, 2015, v. 1, 480 p.
- [4] *Slovar' tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva* [Dictionary of pulp and paper production] / E.M. Berkman, S.M. Vishnevsky, L.O. Ioffe. Ed N.V. Ryukhin. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forestry industry], 1969, 299 p.
- [5] Vasil'ev D.N. *Proizvodstvo fibry* [Production of fiber]. Moscow–Leningrad: Goslesbumizdat, 1959, 170 p.
- [6] Puzyrev S.A., Burova T.S., Krechetova S.P., Ryzhov P.T. *Tekhnologiya obrabotki i pererabotki bumagi i kartona* [Paper and cardboard processing and recycling technology]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forestry industry], 312 p.
- [7] Razumeev A.A. *Spravochnik po proizvodstvu iskusstvennogo volokna* [Handbook on the artificial fiber production]. Ed. A.I. Meos. Moscow: ONTI, 1937, 516 p.
- [8] Rogovin Z.A. *Osnovy khimii i tekhnologii khimicheskikh volokon* [Fundamentals of chemistry and technology of chemical fibers] [For universities]. In 2 vol. Moscow: Himiya [Chemistry], 1974, v. 1, 518 p.
- [9] Rogovin Z.A. *Khimiya i tekhnologiya iskusstvennykh volokon* [Chemistry and technology of artificial fibers]. Moscow: Gizlegprom, 1952, 676 p.
- [10] Khuvink R., Staverman A. *Khimiya i tekhnologiya polimerov* [Chemistry and technology of polymers]. In 2 vol. Moscow–Leningrad: Publishing House Chemistry, 1966, v. 2, 1124 p.
- [11] Golding B. *Khimiya i tekhnologiya polimernykh materialov* [Chemistry and technology of polymer materials]. Ed. N.T. Romanchenko. Moscow: Publishing House of Foreign Literature, 1963, 666 p.
- [12] Ushakov S.N. *Efiry tsellyulozy i plasticheskie massy na ikh osnove* [Cellulose esters and plastic masses based on them]. Leningrad: Goskhimizdat, 1941, 502 p.
- [13] Zakoshchikov A.P. *Nitrotsellyuloza* [Nitrocellulose]. Moscow: Publishing house and printing house Oborongiz, 1950, 372 p.
- [14] Kittel' G. *Tsellyuloznye laki* [Cellulose varnishes]. Ed. E.F. Belenky. Leningrad: Goskhimizdat, 1957, 327 p.
- [15] Bytenskiy V.Ya., Kuznetsova E.P. *Proizvodstvo efrov tsellyulozy* [Production of cellulose esters]. Ed. N.I. Klenkova. Leningrad: Chemistry: Leningrad Branch, 1974, 206 p.
- [16] Filatova A.E., Sul'man A.M., Shimanskaya E.I., Grebennikova O.V., Monzharenko M.A. *Vliyanie svoystv polimernoy matritsy katalizatora na protsess pererabotki rastitel'noy biomassy* [Influence of the properties of the polymer matrix of the catalyst on the processing of plant biomass]. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya* [Bulletin of the Tver State University. Series: Chemistry], 2023, no. 1 (51), pp. 45–50.
- [17] Khakimova F.Kh., Noskova O.A., Kotel'nikov S.A., Sinyayev K.A. *Poluchenie prirodnogo polimernogo materiala dlya ispol'zovaniya v energonasyschennykh kompozitsiyakh* [Obtaining natural polymeric material for use in energy-saturated compositions]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace Engineering], 2019, no. 56, pp. 72–82.
- [18] Kostochko A.V., Valishina Z.T., Deberdeev R.Ya. *Osobennosti struktury i svoystv nitratov pen'kovoy tsellyulozy* [Features of the structure and properties of hemp cellulose nitrates]. *Plasticheskie massy* [Plastic masses], 2019, no. 9–10, pp. 41–44.
- [19] Kryuger D. *Atsetiltsellyuloza i drugie organicheskie efiry tsellyulozy* [Acetylcellulose and other organic cellulose esters]. Ed. Z.A. Rogovin. Moscow: GONTI, 1938, 448 p.
- [20] Akim E.L., Perepechkin L.P. *Tsellyuloza dlya atsetilirovaniya i atsetaty tsellyulozy* [Cellulose for acetylation and cellulose acetates]. Moscow: Forest Industry, 1971, 232 p.

- [21] Yatsenkova O.V., Skripnikov A.M., Karacharov A.A., Mazurova E.V., Vorob'ev S.A., Kuznetsov B.N. *Novyy metod polucheniya mikrofibrillirovannoy tsellyulozy iz drevesiny eli* [A new method for obtaining microfibrillated cellulose from spruce wood]. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2020, no. 1, pp. 303–314.
- [22] Stepina I.V., Sodomon M., Kononov G.N., Petukhov V.A. *Komponentnyy sostav modifitsirovannogo rastitel'nogo syr'ya* [Component composition of modified plant raw materials]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don], 2022, no. 9 (93), pp. 223–231.
- [23] Kononov G.N., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V. *Mikoliz drevesiny, ego produkty i ikh ispol'zovanie*. Collection of abstracts of the international symposium of the MF Bauman Moscow State Technical University «Forest Complex in the digital Economy». Moscow: Scientific Technologies, 2019, pp. 89–90.
- [24] Kornev P.P., Maksimov A.A., Baranova A.E., Osovskaya I.I. *Poluchenie tsellyulozy iz rastitel'nogo syr'ya* [Obtaining cellulose from vegetable raw materials]. *Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie. materialy VII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Forests of Russia: politics, industry, science, education. materials of the VII All-Russian Scientific and Technical Conference]. St. Petersburg, 2022, pp. 198–199.
- [25] Nikitina Z.K., Gordonova I.K. *Izucheniye tsellyulaznoy aktivnosti kollekttsionnykh shtammov mitselial'nykh gribov* [Study of the cellulase activity of collection strains of filamentous fungi]. *Voprosy biologicheskoy, meditsinskoy i farmatsevticheskoy khimii* [Questions of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry], 2022, v. 25, no. 11, pp. 29–35.
- [26] Mines K. *Benziltsellyuloza i drugie prostye i slozhnye efiry tsellyulozy* [Benzylcellulose and other simple and complex cellulose esters]. Moscow: Goslestehizdat, 1936, 117 p.
- [27] Luginina A.A., Kuznetsov S.V., Alexandrov A.A., Gainutdinov R.V., Petukhov D.I., Voronov V.V., Chernova E.V., Fedorov P.P. High lignin content cellulose nanofibrils obtained from thermomechanical pulp. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2022. T. 13. № 6. C. 698–708.

Authors' information

Kononov Georgiy Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, the Scientific Secretary of section «Chemistry and engineering chemistry of wood» RHO of D.I. Mendeleev, kononov@mgul.ac.ru

Verevkin Aleksey Nikolaevich  — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), verevkin@mgul.ac.ru

Serdyukova Yulia Vladimirovna — Senior Lecturer of the BMSTU (Mytishchi branch), caf-htdip@mgul.ac.ru

Khvalko Daniil Denisovich — Student of the BMSTU (Mytishchi branch), verevkin@mgul.ac.ru

Received 27.12.2022.

Approved after review 28.02.2023.

Accepted for publication 22.03.2023.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

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

The authors declare that there is no conflict of interest

ИМПУЛЬСНАЯ СУШКА ЗАГОТОВОК ИЗ ДРЕВЕСИНЫ ИРОКО, МЕРБАУ И ВЕНГЕ В КОНВЕКТИВНОЙ СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЕ

Д.И. Деянов^{1✉}, А.А. Косарин², С.А. Моисеев³, Г.Н. Курьшов

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Мытищинский филиал, Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
²ООО «Форсклад», Россия, 121359, г. Москва, ул. Партизанская, д. 40

³АО «Волга», Россия, 606407, Нижегородская обл., г. Балахна, ул. Горького, д. 1

d.dejanov@yandex.ru

Приведен обзор литературных источников по физико-механическим свойствам древесины ироко, мербау и венге. Указаны места произрастания данных пород. Изложено описание разновидности свойств рассматриваемых пород в зависимости от ареала распространения. Представлен обзор литературных источников по режимам и параметрам сушки заготовок из древесины ироко, мербау и венге. Рассмотрены режимы сушки заготовок из древесины ироко, мербау и венге параметры которых зависят от текущей влажности древесины, и принципы построения импульсных режимов сушки. Определены режимы импульсной сушки заготовок из древесины ироко толщиной 25 мм, мербау — толщиной 25 мм и венге — толщиной 45 мм. Показано, что использование импульсных режимов сушки заготовок позволяет сократить потребление электроэнергии и повысить качество продукции.

Ключевые слова: заготовки из древесины ироко, мербау и венге, импульсный режим, режимы сушки, показатели качества

Ссылка для цитирования: Деянов Д.И., Косарин А.А., Моисеев С.А., Курьшов Г.Н. Импульсная сушка заготовок из древесины ироко, мербау и венге в конвективной сушильной камере // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 143–149. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-143-149

Ироко или Хлорофора высокая (*Chlorophora excels* Benth & Hook f и *C. regia* A. Chev) распространена в Африканской тропической зоне от Сьерра-Леоне на западе и до Танзании на востоке [1–3]. Мербау — ботаническое название породы древесины *Intsia palembanica*. Включает в себя виды деревьев, произрастающих во влажных тропических лесах Южной и Юго-Восточной Азии [4, 5]. Венге (*Millettia laurentii*) — вид африканских тропических деревьев из рода *Millettia* семейства Fabaceae.

Произрастает в тропических джунглях Западной Африки [6].

В табл. 1–4 приведены основные характеристики, макроскопические признаки, физико-механические и технологические свойства пород древесины ироко, мербау и венге [1–10].

Цель работы

Цель работы — разработка технологии импульсной сушки заготовок из древесины ироко, мербау и венге в конвективной сушильной камере.

Т а б л и ц а 1

Характеристики пород древесины

Characteristics of wood species

Порода	Ботаническое название	Ареал распространения	Коммерческое название породы
Ироко	<i>Chlorophora excels</i> Benth & Hook f и <i>C. regia</i> A. Chev	Африканский континент, Кот-д'Ивуар, Танзания, Сьерра-Леоне, Нигерия, Камерун, Ангола, Мозамбик	Odum (Гана и Кот-д'Ивуар), mvule (Восточная Африка), kambala (Заир), bang (Камерун), moreiga (Ангола), tule, intule (Мозамбик)
Мербау	<i>Intsia palembanica</i>	Южная и Юго-Восточная Азия, Андаманские и Никобарские острова, Тайланд, Малайзия, Индонезия, Филиппины	Тик Борнео (Borneo teak), Малаккский тик (Malacca teak), Покок мербау (Pokok merbau)
Венге	<i>Millettia laurentii</i>	Конго, Камерун, Габон, Гвинея, Нигерия	Панга-панга (Panga-panga), конголезский палисандр, дикела, миботу, боконге, авонг

Т а б л и ц а 2

Макроскопические признаки пород древесины**Macroscopic signs of wood species**

Порода	Ядро	Заболонь	Годичные слои	Сердцевинные лучи
Ироко	Желтого, золотисто-коричневого цвета	Ширина 50–75 мм, четко ограничена	Хорошо видны	Хорошо видны
Мербау	Оранжево-коричневое или красно-коричневое	Узкая, ширина 50–75 мм.	Хорошо видны	Слабо заметны
Венге	Золотисто-коричневое или темно-коричневое с черными прожилками	Ширина до 3 см, цвет темно-серый или палево-желтый	Хорошо видны	Узкие, слабо заметны

Т а б л и ц а 3

Физико-механические свойства пород древесины**Physical and mechanical properties of wood species**

Порода	Плотность, кг/м ³	Предел прочности при изгибе, МПа	Модуль упругости при изгибе, ГПа	Предел прочности при сжатии вдоль волокон, МПа	Стоимость, тыс. руб./1м ³
Ироко	660	87,6	9,38	54,0	262
Мербау	815	145,2	15,93	73,2	467
Венге	880	151,7	18,59	80,7	520

Т а б л и ц а 4

Технологические свойства пород древесины**Technological properties of wood species**

Порода	Технологические характеристики	Область применения
Ироко	Хорошо обрабатывается режущим инструментом, хорошо склеивается, удерживает гвозди и шурупы, высококачественная отделка	Изготовление паркета, кораблестроение, токарные работы, изготовление скульптур
Мербау	Малая усушка, равномерно окрашивается и полируется, устойчива к воздействию влаги	Изготовление паркета, массивной мебели, музыкальных инструментов, дверей и лестниц
Венге	Использование без ограничений, не боится влажности, устойчива к гниению	Производство шпона, оформление лестниц, изготовление паркета и мебели

Материалы и методы исследования

В начале 1990-х годов на кафедре «Сушка и защита древесины» МГУЛ (ныне МГТУ им. Н.Э. Баумана, Мытищинский филиал) были начаты исследования процесса импульсной сушки древесины.

Первые опытные сушки импульсными режимами пиломатериалов из сосны проведены в 1991–1992 гг. в сушильных камерах фирмы Hildebrand на Деревообрабатывающем комбинате (ДОК) № 160 г. Королев Московской обл. В 1992–1994 гг. исследование импульсных режимов сушки пиломатериалов из сосны, дуба и ясеня было продолжено на ДОК № 1 в г. Москва в сушильной камере периодического действия УЛ-2М и сушильной камере непрерывного действия ЦНИИМОД-32 [11].

В 1995 г. получен патент России на «Способ сушки пиломатериалов» [12].

В период с 1993 по 1995 гг. были выполнены реконструкции аэродинамических сушильных камер фирмы «ВЕЛД» на ООО «Дриада» в г. Долгопрудный и «УРАЛ-72» на ООО «ИНТАР» в г. Москва для сушки импульсными режимами хвойных и лиственных пород древесины [13].

С 1995 по 2008 гг. на ООО «ИНТАР» в г. Москва по технологии импульсной сушки были высушены пиломатериалы толщиной 50 мм из древесины дуба, бука, ясеня, ореха, груши, сосны и ольхи [14].

С 2008 по 2016 гг. в четырех одноштабельных сушильных камерах в строительных ограждениях периодического действия учебно-производственных мастерских МГУЛ импульсными режимами высушивались пиломатериалы из сосны, дуба, бука, ясеня, вишни, грецкого ореха, ольхи и березы [15].

В 2015 и 2016 гг. были поданы заявки на изобретения, а в 2017 г. получены три патента России на

«Способ импульсной сушки пиломатериалов» [16–18].

В это же время в лаборатории сушки кафедры «Древесиноведение и технологии деревообработки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) были начаты сушки импульсными режимами тропических пород древесины (эбена, махагони, меранти, американского черного ореха, ироко, мербау, венге), мореного дуба и карельской березы [19]. В лаборатории была установлена опытно-экспериментальная сушильная камера периодического действия с поперечно-горизонтальной циркуляцией, которая осуществлялась осевым вентилятором № 6, расположенным в торцевой части камеры. Теплоносителем служила электроэнергия, полученная от трубчатых электронагревателей, общей мощностью 6 кВт. На боковой стене сушильной камеры находится психрометрический узел, состоящий из сухого и смоченного термометров, выполненных на базе термометров сопротивления ТСМ. Заслонки приточно-вытяжных каналов управляются исполнительным механизмом, установленным в верхней части камеры.

В целях снятия или уменьшения остаточных напряжений и выравнивания влажности по толщине заготовок в сушильной камере была установлена система кондиционирования.

Система автоматического контроля и управления процессом импульсной сушки заготовок включает в себя психрометрический узел, двухканальный измеритель-регулятор температуры ТРМ202 (фирмы «ОВЕН», г. Москва), имеющего интерфейс для связи с ПК. Программа, разработанная фирмой «ОВЕН», позволяет вести контроль параметров сушки в режиме online и архивировать полученные данные. Продолжительность стадии «импульс» и «пауза» устанавливается с использованием таймера УТ-1 («ОВЕН»).

В целях предотвращения коробления заготовок в верхних рядах штабеля сушильной камеры они выкладываются из швеллеров, обеспечивающих давление на нижележащие ряды заготовок в пределах 100 кг/м² [20].

Подлежащие сушке заготовки из древесины ироко (при начальной влажности 30 %) имели размеры, мм:

Толщина.....25
Ширина.....100
Длина.....1200

Процесс импульсной сушки ироко включал в себя следующие технологические операции:

- прогрев заготовок (3 ч);
- многоступенчатую сушку (6 ступеней);
- кондиционирование заготовок (4 ч).

Продолжительность стадий «импульс» и «пауза» при сушке заготовок ироко составляла 2 ч соответственно. Температура сушильного агента

на стадии «импульс» поддерживалась в диапазоне 52...70 °С. В ходе процесса сушки температура ступенчато поднималась в зависимости от сушильных напряжений, характер изменения которых регулярно контролировался по силовым секциям. Текущая влажность заготовок ироко определялась по контрольным образцам влажности. Были проведены две сушки заготовок из древесины ироко. Заготовки были высушены до влажности 4...6 %.

Качество высушенного материала определялось по средней конечной влажности заготовок, отклонению влажности отдельных заготовок от средней влажности штабеля, перепаду влажности по толщине заготовок и условному показателю остаточных деформаций [21]. Заготовки из древесины ироко были высушены по первой категории качества. Продолжительность сушки составила 8 сут [22].

Подлежащие сушке заготовки из древесины мербау (при начальной влажности 40...45 %) имели размеры, мм:

Толщина.....25
Ширина.....180
Длина.....1500

Процесс импульсной сушки мербау включал в себя следующие технологические операции:

- прогрев заготовок (3 ч);
- многоступенчатую сушку (7 ступеней);
- кондиционирование заготовок (5 ч).

Продолжительность стадий «импульс» и «пауза» при сушке заготовок мербау составляла 1...3 ч. Температура сушильного агента на стадии «импульс» поддерживалась в диапазоне 50...70 °С. В ходе процесса сушки температура ступенчато поднималась в зависимости от сушильных напряжений, характер изменения которых регулярно контролировался по силовым секциям. Текущая влажность заготовок мербау определялась по контрольным образцам влажности. Было высушено 8 м³ заготовок из древесины мербау. Заготовки были высушены до влажности 6...8 %.

Качество высушенного материала определялось по средней конечной влажности заготовок, отклонению влажности отдельных заготовок от средней влажности штабеля, перепаду влажности по толщине заготовок и условному показателю остаточных деформаций [23]. Заготовки из древесины мербау были высушены по второй категории качества. Продолжительность сушки составила 13 сут.

Подлежащие сушке заготовки из древесины венге (при начальной влажности 50 %) имели размеры, мм:

Толщина.....45
Ширина.....100
Длина.....1500

Т а б л и ц а 5

Режим сушки заготовок из древесины ироко толщиной 25 мм**Drying mode for 25 mm thick merbau blanks**

Средняя влажность древесины, %	Температура агента сушки, °С	Психрометрическая разность, Δt °С	Степень насыщенности, %
>50	49	2,5	88
50–40	49	3,0	85
40–35	49	4,5	77
35–30	49	8,0	62
30–25	54,5	28	35
25–20	60,0	45	15
20–15	65,5	28	18
<15	82	27,5	26

Т а б л и ц а 6

Режим сушки заготовок из древесины мербау толщиной 25 мм**Drying mode for 25 mm merbau blanks**

Средняя влажность древесины, %	Температура агента сушки, °С	Психрометрическая разность, Δt °С	Степень насыщенности, %
>40	43,5	2,5	87
40–35	43,5	3,5	84
35–30	43,5	4,5	76
30–25	49,0	8	62
25–20	54,5	17	35
20–15	60	28	15
<15	71	27,5	21

Т а б л и ц а 7

Режим сушки заготовок из древесины венге толщиной 45 мм**Drying mode for 45 mm thick blank wood**

Средняя влажность древесины, %	Температура агента сушки, °С	Психрометрическая разность, Δt °С	Степень насыщенности, %
>50	43,5	2,0	90
50–40	43,5	2,5	87
40–35	43,5	3,5	81
35–30	43,5	6,0	70
30–25	49,0	14,0	40
25–20	54,5	22,5	22
20–15	60,0	28	15
<15	71	27,5	21

Процесс импульсной сушки венге включал в себя следующие технологические операции:

- прогрев заготовок (4 ч);
- многоступенчатую сушку (8 ступеней);
- кондиционирование заготовок (6 ч).

Продолжительность стадий «импульс» и «пауза» при сушке заготовок венге составляла 1...4 ч. Температура сушильного агента на стадии «импульс» поддерживалась в диапазоне 40...68 °С. В ходе процесса сушки температура ступенчато поднималась в зависимости от сушильных напряжений, характер изменения которых регулярно контролировался по силовым секциям. Текущая влажность заготовок венге определялась по контрольным образцам влажности. Из древесины венге было высушено 8 м³ заготовок до влажности 6...7 %.

Качество высушенного материала определялось по средней конечной влажности заготовок, отклонению влажности отдельных заготовок от средней влажности штабеля, перепаду влажности по толщине заготовок и условному показателю остаточных деформаций [21]. Заготовки из древесины венге были высушены по второй категории качества. Продолжительность сушки составила 18 сут.

Следует отметить, что определение категории качества высушенного материала после каждой сушки делает необходимым наличие в сушильном производстве специальной лаборатории. В ее состав должно входить следующее оборудование [24]: сушильный шкаф, технические весы с пределом взвешивания до 500 г, торговые весы с пределом взвешивания до 25 кг, влагомеры электрические, анемометры (термоанемометры), лабораторные термометры, фонари электрические, настольная ленточная пила с электродвигателем, измерительные приборы (рулетки, складные метры), а также техническая литература по сушке древесины.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования физико-механических свойств древесины ироко, мербау и венге приведены в работах [3, 5, 6]. Режимы сушки заготовок из древесины ироко, мербау и венге для камер периодического действия в отечественной технической литературе по сушке древесины не приводятся.

Режимы сушки заготовок из древесины ироко, мербау и венге приведены в табл. 5–7 [25]

Применение импульсных режимов для сушки заготовок из древесины ироко, мербау и венге предпочтительнее, так как при одинаковой продолжительности процесса по сравнению с традиционными режимами, представленными в табл. 5–7 существенно экономятся энергозатраты, идущие на циркуляцию сушильного агента.

Режимы импульсной сушки заготовок из древесины ироко, мербау и венге представлены в табл. 8–10

Т а б л и ц а 8

Режим импульсной сушки заготовок из древесины ироко толщиной 25 мм
Pulse-drying mode for 25 mm thick African teak

Продолжительность сушки, сут	Температура агента сушки, °С	Режим сушки по стадиям, ч		Текущая влажность, %
		«импульс»	«пауза»	
1	52	2	2	30,0
3	55	2	2	24,1
4	59	2	2	21,0
5	62	2	2	18,3
7	66	2	2	11,4
8	70	2	2	4–6

Т а б л и ц а 9

Режим импульсной сушки заготовок из древесины мербау толщиной 25 мм
Pulse-drying mode for 25 mm merbau wood

Продолжительность сушки, сут	Температура агента сушки, °С	Режим сушки по стадиям, ч		Текущая влажность, %
		«импульс»	«пауза»	
1	50	1	3	45,0
3	52	1,5	3	37,1
5	55	2	3	31,4
7	59	2,5	2,5	25,7
9	63	3	2,5	18,7
11	66	3	2	11,2
13	70	3	2	6–8

Т а б л и ц а 10

Режим импульсной сушки заготовок из древесины венге толщиной 45 мм
Pulse drying mode for 45 mm thick wenge wood

Продолжительность сушки, сут	Температура агента сушки, °С	Режим сушки по стадиям, ч		Текущая влажность, %
		«импульс»	«пауза»	
1	40	1	4	50,0
4	44	1,5	4	42,1
6	48	1,5	3,5	35,6
9	52	2,0	3,5	29,4
11	57	2,0	3,0	23,3
13	60	2,5	3,0	17,2
15	64	2,5	2,5	11,5
18	68	2,0	2,0	6–7

Выводы

Проведенные импульсные сушки заготовок из древесины ироко, мербау и венге в опытно-экспериментальной сушильной камере подтвердили возможность применения импульсной технологии сушки в условиях производства для этих пород древесины.

Список литературы

- [1] Древесные породы мира. Т. 1. М.: Лесная пром-сть, 1982. 328 с.
- [2] Энциклопедия древесных пород. Справочник сортов древесины. М.: Кладезь-букс, 2008. 192 с.
- [3] Фабрика «Мебель и интерьеры», Ироко. 2006–2022. URL: <https://www.mebelib.ru/wood-tree/iroko/> (дата обращения 25.09.2022)
- [4] Курышов Г.Н., Косарин А.А. Импульсная сушка заготовок из древесины махагоны и мербау // Науч. труды МГУЛ. Вып. 349. М.: МГУЛ, 2010. С. 46–48.
- [5] Фабрика «Мебель и интерьеры», Мербау. 2006–2022. URL: <https://www.mebelib.ru/wood-tree/merbau/> (дата обращения 25.09.2022)
- [6] Фабрика «Мебель и интерьеры», Венге. 2006–2022. URL: <https://www.mebelib.ru/wood-tree/wenge/> (дата обращения 25.09.2022)
- [7] Косарин А.А., Курышов Г.Н. Импульсные режимы сушки для заготовок из древесины ироко // Науч. труды МГУЛ. Вып. 353. М.: МГУЛ, 2011. С. 27–28.
- [8] WOODSTOCK. Эксперт по дереву. Пиломатериалы Ироко // 2006–2022 WoodStock — Шпон и пиломатериалы ценных пород. URL: https://www.woodstock.ru/products/iroko_iroko_p/ (дата обращения 25.09.2022).
- [9] WOODSTOCK. Эксперт по дереву. Пиломатериалы Мербау // 2006–2022 WoodStock — Шпон и пиломатериалы ценных пород. URL: https://www.woodstock.ru/products/merbau_merbau_p/ (дата обращения 25.09.2022).
- [10] WOODSTOCK. Эксперт по дереву. Пиломатериалы Венге // 2006–2022 WoodStock — Шпон и пиломатериалы ценных пород. URL: https://www.woodstock.ru/products/wenge_wenge_p/ (дата обращения 25.09.2022).
- [11] Расев А.И., Курышов Г.Н., Ляшенко С.В. Прерывистые режимы сушки пиломатериалов и заготовок // Деревообрабатывающая пром-сть, 1993. № 3. С. 15–16.
- [12] Расев А.И., Курышов Г.Н., Ляшенко С.В. Способ сушки пиломатериалов. Патент №2027127 РФ. Опубл. 20.01.1995. Бюл. № 2.
- [13] Расев А.И., Курышов Г.Н. Технология сушки пиломатериалов в аэродинамических сушильных камерах // Деревообработка в России, 1998. № 1. С. 3–4.
- [14] Курышов Г.Н. Сушка пиломатериалов из груши импульсными режимами // Науч. труды МГУЛ. Вып. 319. М.: МГУЛ, 2003. С. 20–21.
- [15] Косарин А.А., Курышов Г.Н. Импульсная сушка пиломатериалов из древесины ольхи // Науч. труды МГУЛ. Вып. 368. М.: МГУЛ, 2013. С. 25–27.
- [16] Курышов Г.Н., Косарин А.А., Расева Е.А. Способ импульсной сушки пиломатериалов. Патент №2607923 РФ. Опубл. 11.04.2017. Бюл. № 2.
- [17] Курышов Г.Н., Косарин А.А., Расева Е.А. Способ импульсной сушки пиломатериалов. Патент №2615854 РФ. Опубл. 11.04.2017. Бюл. № 11.
- [18] Курышов Г.Н., Косарин А.А., Косарина А.А. Способ импульсной сушки. Пат. №2637288 РФ. Опубл. 01.12.2017. Бюл. № 34.
- [19] Косарин А.А. Технология импульсной сушки пиломатериалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук, 2012. 22 с.
- [20] Серговский П.С., Расев А.И. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесная пром-сть, 1987. 360 с.
- [21] Расев А.И. Сушка древесины. СПб.: Лань, 2010. 416 с.
- [22] Косарин А.А., Курышов Г.Н. Импульсные режимы сушки для заготовок из древесины Ироко // Науч. труды МГУЛ. Вып. 353. М.: МГУЛ, 2011. С. 27–28.

- [23] Курьшов Г.Н., Косарин А.А. Импульсная сушка заготовок из древесины махагони и мербау // Науч. труды МГУЛ. Вып. 349. М.: МГУЛ, 2010. С. 46–48.
- [24] Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки пиломатериалов. Архангельск: Изд-во ОАО «НАУЧдревпром-ЦНИИМОД», 2000. 125 с.
- [25] Boone R.S., Kozlik C.J., Bois P.J., Wengert E.M. Dry kiln schedules for commercial woods-temperate and tropical. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-57. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1988, 158 p.

Сведения об авторах

Деянов Дмитрий Игоревич — аспирант ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Мытищинский филиал, d.dejanov@yandex.ru

Косарин Анатолий Александрович — канд. техн. наук, доцент, заместитель директора ООО «Форсклад», Kosarin2008@yandex.ru

Моисеев Сергей Андреевич — магистрант МГТУ им Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), сотрудник АО «Волга», rf-baf2@mail.ru

Курьшов Григорий Николаевич — канд. техн. наук, доцент

Поступила в редакцию 05.12.2022.

Одобрено после рецензирования 18.01.2023.

Принята к публикации 21.03.2023.

IMPULSE DRYING OF AFRICAN TEAK, MERBAU AND WENGE WOOD BLANKS IN A CONVECTION DRYING CHAMBER

D.I. Deyanov¹, A.A. Kosarin², S.A. Moiseev³, G.N. Kuryshov

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

²ООО «Форсклад», 40, Partizanskaya st., 121359, Moscow, Russia

³Volga JSC, 1, Gorky st., 606407, Balakhna, Nizhny Novgorod reg., Russia

d.dejanov@yandex.ru

A review of literature sources on the physical and mechanical properties of iroko, merbau and wenge wood is given. The places of growth of these breeds are indicated. The description of the varieties of properties of the rocks under consideration, depending on the distribution area, is presented. A review of literature sources on the modes and parameters of drying of iroko, merbau and wenge wood blanks is presented. The drying modes of iroko, merbau and wenge wood blanks are considered, the parameters of which depend on the current moisture content of the wood and the principles of constructing pulse drying modes. The modes of pulse drying of iroko wood blanks with a thickness of 25 mm, merbau with a thickness of 25 mm and wenge with a thickness of 45 mm are determined. It is shown that the use of pulsed drying modes of workpieces can reduce electricity consumption and improve product quality.

Keywords: iroko, merbau and wenge wood blanks, impulse drying, drying mode, quality indicators

Suggested citation: Deyanov D.I., Kosarin A.A., Moiseev S.A., Kuryshov G.N. *Impul'snaya sushka zagotovok iz drevesiny iroko, merbau i venge v konvektivnoy sushil'noy kamere* [Impulse drying of african teak, merbau and wenge wood blanks in a convection drying chamber]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 3, pp. 143–149. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-143-149

References

- [1] *Drevesnye porody mira* [Timber species of the world], in 3 t. T. 1. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Timber industry], 1982, 328 p.
- [2] *Entsiklopediya drevesnykh porod. Spravochnik sortov drevesiny* [Encyclopedia of Wood Species. Directory of Wood Varieties.]. Moscow: Kladez'-buku [Kladez'-Books], 2008, 192 p.
- [3] *Fabrika «Mebel' i inter'yery», Iroko* [Factory «Furniture and interiors», Iroko] 2006–2022. Available at: <https://www.mebelib.ru/wood-tree/iroko/> (accessed 25.09.2022).
- [4] Kuryshov G.N., Kosarin A.A. *Impul'snaya sushka zagotovok iz drevesiny makhagony i merbau* [Impulse drying of blanks from mahogany and merbau wood]. *Nauchnye trudy MGUL* [Scientific works of MSFU], 2010, iss. 349, pp. 46–48.
- [5] *Fabrika «Mebel' i inter'yery», Merbau* [Factory «Furniture and Interiors», Merbau] 2006–2022. Available at: <https://www.mebelib.ru/wood-tree/merbau/> (accessed 25.09.2022).
- [6] *Fabrika «Mebel' i inter'yery», Venge* [Factory «Furniture and interiors», Wenge] 2006–2022. Available at: <https://www.mebelib.ru/wood-tree/wenge/> (accessed 25.09.2022).

- [7] Kosarin A.A., Kuryshov G.N. *Impul'snye rezhimy sushki dlya zagotovok iz drevesiny iroko* [Impulse drying modes for Iroko wood products]. Nauchnye trudy MGUL [Scientific works of MSFU], 2011, iss. 353, pp. 27–28.
- [8] WOODSTOCK. *Ekspert po derevu. Pilomaterialy Iroko 2006–2022 WoodStock — Shpon i pilomaterialy tsennykh porod* [WOODSTOCK. Wood Expert. Iroko Lumber // 2006–2022 WoodStock — Veneer and lumber of valuable wood species] Available at: https://www.woodstock.su/products/iroko_iroko_p/ (accessed 25.09.2022).
- [9] WOODSTOCK. *Ekspert po derevu. Pilomaterialy Merbau 2006–2022 WoodStock — Shpon i pilomaterialy tsennykh porod* [WOODSTOCK. Wood Expert. Merbau Lumber // 2006–2022 WoodStock — Veneer and lumber of valuable wood species] Available at: https://www.woodstock.su/products/merbau_merbau_p (accessed 25.09.2022).
- [10] WOODSTOCK. *Ekspert po derevu. Pilomaterialy Venge // 2006–2022 WoodStock — Shpon i pilomaterialy tsennykh porod* [WOODSTOCK. Wood Expert. Wenge Lumber // 2006–2022 WoodStock — Veneer and lumber of valuable wood species] Available at: https://www.woodstock.su/products/venge_wenge_p/ (accessed 25.09.2022).
- [11] Rasev A.I., Kuryshov G.N., Lyashenko S.V. *Preryvistyie rezhimy sushki pilomaterialov i zagotovok* [Intermittent drying of sawnwood and blanks]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Wood industry], 1993, no. 3, pp. 15–16.
- [12] Rasev A.I., Kuryshov G.N., Lyashenko S.V. *Sposob sushki pilomaterialov* [Method of drying]. Pat. no. 2027127 RF. Publ. 20.01.1995. Bull. no. 2.
- [13] Rasev A.I., Kuryshov G.N. *Tekhnologiya sushki pilomaterialov v aerodinamicheskikh sushil'nykh kamerakh* [Technology of drying lumber in aerodynamic drying chambers]. *Derevoobrabotka v Rossii* [Wood processing in Russian], 1998, no. 1, pp. 3–4.
- [14] Kuryshov G.N. *Sushka pilomaterialov iz grushi impul'snymi rezhimami* [Drying of lumber pear with impulse modes]. Nauchnye trudy MGUL [Scientific works of MSFU], 2003, iss. 319, pp. 20–21.
- [15] Kosarin A.A., Kuryshov G.N. *Impul'snaya sushka pilomaterialov iz drevesiny ol'khi* [Impulse drying of alder lumber]. Nauchnye trudy MGUL [Scientific works of MSFU], 2013, iss. 368, pp. 25–27.
- [16] Kuryshov G.N., Kosarin A.A., Raseva E.A. *Sposob impul'snoy sushki pilomaterialov* [Impulse drying method for lumber]. Pat. no. 2607923 RF. Publ. 11.04.2017. Bull. no. 2.
- [17] Kuryshov G.N., Kosarin A.A., Raseva E.A. *Sposob impul'snoy sushki pilomaterialov* [Impulse drying method for lumber]. Pat. no. 2615854 RF. Publ. 11.04.2017. Bull. no. 11.
- [18] Kuryshov G.N., Kosarin A.A., Kosarina A.A. *Sposob impul'snoy sushki pilomaterialov* [Impulse drying method for lumber]. Pat. no. 2637288 RF. Publ. 01.12.2017. Bull. no. 34.
- [19] Kosarin A.A. *Tekhnologiya impul'snoy sushki pilomaterialov* [Technology of pulsed drying of lumber]. Diss. Cand. Sci. (Tech.), 2012, 22 p.
- [20] Sergovskiy P.S., Rasev A.I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny* [Hydrothermal treatment and preservation of wood]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1987, 360 p.
- [21] Rasev A.I. *Sushka drevesiny* [Drying wood]. St. Petersburg: Lan', 2010, 416 p.
- [22] Kosarin A.A., Kuryshov G.N. *Impul'snye rezhimy sushki dlya zagotovok iz drevesiny Iroko* [Impulse drying modes for Iroko wood products]. Nauchnye trudy MGUL [Scientific works of MSFU], 2011, iss. 353, pp. 27–28.
- [23] Kuryshov G.N., Kosarin A.A. *Impul'snaya sushka zagotovok iz drevesiny makhagoni i merbau* [Impulse drying of blanks from mahogany and merbau wood]. Nauchnye trudy MGUL [Scientific works of MSFU], 2010, iss. 349, pp. 46–48.
- [24] *Rukovodnyashchie tekhnicheskie materialy po tekhnologii kamernoy sushki pilomaterialov* [Guiding technical materials on the technology of chamber drying of sawn timber]. Arkhangelsk: Nauchdrevprom-TsNIIMOD, 2000, 125 p.
- [25] Boone R.S., Kozlik C.J., Bois P.J., Wengert E.M. *Dry kiln schedules for commercial woods-temperate and tropical*. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-57. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1988, 158 p.

Authors' information

Deyanov Dmitriy Igorevich✉ — pg. of the BMSTU (Mytishchi branch), d.dejanov@yandex.ru

Kosarin Anatoliy Aleksandrovich — Cand. Sci. (Tech.), Deputy Director of the LTD «Forcklad», kosarin2008@yandex.ru

Moiseev Sergey Andreevich — Master graduand of the BMSTU (Mytishchi branch), employee of Volga JSC, rf-baf2@mail.ru

Kuryshov Grigoriy Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), kuryshov@mgul.ac.ru

Received 05.12.2022.

Approved after review 18.01.2023.

Accepted for publication 21.03.2023.

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



РОСЛЕСХОЗ: РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА РАБОТ ПО СОХРАНЕНИЮ ЛЕСОВ 25 РЕГИОНОВ РОССИИ

Ежегодно Рослесинфорг (подведомственная организация Рослесхоза) проверяет 10 % лесничеств 25 субъектов России, где проводились мероприятия по сохранению лесов

Задачи анализа — проверить и проанализировать качество проведенных работ, переданных на исполнение региональных лесных ведомств, а также устранить нарушения лесного законодательства. В 2022 году анализ мероприятий по сохранению лесов* был проведен в 52 лесничествах 25 субъектов России. Всего обследовано 4 118 лесных участков. На 32 % из них выявлены нарушения, наибольшее количество нарушений выявлено при выполнении комбинированного лесовосстановления, рубок прореживания и рубок молодняков.

«Лучше всего справляются с выполнением работ по сохранению лесов в Тульской области и Чувашской Республике. Только на 12 % лесных участков в этих регионах выявлены нарушения. К сожалению, хуже с обязательствами справляются в Мурманской и Томской области — на 56 % лесных участков мероприятия по сохранению лесов выполнены с нарушениями, в Ямало-Ненецком автономном округе — на 54 %, в Кировской области — на 48 %, в Иркутской — на 47 %. Департаменты лесного хозяйства по федеральным округам направили отчеты по анализу качества работ для рассмотрения в органы прокуратуры. Также регионам выданы акты проверки, в соответствии с которыми им необходимо разработать план по устранению выявленных нарушений», — рассказала замглавы Рослесхоза Анастасия Винокурова.

Также она отметила, что в 2022 году повторный анализ мероприятий в проблемных регионах показал, что количество нарушений лесного законодательства уменьшилось в 1,3 раза (до 27 %) в Республике Тыва и Красноярском крае, в 1,2 раза (до 30 %) в Архангельской области и Республике Коми.

В этом году проверки пройдут во Владимирской, Ивановской, Смоленской, Тверской, Тамбовской, Мурманской, Калининградской, Ленинградской, Вологодской, Кировской, Иркутской, Новосибирской, Томской, Курганской, Свердловской и Амурской областях, республиках Карелия, Башкортостан, Мордовия, Татарстан, Бурятия, Марий Эл, Якутия, Алтайском, Краснодарском и Забайкальском краях, а также Ямало-Ненецком автономном округе.

Справочно:

*Восточный экономический форум — ключевая международная площадка для создания и укрепления связей российского и мирового инвестиционного сообщества, всесторонней экспертной оценки экономического потенциала российского Дальнего Востока, представления его инвестиционных возможностей и условий ведения бизнеса на территориях опережающего развития.

Пресс-служба Рослесхоза