

Главный редактор

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

Зам. главного редактора

Никишов Владимир Дмитриевич, проф., канд. техн. наук, академик РАН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

Редакционный совет журнала

Азаров Василий Ильич, проф., д-р техн. наук, заслуженный деятель науки и техники РФ, академик РАН, Москва
Артамонов Дмитрий Владимирович, проф., д-р техн. наук, Пензенский ГУ, Пенза
Беляев Михаил Юрьевич, д-р техн. наук, начальник отдела, зам. руководителя ИТЦ РКК «Энергия» им. С.П. Королева, Москва
Бемман Альбрехт, проф., Дрезденский технический университет, Институт профессуры для стран Восточной Европы, Германия
Драпалюк Михаил Валентинович, профессор, д-р техн. наук, проректор по науке и инновациям ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», Воронеж
Евдокимов Юрий Михайлович, профессор, канд. хим. наук, академик Нью-Йоркской академии наук, чл.-корр. РАН, член центрального правления Нанотехнологического общества России, Москва
Залесов Сергей Вениаминович, проф., д-р с.-х. наук, УГЛТУ, Екатеринбург
Залесов Вячеслав Ильич, проф., д-р техн. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Исаев Александр Сергеевич, академик РАН, Международный институт леса, Москва
Карлайнен Тимо, проф., Университет Восточной Финляндии г. Йоэнсуу, Лесной НИИ «Метла», Финляндия
Кожухов Николай Иванович, академик РАН, проф., д-р экон. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Козлов Александр Ильич, канд. техн. наук, ученый секретарь Совета ОАО «НПО ИТ», Королев
Комаров Евгений Геннадиевич, проф., д-р техн. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Корольков Анатолий Владимирович, проф., д-р физ.-мат. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Кох Нильс Элерс, проф., д-р агрономии в области лесной политики, Президент IUFRO, Центр лесного и ландшафтного планирования университета, г. Копенгаген, Дания
Кротт Макс, проф., специализация «Лесная политика», Георг-Аугуст-Университет, Геттинген
Леонт'ев Александр Иванович, академик РАН, проф., д-р техн. наук, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Липаткин Владимир Александрович, проф., канд. биол. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Майорова Елена Ивановна, проф., д-р юр. наук, канд. с.-х. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Мартынюк Александр Александрович, д-р с.-х. наук, ФБУ ВНИИЛМ, Москва
Моисеев Николай Александрович, академик РАН, проф., д-р с.-х. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Редкин Анатолий Константинович, проф., д-р техн. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Рыкунин Станислав Николаевич, проф., д-р техн. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Семенов Юрий Павлович, проф., д-р техн. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Стрекалов Александр Федорович, канд. техн. наук, РКК «Энергия», ЗАО «ЭЭМ», Королев
Теодоронский Владимир Сергеевич, проф., д-р с.-х. наук, академик РАН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Титов Анатолий Матвеевич, канд. техн. наук, зам. начальника отделения, ученый секретарь Совета ЦУП ЦНИИМАШ, Королев
Тулузакوف Дмитрий Владимирович, доц., канд. техн. наук, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Цветков Вячеслав Едимович, проф., д-р техн. наук, академик РАН, Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
Чубинский Анатолий Николаевич, проф., д-р техн. наук, СПбГЛТУ, Санкт-Петербург
Шимкович Дмитрий Григорьевич, проф., д-р техн. наук, ООО «Кудесник», Москва

Ответственный секретарь Расева Елена Александровна

Редактор Л.В. Забродина
Перевод М.О. Жердева
Набор и верстка М.А. Зверев
Электронная версия Н.К. Зверева

*Учредитель МГТУ им. Н.Э. Баумана
 Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
 Свидетельство о регистрации ПИ № Фс 77-68118 от 21.12.2016
 Журнал 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*

Дата выхода в свет 13.03.2017.
 Тираж 600 экз.
 Заказ №
 Объем 18 п. л.
 Цена свободная

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

Editor-in-chief

Sanaev Victor Georgievich, professor, Dr.Sci.(Tech.), director of BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Deputy Editor-in-Chief

Nikishov Vladimir Dmitrievich, professor, Ph.D.(Tech.), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow

Editorial council of the journal

Azarov Vasily Il'ich, professor, Dr.Sci.(Tech.), Honored Worker of Science and Technology of Russia, Academy of Natural Sciences, Moscow
Artamonov Dmitry Vladimirovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Penza State
Belyaev Mikhail Yur'evich, Dr.Sci.(Tech), Head of Department, Deputy Director of S.P. Korolev RSC "Energiya", Moscow
Bemman Al'brekht, professor, the Dresden technical university, professorate Institute for countries of Eastern Europe, Germany
Drapalyuk Mikhail Valentinovich, professor, Dr.Sci.(Tech), Vice-Rector for Science and Innovation Voronezh State Academy of Forestry, Voronezh
Evdokimov Yuriy Mikhaylovich, professor, Ph.D.(Chemical), academician of the New York Academy of Sciences, corr. Academy of Natural Sciences, a member of the Central Board of Nanotechnology Society of Russia, Moscow
Zalesov Sergey Veniaminovich, professor, the Dr.Sci.(Agricultural), USFEU, Ekaterinburg
Zaprudnov Vyacheslav Il'ich, professor, Dr.Sci.(Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Isaev Aleksandr Sergeevich, academician of the Russian Academy of Sciences, International institute of the wood, Moscow
Karjalainen Timo, professor, university of East Finland Joensuu, forest scientific research institute "Metla", Finland
Kozhukhov Nikolay Ivanovich, professor, academician of the Russian Academy of Sciences, Dr.Sci.(Econ.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Kozlov Aleksandr Il'ich, Ph.D.(Tech), Scientific Secretary of the Board of "NPO IT", Korolev
Komarov Evgeniy Gennadievich, professor, Dr.Sci.(Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Korolkov Anatoliy Vladimirovich, professor, Dr.Sci.(Phys.-Math.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Kokh Nil's Elers, professor, the Dr. of agronomics in the field of forest policy, the President of IUFRO, the Center of forest and landscape planning of university Copenhagen, Denmark
Krott Maks, professor of Forest policy specialization, George-August-Universitet, Goettingen
Leont'ev Aleksandr Ivanovich, academician of the Russian Academy of Sciences, professor, Dr.Sci.(Tech.), BMSTU, Moscow
Lipatkin Vladimir Aleksandrovich, professor, Ph.D (Biol.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Mayorova Elena Ivanovna, Dr.Sci.(Jurisprudence), Ph.D.(Agricultural), MSTU after N.E. Bauman (Mytishchi branch), Moscow
Martynuk Aleksandr Aleksandrovich, Dr.Sci.(Agricultural), VNIILM, Moscow
Moiseev Nikolay Aleksandrovich, professor, Dr.Sci. (Agricultural) academician of the Russian Academy of Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Red'kin Anatoliy Konstantinovich, professor, Dr.Sci.(Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Rykunin Stanislav Nikolaevich, professor, Dr.Sci.(Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Semenov Yuriy Pavlovich, professor, Dr.Sci.(Tech.), BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Strekalov Aleksandr Fedorovich, Ph.D.(Tech), Rocket and space corporation «ENERGIJA», Korolev
Teodoronskiy Vladimir Sergeevich, professor, Dr.Sci.(Agricultural), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Titov Anatoliy Matveevich, Ph.D.(Tech), Deputy Chief of Department, Scientific Secretary of the Board of MCC TSNIIAMASH, Korolev
Tuluzakov Dmitriy Vladimirovich, associate professor, Ph.D.(Tech.), MSTU after N.E. Bauman (Mytishchi branch), Moscow
Tsvetkov Vyacheslav Efimovich, professor, Dr.Sci.(Tech.), academician of the Russian Academy of Natural Sciences, BMSTU (Mytishchi branch), Moscow
Chubinskiy Anatoliy Nikolaevich, professor, Dr.Sci.(Tech.), Saint Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg
Shimkovich Dmitriy Grigor'evich, professor, Dr.Sci.(Tech.), ООО "Kudesnik", Moscow

Assistant Editor Raseva Elena Aleksandrovna

Editor L.V. Zbrodina
Translation by M.O. Zherdeva
PageMaker M.A. Zverev
Electronic version N.K. Zvereva

*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 от 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*

It is sent for the press 13.03.2017.
 Circulation 600 copies
 Order №
 Volume 18 p. p.
 Price free

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

Содержание

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Малышева Н.В., Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н., Золина Т.А. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годичного депонирования углерода	4
Данчева А.В., Залесов С.В. Современное состояние высокополнотных сосняка в рекреационного назначения в Баянаульском ГНПП	14
Залесов С.В., Панин И.А. Ресурсы ягодных кустарничков в ельнике мшистом Североуральской среднегорной лесорастительной провинции	21
Дебков Н.М., Ильинцев А.С., Васильев А.С. Оценка подпологового возобновления в сосняках южной тайги Томской области	28
Пастухова Н.О., Лебедева О.П., Поташева Ю.И. Влияние осушительной мелиорации на выход живицы сосны в условиях северной подзоны тайги Архангельской области	36
Изместьев А.А. О продукции лесного хозяйства в контексте его экономической организации	41

ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Чемоданов А.Н., Гайнуллин Ренат Х., Гайнуллин Ришат Х. Определение силовых характеристик процесса смешанного резания древесины на шпон	48
Петрунина Е.А., Лоскутов С.Р., Шишикин А.С. Термический анализ затопленной древесины	54
Ермоченков М.Г., Евстигнеев А.Г. Изменение теплоты сгорания древесного топлива при торрефикации	64
Лавриченко В.А., Рыбин Б.М., Завражнова И.А. Проектное моделирование эффективности мебельных предприятий, различных по уровню технической оснащенности и режимам работы	69
Рыбин Б.М., Завражнова И.А. К вопросу оценки блеска прозрачных лаковых покрытий на древесине	77
Кононов Г.Н., Кудряшов А.В., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Косарев К.Л. Перспективы использования бетулинсодержащих отходов окорки древесины в качестве комплексного сорбента	84

ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

Лозовецкий В.В., Шадрин А.А., Кохреидзе М.В., Катков С.А. Экспериментально-аналитические исследования движения древесно-стружечных материалов в элементах пневмосистем	88
Посыпанов С.В., Коробицын А.В. Исследование равномерного движения открытого баржевого модуля	95
Карпачев С.П., Запруднов В.И., Комяков А.Н., Сорокин М.А. Влияние числа сортиментов на транспортно-технологические показатели работы берегового склада	101
Запруднов В.И., Карпачев С.П., Быковский М.А. Технологии и технические средства процессов лесосечных работ	108

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Дорошенко В.А., Друк Л.В., Герасимов А.Э. Математическое описание взаимовлияния технических средств распределенных по уровням систем управления с обратными связями	118
Матюшин М.М., Зеленов Д.А., Бакланов Е.В. Выбор оптимальных маршрутов передачи данных при оперативном управлении космическими аппаратами	125
Шульц А.Н. Скачок конденсации при запуске тепловых труб	131
Шмаков А.В., Серебренников П.С., Шипов Н.В., Чернова Т.В. Сходящаяся и расходящаяся плоская цилиндрическая волна в идеальной сжимаемой жидкости	137
Рубинштейн А.И., Полещук О.М., Чернова Т.В. Чему можно и следует учить студентов	141

Contents

FORESTRY

Malysheva N.V., Moiseev B.N., Filipchuk A.N., Zolina T.A. Methods of carbon balance estimation in forest ecosystems and application of them for calculations of annual carbon sequestration	4
Dancheva A.V., Zalesov S.V. The current state of high-density pine forest of recreational purpose in the GNPP «Bayanaul»	14
Zalesov S.V., Panin I.A. Resources of berry shrubs in mossy spruce forest of Northern ural middle mountains forest province	21
Debkov N.M., Ilintsev A.S., Vasilev A.S. Evaluation of regeneration under the canopy pine forests of the southern taiga of Tomsk region	28
Pastukhova N.O., Lebedeva O.P., Potasheva Yu.I. Effect of reclamation of marshland on soft resin yield of pinus sylvestris	36
Izmestev A.A. About forestry products in the context of its economic organization	41

WOOD PROCESSING AND CHEMICAL TECHNOLOGY

Chemodanov A.N., Gainullin Ren.Kh., Gainullin Rish.Kh. The definition of the mixed wood cutting process power characteristics in veneer-sawing industry	48
Petrunina E.A., Loskutov S.R., Shishikin A.S. Thermal analysis of flooded wood	54
Ermochenkov M.G., Evstigneev A.G. Changes of the calorific value of wood fuel after torrefaction	64
Lavrichenko V.A., Rybin B.M., Zavrazhnova I.A. Modeling project efficiency in various furniture preedpriyaty level of technical equipment and operating modes	69
Rybin B.M., Zavrazhnova I.A. Estimation of gloss transparent laquer coating on wood	77
Kononov G.N., Kudryashov A.V., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Kosarev K.L. Prospects for the use of waste wood debarking containing betulin as a complex sorbent	84

FOREST ENGINEERING

Lozovetskiy V.V., Shadrin A.A., Kokhraidze M.V., Katkov S.A. Experimental and analytical studies of the movement of wood-strand materials in the elements of pneumatics systems	88
Posypanov S.V., Korobitsyn A.V. Investigation of an open barge module uniform motion	95
Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Komyakov A.N., Sorokin M.A. The influence of number of timber assortments on the technology of banking ground	101
Zaprudnov V.I., Karpachev S.P., Bykovskiy M.A. Technologies and technical tools of processes of logging operations	108

MATH MODELING

Doroshenko V.A., Druk L.V., Gerasimov A.E. The mathematical description of the interaction of technical means by levels of distributed control systems with feedback	118
Matyushin M.M., Zelenov D.A., Baklanov Ye.V. The choice of optimal route of data at the operational management of spacecraft	125
Schults A.N. Jump of condensation at start of heat pipes	131
Shmakov A.V., Serebrennikov P.S., Shipov N.V., Chernova T.V. Convergent and divergent plane cylindrical wave in an ideal compressible fluid	137
Rubinshtein A.I., Poleshchu O.M.k, Chernova T.V. What you can and should teach students	141

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ БАЛАНСА УГЛЕРОДА В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ГОДИЧНОГО ДЕПОНИРОВАНИЯ УГЛЕРОДА

Н.В. Малышева, Б.Н. Моисеев, А.Н. Филипчук, Т.А. Золина

ФБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства», 141202, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 15

nat-malysheva@yandex.ru

Рассмотрены основанные на моделировании различные методы оценки и прогноза запаса углерода в лесах, которые получили международное признание, в их числе: ИЗИС ИААА (Австрия), EFIMOD + ROMUL (Россия), РОБУЛ (Россия), Информационная система определения и картирования депонирования лесами углерода (Россия, УГЛТУ), СВМ-CFS3 (Лесная служба Канады), FORCARB2 (Лесная служба США). Рассчитана и проиллюстрирована в картографической форме величина годичного депонирования углерода основными типами лесных экосистем зоны хвойно-широколиственных лесов Европейско-Уральской части России. Методика расчета базируется на рекомендациях МГЭИК ООН. В расчетах использованы данные Государственного лесного реестра (ГЛР). По данным ГЛР 2015 г. выполнены расчеты годичного накопления углерода в лесных экосистемах зоны хвойно-широколиственных (смешанных) лесов ЕУЧР. Получены следующие значения показателей, характеризующих скорость накопления органического вещества: $NPP = 5,92$; $R_h = 3,96$; $NEP = 1,96$ т С/га · год, а $NBP = 2,02$ т С/га · год. Полученные нами значения годичной продукции и эмиссии углерода согласуются с результатами расчетов для этой территории, сделанными научным коллективом ИААА. Расхождение оценок находится в пределах стандартных ошибок расчетов.

Ключевые слова: депонирование углерода лесами, баланс углерода, лесные экосистемы, имитационное моделирование

Ссылка для цитирования: Малышева Н.В., Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н., Золина Т.А. Методы оценки баланса углерода в лесных экосистемах и возможности их использования для расчетов годичного депонирования углерода // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 4–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-4-13

В глобальном углеродном цикле значительная роль принадлежит лесным экосистемам, что подтверждено многочисленными научными исследованиями последних десятилетий. Длительный жизненный цикл основных лесобразующих пород и замедленный биологический круговорот веществ в экосистемах бореального и умеренного пояса нашей страны способствуют накоплению углерода не только в фитомассе, но и в детрите, гумусе лесных почв и торфе. Благодаря долговременному аккумулярованию запасенного углерода в лесных экосистемах достигается биосферный эффект, связанный с поглощением парниковых газов и противодействием изменениям климатической системы планеты.

Усиление углерододепонирующей способности лесов и адаптация лесов к климатическим изменениям — актуальные проблемы научных и прикладных исследований, однако адаптивный потенциал лесов в региональном аспекте изучен недостаточно. Согласно требованиям международной отчетности, в области землепользования, изменений землепользования и лесного хозяйства расчет депонирования CO_2 лесами предпочтительно осуществлять по стратифицированным (таксономическим) географическим единицам. Объект проведенных нами исследований — экосистемы зоны хвойно-широколиственных (сме-

шанных) лесов Европейско-Уральской части России (ЕУЧР). Лесорастительное районирование соответствует Приказу Минприроды России от 23.12.2014 № 569. Цель исследований — провести анализ методов оценки баланса углерода и опробовать методические рекомендации Межправительственной группы экспертов ООН (МГЭИК ООН) для модельных расчетов годичного депонирования углерода лесными экосистемами объекта исследований.

МГЭИК ООН [1] рекомендует при оценке углеродного бюджета рассматривать пять основных пулов (хранилищ, резервуаров) углерода в лесах: надземную фитомассу лесной растительности, подземную фитомассу лесной растительности; мертвую древесину (дебрис) — сухостой и валеж; лесную подстилку; органическое вещество почвы.

Согласно международным договоренностям [2], в ежегодной национальной отчетности необходимо отражать информацию и оценивать изменения в накоплении углерода во всех пяти пулах. Это обстоятельство не требует обязательного увеличения накопления углерода во всех пулах, поскольку уменьшение запаса углерода в одном пуле может компенсироваться увеличением его в другом. Например, пул надземной фитомассы после низовых пожаров или повреждения насекомыми-вредителями уменьшается, вместе с тем

пул сухостойной и валежной древесины увеличивается. Для предоставления международной отчетности согласно климатическим соглашениям интерес представляют не потоки и миграция углерода в самой экосистеме, а ее взаимодействие с атмосферой, поэтому учитывают не потоки, а величину баланса. Если итоговый баланс по совокупности пулов положительный — идет увеличение стоков и накопление углерода как результат эффективной практики землепользования, изменений в землепользовании и лесном хозяйстве.

Материалы и методы

Для оценки углеродного обмена между экосистемой и атмосферой рассчитывают такие показатели как чистая первичная продукция (ЧПП, английская аббревиатура NPP), чистая экосистемная продукция (ЧЭП, англ. NEP) и чистая биомная продукция (ЧБП, англ. NBP). Количество органического вещества, пополняющего пул фитомассы, оценивается показателем «чистая первичная продукция». Это суммарное годовое депонирование углерода во всех фракциях фитомассы (включая подземные, отпад и опад), подсчитываемое по изменению запасов. Показатель можно определить в полевых условиях с помощью весовых методов и экстраполировать на относительно однородные ареалы расчетным путем. Однако прямой перенос данных пробных площадей на региональный уровень оценки (экорегiona, лесничества или области) может привести к существенным систематическим ошибкам.

В экологии скорость накопления органического вещества в сообществе, или чистая экосистемная продукция, — нетто-продуктивность экосистем — определяется как разность между чистой первичной продукцией и гетеротрофным дыханием (R_h) за вегетационный период или за год [3]. Гетеротрофное дыхание включает суммарное высвобождение углерода в пулах почвы, подстилки и мертвой древесины в процессе разложения. Оценка показателя представляет собой сложную задачу, не решенную до конца в методическом плане.

На локальном уровне, на пробных площадях величину NEP обычно приближенно получают суммированием годовых приростов запасов живой и мертвой фитомассы (без органики почв). Соотношения годовых потоков фитомассы и NEP в лесной экосистеме можно записать следующим образом [1, 4–6]

$$\text{NEP} = \text{NPP} - R_h \approx \text{NPP} - \text{Fall} + \Delta\text{Mort} \approx \Delta\text{Live} + \Delta\text{Mort}, \quad (1)$$

где NEP — чистая экосистемная продукция, или прирост живой и мертвой фитомассы;
NPP — чистая первичная продукция;
 R_h — гетеротрофное дыхание (в климаксе $R_h \approx \text{NPP}$, тогда $\text{NEP} \rightarrow 0$);
Fall — ежегодный естественный отпад и опад фитомассы;
 ΔLive , ΔMort — чистый прирост запаса живой и мертвой фитомассы соответственно.

В расчетах на уровне биомы регионального и глобального масштаба необходимо учитывать потери фитомассы в результате внешних воздействий. В этом случае чистая биомная продукция рассчитывается путем вычитания из чистой продукции экосистем потерь (Loss), обусловленных рубками, катастрофическими пожарами и прочими внешними факторами, нарушающими нормальное функционирование экосистем

$$\text{NBP} = \text{NEP} - \text{Loss}. \quad (2)$$

Изучение потоков углерода в лесных экосистемах с детальной характеристикой его накопления и миграции — фундаментальная научная проблема. Для ее решения необходима количественная оценка углеродных пулов. Фундаментальные научные исследования сосредоточены на поиске способов наиболее полного расчета запасов углерода в разных пулах и на их динамике во времени [7–13]. Как отмечают эксперты, «... за исключением очень малых пространственных масштабов (отдельные участки) и ограниченных временных рамок (от нескольких дней до нескольких месяцев) не представляется возможным измерить ни содержание углерода, ни уровень углеродного обмена между лесом и атмосферой» [14].

Непосредственные измерения потоков CO_2 и углеродного обмена между экосистемой и атмосферой проводят с использованием метода вихревых пульсаций (eddy covariance). Однако оценки углеродного обмена, полученные этим экспериментальным методом, в силу пространственной и параметрической ограниченности измерений невозможно использовать для региональных обобщений [15]. (Для справки: за весь период существования этого метода измерения в лесах России были проверены только на 7 станциях [13]). Из-за некорректности экстраполяции результатов измерений на отдельных участках или пробных площадях на обширные территории и из-за нестабильности потоков углерода во времени оценку запасов и потоков углерода в лесных экосистемах обычно осуществляют с использованием математических моделей.

Имитационное моделирование отклика лесных экосистем на климатические изменения и

Т а б л и ц а

Математические модели и системы оценки и прогноза запасов углерода в лесах
Mathematical models and estimation and prediction systems of evaluating carbon stocks in forests

Система / Математическая модель	Организация	Разработчики
ИЗИС IIASA	Международный институт прикладного системного анализа (IIASA), Австрия	А.З. Швиденко, Д.Г. Щепашенко, С. Нильссон
EFIMOD + ROMUL	Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения (ИФХБП РАН), г. Пушкино, Россия	А.С. Комаров, О.Г. Чертов
Информационная система определения и картирования депонируемого лесами углерода УГЛТУ	Уральский государственный лесотехнический университет (УГЛТУ), г. Екатеринбург, Россия	В.А. Усольцев
РОБУЛ	Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов (ЦЭПЛ РАН), Россия	Д.Г. Замолодчиков
FORRUS	Московский государственный университет леса (МГУЛ), г. Мытищи, Россия	С.И. Чумаченко
CBM-CFS3	Лесная служба Канады (CFS)	W. Kurz
FORCARB2, современная обновленная версия U.S. FORest CARBon Budget Model (FORCARB)	Лесная служба США	R. Birdsey

расчет баланса углерода при различных климатических сценариях — популярное и активно развивающееся во всем мире направление научных исследований по проблеме изменения климата. Математические модели, признанные международным научным сообществом и многократно использованные для оценки и прогноза запасов углерода в лесах России и других стран, перечислены в таблице. В перечне систем оценки приведены только те, что пригодны для изучения углеродного цикла в лесных экосистемах зоны хвойно-широколиственных лесов.

Из перечисленных математических моделей на локальный пространственный уровень — лесных экосистем (типов леса) — ориентировано использование комплекса EFIMOD + ROMUL [16, 17]. Модели EFIMOD разработаны для оценки биологического круговорота углерода и азота в лесных экосистемах бореальной зоны и зоны хвойно-широколиственных (смешанных) лесов. Система моделей EFIMOD состоит из четырех составляющих: модели ежегодного прироста биомассы отдельного дерева; индивидуально-ориентированной пространственной модели древостоя, состоящего из отдельных деревьев; модели динамики органического вещества почвы ROMUL [18–21] и генератора климата SCLISS. В качестве входных данных системе моделей EFIMOD необходимы: видовой состав древостоя на лесотаксационном выделе; возраст, средняя высота ствола и диаметр на уровне груди для каждого элемента леса; число деревьев на гектар; характеристики пулов органического вещества почвы. С помощью системы моделей EFIMOD и ROMUL можно воспроизвести различные сце-

нарии лесопользования по изменению баланса углерода на локальном уровне [22–25]. Вместе с тем требование к детальности исходных данных для калибровки (настройки) системы делает ее малоприменимой для обобщенных региональных оценок баланса углерода. Схожа по назначению с вышеупомянутыми и американская модель FORCARB2, которая разработана для подсчета запасов углерода в каждом из углеродных пулов на уровне насаждения с использованием данных инвентаризации, собранных на пробных площадях [26].

Математическая и имитационная модель FORRUS [27, 28] первоначально ориентирована на локальный уровень — лесотаксационный выдел, современная версия предназначена для моделирования на региональном пространственном уровне. Модель FORRUS описывает динамику характеристик древостоя во времени и может быть использована для оценки углеродного баланса. В отличие от комплекса EFIMOD + ROMUL, она не сопряжена с почвенной моделью. В экспериментах с этой моделью рассматриваются различные сценарии лесопользования, но применительно к динамике лесотаксационных показателей — видового состава и продуктивности древостоев при сукцессионных сменах, а не к подсчетам баланса углерода.

Многочисленные научные публикации по проблеме «лес и климат» сосредоточены на оценке воздействия климатических изменений на углеродный баланс и расчетах углеродного бюджета в лесах регионального и национального уровня. При изложении результатов моделирования рассматриваются два аспекта воздействия внешних

факторов на накопление углерода в лесах: эмиссии лесных пожаров и изъятие древесины при ведении лесозаготовок.

Группа ученых Института прикладного системного анализа, широко известная своей публикационной активностью по проблеме изменения климата, нацеливает исследования на расчет полного углеродного бюджета и его динамики вследствие воздействия лесных пожаров, биотических факторов [29, 30], влияния лесозаготовок. Концептуально эти исследования основаны на ландшафтно-экосистемном подходе [13]. Методически расчет полного углеродного бюджета включает оценку потоков углерода в экосистемах с элементами учета изменений запаса. Пространственный масштаб исследований этого научного коллектива — региональный и национальный.

Модель бюджета углерода Канадского лесного сектора (CBM-CFS) начали разрабатывать еще в 1990-х гг. В настоящее время современная версия модели CBM-CFS3 представляет собой программный комплекс, снабженный удобным пользовательским интерфейсом. Это открытое программное обеспечение [31]. Модель широко используется для расчета запасов и баланса углерода по экологическим зонам для всей страны и отдельных провинций Канады [23, 24, 32].

Разработчики указывают на ряд недостатков, присущих модели. Расчеты ориентированы на данные лесной инвентаризации, собранные на пробных площадях. В этом заключается как достоинство, так и недостаток модели [24]. Положительная сторона в том, что используются данные натурных измерений, а недостаток — в том, что сведения продуктивности древостоя в модели CBM-CFS3 получены по эмпирическим данным о приросте запасов из таблиц хода роста, которые включают влияние климата и условий местопроизрастания (бонитета) на рост древостоев, но не отражают текущее состояние климата. Эти методы не учитывают межгодовую изменчивость климата и отклонение от среднеголетних климатических условий, которые влияют на данные о росте деревьев, установленные путем измерений на пробных площадях. Если совокупный эффект от повышения плодородия почв из-за осаждения атмосферного азота, увеличения CO_2 и климатических изменений сказался позитивно на производительности управляемых лесов Канады с того времени, когда были составлены таблицы хода роста, то в результате величина чистой первичной продуктивности будет занижена.

Из-за недостатка эмпирических данных по разным экорегионам Канады в модели CBM-CFS3 не учитывается накопление углерода в

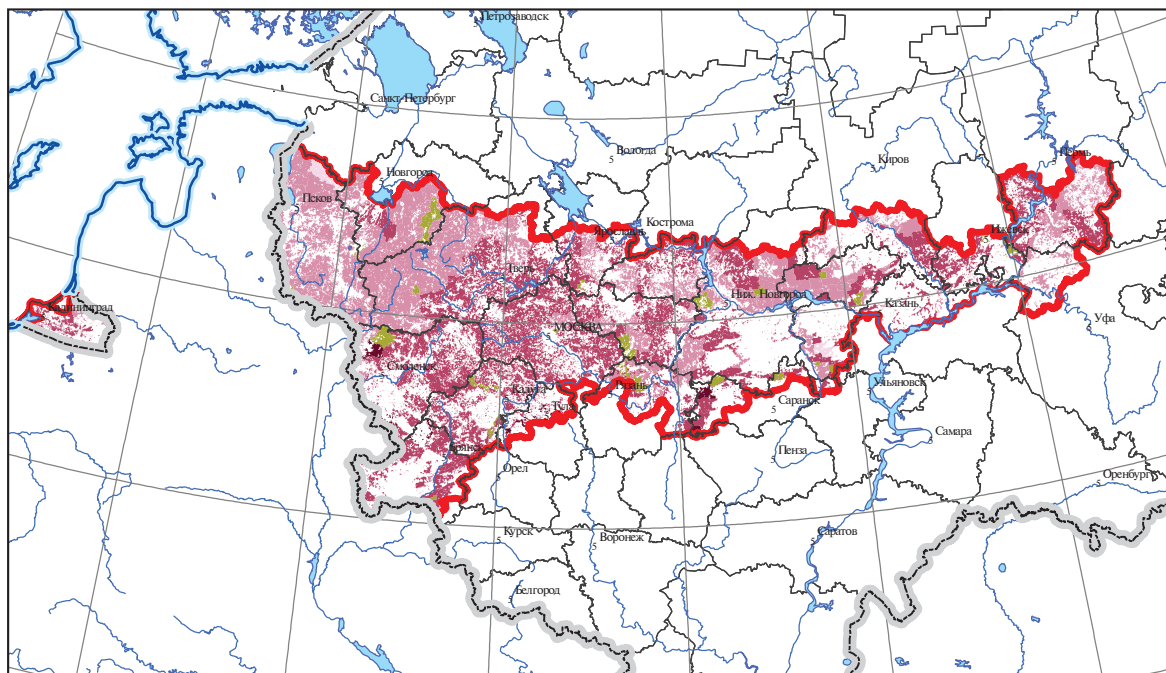
«недревесной растительности», которая включает совокупность подроста, подлеска, лесной подстилки. Исключение из расчетов «недревесной растительности» также влияет на величину потоков мертвого органического вещества и гетеротрофного дыхания, т. е. высвобождения углерода в процессе разложения в пулах почвы, подстилки и мертвой древесины, вместе взятых. Кроме того, модель учитывает только изменения среднегодовой температуры, что справедливо для лесов бореальной зоны [33], но не учитывает изменения уровня осадков и т. д. В целом расчеты по модели занижают запасы углерода в лесах. Как правило, эти присущие модели ограничения при апробации ее для других лесорастительных условий и других стран упускают.

Разработанная лесной службой Канады имитационная модель CBM-CFS3 опробована для прогнозной оценки влияния объемов лесопользования на углеродный бюджет лесов отдельных регионов бореальной зоны и России в целом [34, 35]. Отмечена сходимость полученных результатов по канадской модели с расчетами с помощью системы региональной оценки бюджета углерода лесов — РОБУЛ. [35]. Схожесть результатов позволяет предположить, что и система РОБУЛ занижает оценку запасов углерода. Она используется для расчета углеродного бюджета регионального (субъекты Российской Федерации) и национального уровня, с ее помощью Росгидромет формирует кадастр стоков и источников парниковых газов по лесам. При расчетах расходной части баланса углерода в системе учитываются потери углерода в результате заготовки древесины в лесах и лесных пожаров [36, 37].

Результаты и обсуждение

Для решения практических задач Рамочной конвенции об изменении климата ООН методические руководства, подготовленные МГЭИК, предлагают простые методы оценки годичного накопления углерода в разных пулах. Для расчетов годичного депонирования углерода в лесах предложены два уравнения: по соотношению разности запасов углерода за единицу времени (уравнение (3.2.3), [1]) и по среднему приросту запаса (уравнение (3.2.5), [2]).

В работах [39, 40] приводятся аргументы в пользу того, что уравнение (3.2.3) [1] для расчета годичного депонирования углерода по разности запасов, целесообразно использовать для расчетов, если имеются надежные данные о запасах пулов за определенный период (5–10 лет), полученные на пробных площадях. Это уравнение положено в основу расчетов запаса углерода, которые осуществляются при ведении государс-



Чистая экосистемная продукция (NEP), т С/га · год



Годичное депонирование углерода лесными экосистемами зоны хвойно-широколиственных (смешанных) лесов ЕУЧР
Annual carbon sequestration by forest ecosystems in the zone of EUCR coniferous-deciduous (mixed) forests

твенной инвентаризации лесов в России [41]. На пробной площади учету подлежат запас надземной фитомассы, сухостоя и валежа, прирост по диаметру и высоте растущих деревьев и др. Программное обеспечение, используемое в полевых работах, содержит специальную утилиту для расчета запаса углерода, депонированного в надземной и подземной фитомассе, в валеже и сухостое. В перспективе после повторной инвентаризации тех же пробных площадей можно будет рассчитать итоговый баланс совокупности пулов и судить о накоплении или потерях запаса углерода.

Подобный подход к расчету углеродных пулов используется на практике в Республике Беларусь. Разработана методика оценки общего и годового депонирования углерода лесами Республики Беларусь [42–46]. В основу расчетов положен метод подсчета запасов и их временных изменений с применением уравнения (3.2.3) [1].

В работах [4, 39, 40] доказано, что для расчетов годового депонирования углерода на основании данных, внесенных в Государственный лесной реестр (ГЛР), предпочтительно использовать формулу среднего прироста запаса (уравнение (3.2.5), [2])

$$G_w = I_v D BEF_1, \quad (3)$$

где G_w — средний годичный прирост надземной фитомассы, т/га · год;

I_v — средний годичный чистый прирост запаса стволовой древесины, м³/га · год;

D — плотность древесины, т/м³;

BEF_1 — конверсионный коэффициент для пересчета чистого годичного прироста в прирост надземной фитомассы (безразмерная величина).

Этот способ расчета опробован в научных исследованиях прикладного характера [4, 40] и при подготовке национальной отчетности для Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО). Исходя из величины общего среднего прироста запаса и используя вышеприведенную формулу, по данным Государственного лесного реестра за 2014 г. рассчитан показатель NEP по лесничествам, приуроченным к зоне хвойно-широколиственных (смешанных) лесов ЕУЧР. На рисунке показано пространственное распределение годового депонирования углерода разными типами лесных экосистем зоны хвойно-широколиственных лесов ЕУЧР. Установлено, что наибольшие удельные значения NEP на единицу площади (1 га) в год приходятся на леса Тульской (Белевское, Тульское, Одоевское лесничества), Смоленской (Демидовское, Шумячское), Брянской (Дубровское) областей и Республики Мордовия (Вышинское и Темниковское лесничества).

Сравнение представленных на карте результатов проведенных расчетов годового депонирования

ния углерода с картографической иллюстрацией и расчетами по субъектам Российской Федерации, приведенными в работах [34–38, 47], подтверждает тезис об имеющихся расхождениях и существенном занижении углеродного баланса.

Группа ученых Международного института прикладного системного анализа в последней из опубликованных к настоящему времени сводных оценок [13, табл. 4, 5] приводит следующие значения годичной продукции и эмиссии углерода, рассчитанные для зоны умеренных лесов ЕУЧР (зона умеренных лесов ЕУЧР, рассматриваемая в [13] корреспондируется с зоной хвойно-широколиственных лесов ЕУЧР в данном исследовании), т С/га · год: средняя NPP = 6,65; гетеротрофное дыхание (гетеротрофное дыхание почв + разложение крупных древесных остатков) $R_h = 3,37$; NBP = 2,11. Расчеты для экосистем хвойно-широколиственных (смешанных) лесов ЕУЧР, выполненные нами в 2015 г., привели к следующим результатам, т С/га·год: NPP = 5,92; $R_h = 3,96$; NEP = 1,96; NBP = 2,02. Как видно, расхождение оценок находится в пределах стандартных ошибок расчетов. Суммарное накопление углерода, по нашим расчетам, составило $56,0 \pm 7,8$ Мт С/год, из них 37,1 % приходится на экосистемы с преобладанием хвойных лесов, 2,4 % — широколиственных, 59,3 % — мелколиственных насаждений и 1,2 % — на земли, не покрытые лесом.

Выводы

Рассмотренные методы оценки депонирования углерода лесами свидетельствуют о том, что, несмотря на сопоставимость расчетов в модельном эксперименте, результаты, полученные разными научными коллективами, значительно расходятся в силу высокой степени неопределенности. Современный уровень научных знаний по проблеме оценки углеродного бюджета лесов России отличает разнообразие методических решений и расчетных моделей, но зачастую и противоречивость результатов, поэтому исследования в этом направлении требуют продолжения.

Список литературы

- [1] Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. М.: МГЭИК: ВМО, 2003. 330 с.
- [2] Дополнительные методы и руководящие указания по эффективной практике, вытекающие из Киотского протокола. Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства. Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. М.: МГЭИК: ВМО, 2003. 137 с.
- [3] Реймерс Н.Ф. Природопользование: словарь-справочник. М.: Мысль, 1990. 637 с.
- [4] Моисеев Б.Н. Баланс органического углерода в лесах и растительном покрове России // Лесн. хоз-во, 2007. № 2. С. 3–16.
- [5] Федоров Б.Г., Моисеев Б.Н., Сняк Ю.В. Поглощающая способность лесов России и выбросы углекислого газа энергетическими объектами // Проблемы прогнозирования, 2011. № 3. С. 127–142.
- [6] Федоров Б.Г. Выбросы углекислого газа: углеродный баланс России // Проблемы прогнозирования, 2014. № 1. С. 63–78.
- [7] Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России / А.С. Исаев, Г.Н. Коровин, В.И. Сухих, С.П. Титов, А.И. Уткин, А.А. Голуб, Д.Г. Замолдчиков, А.А. Пряжников. М.: Центр экологической политики, 1995. 156 с.
- [8] Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии. Екатеринбург: УРО РАН, 2007. 637 с.
- [9] Биологическая продуктивность лесных культур на бореальном экотоне / В.А. Усольцев, Г.Г. Терехов, Н.С. Ненашев, Н.В. Пальмова, М.И. Балицкий, А.С. Касаткин, Д.И. Лысенко, О.В. Канунников, Н.И. Кузьмин // Хвойные бореальной зоны: теоретический и научно-практический журнал, 2007. Т. XXIV. № 1. С. 42–54.
- [10] Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УРО РАН, 2010. 570 с.
- [11] Воронов М.П., Усольцев В.А., Часовских В.П. Исследование методов и разработка информационной системы определения и картирования депонируемого лесами углерода в среде Natural. Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. 192 с.
- [12] Швиденко А.З., Шепашенко Д.Г., Нильссон С. Материалы к познанию современной продуктивности лесных экосистем России // Базовые проблемы перехода к устойчивому лесному хозяйству в России. Красноярск: ИЛ СО РАН, 2007. С. 7–37.
- [13] Швиденко А.З., Шепашенко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сибирский лесной журнал, 2014. № 1. С. 69–92.
- [14] Коровин Г.Н. Проблемы реализации Киотского протокола в российском лесном секторе // Роль механизмов Киотского протокола в развитии лесо- и землепользования в России. М., 2005. 17 с.
- [15] Швиденко А.З., Шепашенко Д.Г., Ваганов Е.А., Нильссон С. Чистая первичная продукция лесных экосистем России: новая оценка // Доклады Академии наук, 2008. Т. 421. № 6. С. 822–825.
- [16] Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L. EFIMOD2 a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems // Ecological Modelling, v. 170, 2003, № 2–3, pp. 373–392.
- [17] Chertov O., Komarov A., Loukianov A. The use of forest ecosystem model EFIMOD for research and practical implementation at forest stand, local and regional levels // Ecological Modelling, 2006, v. 194, pp. 227–232.
- [18] Chertov O.G., Komarov A.S., Bykhovets S.S., Kobak K.I. Simulated soil organic matter dynamics in forests of the Leningrad administrative area // Forest Ecology and Management, 2002, v. 169, pp. 29–44.
- [19] Shanin V.N., Komarov A.S., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S. Modeling carbon and nitrogen dynamics in forest ecosystems of Central Russia under different climate change scenarios and forest management regimes // Ecological Modelling, 2011, v. 222, pp. 22162–2275. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2010.11.009
- [20] Shanin V., Komarov A., Bykhovets S. Modelling the dynamics of forest ecosystems at different levels of nitrogen disposition and climate change. Available at: http://www.nitrogen2011.org/oral_presentations/S17_1_Shanin.pdf
- [21] Шанин В.Н. Имитационное моделирование динамики лесных экосистем при различных лесохозяйственных и

- климатических сценариях: дис. ... канд. биол. наук. Сыктывкар: Ин-т биологии КомиНЦ УрО РАН, 2011. 18 с.
- [22] Stocks B.J., Levine J.S. The extent and impact of forest fires in northern circumpolar countries. *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic and Biosphere Implications*. Cambridge, MA: The MIT Press Inc., 1991, pp. 197–202.
- [23] Colombo S.J., Parker W.C., Luckai N., Dang Q., Cai T. The Effects of Forest Management on Carbon Storage in Ontario's Forests: Climate Change Research Report. CRR-03. CFS, 2005, 123 p.
- [24] Stinson G., Kurz W.A., Smith C.E. An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics 1990 to 2008. *Global Change Biology*, 2011, v. 17, № 6, pp. 2227–2244. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02369.x
- [25] Liu S., Bond-Lamberty B., Hicke J.A. Simulation the impacts of disturbances on forest carbon cycling in North America: Processes, data, models and challenges // *Journal of Geophysical Research*. 2011. v. 116. 22 p. doi: 10.1029/2010JG001585
- [26] Heath L., Nichols M., Smith J., Mills J. FORCARB2. An Updated version of U.S. Forest Carbon Budget Model. General Technical Report. NRS-67 USDA Forest Service: Northern Research Station 2010. 52 p. Available at: <http://nrs.fs.fed.us/pubs/35613>
- [27] Чумаченко С.И., Паленова М.М., Коротков В.Н. Прогноз динамики таксационных показателей лесных насаждений при разных сценариях ведения лесного хозяйства: модель динамики лесных насаждений FORRUS-S // *Экология, мониторинг и рациональное природопользование*. МГУЛ, 2001. Вып. 314. С. 128–146.
- [28] Чумаченко С.И., Смирнова О.В. Моделирование развития насаждений в ходе аутогенных сукцессий // *Лесоведение*, 2009. № 6. С. 3–17.
- [29] Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г., Ваганов Е.А. Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // *Доклады Академии наук*, 2011. Т. 441. № 4. С. 544–548.
- [30] Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // *Лесоведение*, 2013. № 5. С. 50–61.
- [31] Operational-Scale Carbon Budget Model off the Canadian Forest Sector (CBM-CFS3) Version 1.0: / Kull S.J., Kurz W.A., Rampley G.J., Banfield G.E., Schivatcheva R.K., Apps M.J. Northern Forestry Centre, 2006, 320 p.
- [32] Carbon Budget Model. Available at: <http://www.nrcan.gc.ca/forests/climate-change/13107>
- [33] Малхазова С.М., Минин А.А., Леонова Н.Б. Тенденции возможных изменений растительности на Европейской территории России и Западной Сибири // *Эколого-географические последствия глобального потепления климата XXI века на Восточно-Европейской равнине и в Западной Сибири*. М.: МАКС Пресс, 2011. С. 342–376.
- [34] Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н., Курц В.А. Оценка и прогноз углеродного бюджета лесов Вологодской области по канадской модели CBM-CFS // *Лесоведение*, 2008. № 6. С. 3–14.
- [35] Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Курц В.А. Влияние объемов лесопользования на углеродный баланс лесов России: прогнозный анализ по модели CBM-CFS3 // *Тр. СПб НИИЛХ*, 2014. № 1. С. 5–18.
- [36] Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Шуляк П.П., Честных О.А. Влияние пожаров и лесозаготовок на углеродный баланс лесов России // *Лесоведение*, 2013. № 5. С. 36–49.
- [37] Замолодчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации с 1990–2050 гг.: ретроспективная оценка и прогноз // *Метеорология и гидрология*, 2013. № 10. С. 73–94.
- [38] Замолодчиков Д.Г., Грабовский В., Курц В. Управление балансом углерода лесов России: прошлое, настоящее и будущее // *Устойчивое лесопользование*, 2014. № 2 (39). С. 23–31.
- [39] Моисеев Б.Н., Филипчук А.Н. Методика МГЭИК для расчета годичного депонирования углерода и оценка ее применения для лесов России // *Лесное хозяйство*, 2009. № 4. С. 11–13.
- [40] Моисеев Б.Н. Оценка годичного депонирования углерода по запасу древесины в лесах России // *Лесное хозяйство*, 2011. № 1. С. 16–18.
- [41] Методические рекомендации по проведению государственной инвентаризации лесов. Приказ Рослесхоза от 10.11.2011. № 472 129 с. Available at: http://www.rosleshoz.gov.ru/docs/leshoz/199/Metod_rekomendacii.pdf
- [42] Рожков Л.Н. Методика оценки общего и годичного депонирования углерода лесами Республики Беларусь. Минск: БГТУ, ЛРУП «Белгослес», 2011. 19 с.
- [43] Рожков Л.Н. Методические подходы расчета углеродных пулов в лесах Беларуси // *Экология, лесоводство и охотничье хозяйство: Тр. БГТУ. Лесное хозяйство*, 2011. № 1. С. 62–70.
- [44] Шатравко А.В., Рожков Л.Н. Углеродные потоки в лесах Республики Беларусь // *Экология, лесоводство и охотничье хозяйство: Тр. БГТУ. Лесное хозяйство*, 2012. № 1. С. 314–317.
- [45] Рожков Л.Н. Прогноз годичных потоков «стока-эмиссии» углекислого газа лесной экосистемой Беларуси // *Экология, лесоводство и охотничье хозяйство: Тр. БГТУ. Лесное хозяйство*, 2013. № 1. С. 100–102.
- [46] Рожков Л.Н. Устойчивое лесопользование и сокращение выбросов углекислого газа // *Экология, лесоводство и лесохозяйственное хозяйство: Тр. БГТУ. Лесное хозяйство*, 2014. № 1. С. 97–99.
- [47] Замолодчиков Д.Г. Системы оценки прогноза запасов углерода в лесных экосистемах // *Устойчивое лесопользование*, 2011. № 4 (29). С. 15–22.

Сведения об авторах

Малышева Наталия Викторовна — канд. геогр. наук, ведущий научный сотрудник ФБУ ВНИИЛМ, e-mail: nat-malysheva@yandex.ru

Моисеев Борис Николаевич — канд. с.-х. наук, эксперт Рабочей группы по климату Рослесхоза, e-mail: bmoiseev@yandex.ru

Филипчук Андрей Николаевич — д-р с.-х. наук, зам. директора ФБУ ВНИИЛМ, зав. отделом аналитических исследований состояния и динамики лесов, e-mail: afilipchuk@yandex.ru

Золина Татьяна Анатольевна — старший научный сотрудник ФБУ ВНИИЛМ, e-mail: tzolina@gmail.com

Статья поступила в редакцию 25.05.2016 г.

THE METHODS OF CARBON BALANCE ESTIMATION IN FOREST ECOSYSTEMS AND THEIR APPLICATION TO CALCULATE ANNUAL CARBON SEQUESTRATION

N.V. Malysheva, B.N. Moiseev, A.N. Filipchuk, T.A. Zolina

All Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (FBU VNIILM),
15 Institutskaya st., Pushkino, Moscow reg., Russia, 141202

nat-malysheva@yandex.ru

Various methods of assessment and forecast of the carbon sequestration by forests which are based on simulation and are recognized by scientific international community have been discussed in this article. They include the following: IIASA (Austria), EFIMOD + ROMUL (Russia), ROBUL (Russia), Information System of Definition and Carbon Mapping (Russia, Ural SFTU), CBM-CFS3 (Canadian Forest service), FORCARB2 (US Forest Service). The carbon stored in forest ecosystems of the European-Ural Part of Russia is quantified. The cartographic presentation shows the annual carbon sequestration assessments according to the main types of forest ecosystems such as coniferous, broad-leaved and deciduous forests. The valuation method is based on the annual net increment in volume with equations and methodology recommended by the IPCC UN. The State forest register data have been used to estimate the carbon balance in forest ecosystems. The evaluation of carbon sequestration for an ecosystem of coniferous-deciduous (mixed) forests in European-Ural Part of Russia was made by us in 2015, which resulted in the following data : NPP = 5,92; Rh = 3,96; NEP = 1,96 t C / ha • year and NBP = 2,02 t C / ha • year. Our values of annual carbon production and carbon emission are consistent with the results of calculations for the above area made by the IIASA's scientific team. The estimate discrepancies are within the standard calculation errors.

Keywords: annual carbon sequestration, carbon balance, forest ecosystems, model-based analysis, climate change

Suggested citation: Malysheva N.V., Moiseev B.N., Filipchuk A.N., Zolina T.A. *Metody otsenki balansa ugleroda v lesnykh ekosistemakh i vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya dlya raschetov godichnogo deponirovaniya ugleroda* [The methods of carbon balance estimation in forest ecosystems and their application to calculate the annual carbon sequestration]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no.1, pp. 4–13. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-4-13

References

- [1] *Rukovodyashchie ukazaniya po effektivnoy praktike dlya zemlepol'zovaniya, izmeneniy v zemlepol'zovanii i lesnogo khozyaystva. Programma MGEIK po natsional'nykh kadastram parnikovyykh gazov* [IPCC Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme]. Moscow, MGEIK: VMO, 2003, 330 p. Available at : <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf/russian/ch3.pdf> (in Russian)
- [2] *Dopolnitel'nye metody i rukovodiashchie ukazaniya po effektivnoy praktike, vytekaiushchie iz Kiotskogo protokola. Rukovodiashchie ukazaniya po effektivnoy praktike dlya zemlepol'zovaniya, izmeneniy v zemlepol'zovanii i lesnogo khozyaystva. Programma MGEIK po natsional'nykh kadastram parnikovyykh gazov* [Supplementary Methods and Good Practice Guidance from Kyoto Protocol]. Moscow, MGEIK: VMO Publ., 2003, 137 p. Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf/russian/ch4.pdf> (in Russian)
- [3] Reimers N.F. *Prirodopol'zovanie* [Environmental Management: Glossary]. Moscow, Mysl', 1990, 637 p. (in Russian).
- [4] Moiseev B.N. *Balans organicheskogo ugleroda v lesakh i rastitel'nom pokrove Rossii* [The balance of organic carbon in forests and vegetation Russia]. *Lesnoe khozyaystvo*. [Forestry], 2007, no. 2, pp. 13-16. (in Russian).
- [5] Fedorov B.G., Moiseev B.N., Siniak Iu.V. *Pogloshchayushchaya sposobnost' lesov Rossii i vybrosy uglekislogo gaza energeticheskimi ob'ektami* [The absorptive capacity of Russian forests and the carbon dioxide emissions of energy facilities]. *Problemy prognozirovaniya* [Problems of Forecasting], 2011, no. 3, pp. 127-142. (in Russian).
- [6] Fedorov B.G. *Vybrosy uglekislogo gaza: uglerodnyi balans Rossii* [Carbon dioxide emissions: the carbon balance of Russia]. *Problemy prognozirovaniya* [Problems of Forecasting], 2014, no. 1, pp. 63-78. (in Russian).
- [7] Isaev A.S., Korovin G.N., Sukhikh V.I., Titov S.P., Utkin A.I., Golub A.A., Zamolodchikov D.G., Priazhnikov A.A. *Ekologicheskie problemy pogloshcheniya uglekislogo gaza posredstvom lesovosstanovleniya i lesorazvedeniya v Rossii* [Environmental problems in the absorption of carbon dioxide through reforestation and afforestation in Russia]. Moscow, Tsentr ekologicheskoi politiki, 1995, 156 p. (in Russian).
- [8] Usol'tsev V.A. *Biologicheskaya produktivnost' lesov Severnoi Evrazii* [Biological productivity of North Eurasian forests]. Ekaterinburg, UrO RAN, 2007, 637 p. (in Russian).
- [9] Usol'tsev V.A., Terekhov G.G., Nenashev N.S., Pal'mova N.V., Balitskii M.I., Kasatkin A.S., Lysenko D.I., Kanunnikova O.V., Kuz'min N.I. *Biologicheskaya produktivnost' lesnykh kul'tur na boreal'nom ekotone* [Biological productivity of forest plantations in boreal ecotone]. *Khvoynye boreal'noi zony: teoreticheskii i nauchno-prakticheskii zhurnal* [Coniferous of the boreal zone: theoretical and scientific-practical journal], v. XXIV, 2007, no. 1, pp. 42-54. (in Russian).
- [10] Usol'tsev V.A. *Fitomassa i pervichnaya produktsiya lesov Evrazii* [Phytomass and primary production of the forests of Eurasia]. Ekaterinburg: Ural branch of the RAS, 2010, 570 p. (in Russian).
- [11] Voronov M.P., Usol'tsev V.A., Chasovskikh V.P. *Issledovanie metodov i razrabotka informatsionnoi sistemy opredeleniya i kartirovaniya deponiruemogo lesami ugleroda v srede Natural* [Study of methods and development of information system definition and mapping of forest carbon deposited in the Natural environment]. Ekaterinburg: UGLTU Publ., 2012, 192 p. (in Russian).

- [12] Shvidenko A.Z., Shepashchenko D.G., Nil'sson S. *Materialy k poznaniu sovremennoi produktivnosti lesnykh ekosistem Rossii* [Materials to the knowledge of modern productivity of forest ecosystems of Russia]. Bazovye problemy perekhoda k ustoichivomu lesnomu khoziaistvu v Rossii: Materialy. mezhdunar. semin. 6–7 dekabria 2007 [Basic problems of transition to sustainable forestry in Russia: Materials. Intern. Semin. December 6-7]. Krasnoiar'sk, The Institute of forest. V. N. Sukachev Siberian branch RAS Publ., 2007, pp.7–37. (in Russian).
- [13] Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G. *Uglerodnyi biudzheta lesov Rossii* [The Carbon Budget of Russian Forests]. Sibirskii lesnoi zhurnal [Siberian Forest Journal], 2014, no. 1, pp.69-92. (in Russian).
- [14] Korovin G.N. *Problemy realizatsii Kiotskogo protokola v Rossiiskom lesnom sektore* [Problems of implementation of the Kyoto Protocol in the Russian forest sector: report on the seminar]. Rol' mekhanizmov Kiotskogo protokola v razvitiu lesa i zemlepol'zovaniia v Rossii: Doklad na seminare [The role of Kyoto Protocol mechanisms in the development of forest and land management in Russia]. Moscow, 2005, 17 p. (in Russian).
- [15] Shvidenko A.Z., Shepashchenko D.G., Vaganov E.A., Nil'sson S. *Chistaia pervichnaia produktsiia lesnykh ekosistem Rossii: novaia otsenka* [Net primary production of forest ecosystems of Russia: a new assessment]. Doklady Akademii Nauk [Reports Of Academy Of Sciences], 2008, v. 421, no. 6, pp.822-825. (in Russian).
- [16] Komarov A.S., Chertov O.G., Zudin S.L., Nadporozhskaya M.A., Michailov A.V., Bykhovets S.S., Zudina E.V., Zubkova E.V. EFIMOD2 a model of growth and cycling of elements in boreal forest ecosystems. *Ecological Modeling*, 2003, v. 170, no. 2-3, pp. 373-392.
- [17] Chertov O., Komarov A., Loukianov A., Michailov A., Nadporozhskaya M., Zubkova E. The use of forest ecosystem model EFIMOD for research and practical implementation at forest stand, local and regional levels. *Ecological Modeling*, 2006, v. 194, pp. 227-232.
- [18] Chertov O.G., Komarov A.S., Bykhovets S.S., Kobak K.I. Simulated soil organic matter dynamics in forests of the Leningrad administrative area. *Forest Ecology and Management*, 2002, v. 169, pp. 29-44.
- [19] Shanin V.N., Komarov A.S., Mikhailov A.V., Bykhovets S.S. Modeling carbon and nitrogen dynamics in forest ecosystems of Central Russia under different climate change scenarios and forest management regimes. *Ecological Modeling*, 2011, v. 222, pp. 22162-2275. doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.11.009
- [20] Shanin V., Komarov A., Bykhovets S. Modeling the dynamics of forest ecosystems at different levels of nitrogen disposition and climate change. Available at: http://www.nitrogen2011.org/oral_presentations/S17_1_Shanin.pdf
- [21] Shanin V.N. *Imitatsionnoe modelirovanie dinamiki lesnykh ekosistem pri razlichnykh lesokhoziaistvennykh i klimaticheskikh stseneriiakh*. Diss. kand. biol. nauk [Modeling of forest ecosystems dynamics under different forest and climate scenarios. Cand. biol. sci. diss.]. Syktyvkar, IB Komi SC UrD RAS Publ., 2011, 18 p. (in Russian).
- [22] Stocks B.J., Levine J.S. The extent and impact of forest fires in northern circumpolar countries. *Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic and Biospheric Implications*, 1991, pp. 197-202.
- [23] Colombo S.J., Parker W.C., Luckai N., Dang Q., Cai T. The Effects of Forest Management on Carbon Storage in Ontario's Forests. *Climate Change Research Report CCRR-03*, 2005, 123 p.
- [24] Stinson G., Kurz W.A., Smith C.E., Nelson E.T., Dymond C.C., Metsaranta J.M., Boisvenue C., Rampley G.J., Li Q., White T.M., Blain D. An inventory-based analysis of Canada's managed forest carbon dynamics, 1990 to 2008. *Global Change Biology*, 2011, v. 17, no. 6, p. 2227–2244. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02369.x
- [25] Liu S., Bond-Lamberty B., Hicke J.A., Vargas R., Zhao S., Chen J., Edburg S., Hu Y., Liu J., McGuire D., Xiao J., Keane R., Yuan W., Tang J., Luo Y., Potter C., Oeding J. Simulation the impacts of disturbances on forest carbon cycling in North America: Processes, data, models and challenges. *Journal of Geophysical Research*, 2011, v. 116, 22 p. doi: 10.1029/2010JG001585
- [26] Heath L., Nichols M., Smith J., Mills J. FORCARB2. An Updated version of U.S. Forest Carbon Budget Model. General Technical Report. NRS-67. USDA Forest Service, Northern Research Station, 2010, 52 p. Available at: <http://nrs.fs.fed.us/pubs/35613>.
- [27] Chumachenko S.I., Palenova M.M., Korotkov V.N. *Prognoz dinamiki taksatsionnykh pokazatelei lesnykh nasazhdenii pri raznykh stseneriiakh vedeniia lesnogo khoziaistva: model' dinamiki lesnykh nasazhdenii FORRUS-S* [Forecast of the dynamics of the biophysical parameters of forest stands at different scenarios of forest management: the FORRUS-S, model of the dynamics of forest stands]. *Ekologiya, monitoring i ratsional'noe prirodopol'zovanie* [Ecology, monitoring and rational nature management], 2001, v. 314, pp. 128-146. (in Russian).
- [28] Chumachenko S.I., Smirnova O.V. *Modelirovanie razvitiia nasazhdenii v khode autogennykh suksessii* [Modeling of development of plantations in the course of autogenic succession]. *Lesovedenie*. [Silviculture], 2009, no. 6, pp. 3-17. (in Russian).
- [29] Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G., Vaganov E.A., Sukhinin A.I., Maksutov Sh.Sh., Mkhallum I., Lakida I.P. *Vliianie prirodnykh pozharov v Rossii 1998-2010 gg. na ekosistemy i global'nyi uglerodnyi biudzheta* [The influence of natural fires in Russia 1998-2010 on ecosystems and the global carbon budget]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Academy of Sciences], 2011, v. 441, no. 4, pp. 544-548. (in Russian).
- [30] Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G. *Klimaticheskie izmeneniia i lesnye pozhary v Rossii* [Climate change and forest fires in Russia]. *Lesovedenie* [Silviculture], 2013, no. 5, pp. 50-61. (in Russian).
- [31] Kull S.J., Kurz W.A., Rampley G.J., Banfield G.E., Schivatcheva R.K., Apps M.J. *Operatsionnaia model' ucheta ugleroda Kanadskogo lesnogo sektora CBM-CFS3 versiiia 1.0: rukovodstvo pol'zovatel'ia* [The operating model of carbon accounting Canadian forest sector CBM-CFS3 version 1.0: User's Guide]. Northern Forestry Centre, 2010, 112 p. (in Russian).
- [32] Carbon Budget Model. Available at: <http://www.nrcan.gc.ca/forests/climate-change/13107>
- [33] Malkhazova S.M., Minin A.A., Leonova N.B., Rumiantsev V.Iu., Soldatov M.S. *Tendentsii vozmozhnykh izmenenii rastitel'nosti na Evropeiskoi territorii Rossii i Zapadnoi Sibiri* [Trends of possible changes of vegetation in European Russia and Western Siberia]. *Ekologo-geograficheskie posledstviia global'nogo potepeniia klimata XXI veka na Vostochno-Evropeiskoi ravnine i v Zapadnoi Sibiri* [Ecological and geographical consequences of global climate warming in XXI century on the East European plain and in Western Siberia]. Moscow: MAKS Press Publ., 2011, pp. 342-376.
- [34] Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Korovin G.N., Kurts V.A. *Otsenka i prognos uglerodnogo biudzheta lesov Vologodskoi oblasti po kanadskoi modeli CBM-CFS* [Assessment and forecast of the carbon budget of the Vologda region of forests on the Canadian model CBM-CFS]. *Lesovedenie* [Silviculture], 2008, no. 6, p. 3-14. (in Russian).

- [35] Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Kurts V.A. *Vliianie ob'emov lesopol'zovaniia na ugleodnyi balans lesov Rossii: prognoznyi analiz po modeli CBM-CFS3* [Effect of forest management on the volume of the carbon balance of forests in Russia: predictive analysis on CBM-CFS3 model]. *Trudy SPbNILH* [Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry], 2014, no.1, pp. 5-18. (in Russian).
- [36] Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Shuliak P.P., Chestnykh O.A. *Vliianie pozharov i lesozagotovok na ugleodnyi balans lesov Rossii* [The impact of fires and logging on the carbon balance of forests in Russia]. *Lesovedenie* [Silviculture], 2013, no. 5, pp. 36-49. (in Russian).
- [37] Zamolodchikov D.G., Grabovskii V.I., Korovin G.N. *Biudzhët ugleoda upravliaemykh lesov Rossiiskoi Federatsii s 1990-2050 gg: retrospektivnaia otsenka i prognoz* [Carbon budget of the Russian Federation managed forests in 1990-2050: The retrospective evaluation and forecast]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2013, no.10, pp. 73-94. (in Russian).
- [38] Zamolodchikov D., Grabovskii V., Kurts V. *Upravlenie balansom ugleoda lesov Rossii: proshloe nastoiashchee i budushchee* [Carbon balance management of Russian forests: Past, Present and Future]. *Ustoichivoe lesopol'zovanie* [Sustainable forest management], 2014, no. 2(39), pp. 23-31. (in Russian).
- [39] Moiseev B.N., Filipchuk A.N. *Metodika MGEIK dlia rascheta godichnogo deponirovaniia ugleoda i otsenka ee primeneniia dlia lesov Rossii* [IPCC methodology for the calculation of the annual carbon sequestration and evaluation of its application for the Russian forest]. *Lesnoe khoziaistvo* [Forestry], 2009, no.4, pp.11-13. (in Russian).
- [40] Moiseev B.N. *Otsenka godichnogo deponirovaniia ugleoda po zapasu drevesiny v lesakh Rossii* [Evaluation of the annual carbon sequestration on a stock of wood in the forests of Russia]. *Lesnoe khoziaistvo* [Forestry], 2011, no.1, pp.16-18. (in Russian).
- [41] *Metodicheskie rekomendatsii po provedeniiu gosudarstvennoi inventarizatsii lesov: Prilozheniia* [Guidelines for the State Forest Inventory in Russia, Applications]. *Prikaz Rosleskhoza ot 10.11.2011 № 472* [Approved and put into effect by Order of the Russian Federal Forestry Agency from 10.11.2011 no. 472]. (in Russian).
- [42] *Metodika otsenki obshchego i godichnogo deponirovaniia ugleorda lesami Respubliki Belarus'* [Methods of assessing the total and the annual carbon sequestration by forests of the Republic of Belarus]. Approved and put into effect by Order of the Ministry of Forestry of the Belarus Republic from 28.03.2011, no. 81, Minsk: BGTU, LRUP «Belgosles» Publ., 2011, 19 p. (in Russian).
- [43] Rozhkov L.N. *Metodicheskie podkhody rascheta ugleodnykh pulov v lesakh Belarusi* [Methodological approaches for calculating carbon pools in the forests of Belarus]. *Ekologiya, lesovodstvo i okhotnich'e khoziaistvo. Trudy BGTU. Lesnoe khoziaistvo* [Ecology, forestry and hunting. Proceedings of BGTU. Forestry], 2011, no. 1, pp. 62-70. (in Russian).
- [44] Shatravko A.V., Rozhkov L.N. *Ugleodnye potoki v lesakh Respubliki Belarus'* [Carbon flows in the Republic of Belarus forests]. *Trudy BGTU* [Ecology, forestry and hunting. Proceedings of BGTU. Forestry], 2012, № 1, pp. 314-317. (in Russian).
- [45] Rozhkov L.N. *Prognoz godichnykh potokov «stoka-emissii» uglekislogo gaza lesnoi ekosistemoi Belarusi* [Forecast annual flows «stock-emission» of carbon dioxide forest ecosystem Belarus]. *Trudy BGTU, Lesnoe khoziaistvo* [Ecology, forestry and hunting. Proceedings of BGTU. Forestry], 2013, no. 1, pp. 100-102. (in Russian).
- [46] Rozhkov L.N. *Ustoichivoe lesopol'zovanie i sokrashchenie vybrosov uglekislogo gaza* [Sustainable forest management and the reduction of carbon dioxide emissions]. *Ekologiya, lesovodstvo i lesokhotnich'e khoziaistvo. Trudy BGTU*. [Ecology, forestry and hunting. Proceedings of BGTU. Forestry], 2014, № 1, pp. 97-99. (in Russian).
- [47] Zamolodchikov D.M. *Sistemy otsenki i prognoza zapasov ugleoda v lesnykh ekosistemakh* [The system of assessment and forecast of carbon stock in forest ecosystems]. *Ustoichivoe lesopol'zovanie* [Sustainable Forestry], 2011, no. 4 (29), pp. 15-22. (in Russian).

Author's information

Malysheva Nataliya Viktorovna — Cand. Sci. (Geographical), leading researcher of All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (VNIILM), e-mail: nat-malysheva@yandex.ru

Moiseev Boris Nikolayevich — Cand. Sci (Agricultural), expert of the Working group on climate of Federal Forestry Agency, e-mail: bmoiseev@yandex.ru

Filipchuk Andrey Nikolayevich — Dr. Sci (Agricultural), Deputy Director of All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (VNIILM), head of Analytical Studies on Status and Dynamics of Forests Department, e-mail: afilipchuk@yandex.ru

Zolina Tatiana Anatolievna — Senior researcher of All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (VNIILM), e-mail: tzolina@gmail.com

Received 25.05. 2016

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЫСОКОПОЛНОТНЫХ СОСНЯКОВ РЕКРЕАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ В БАЯНАУЛЬСКОМ ГНПП

А.В. Данчева¹, С.В. Залесов²

¹ Казахский научно-исследовательский институт лесного хозяйства, 021704, Казахстан, г. Щучинск, ул. Кирова 58

² Уральский государственный лесотехнический университет, 620110, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

a.dancheva@mail.ru

Приводятся данные исследования состояния сосновых древостоев рекреационного назначения Баянаульского государственного национального природного парка (ГНПП). По физико-географическому районированию территория парка входит в Ерментау-Каркаралинскую область Центрально-Казахстанского мелкосопочника. Это регион умеренно-сухих и сухих степей с выраженным высотным поясом. Объектами исследования являлись молодняки II класса возраста и приспевающие высокополнотные сосновые древостои, произрастающие в сухих и свежих лесорастительных условиях. Определяли показатели жизненного состояния сосняков. Установлено, что все исследуемые сосняки характеризуются как ослабленные. Проведенное распределение деревьев по категориям крупности показало, что во всех исследуемых древостоях преобладают деревья, относящиеся к категории крупности «средние». Доля мелких деревьев достигает 25–36%. Выявлена тесная взаимосвязь показателя жизненного состояния и категорий крупности деревьев, которая аппроксимируется уравнением линейной функции и функцией полинома второй степени. Проведено распределение запаса по категориям состояния. Установлено, что в естественных сосновых древостоях основная доля древесного запаса (до 70% общего запаса) приходится на ослабленные деревья. В искусственных сосняках основную часть древесного запаса — до 55% — составляют здоровые деревья. На долю древесного запаса сильно ослабленных и отмирающих деревьев в естественных и искусственных сосняках приходится в среднем 4...9% общего древесного запаса, что указывает на их незначительное доленое участие в общем запасе древостоя. В результате проведенных исследований выявлено, что присутствие в составе исследуемых сосновых древостоев большого количества мелких деревьев с оценкой общего жизненного состояния (ОЖС) «сильно ослабленные» и «отмирающие» способствует уменьшению среднего показателя ОЖС всего древостоя, а следовательно, снижению их общей биологической устойчивости, пожароустойчивости и рекреационной привлекательности.

Ключевые слова: сосновые древостои, сухие и свежие лесорастительные условия, категории крупности, показатель жизненного состояния, рекреационное лесопользование

Ссылка для цитирования: Данчева А.В., Залесов С.В. Современное состояние высокополнотных сосняков рекреационного назначения в Баянаульском ГНПП // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 14–20. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-14-20

Изучение динамики лесных экосистем принадлежит к числу основных направлений фундаментальных исследований в экологии, геоботанике и лесоведении, оно позволяет глубже понять природу леса, дифференцированно оценить значимость естественных и антропогенных процессов формирования растительности и дать прогноз будущего состояния лесов [1].

Баянаульский государственный национальный природный парк (ГНПП) основан в 1985 г. как первый национальный парк в Казахстане, созданный с целью максимального сохранения уникальных природных комплексов, упорядочения туризма и рекреации, улучшения отдыха трудящихся, особенно рабочих и служащих городов Караганды, Павлодара, Экибастуза, Балхаша [2, 3]. По физико-географическому районированию территория парка входит в Ерментау-Каркаралинскую область Центрально-Казахстанского мелкосопочника [3]. Это регион умеренно-сухих и сухих степей с выраженным высотным поясом.

Ландшафты Баянаульских низкогорий славятся своеобразием и красотой [2]. Они не только представляют ценность в научном отношении,

но и отличаются условиями, благоприятными для организации отдыха и туризма, особенно в летний период (более мягкий по сравнению с окружающими степными пространствами климат, наличие пресноводных озер, обилие фитонцидов). Природные факторы дают возможность успешно сочетать здесь задачи культурно-познавательного и спортивного туризма с отдыхом.

Территория национального парка отличается уникальностью отдельных растительных сообществ и почвенного разнообразия — каждый из четырех типов растительности (лесной, кустарниковой, луговой и степной) связан с определенными вариантами почв (бурые лесные и аллювиальные, лесолуговые, луговые, черноземные) [3]. Самыми ценными, нуждающимися в особой охране элементами растительного покрова являются леса — сосняки, ольховники, березняки и осинники.

Площади сосновых лесов Баянаула сильно сократились еще в XIX в. — со 114 тыс. га в 1820 г. до 28 тыс. га в 1870 г. По данным учета лесного фонда на 01.01.2007, сосняки занимают площадь около 8 тыс. га.

Объекты и методы исследования

Районом исследований являлся Баянаульский ГНПП, который расположен на территории Баянаульского административного района Павлодарской области на окраине Центрально-Казахстанского мелкосопочника [2].

Географические координаты — 51°00' с. ш. и 75°40' в. д. По классификации Международного союза охраны природы (Гланде, Швейцария), Баянаульский ГНПП относится ко II категории — «Национальные парки».

По данным учета лесного фонда на 01.01.2007 общая площадь Баянаульского ГНПП составляет 50,7 тыс. га, из них на долю покрытых лесом угодий приходится 12,9 тыс. га, или 25,5 % [4].

Основной лесообразующей породой является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), насаждения которой занимают 56,0 % покрытой лесом площади. Искусственные насаждения сосны составляют 1,1 % от общей площади, занимаемой сосновыми насаждениями. По возрастным категориям преобладают средневозрастные сосновые древостои — до 76 % и приспевающие — до 22 % от общей площади, занятой сосновыми насаждениями.

В районе исследований преобладают сухие лесорастительные условия — тип леса C_2 — 60,1 % от общей площади занятой сосняками.

По данным распределения лесных земель парка по функциональным зонам, основная доля сосновых насаждений — до 38,1 % приходится на зону туристической и рекреационной деятельности.

Объектом исследований являлись средневозрастные и приспевающие высокополнотные сосновые древостои Баянаульского государственного национального природного парка. Всего заложено 4 пробные площади (ПП) в зоне туристической и рекреационной деятельности Баянаульского лесничества. В естественных древостоях: ПП-4Б — в сухом сосняке (тип леса C_2) (квартал 10, выдел 65) и ПП-5Б — в свежем сосняке (тип леса C_3) (квартал 3, выдел 57). В искусственных древостоях: ПП-2Б — в свежем сосняке (тип леса C_3) (квартал 16, выдел 35), ПП-3Б — в сухом сосняке (тип леса C_2) (квартал 16 выдел 26).

За основу методологии взят метод пробных площадей, закладка которых проводилась в соответствии с общепринятыми лесотаксационными нормативами [5, 6]. Для определения лесотаксационных параметров исследуемых сосновых древостоев применялся метод сплошных переписей на пробных площадях, традиционный для исследовательских работ на ПП [7].

Деревья на ПП были распределены по следующим категориям крупности: на ПП-4Б и ПП-5Б —

крупные (23,0...17,1 см), средние (17,0...10,5 см) и мелкие (10,4...7,5 см). На ПП-1Б — (31,2...23,0 см), (22,2...16,6 см), (10,9...8,0 см). На ПП-2Б — (26,0...19,5 см), (19,4...10,6 см), (10,5...7,5 см). На ПП-3Б — (22,2...16,6 см), (16,5...10,6 см) и (10,5...7,5 см) соответственно.

Оценка жизненного состояния деревьев проводилась по методике В.А. Алексеева [8]. При показателе 100...80 % жизненное состояние древостоя оценивалось как здоровое, при 79...50 % древостой считался поврежденным (ослабленным), при 49...20 % — сильно поврежденным (сильно ослабленным), при 19 % и ниже — полностью разрушенным.

Расчет относительного жизненного состояния всего древостоя производился по формуле

$$L_n = (100n_1 + 70n_2 + 40n_3 + 5n_4) / N,$$

где L_n — относительное жизненное состояние, рассчитанное по количеству деревьев;

n_1 – n_4 — количество здоровых, ослабленных, сильно ослабленных, отмирающих деревьев на ПП (или 1 га), соответственно, шт;

N — общее количество деревьев (включая сухостой) на ПП или 1 га, шт.

Результаты исследования

Основные таксационные характеристики исследуемых сосновых древостоев Баянаульского ГНПП представлены в табл. 1. Объекты исследования представлены чистыми по составу одновозрастными сосняками. На момент закладки опытов естественные древостои характеризовались IV классом возраста. Класс бонитета — V.

Искусственные сосняки на ПП-2Б и ПП-3Б относятся ко II классу возраста, на ПП-1Б древостои характеризуются IV классом возраста.

Исследуемые насаждения естественного и искусственного происхождения относятся к высокополнотным со средним значение полноты 1,2.

Представленные на рис. 1 данные распределения деревьев в исследуемых сосняках по категориям крупности представлены на рис. 1 свидетельствуют о том, что во всех сосняках преобладают деревья, относящиеся к категории крупности «средние» — от 51 до 67 % общего количества деревьев. На долю крупных деревьев приходится в среднем до 15 %, а долю мелких — 25...29 %. В отдельных случаях (в искусственных сосняках сухих условий произрастания ПП-3Б) количество мелких деревьев достигает 36 %.

Следует отметить, что и в естественных, и в искусственных сосняках количество деревьев, относящихся к категории «мелкие», в древостоях, произрастающих в сухих лесорастительных условиях, превышает в 1,2–1,6 раза количество таковых в древостоях, произрастающих в свежих

Т а б л и ц а 1

Таксационная характеристика исследуемых сосновых древостоев Баянаульского ГНПП
The taxation data of the pine stands studied in Bayanaul SNNP

№ ПП	Состав	Тип леса	Возраст	Средние		Густота, шт./га	Полнота		Запас, м ³ /га	Класс бонитета	Класс Крафта	ОЖС (Ln), %
				высота, м	диаметр, см		абсолютная, м ² /га	относительная				
Естественные насаждения												
4Б	10С	C ₂	69	8,9	12,4	2525	30,6	1,1	156,8	V	II 6	71,7
5Б	10С	C ₃	69	10,3	14,9	2128	37,1	1,2	207,0	V	II 8	70,6
Искусственные насаждения												
2Б	10С	C ₃	40	10,6	14,8	2080	35,7	1,2	206,9	III	II 7	69,8
3Б	10С	C ₂	33	9,0	12,2	2778	32,5	1,1	162,3	III	II 6	73,8

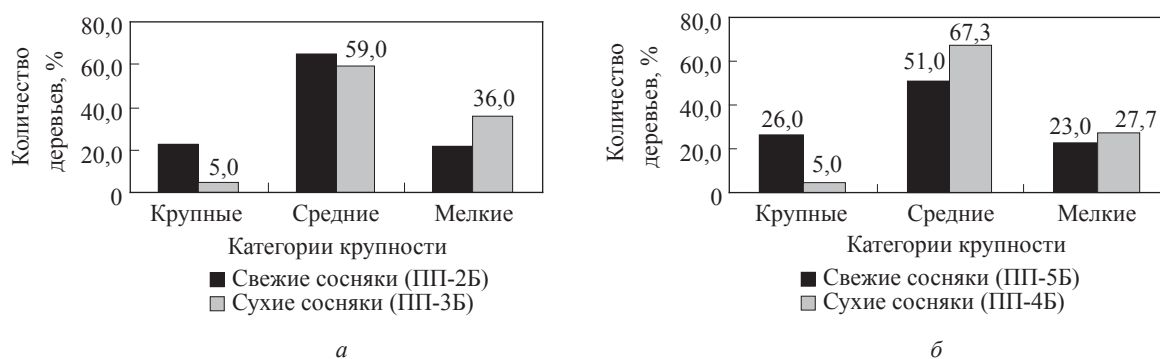


Рис. 1. Распределение деревьев по категориям крупности в сосновых древостоях Баянаульского ГНПП: а) естественные древостои; б) искусственные древостои

Fig. 1. The distribution of trees by the size category in the pine stands of Bayanaul SNNP: а) natural stands; б) artificial stands

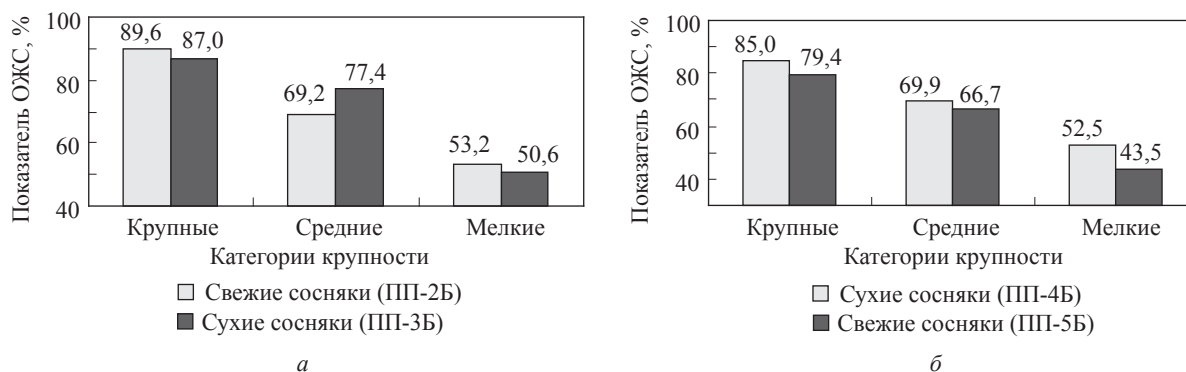


Рис. 2. Изменение показателя ОЖС по категории крупности в зависимости от типа леса в сосняках Баянаульского ГНПП: а) естественные древостои; б) искусственные древостои

Fig. 2. The change in OZHS by the size category according to the forest type in the pine forests of Bayanaul SNNP: а) natural stands; б) artificial stands

лесорастительных условиях. Обратная картина наблюдается в категории крупности «крупные». Во всех рассматриваемых по типу происхождения сосняках количество «крупных» деревьев в свежем типе леса (C₃) превосходит таковые в сухом типе леса (C₂) в 4–5 раз.

Одним из основных показателей, характеризующих биологическую устойчивость насаждения, является показатель жизненного состояния древостоя, свидетельствующий об уровне устойчивости древостоя к изменениям условий произрастания, обусловленных причинами природно-

го или антропогенного характера. При оценке состояния сосновых древостоев по показателю жизненного состояния (ОЖС) выявлено, что все древостои относятся к категории «ослабленные», доля в общем запасе колеблется в пределах 70,0...74,0 %.

Распределение показателя ОЖС деревьев на исследуемых ПП по категориям крупности, представленное на рис. 2, свидетельствует о том, что со снижением крупности деревьев происходит снижение показателя ОЖС. Так, если значение показателя ОЖС деревьев, относящихся

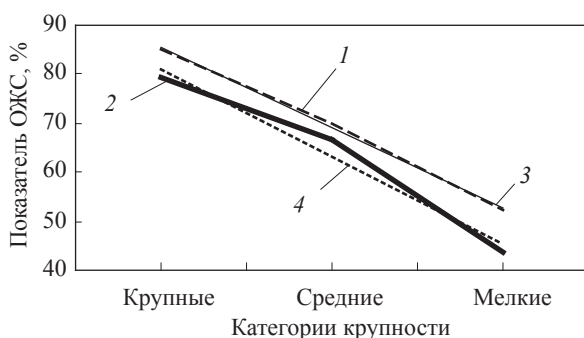


Рис. 3. Взаимосвязь показателя ОЖС и категории крупности деревьев в естественных сосняках Баянаульского ГНПП: 1 — сухие сосняки (ПП-4Б); 2 — свежие сосняки (ПП-5Б); 3 — сухие сосняки (ПП-4Б), линейный график; 4 — свежие сосняки (ПП-5Б), линейный график

Fig. 3. The relationship of growing power category and size category of trees in natural pine forests of Bayanaul SNNP: 1 — dry pine (Test Area-4Б); 2 — fresh pine (Test Area-5Б); 3 — dry pine (Test Area-4Б), linear schedule; 4 — fresh pine (Test Area-5Б), linear schedule

к категории «крупные», равно 79,0...85 %, то в категории «средние» отмечается снижение его значения в 1,1–1,2 раза, и резкое снижение в категории «мелкие» — в 1,5–1,7 раза.

Между средними значениями показателя ОЖС всех сравниваемых категорий крупности существуют достоверные различия, которые подтверждаются рассчитанным показателем t -критерия Стьюдента (t_s), значение которого колеблется в пределах от 2,0 до 9,8 при табличном показателе $t_{0,05} = 1,99–2,00$. Следует обратить внимание на тот факт, что показатель ОЖС всех рассматриваемых категорий крупности деревьев в сухих сосняках превосходят соответствующие значения ОЖС в свежих сосняках.

В результате проведенного анализа в естественных сосняках выявлена тесная взаимосвязь показателя ОЖС с категориями крупности деревьев в виде прямолинейной зависимости (рис. 3), которая подтверждается высоким коэффициентом аппроксимации (R^2), равным в сухих и свежих типах леса 0,998 и 0,972 соответственно.

В искусственных насаждениях тесная взаимосвязь между показателем жизненного состояния (ОЖС) и категориями крупности деревьев подтверждается полученной зависимостью сравниваемых показателей в виде функции полинома 2 степени (рис. 4) и абсолютным значением коэффициента аппроксимации $R^2 = 1$.

Распределение деревьев в естественных и искусственных древостоях по категориям жизненного состояния, приведенное на рис. 5 и 6, свидетельствуют о том, что в естественных, и в

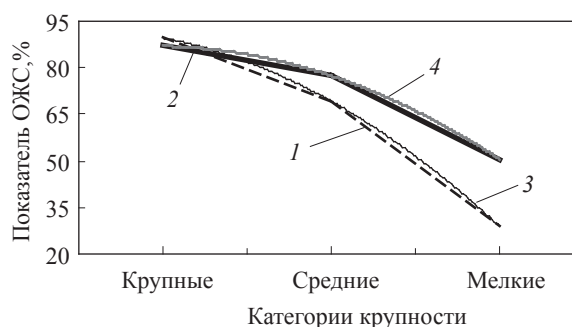


Рис. 4. Взаимосвязь показателя ОЖС и категории крупности деревьев в искусственных сосняках Баянаульского ГНПП: 1 — свежие сосняки (ПП-2Б); 2 — сухие сосняки (ПП-3Б); 3 — свежие сосняки (ПП-2Б), полиномиальный график; 4 — сухие сосняки (ПП-3Б), полиномиальный график

Fig. 4. The relationship of the growing power category and the size category of trees in the pine forest plantations of Bayanaul SNNP: 1 — fresh pine (Test Area-2Б); 2 — dry pine (Test Area-3Б); 3 — fresh pine (Test Area-2Б), polynomial schedule; 4 — dry pine (Test Area-3Б), polynomial schedule

искусственных насаждениях преобладают ослабленные деревья — до 71 % от общего количества деревьев на ПП. На долю здоровых деревьев в естественных сосняках приходится 18...24 %, в искусственных — 35...36 %. Количество сильно ослабленных и отмирающих составляет 10...15 и 13...26 % соответственно.

Следует отметить, что количество ослабленных деревьев сосны в естественных древостоях на 28...35 % превышает данный показатель в искусственных сосняках. Обратная картина наблюдается в категории «здоровых», количество которых в естественных древостоях составляет 18...24 % общего числа учтенных деревьев, что на 30...50 % меньше, чем в искусственных сосняках.

Количество сильно ослабленных и отмирающих деревьев в искусственных древостоях на 33...34 % меньше, чем в естественных.

Следует отметить, что количество сильно ослабленных и отмирающих деревьев в естественных сосняках не превышает в среднем, по рассматриваемым типам лесорастительных условий, 10...15 % от общего количества деревьев на ПП. Поэтому, можно сделать вывод о том, на средний показатель ОЖС древостоев естественного происхождения, существенным образом влияет ОЖС ослабленных деревьев, не исключено и влияние показателя ОЖС сильно ослабленных и отмирающих деревьев.

Обратная картина наблюдается в искусственных сосняках. На фоне практически равного соотношения ослабленных и здоровых деревь-

Т а б л и ц а 2

**Распределение древесного запаса в сосновых древостоях Баянаульского ГНПП
по категориям жизненного состояния, м³/га**

The distribution of the wood stock in the pine stands of Bayanaul SNNP according to the living condition categories, m³/ha / %

№ ПП	Тип леса	Категории жизненного состояния, %				Итого
		Здоровые (100...80)	Ослабленные (79...50)	Сильно ослабленные (49...20)	Отмирающие (19...0)	
Естественные насаждения						
4Б	C ₂	39,8	109,8	6,8	0,4	156,8
		25,4	70,0	4,4	0,2	100,0
5Б	C ₃	74,7	115,4	6,2	10,7	207,0
		36,1	55,7	3,0	5,2	100,0
Искусственные насаждения						
2Б	C ₃	114,2	74,9	14,3	3,5	206,9
		55,2	36,2	6,9	1,7	100,0
3Б	C ₂	87,5	68,0	5,2	1,6	162,3
		53,9	41,9	3,2	1,0	100,0

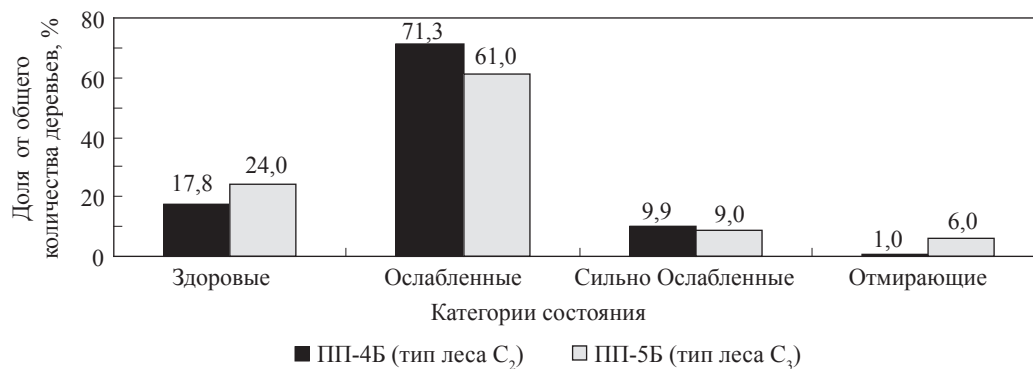


Рис. 5. Распределение деревьев сосны по категориям жизненного состояния в естественных сосняках Баянаульского ГНПП

Fig. 5. The distribution of pine trees according to the growing power category in the natural pine forests of Bayanaul SNNP

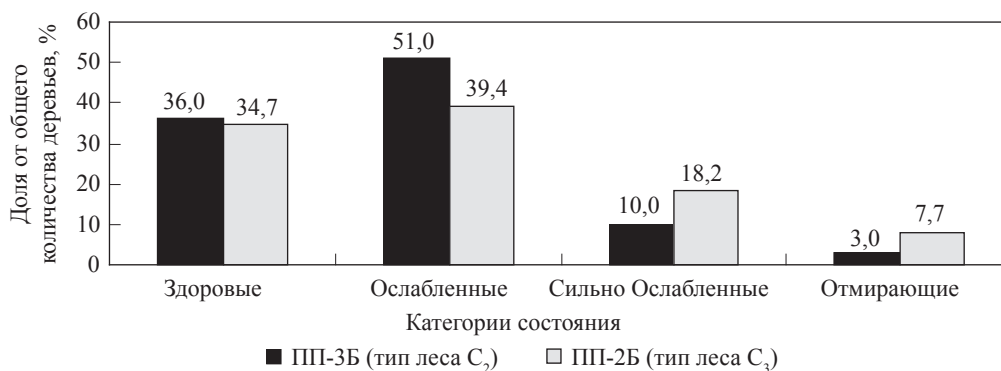


Рис. 6. Распределение деревьев сосны по категориям жизненного состояния в искусственных сосняках Баянаульского ГНПП

Fig. 6. The distribution of pine trees according to the growing power category in the pine forest plantations of Bayanaul SNNP

ев, (количество последних не превышает 51 % общего числа деревьев на ПП), доля сильно ослабленных и отмирающих деревьев составляет 13...26 % от общего количества учтенных деревьев на ПП. Данный факт позволяет утверждать, что в искусственных сосняках на средний показатель ОЖС всего древостоя существенным образом влияет ОЖС сильно ослабленных и

отмирающих деревьев, при этом не исключено влияние отдельных деревьев категории «ослабленные».

Большой процент деревьев в искусственных древостоях относящихся к категории сильно ослабленных и отмирающих по сравнению с естественными может быть объяснен происходящим в загущенных искусственных сосновых молод-

нях интенсивным процессом дифференциации деревьев по росту и развитию.

Не меньший интерес в оценке состояния исследуемых сосняков вызывает распределение запаса по категориям состояния, представленное в табл. 2. Так, данные таблицы свидетельствуют о том, что в естественных сосновых древостоях основная доля древесного запаса (до 70 % общего запаса) приходится на ослабленные деревья. В искусственных сосняках основную часть древесного запаса — до 55 % — составляют здоровые деревья.

На долю древесного запаса сильно ослабленных и отмирающих деревьев в естественных и искусственных сосняках приходится в среднем 4...9 % общего древесного запаса, что указывает на незначительное их участие в общем запаса древостоя.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Жизненное состояние исследуемых сосновых древостоев, произрастающих в сухих и свежих лесорастительных условиях, оценивается как ослабленное.

2. Выявлено, что с уменьшением крупности деревьев снижается значение показателя их ОЖС. Установлена тесная зависимость между показателем ОЖС и категориями крупности деревьев, которая аппроксимируется в естественных сосняках уравнениями линейной функции, в искусственных — функцией полинома второй степени.

3. Присутствие в составе исследуемых сосновых древостоев большого количества мелких деревьев с оценкой жизненного состояния «сильно ослабленные» и «отмирающие» способствует уменьшению среднего показателя ОЖС всего древостоя, а следовательно, снижению общей их биологической устойчивости, пожароустойчивости и рекреационной привлекательности.

4. Установленный природоохранный режим в зоне туристической и рекреационной деятельности Баянаульского ГНПП является мерой не только пресечения рубок главного пользования, но и ухода за лесом. Исключение — проводящиеся после пожаров выборочные или сплошные санитарные рубки и уборка захламленности. Последнее диктуется необходимостью поддержания санитарного состояния лесов, поскольку

ку сосновые насаждения Баянаульского ГНПП, произрастающие в зоне туристической и рекреационной деятельности, являются объектами интенсивного посещения людьми в целях отдыха, сбора грибов и ягод, охоты.

5. Практикуемые в настоящее время сплошные санитарные рубки не решают задачу повышения биологической устойчивости, пожароустойчивости и рекреационной привлекательности сосновых насаждений, поскольку преследуют совершенно другие цели — устранение захламленности на отдельно взятых участках только после пожаров.

6. Оценка древостоев «ослабленные» свидетельствует об актуальности разработки и использования в сосновых насаждениях особо охраняемых природных территорий, в частности в Баянаульском ГНПП, новых способов рубок, а также адаптации в конкретных лесорастительных условиях известных способов рубок, позволяющих не только омолаживать насаждения, но и обеспечивать поддержание биологической устойчивости, пожароустойчивости и рекреационной привлекательности данных насаждений.

Список литературы

- [1] Оскорбин П.А., Бугаева К.С. Динамика структуры островных боров Красноярской лесостепи под влиянием рубок ухода // Хвойные бореальные зоны, 2007. XXIV. № 4–5. С. 408–413.
- [2] Горчаковский П.Л. Лесные оазисы Казахского мелкосопочника. М.: Наука, 1987. 158 с.
- [3] Огарь Н.П., Иващенко А.А. Баянаульский национальный парк // Заповедники и национальные парки Казахстана. Алматы: Алматыкітап, 2006. С. 192–201.
- [4] Лесостроительный проект Баянаульского государственного национального природного парка Павлодарской области. Пояснительная записка, 2006. Том I. 182 с.
- [5] ОСТ 56-69-83 Площади пробные лесостроительные. Метод закладки. М: Гослесхоз СССР, 1983. 60 с.
- [6] Ануцин Н.П. Лесная таксация: учебник для вузов. 5-е изд. М.: Лесная пром-сть, 1982. 552 с.
- [7] Данчева А.В., Залесов С.В. Экологический мониторинг лесных насаждений рекреационного назначения: учебное пособие. Электронное издание. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. 152 с.
- [8] Алексеев В.А. Диагностика повреждений деревьев и древостоев при атмосферном загрязнении и оценка их жизненного состояния // Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение. Ленинград: Наука, 1990. С. 38–53.

Сведения об авторах

Данчева Анастасия Васильевна — канд. с.-х. наук, научный сотрудник Казахского научно-исследовательского института лесного хозяйства и агролесомелиорации (ТОО «КазНИИЛХА»), e-mail: a.dancheva@mail.ru, kafri50@mail.ru

Залесов Сергей Вениаминович — д-р с.-х. наук, профессор, проректор по научной работе ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», e-mail: zalesov@usfeu.ru

Статья поступила в редакцию 25.05.2016 г.

THE CURRENT STATE OF HIGH-DENSITY RECREATIONAL PINE FORESTS IN THE «BAYANAUL» SNNP

A.V. Dancheva¹, S.V. Zalesov²

¹Department of Forestry, Kazakh Scientific Research Institute of Forestry (KazSRIF), st. Kirov, 58, 021704, the town of Shchuchinsk, Republic of Kazakhstan

²Ural State Forest Engineering University (USFEU), st. Sibirsky tract, 37, 620100, Ekaterinburg, Russia

a.dancheva@mail.ru

The result of the accomplished research of the state of pine forest recreational stands in the «Bayanaul» State National Nature Park (SNNP) are given in the article. According to the physical-geographical zoning the park territory is a part of the Ermentau-Karkaralinsk region situated on the Central Kazakhstan hills. This region is mesoxerophytic and dry steppes with some prominent altitudinal belts. The objects of research were pine forests of sapling stage and ripening pine forests which grow in dry forest conditions (type of forest C2) and in the fresh forest conditions (type of forest C3). The state of pine forests was studied on the base of using the growing power index. The studies found that the growing power index of the pine forest stands was rated as «weakened». The trees were distributed according to the size category. It was revealed that in all the studied forest stands the trees belonging to the medium size category dominated. The proportion of «small» trees was up to 25–36 %. It was found that there was a close relationship between the growing power index and the size category of trees in the studied pine forests which was approximated by the linear and polynomial functions. The distribution of growing stock volume according to the growing power index was made. It was found out that in natural pine forest stands the main share of growing stock volume (up to 70 % of the total stock) were «weakened» trees; on the contrary, in pine forest plantations the share of «healthy» trees was up to 55 %. The growing stock volume of trees belonging to the categories «greatly weakened» and «dying» was not significant - less than 4–9 % of the total growing stock volume. As the result of the research carried out it was found that the availability of a large number of «small» trees in the composition of the studied pine stands, which were rated as «greatly weakened» and «dying», contributed to reducing the growing power index of the forest stand as a whole and to reducing its biological stability, its fire resistance and its recreational appeal.

Keywords: pine forest stands, dry and fresh forest conditions, size category, growing power index, recreational forest exploitation

Suggested citation: Dancheva A.V., Zalesov S.V. *Sovremennoe sostoyanie vysokopolnotnykh sosnyakov rekreatsionnogo naznacheniya v Bayanaul'skom GNPP* [The current state of high-density recreational pine forest in the «Bayanaul» SNNP]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no.1, pp. 14–20. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-14-20

References

- [1] Oskorbin P.A., Bugaeva K.S. *Dinamika struktury ostrovnykh borov Krasnoyarskoy lesostepi pod vliyaniem rubok ukhoda* [Dynamics of the forests outlier of the Krasnoyarsk forest-steppe under the influence of thinning] *Khvoynye boreal'nye zony* [Coniferous boreal zone]. 2007, v. XXIV, № 4-5. pp. 408-413. (in Russian)
- [2] Gorchakovskiy P.L. *Lesnye oazisy Kazakhskogo melkosopochnika* [Forest oasis of Kazakh hills]. Moscow: Nauka Publ., 1987, 158 p. (in Russian)
- [3] Ogar' N.P., Ivashchenko A.A. *Bayanaul'skiy natsional'nyy park* [National Park of Bayanaul] *Zapovedniki i natsional'nye parki Kazakhstana* [Nature Reserves and National Parks of Kazakhstan]. Almaty: Almatykitap Publ., 2006, pp. 192-201. (in Russian)
- [4] *Lesoustroitel'nyy proekt Bayanaul'skogo gosudarstvennogo natsional'nogo prirodnogo parka Pavlodarskoy oblasti* [Forest estimation plan of Bayanaul State National Natural Park of Pavlodar region], v. I., 2006, 182 p. (in Russian)
- [5] *OST 56-69-83. Ploshchadi probnye lesoustroitel'nye. Metod zakladki* [OST 56-69-83. Plots of forest management. Method of laying of plots]. Moscow, 1983. 60 p. (in Russian)
- [6] Anuchin N.P. *Lesnaya taksatsiya* [Forest inventories]. Moscow: Forest Industry Publ., 1982. 552 p. (in Russian)
- [7] Dancheva A.V., Zalesov S.V. *Ekologicheskii monitoring lesnykh nasazhdeniy rekreatsionnogo naznacheniya* [Ecological monitoring of recreational forest stand: a study guide]. Ekaterinburg: USFEU Publ., 2015. 152 p. (in Russian)
- [8] Alekseev V.A. *Diagnostika povrezhdeniy derev'ev i drevostoev pri atmosfernom zagryaznenii i otsenka ikh zhiznennogo sostoyaniya* [Diagnosis of damage to trees and forest stands at air pollution and assessment of their living conditions] *Lesnye ekosistemy i atmosfernoe zagryaznenie* [Forest ecosystems and air pollution]. Leningrad: Nauka Publ., 1990. pp. 38–53. (in Russian)

Author's information

Dancheva Anastassiya Vasilyevna — Cand. Sci. (Agricultural), research associate KazSRIFA, e-mail: a.dancheva@mail.ru

Zalesov Sergei Veniaminovich — Dr. Sci. (Agricultural), Prof., head of the chair «Forestry», vice-rector on scientific work. Ural state forest engineering university (USFEU), e-mail: zalesov@usfeu.ru

Received 25.05.2016

РЕСУРСЫ ЯГОДНЫХ КУСТАРНИЧКОВ В ЕЛЬНИКЕ МШИСТОМ СЕВЕРОУРАЛЬСКОЙ СРЕДНЕГОРНОЙ ЛЕСОРАСТИТЕЛЬНОЙ ПРОВИНЦИИ

С.В. Залесов, И.А. Панин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет»,
620100, г. Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

igorpanin1993@yandex.ru

Проанализированы биологические ресурсы дикорастущих ягодных кустарничков еловых насаждений мшистой группы типов леса в условиях Североуральской среднегорной лесорастительной провинции. Исследование проводилось на территории Карпинского лесничества Департамента лесного хозяйства Свердловской области. Выявлено, что среди ягодных кустарничков преобладают 2 вида. Это черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.) и брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-idaea* L.). Установлено, что практический интерес для организации заготовок черники обыкновенной представляют средне-полнотные спелые и перестойные насаждения. В таких насаждениях показатель надземной фитомассы черники в абсолютно сухом состоянии может достигать 494,3 кг/га, а урожай ягод — 175,3 кг/га в свежесобранном виде. При снижении полноты древостоя происходит разрастание травянистых видов и снижение фитомассы ягодных кустарничков до 82,9 кг/га в абсолютно сухом состоянии. Выявлено, что в живом напочвенном покрове молодняков и средневозрастных насаждений преобладают травянистые растения, которые угнетают ягодные кустарнички. По этой причине черника начинает плодоносить только в насаждениях 4 класса возраста. Установлено, что брусника обыкновенная встречается практически во всех насаждениях, но не образует густых зарослей и продуцирует незначительное количество плодов. Ее показатель надземной фитомассы в абсолютно сухом состоянии варьирует от 3,7 до 86,1 кг/га, а урожай ягод не превышает 1,5 кг/га в свежесобранном виде. Представленные данные надземной фитомассы и урожайности ягодных кустарничков могут быть использованы при планировании и организации заготовок дикорастущих ягод на территории Североуральской среднегорной лесорастительной провинции.

Ключевые слова: недревесная продукция, дикорастущие ягодники, черника, брусника, тип леса, ельники, ельник мшистый

Ссылка для цитирования: Залесов С.В., Панин И.А. Ресурсы ягодных кустарничков в ельнике мшистом Североуральской среднегорной лесорастительной провинции // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 21–27. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-21-27

В 90-е гг. XX в. промышленные заготовки дикорастущих ягод в Российской Федерации находились в упадке. Система потребительской коопераций, на долю которой приходилось более 70 % среднегодового сбора, была полностью разрушена [1]. В новых рыночных условиях заготовки производились стихийно, бесконтрольно и в незначительных масштабах. С начала 2000-х гг. рынок дикоросов в России снова начал развиваться. В настоящее время промышленный сбор дикорастущих лесных ягод активно производится на территории Северо-Западного и Центрального федеральных округов, где ежегодно заготавливается около 60 тыс. т ягод. Данная отрасль также достаточно развита в Сибири, где среднегодовой сбор составляет 11,2 тыс. т [2, 3].

На Урале, в частности в Свердловской области, промышленная заготовка дикоросов практически не производится. В то же время значительный ресурсный потенциал этого региона не вызывает сомнений. Согласно оценкам сотрудников Уральской государственной лесо-

технического университета, в лесах Свердловской области ежегодно производится не менее 7 млн т дикорастущих плодов и ягод [4]. Одной из проблем, препятствующих реализации этого потенциала, является недостаток сведений о биологических и эксплуатационных запасах дикоросов. В Свердловской области проводились исследования влияния минеральных удобрений на урожайность клюквы [5], изучалось влияние осушительной мелиорации на живой напочвенный покров (ЖНП), в частности на ягодные кустарнички [6]. Существуют немногочисленные исследования ресурсов дикорастущих ягод, которые проводили на территории подзоны южной тайги. Установлено, что урожайность ягод черники в сосняках черничных Ирбитского, Талицкого, Туринского и Слободо-Туринского районов составляет 37...60 кг/га [7]. Площадь черничников юго-западной части области — 61 695 га, их средняя урожайность 11 кг/га [8]. Таким образом, в изучении нуждаются ресурсы дикорастущих ягод в подзонах средней и северной тайги Свердловской области.

Объекты и методы

Исследование проводилось методом пробных площадей (ПП) в соответствии с общепринятыми методиками и существующими стандартами [9, 10]. Для изучения ЖНП на каждой ПП закладывали учетные площадки квадратной формы размером $0,5 \times 0,5$ м. Учетные площадки размещали по диагональным ходовым линиям через равные расстояния. На учетных площадках все растения срезали на уровне поверхности почвы. Затем их сортировали по видам и взвешивали в свежесобранном состоянии. От каждого вида отбирали навеску, которую высушивали в сушильном шкафу при температуре 105°C до абсолютно сухого состояния [11].

Для определения необходимого количества учетных площадок использовали формулу

$$n = C_v^2 / P_v^2,$$

где n — количество учетных площадок, шт.;

C_v — коэффициент изменчивости, %;

P_v — точность определения средней величины, %.

Принятая точность исследования — 10 %.

Учет урожая ягод так же проводили на учетных площадках, количество которых устанавливали в соответствии с требованиями обеспечения требуемой точности. Внутри площадок ягоды пересчитывали, собирали и взвешивали. Массу незрелых и поврежденных плодов вычисляли путем перемножения их количества на среднюю массу спелых ягод данного вида в условиях изучаемой ПП [12].

Исследование проводили с 2014 по 2016 гг. на территории Кытлымского участкового лесничества Карпинского административного района Свердловской области. Место исследования характеризуется среднегорным рельефом с многочисленными горными хребтами. Высота некоторых вершин превышает 1500 м над уровнем моря [13]. Согласно лесорастительному районированию Колесникова с соавт., данная территория относится к Североуральской среднегорной провинции северотаежного округа [14]. Для изучения были выбраны ельники мшистой группы типов леса, поскольку для района исследования насаждения данной группы являются преобладающими. В границах Кытлымского участкового лесничества ельники мшистой группы произрастают на площади 41 569 га, что составляет 15,6 % общей площади лесного фонда. Особое внимание уделяли вторичным насаждениям, не достигшим возраста спелости, поскольку лесной фонд длительное время подвергался активным сплошнолесосечным рубкам. По данным пос-

леднего лесоустройства, проводимого в 1998 г., в составе лесного фонда Кытлымского участкового лесничества насаждения 1–4 классов возраста занимают 34 %. В настоящее время их доля сильно увеличилась. При этом рубки проводились в насаждениях, наиболее доступных в транспортном отношении, а следовательно, наиболее привлекательных для заготовок дикоросов. Всего было заложено 9 ПП, из них 3 — в спелых и перестойных девственных насаждениях, 6 — в насаждениях, не достигших возраста спелости. Вторичные насаждения были сформированы после сплошнолесосечной рубки, выполненной в зимний период. На валке деревьев применяли ручные бензомоторные пилы, а при трелевке древесины гусеничные трактора. Отчистку лесосек осуществляет путем укладки порубочных остатков на волока. Все вырубленные насаждения были оставлены под естественное зарастание. Рубки ухода в сформировавшихся насаждениях не проводились.

Результаты и обсуждение

Таксационная характеристика насаждений приведена в табл. 1. ПП 13/16, 8/16 и 19/16 представлены молодняками 1 класса возраста, ПП 15/16 и 9/16 — средневозрастными насаждениями, 1/14 — приспевающими, а ПП 14/14, 8/14 и 7/16 заложены в спелых и перестойных насаждениях. ПП 8/14 и 14/14 близки по составу, но имеют различные относительные полноты (0,6 и 0,7 соответственно). ПП 7/16 была заложена в самом старшем из рассматриваемых насаждений, с частично разваливающимся древостоем. Полнота древостоя на ПП 7/16 — 0,5.

Данные табл. 2 свидетельствуют о том, что в ЖНП всех вторичных насаждений ельника мшистого преобладает травостой. Доля травянистых видов в общей фитомассе ЖНП колеблется от 42,5 % (ПП 1/14) до 89,9 % (ПП 15/16). В молодняках наблюдается наибольшее разрастание травянистых растений, среди которых преобладает кипрей узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop). Фитомасса травянистых видов в молодняках достигает 1839,4 кг/га (ПП 8/16) в абсолютно сухом состоянии. С увеличением давности рубки, развивающийся древостой затеняет подпоговое пространство, что приводит к снижению фитомассы травянистых растений. Мхи развиты слабо, их фитомасса после сплошнолесосечных рубок в абсолютно сухом состоянии варьирует от 46,8 кг/га (ПП 15/16) до 306,0 кг/га (ПП 1/14). Связи между возрастом насаждений и фитомассой ягодных кустарничков не выявлено.

Согласно данным табл. 3, в спелых и перестойных насаждениях ельника мшистого фи-

Т а б л и ц а 1

Таксационные характеристики насаждений пробных площадей
The taxation data of plantation plots

ПП	Возраст, лет	Состав	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Класс бонитета	Полнота	Запас, м ³ /га
13/16	7	5Б3Е2П+Ив, Ос	1,8	1,7	IV	0,7	12
8/16	16	3Б3Е2П1Ос1К	2,2	4,0	IV	0,7	24
19/16	18	4Б3Е2Ив1П1Ос	3,1	5,8	IV	0,7	36
15/16	43	4Е2П1К3Б	7,0	13,9	V	0,6	38
9/16	58	5Б3К1С1Е+Ос, Л	12,2	18,2	IV	0,7	73
1/14	86	6Е3Б1П+К, С, Ос	17,4	19,7	III	0,7	204
14/14	166	4Е3П2К1Б	17,5	23,3	V	0,7	211
8/14	126	4Е3П2К1Б+С	24,2	21,0	IV	0,6	232
7/16	198	7Е2К1П+Б	18,0	26,6	V	0,5	202

Т а б л и ц а 2

Надземная фитомасса ЖНП на вырубках и в молодняках мшистой группы типов леса в абсолютно сухом состоянии, в числителе — кг/га, в знаменателе — %
The aboveground phytomass of forest live cover (FLC) on cutover areas and in the young group of mossy forest types in a completely dry state, numerator — kg / ha, denominator — %

ПП	Кустарнички		Травянистые		Хвощи, папоротники и плауновидные	Мхи	Итого
	Всего	В том числе ягодные	Всего	В том числе ягодные			
13/16	<u>51,9</u> 3,2	<u>48,7</u> 3,0	<u>1299,3</u> 80,7	<u>21,9</u> 1,4	<u>156,0</u> 9,7	<u>102,9</u> 6,4	<u>1610,1</u> 100
8/16	<u>252,7</u> 10,9	<u>235,5</u> 10,1	<u>1839,4</u> 79,1	<u>43,5</u> 1,9	<u>4,8</u> 0,2	<u>227,2</u> 9,8	<u>2324,1</u> 100
19/16	<u>9,8</u> 1,0	<u>9,6</u> 1,0	<u>572,4</u> 59,7	<u>4,1</u> 0,4	<u>261,4</u> 27,3	<u>115,3</u> 12,0	<u>958,9</u> 100
15/16	<u>36,8</u> 3,3	<u>36,8</u> 3,3	<u>989,1</u> 89,9	<u>16,7</u> 1,5	<u>27,6</u> 2,5	<u>46,8</u> 4,3	<u>1100,3</u> 100
9/16	<u>115,7</u> 16,5	<u>114,2</u> 16,3	<u>308,9</u> 44,1	<u>12,7</u> 1,8	<u>134,3</u> 19,2	<u>141,2</u> 20,2	<u>700,1</u> 100
1/14	<u>47,0</u> 6,0	<u>45,0</u> 5,7	<u>335,7</u> 42,5	<u>7,8</u> 1,0	<u>100,4</u> 12,7	<u>306,0</u> 38,8	<u>789,1</u> 100

Т а б л и ц а 3

Надземная фитомасса ЖНП спелых и перестойных насаждений мшистой группы типов леса, в числителе — кг/га, в знаменателе — %
The aboveground phytomass of FLC in the ripe and overripe forests of moss forest types, numerator — kg / ha, denominator — %

ПП	Кустарнички		Травянистые		Хвощи, папоротники и плауновидные	Мхи	Итого
	Всего	В том числе ягодные	Всего	В том числе ягодные			
14/14	<u>212,5</u> 30,4	<u>203,7</u> 29,2	<u>189,1</u> 27,1	<u>14,7</u> 2,1	<u>87,1</u> 12,5	<u>210,0</u> 30,1	<u>698,7</u> 100
8/14	<u>536,4</u> 65,5	<u>521,2</u> 63,7	<u>64,7</u> 7,9	<u>2,7</u> 0,3	<u>25,6</u> 3,1	<u>192,0</u> 23,5	<u>818,7</u> 100
7/16	<u>87,1</u> 8,8	<u>82,8</u> 8,4	<u>664,2</u> 68,8	<u>16,8</u> 1,7	<u>40,2</u> 4,1	<u>181,2</u> 18,3	<u>989,5</u> 100

Т а б л и ц а 4

Надземная фитомасса ягодных кустарничков в абсолютно сухом состоянии в насаждениях мшистой группы типов леса, сформированных после сплошнолесосечной рубки, в числителе — кг/га, в знаменателе — %
The aboveground phytomass of berry bushes in a completely dry plantations in mossy forest type group formed after clear-cutting, numerator — kg / ha, denominator — %

ПП	Вид			Итого
	Брусника обыкновенная	Черника обыкновенная	Голубика обыкновенная	
13/16	$\frac{5,4}{11,1}$	$\frac{43,3}{88,9}$	–	$\frac{48,7}{100}$
8/16	$\frac{19,3}{8,2}$	$\frac{216,2}{91,8}$	–	$\frac{235,5}{100}$
19/16	–	$\frac{9,6}{100}$	–	$\frac{9,6}{100}$
15/16	$\frac{13,5}{36,7}$	$\frac{23,4}{63,3}$	–	$\frac{36,8}{100}$
9/16	$\frac{43,4}{38,0}$	$\frac{66,2}{58,0}$	$\frac{4,6}{4,0}$	$\frac{114,2}{100}$
1/14	$\frac{3,7}{8,0}$	$\frac{41,3}{92,0}$	–	$\frac{45,0}{100}$
14/14	$\frac{86,1}{31,3}$	$\frac{188,7}{68,7}$	–	$\frac{274,8}{100}$
8/14	$\frac{26,9}{5,2}$	$\frac{494,3}{94,8}$	–	$\frac{521,2}{100}$
7/16	$\frac{58,8}{70,9}$	$\frac{24,1}{29,1}$	–	$\frac{82,9}{100}$

Т а б л и ц а 5

Урожайность ягод в свежесобранном виде, кг/га
Yields in the freshly harvested form of berries, kg / ha

ПП	Вид		Итого
	Брусника обыкновенная	Черника обыкновенная	
9/16	1,5	0,8	2,3
1/14	0	26,4	26,4
14/14	0	48,7	48,75
8/14	0	175,3	175,3

томасса ягодных кустарничков в отдельных случаях на много выше, чем в насаждениях, не достигших возраста спелости. При этом значительно различаются ЖНП в насаждениях с разными показателями полноты древостоя. При полноте 0,5 преобладают травянистые растения (ПП 7/16), их надземная фитомасса в абсолютно сухом состоянии достигает 664,2 кг/га, что составляет 68,8 % всей фитомассы ЖНП данного насаждения. Наибольшим развитием ягодных кустарничков характеризуется ПП 8/14 с относительной полнотой древостоя 0,6. В дан-

ном насаждении фитомасса кустарничков в абсолютно сухом состоянии достигает 536,4 кг/га, что составляет 65,5 % общей фитомассы ЖНП. В условиях ПП 14/14 при полноте древостоя 0,7 заросли кустарничков менее развиты. Их фитомасса в абсолютно сухом состоянии — 212,5 кг/га (30,4 % от фитомассы ЖНП).

В табл. 4 приводятся сведения о надземной фитомассе ягодных кустарничков. В ельнике мшистом распространенными видами являются черника обыкновенная (*Vaccinium myrtillus* L.) и брусника обыкновенная (*Vaccinium vitis-*

idaea L.). Голубика обыкновенная (*Vaccinium uliginosum* L.) зафиксирована только на ПП 19/16, где показатель ее надземной фитомассы в абсолютно сухом состоянии составляет 4,6 кг/га. Распространение брусники носит спорадический характер. Данный вид присутствует практически во всех насаждениях, не образуя густых зарослей. Кроме того, данные табл. 5 свидетельствуют о том, что брусника практически не плодоносит. Следовательно, с эксплуатационной точки зрения данный вид не представляет интереса. Вероятнее всего, слабое развитие брусники связано с недостатком освещенности. После вырубki древостоя затеняющее действие оказывает травостой, а после смыкания крон древостоя — древесный полог.

Наибольшими биологическими запасами характеризуется черника обыкновенная. Ее показатель надземной фитомассы в различных насаждениях ельника мшистого варьирует от 9,6 до 494,3 кг/га в абсолютно сухом состоянии.

В молодняках и средневозрастных насаждениях ельника мшистого черника практически не продуцирует ягод. Активное плодоношение было зафиксировано в спелых и перестойных, а так же в припевающихся насаждениях. Наибольшей урожайностью — 175,3 кг/га — характеризуется спелое насаждение с полнотой 0,6. Учитывая имеющиеся сведения о средней урожайности промысловых зарослей черники в других регионах (в Челябинской области: 130...200 кг/га, в Западной Сибири 95...200 кг/га [4]), обследованные нами заросли черники можно рассматривать как высокопродуктивные и эксплуатационно-привлекательные.

Следует отметить различия в соотношениях надземной фитомассы и урожайности зарослей черники. Наибольшей продуктивностью характеризуются черничники в припевающемся насаждении (ПП 1/14): на 1 кг надземной фитомассы в абсолютно сухом состоянии приходится 640 г ягод. Урожайность плодоносящих зарослей черники в спелых и перестойных насаждениях — 260...350 г ягод на 1 кг надземной фитомассы в абсолютно сухом состоянии. Известно, что у побегов черники старше 10 лет продуктивность снижается до полного исчезновения плодоношения к 14–16 годам [15]. Можно предположить, что это связано с возрастом побегов черники, которые в спелых насаждениях старше, чем в припевающихся.

Выводы

1. Спелые и перестойные среднеполнотные насаждения ельника мшистого обладают эксплуатационно-привлекательными зарослями

черники обыкновенной. Их урожайность может достигать 175,3 кг/га при надземной фитомассе в абсолютно сухом состоянии 494,3 кг/га. Прочие виды ягодных кустарничков не представляют практического интереса для организации заготовок.

2. Отношение урожая ягод к надземной фитомассе плодоносящих зарослей черники в припевающихся насаждениях в два раза выше, чем в спелых и перестойных.

3. В ЖНП насаждений мшистой группы типов леса, не достигших возраста спелости, преобладает травостой, доля которого варьирует в пределах 44,1...89,9 % общей надземной фитомассы ЖНП. Ягодные кустарнички угнетаются травянистыми растениями, но, несмотря на это, сохраняют значительную фитомассу.

4. Заросли черники в молодняках и средневозрастных насаждениях ельника мшистого не представляют эксплуатационного интереса в связи с отсутствием плодоношения при достаточно большой фитомассе.

5. В насаждениях ельника мшистого при улучшении условий освещенности вследствие снижения полноты древостоя наблюдается активное разрастание травянистой растительности, угнетающей ягодные кустарнички.

Список литературы

- [1] Милосердов В.В., Милосердов К.В. Этапы развития российской кооперации: взлеты и падения // Экономика сельского хозяйства и перерабатывающих предприятий, 2012. № 4. С. 10–16.
- [2] Демина М.П., Вельм М.В. Рынок пищевых ресурсов леса: субъектно-объектная характеристика и особенности функционирования // Известия ИГЭА, 2013. № 2. С. 41–47.
- [3] Старицын В.В., Беляев В.В. О современном состоянии ресурсов брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.) и черники (*Vaccinium myrtillus* L.) в лесах Архангельской области // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Сер.: Естественные науки, 2014. № 2. С. 71–77.
- [4] Луганский Н.А., Залесов С.В., Щавровский В.А. Повышение продуктивности лесов: учеб. пособие. Екатеринбург: УГЛТА, 1995. 297 с.
- [5] Запаранюк А.Е. Повышение урожайности дикорастущих ягодников путем применения минеральных удобрений на Урале: дис. ... канд. с.-х. наук. Свердловск, 1984. 27 с.
- [6] Залесова Е.С., Панин И.А., Тукачева А.В. Изменение живого напочвенного покрова под влиянием осушительной мелиорации // Аграрное образование и наука, 2016. № 3. <http://aon.urgau.ru/ru/issues/17/articles/301> (дата обращения 30.10.2016)
- [7] Донцов А.А., Олешко Г.И., Борисова Н.А. Запасы дикорастущих лекарственных растений в юго-восточных районах Свердловской области // Растительные ресурсы, 1984. Т. 20. Вып. 2. С. 177–182.
- [8] Олешко Г.И., Донцов А.А., Борисова Н.А. Запасы дикорастущих лекарственных растений в юго-западных районах Свердловской области // Растительные ресурсы, 1985. Т. 21. Вып. 4. С. 411–417.

- [9] Данчева А.В., Залесов С.В. Экологический мониторинг лесных насаждений рекреационного назначения. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. 152 с.
- [10] ОСТ 56-69–83 Площади пробные лесоустроительные. М.: Изд-во стандартов, 1983. 20 с.
- [11] Бунькова Н.П., Залесов С.В., Зотеева Е.А., Магасумова А.Г. Основы фитомониторинга: учеб. пособие. Изд. 2-е, доп. и перераб. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2011. 89 с.
- [12] Данилов М.Д. Способы учета урожайности и выявление ресурсов дикорастущих плодово-ягодных растений и съедобных грибов: метод. пособие. Йошкар-Ола: Марийский политехнический институт имени М. Горького, 1973. 36 с.
- [13] Трифионов В.П. Новейшая тектоника на Урале // Геология СССР. М.: Недра, 1969. Т. XII. Ч. I. Кн. 2. С. 205–220.
- [14] Колесников Б.П., Зубарева Р.С., Смолоногов Е.П. Лесорастительные условия и типы лесов Свердловской области. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1973. 176 с.
- [15] Гедых В.Б. Развитие зарослей черники и ее урожай // Растительные ресурсы, 1979. Вып. I. Т. XV. С. 10–19.

Сведения об авторах

Залесов Сергей Вениаминович — д-р с.-х. наук, профессор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой лесоводства ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», e-mail: zalesov@usfeu.ru

Панин Игорь Александрович — аспирант кафедры лесоводства. ФГБОУ ВПО «Уральский государственный лесотехнический университет», e-mail: igorpanin1993@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 04.06.2016 г.

RESOURCES OF BERRY SHRUBS IN MOSSY SPRUCE FORESTS OF THE NORTHERN URAL MIDDLE MOUNTAINS FOREST PROVINCE

S.V. Zalesov, I.A. Panin

Federal State budgetary educational institution of higher education «Ural State Forest Engineering University», 620100, Russia, Ekaterinburg, Sibirskiy Trakt Street 37

igorpanin1993@yandex.ru

The research has been carried out on the territory of the Karpinsky forestry district of the forestry management department in the Sverdlovsk region of Russian Federation. The study analyzed biological resources of wild growing berry shrubs in mossy spruce forest type. The research revealed that bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) and cowberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) are predominant among berry shrubs. The middle-density mature and overmature forests are of practical interest for harvesting bilberry. The amount of bilberry epiterranean biomass in absolutely dry condition may reach 494,3 kg/ha, its crop capacity being in fresh form 175,3 kg/ha. When the stand density decreases, herbal plants begin to dominate and this results in decreasing of the berry shrub epiterranean biomass in absolutely dry condition to 82,9 kg/ha. The study discovered that herbal plants which suppress the growth of berry shrubs are predominant in forest live cover of young and middle-aged forests. Therefore, bilberry shrubs begin to berry only in the 4-th age class stand. The research shows that cowberry can be found almost in every forest, but it does not form dense spinney and does not berry a lot. The amount of cowberry epiterranean biomass under absolutely dry conditions varies from 3,7 to 86,1 kg/ha and its berry crop does not exceed 1,5 kg/ha in fresh form. The given information about the epiterranean biomass and the yielding ability of berry shrubs can be used to plan and to organize harvesting of wild growing berries on the territory studied.

Keywords: non-wood forest products, wild growing berries, bilberry, cowberry, forest type, spruce forest, mossy spruce forest

Suggested citation: Zalesov S.V., Panin I.A. *Resursy yagodnykh kustarnichkov v el'nikе mshistom severoural'skoy srednegornoy lesorastitel'noy provintsii* [Resources of berry shrubs in mossy spruce forests of the northern ural middle mountains forest province] *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 21–27. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-21-27

Reference

- [1] Miloserdov V.V. Miloserdov K.V. *Etapy razvitiya Rossiyskoy kooperatsii: vzlety i padeniya* [Stages of development of Russian cooperation: UPS and downs]. *Ekonomika sel'skogo khozyaystva i pererabatyvayushchikh pred-priyatii* [Economics of agricultural and processing enterprises], 2012, no. 4, pp. 10-16. (in Russian)
- [2] Demina M.P. Vel'm M.V. *Rynok pishchevykh resursov lesa: sub'ektno-ob'ektnaya kharakteristika i osobennosti funktsionirovaniya* [Market food resources of the forest: the subject-object characteristics and peculiarities of functioning]. *Izvestiya IGEA* [Proceedings of IGEA], 2013, no. 2, pp. 41-47. (in Russian)

- [3] Staritsyn V.V. Belyaev V.V. *O sovremennom sostoyanii resursov brusniki (Vaccinium vitis-idaea L.) i cherniki (Vaccinium myrtillus L.) v lesakh Arkhangel'skoy oblasti* [Modern condition of resources of cowberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) and blueberry (*Vaccinium myrtillus* L.) in forests of Arkhangel'sk region] Bulletin of the Northern (Arctic) Federal University. Series: Natural-wide science, 2014, № 2, pp. 71-77. (in Russian)
- [4] Luganskiy N.A. Zalesov S.V. Shchavrovskiy V.A. *Povyshenie produktivnosti lesov: uchebnoe posobie* [Increase forest productivity: a tutorial]. Ekaterinburg: USFEU Publ., 1995. 297 p. (in Russian)
- [5] Zaparanyuk A.E. *Povyshenie urozhaynosti dikorastushchikh yagodnikov putem primeneniya mineral'nykh udobreniy na Urale* [Increasing the yield of wild berry plants by applying mineral fertilizers in the Urals]. Abstract of dissertation of candidate of agricultural Sciences. Sverdlovsk, 1984. 27 p. (in Russian)
- [6] Zalesova E.S. Panin I.A. Tukacheva A.V. *Izmenenie zhivogo napochvennogo pokrova pod vliyaniem osushitel'noy melioratsii* [Changes of the living ground cover under the influence of drainage reclamation]. Agrarnoe obrazovanie i nauka [Agrarian science and education], 2016, no 3. Available at: <http://aon.urgau.ru/ru/issues/17/articles/301> (30.10.2016). (in Russian)
- [7] Dontsov A.A. Oleshko G.I. Borisova N.A. *Zapasy dikorastushchikh lekarstvennykh rasteniy v yugo-vostochnykh rayonakh Sverdlovskoy oblasti* [Inventory of wild medicinal plants in South-Eastern Sverdlovsk region]. Rastitelnye Resursy, 1984, v. 20, no. 2, pp. 177-182. (in Russian)
- [8] Oleshko G.I. Dontsov A.A. Borisova N.A. *Zapasy dikorastushchikh lekarstvennykh rasteniy v yugo-zapadnykh rayonakh Sverdlovskoy oblasti* [Stocks of wild medicinal plants in South-Western Paradise-regions Sverdlovsk region]. Rastitelnye Resursy, 1985, v. 21, no. 4, pp. 411-417. (in Russian)
- [9] Dancheva A.V. Zalesov S.V. *Ekologicheskiy monitoring lesnykh nasazhdeniy rekreatsionnogo na-znacheniya* [Ecological monitoring of forest stands on recreational values]. Ekaterinburg: USFEU Publ., 2015, 152 p. (in Russian)
- [10] OST 56 69 83 «*Ploshchadi probnye lesoustroitel'nye*» [OST 56 69 83 «Square test forest management»]. Moscow: Izd-vo standartov [Publishing standards], 1983. 20 p. (in Russian)
- [11] Bun'kova N.P. Zalesov S.V. Zoteeva E.A. Magasumova A.G. *Osnovy fitomonitoringa: Ucheb. posobie: izd. 2-e dopolnennoe i pereperabotannoe* [The basics of phytomonitoring: Tutorial: edition 2, revised and supplemented]. Ekaterinburg: USFEU Publ., 2011. 89 p. (in Russian)
- [12] Danilov M.D. *Sposoby ucheta urozhaynosti i vyyavlenie resursov dikorastushchikh plodovo-yagodnykh rasteniy i s'edobnykh gribov* [Methods of accounting for productivity and identify the resources of wild fruit-berry plants and edible mushrooms]. Yoshkar-Ola: Mari Polytechnic Institute named after M. Gorky, 1973. 36 p. (in Russian)
- [13] Trifonov V.P. *Noveyshaya tektonika na Urale* [Neotectonics in the Urals]. Geologiya SSSR. t. XII, p. I, book 2. Moscow: Nedra Publ., 1969. pp. 205-220. (in Russian)
- [14] Kolesnikov B.P. Zubareva R.S. Smolonogov E.P. *Lesorastitel'nye usloviya i tipy lesov Sverdlovskoy oblasti* [Forest conditions and forest types in Sverdlovsk region]. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1973. 176 p. (in Russian)
- [15] Gedykh V.B. *Razvitie zarosley cherniki i ee urozhay* [The Development of thickets of blueberry and yield] Rastitelnye Resursy. 1979. v. I, t. XV, pp. 10-19. (in Russian)

Author's information

Zalesov Sergei Veniaminovich — Dr. Sci. (Agricultural), Prof., head of the chair «Forestry», vice-rector on scientific work. Ural State Forest Engineering University (USFEU), e-mail: zalesov@usfeu.ru

Panin Igor Aleksandrovich — pg. Ural State Forest Engineering University (USFEU), e-mail: igorpanin1993@yandex.ru

Received 04.06.2016

ОЦЕНКА ПОДПОЛОГОВОГО ВОЗОБНОВЛЕНИЯ В СОСНЯКАХ ЮЖНОЙ ТАЙГИ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Н.М. Дебков¹, А.С. Ильинцев^{2,3}, А.С. Васильев⁴

¹ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН»
634055, г. Томск, Академический пр-т, 10/3

²ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова»
163002, г. Архангельск, набережная Северной Двины, 17

³ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства» 163062, г. Архангельск, ул. Никитова, 13

⁴Департамент лесного хозяйства Томской области 634041, г. Томск, пр-т Кирова, 41

a.ilintsev@narfu.ru

Рассматривается состояние предварительного возобновления под пологом спелых и перестойных южнотаежных сосняков Томской области. Наличие предварительного возобновления хвойных пород деревьев под пологом хвойных древостоев является важным фактором, который при правильной организации лесозаготовок и последующего ухода за лесом позволяет предотвратить нежелательную смену хвойных древостоев на лиственные. Целью данной работы является выявление особенностей накопления подроста под пологом сосновых формаций в зависимости от условий произрастания (типов леса). Возобновительные процессы изучали на примере Тимирязевского лесничества Томской области, в междуречье рек Обь и Томь, на площади 226 тыс. га. Всего было проанализировано 25 тыс. выделов, из них количество спелых и перестойных выделов сосновой формации составило более 2,5 тыс шт. Установлено, что практически большинство спелых и перестойных сосновых насаждений обеспечено хвойным подростом предварительной генерации в количестве, достаточном для естественного лесовосстановления. Возобновление под пологом сосновых насаждений имеет смешанный состав с преобладанием крупного подроста хвойных пород. Единственное исключение — низкополнотные (0,3–0,4) сосняки осоково-сфагновые и сфагновые, где подростка недостаточно и, согласно действующим правилам, должны проектироваться культуры или комбинированное лесовосстановление. Сосновые насаждения гидроморфных типов леса необходимо исключить из расчетной лесосеки, поскольку лесопользование в них нецелесообразно как с экономической, так и с экологической точки зрения. В таких типах леса, как ягодно-мшистый, мшистый, разнотравный, мшисто-ягодный, следует ориентировать хозяйства на возобновление через минерализацию поверхности вырубок с оставлением источников обсеменения.

Ключевые слова: тип леса, древостой, состав, полнота, хвойные породы, естественное возобновление, подрост

Ссылка для цитирования: Дебков Н.М., Ильинцев А.С., Васильев А.С. Оценка подпологового возобновления в сосняках южной тайги Томской области // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 28–35. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-28-35

Естественное возобновление леса является динамичным процессом, а его успешность определяется типом леса, структурой насаждения, биологическими особенностями древесных пород [1], давностью рубки, источником обсеменения, технологией лесосечных работ и другими факторами [2]. С биолого-экологических позиций сущность естественного возобновления проявляется в самоорганизации, свойственной всем сложным открытым биологическим системам [3]. Это свойство, включающее способность к самовозобновлению, приобретено лесными экосистемами в процессе эволюции. Возобновление — сложный биологический процесс, диктуемый по многим параметрам самой природой лесного биогеоценоза [4].

Возобновительные процессы, особенно при использовании подроста предварительного происхождения, существенно сокращают срок выращивания леса, снижают затраты труда и средств в сравнении с искусственным лесовосстановлением [5], и зачастую при этом формиру-

ются насаждения с лучшими наследственными свойствами. Кроме того, они способствуют поддержанию биологического равновесия в лесу [6], обеспечивают постоянство существования леса, а следовательно, и постоянство пользования им [7]. Применение при лесовосстановлении возобновительных сил природы особенно важно при ведении лесного хозяйства в таежных условиях, где имеет место разграничение территории лесного фонда на зоны зимних и летних лесозаготовок. Помимо этого, возобновление оказывается различным по структуре и интенсивности даже для одной породы в зависимости от теста — на вырубке, на гари или под пологом леса. Появление подроста под пологом леса, его выживание, рост и способность сформировать новое поколение во многом определяется лесообразующей ролью материнского древостоя, а именно его полнотой, составом, возрастом, что, в свою очередь, накладывает отпечаток на развитие и мощность подлеска, живого напочвенного покрова, лесной постилки. Эти и другие факторы, тесно

связанные не только друг с другом, но и с почвенно-климатическими условиями, оказывают влияние на появление, рост и развитие молодых поколений.

В качестве модельной территории для изучения процессов подпологового возобновления было выбрано Тимирязевское лесничество Томской области, расположенное в южной подзоне тайги, в междуречье рек Обь и Томь, на площади 226 тыс. га [8].

Климат района крайне неустойчивый, с резкими температурными колебаниями в течение сравнительно короткого периода времени, с холодной зимой и сухим теплым летом [9]. Продолжительность вегетационного периода составляет 120 дней. Преобладающее направление ветра — южное. Устойчивый снежный покров появляется с 26 октября и сохраняется до 5 мая, при этом глубина промерзания почвы достигает 80 см. Реки замерзают 25 октября — 5 ноября, а вскрываются 25–29 апреля. Район междуречья Томи и Оби, где расположено лесничество, равнинный. Наиболее распространены на территории лесничества подзолистые почвы (58 %), среди которых по гранулометрическому составу преобладают пески и супеси (99 %). Заболоченность в целом по лесничеству составляет 21 %, из них 18 % составляют избыточно увлажненные почвы и 3 % — болота.

Характеризуя лесной фонд лесничества, необходимо отметить его непосредственную близость к г. Томску — крупному промышленному и культурному центру Сибири, что определяет многогранную роль лесов лесничества. В лесах лесничества выделены две группы и шесть категорий защитности лесов. Защитные леса занимают 36,3 % от общей площади лесничества, в том числе: леса зеленых зон — 27,9 %, запретные полосы лесов, защищающие нерестилища ценных промысловых рыб — 3,7 %, запретные полосы лесов по берегам рек — 3,2 %, леса орехово-промысловых зон — 0,9 %, защитные полосы вдоль автомобильных дорог — 0,5 %. Эксплуатационные леса составляют 63,7 %.

Для таксационной характеристики лесных площадей применяется схема типов леса, разработанная Биологическим институтом СО АН СССР [10]. Для практического использования в хозяйственной деятельности лесничества типы леса по сходству лесорастительных условий объединены в группы типов леса. Всего в лесничестве выделено 8 групп типов леса, соответствующих отдельным типам леса по лесорастительным условиям и лесообразующим породам: вейниковая, долгомошная, зеленомошная, лишайниковая, разнотравная, травяно-болотная, сфагновая, папоротниковая. Преобладающей яв-

ляется разнотравная группа, занимающая 59 % площади земель, покрытых лесной растительностью. Остальные группы типов леса составляют: зеленомошная — 19 % данной площади, травяно-болотная — 10 %, сфагновая — 5 %, вейниковая — 3 %, лишайниковая — 2 %, папоротниковая и долгомошная — менее 1 % площади. Основные насаждения имеют несколько иное распределение по группам типов леса: модальный тип леса также разнотравный (40 %), но зеленомошный уступает ему не много (35 %). Значительную площадь занимают сфагновые сосняки (14 %). На остальные типы леса приходится в совокупности примерно 10...11 %: лишайниковый — 5 %, травяно-болотный — 4 %, долгомошный и папоротниковый менее 1 % площади земель, покрытых лесом.

В качестве объектов исследования взята сосновая формация, в которой проводится в настоящее время и планируется в будущем промышленная заготовка древесины. Всего на общей площади в 226 тыс. га проанализировано более 25 тыс. выделов. В сосновой формации по материалам таксационных описаний были отобраны выделы, представляющие собой спелые и перестойные насаждения. Общее количество выделов составило более 2,5 тыс. шт. Затем данные выделов были занесены в электронную базу, где их распределили по каждому типу леса в отдельности, а также по полноте. При этом для каждого значения полноты отбиралось 30 таксационных описаний, чтобы получить сопоставимые данные и необходимую точность исследования, принятую в лесоведении.

На основании данных из электронной базы в табличном редакторе были проведены вычисления средних значений таксационных показателей 1-го и 2-го ярусов, а также подрост насаждений. Учитывали следующие показатели: состав насаждений, их высота, диаметр, возраст, класс бонитета, запас на 1 га (для 1-го и 2-го яруса), густота (для подрост).

В лесном хозяйстве таежной зоны основные усилия направлены на выращивание и заготовку хвойных пород деревьев, которые здесь считаются более ценными — сосны, кедра, ели, пихты и лиственницы. Наличие предварительного возобновления хвойных пород деревьев под пологом хвойных древостоев является важным фактором, который при правильной организации лесозаготовок и последующего ухода за лесом позволяет предотвратить нежелательную смену хвойных древостоев на лиственные. Далее будут рассмотрены количественные и качественные показатели предварительного возобновления в спелых и перестойных насаждениях.

Т а б л и ц а 1

Характеристика материнского полога сосняков
Characteristic of pine forest canopy

Тип леса	Полнота	Состав, %	Высота, м	Диаметр, см	Возраст, лет	Класс бонитета	Запас, м ³ /га
БСФ	0,4	87С13Б	13,0 ± 1,4	19,0 ± 1,7	129 ± 2	5А ± 0,4	75 ± 8
	0,5	82С13Б+К ед. Е, Л	16,4 ± 0,5	22,9 ± 0,8	147 ± 5	4,9 ± 0,1	123 ± 5
	0,6	85С11Б+К ед. Е	16,4 ± 0,4	23,5 ± 0,7	147 ± 5	4,8 ± 0,1	145 ± 4
	0,7	84С11Б+К ед. Л	16,5 ± 0,5	21,4 ± 0,7	134 ± 6	4,7 ± 0,1	175 ± 6
	0,8	91С9Б	17,2 ± 0,4	23,6 ± 0,6	139 ± 5	4,8 ± 0,1	209 ± 6
	0,9	93С7Б	17,4 ± 1,1	20,8 ± 0,8	133 ± 5	4,4 ± 0,2	240 ± 16
МШ	0,3	73С27Б	22,5 ± 0,8	26,8 ± 0,8	128 ± 1	3,4 ± 0,3	108 ± 5
	0,4	75С18Б+Е, К	22,4 ± 0,5	28,5 ± 0,7	137 ± 5	3,4 ± 0,1	138 ± 4
	0,5	58С26Б8К6Ос ед. П, Е	21,2 ± 0,7	27,7 ± 1,0	134 ± 7	3,3 ± 0,1	163 ± 6
	0,6	62С24Б8К ед. Ос, П, Е, Л	21,8 ± 0,3	27,9 ± 0,7	135 ± 4	3,5 ± 0,1	203 ± 5
	0,7	70С23Б+К ед. Л	21,1 ± 0,3	25,9 ± 0,4	134 ± 4	3,6 ± 0,1	232 ± 4
	0,8	81С15Б+К	22,5 ± 0,5	25,9 ± 0,5	126 ± 3	3,2 ± 0,2	289 ± 8
	0,9	90С8Б ед. П	23,7 ± 0,4	27,0 ± 0,4	150 ± 0	2,2 ± 0,2	335 ± 9
ОСБ	0,5	52С26Б9К9Л+Е ед. П	17,8 ± 0,7	22,2 ± 0,8	141 ± 5	4,7 ± 0,2	137 ± 7
	0,6	55С27Б7К6Л+Е ед. П	15,1 ± 1,0	18,6 ± 1,4	98 ± 16	5,0 ± 0,2	154 ± 12
	0,7	48С31Б12К8Л ед. Е	17,4 ± 0,3	23,1 ± 0,7	143 ± 7	4,7 ± 0,1	186 ± 4
ОСФ	0,3	73С23Б ед. К, Л	10,5 ± 0,8	14,8 ± 1,1	132 ± 3	5Б ± 0,2	46 ± 4
	0,4	76С19Б+Л ед. К	11,8 ± 0,5	15,9 ± 0,8	133 ± 2	5А ± 0,1	69 ± 3
	0,5	71С20Б+Л, К	14,4 ± 0,4	19,1 ± 0,7	136 ± 3	5А ± 0,1	103 ± 4
	0,6	62С25Б10К ед. Е, Л	15,5 ± 0,6	19,4 ± 0,9	131 ± 6	5,0 ± 0,1	137 ± 7
	0,7	79С11Б+К, Л	15,5 ± 0,4	21,1 ± 0,7	136 ± 4	5А ± 0,1	161 ± 5
	0,8	91С7Б ед. К	14,8 ± 0,5	19,5 ± 0,8	132 ± 3	5А ± 0,1	178 ± 6
	0,9	92С7Б ед. К	16,5 ± 1,3	19,5 ± 1,3	128 ± 8	4,8 ± 0,5	225 ± 20
РТ	0,3	60С21Б8Ос6Л+К ед. П, Е	22,3 ± 0,4	34,1 ± 1,3	122 ± 5	2,5 ± 0,1	124 ± 2
	0,4	67С26Б+Ос ед. К, Л	25,2 ± 0,4	35,2 ± 0,7	118 ± 2	2,4 ± 0,1	159 ± 4
	0,5	67С18Б11Ос ед. П, Е, К, Л	25,4 ± 0,3	33,8 ± 1,1	125 ± 4	2,3 ± 0,1	201 ± 3
	0,6	64С18Б11Ос+Е, ед. П, К	25,8 ± 0,3	38,3 ± 0,9	118 ± 3	1,9 ± 0,1	245 ± 4
	0,7	71С20Б6Ос ед. К, Е	26,0 ± 0,4	36,3 ± 1,1	116 ± 5	2,0 ± 0,1	294 ± 5
	0,8	80С10Б7Ос ед. К, Е	26,6 ± 0,4	37,4 ± 1,3	129 ± 6	2,1 ± 0,1	337 ± 6
	0,9	93С+Л ед. Б, Е	28,4 ± 0,4	40,4 ± 1,1	149 ± 1	2 ± 0,1	414 ± 7
СФ	0,3	87С13Б	10,0 ± 0,4	15,1 ± 0,5	138 ± 3	5Б ± 0,1	42 ± 2
	0,4	86С14Б	11,0 ± 0,5	15,6 ± 0,7	143 ± 3	5А ± 0,2	69 ± 6
	0,5	84С15Б ед. К	13,8 ± 0,4	18,8 ± 0,6	140 ± 3	5А ± 0,1	101 ± 3
	0,6	88С10Б ед. К	15,5 ± 0,4	20,5 ± 0,6	135 ± 5	5,0 ± 0,1	135 ± 4
	0,7	83С13Б+К	16,0 ± 0,4	20,5 ± 0,6	133 ± 16	4,9 ± 0,1	169 ± 5
	0,8	86С12Б ед. Е, К	15,1 ± 0,4	19,7 ± 0,6	130 ± 2	5А ± 0,1	178 ± 5
МЯ	0,4	57С34Б+К, Л ед. Ос	15,1 ± 0,9	19,2 ± 1,6	130 ± 7	5А ± 0,2	90 ± 6
	0,5	50С33Б11К+Л ед. Е	15,6 ± 0,5	20,3 ± 0,8	129 ± 4	4,9 ± 0,1	117 ± 4
	0,6	40С34Б12Л10К+Е	17,4 ± 0,3	22,3 ± 0,6	125 ± 3	4,5 ± 0,1	157 ± 4
	0,7	59С26Б7Л6К ед. Е	17,3 ± 0,3	21,6 ± 0,6	125 ± 3	4,5 ± 0,1	178 ± 5
	0,8	69С21Б+К, Л ед. Е	17,8 ± 0,5	23,2 ± 0,8	120 ± 4	4,2 ± 0,2	213 ± 11
ЯМШ	0,3	81С13Б+Ос, Л	25,2 ± 0,5	35,8 ± 1,6	132 ± 6	2,7 ± 0,2	119 ± 6
	0,4	75С13Б10Л ед. Ос	25,2 ± 0,8	35,8 ± 1,4	136 ± 5	2,4 ± 0,2	157 ± 6
	0,5	76С13Б+Ос, Л ед. Е, К	24,0 ± 0,5	31,4 ± 1,0	125 ± 4	2,8 ± 0,1	188 ± 4
	0,6	73С14Б+Ос, Е ед. К, Л	25,3 ± 0,3	34,2 ± 1,0	126 ± 4	2,4 ± 0,1	239 ± 4
	0,7	92С+Ос ед. К, Л	24,4 ± 0,4	28,5 ± 0,7	122 ± 4	2,6 ± 0,1	274 ± 5
	0,8	92С ед. Ос, К, Л	24,8 ± 0,3	29,4 ± 0,7	121 ± 6	2,4 ± 0,1	316 ± 4
	0,9	97С ед. К, Л	26,5 ± 0,4	33,2 ± 0,9	138 ± 3	2,2 ± 0,1	369 ± 9
	1,0	99С ед. Л	26,9 ± 0,3	35,3 ± 1,0	141 ± 2	2,2 ± 0,1	433 ± 6
ТБ	0,4	57С34Б+К, Л, Ос	15,1 ± 0,9	19,2 ± 1,6	130 ± 7	5,2 ± 0,2	90 ± 6
	0,5	50С33Б11К+Л ед. Е	15,6 ± 0,5	20,3 ± 0,8	129 ± 4	4,9 ± 0,1	117 ± 4
	0,6	40С34Б12Л10К+Е	17,4 ± 0,3	22,3 ± 0,6	125 ± 3	4,5 ± 0,1	157 ± 4
	0,7	59С26Б7Л6К ед. Е	17,3 ± 0,3	21,6 ± 0,6	125 ± 3	4,5 ± 0,1	178 ± 5
	0,8	69С21Б+К, Л ед. Е	17,8 ± 0,5	23,2 ± 0,8	120 ± 4	4,2 ± 0,2	213 ± 11

Характеристика 1-го яруса спелых и перестойных насаждений сосны (табл. 1) показывает, что на территории лесничества они представлены преимущественно 9 типами леса — мшистым (МШ), мшисто-ягодным (МЯ), ягодно-мшистым (ЯМШ), багульниково-сфагновым (БСФ), осоково-сфагновым (ОСФ), сфагновым (СФ), осоково-багульниковым (ОСБ), травяно-болотным (ТБ) и разнотравным (РТ). При этом в мшистом, осоково-сфагновом и разнотравном типах леса отсутствуют (или представлены единично) спелые и перестойные древостои полнотой 1,0, в осоково-болотном — 0,3 и 1,0, в сфагновом — 0,9 и 1,0, мшисто-ягодном — 0,3, 0,9 и 1,0, травяно-болотном — 0,3, 0,9 и 1,0. Только в ягодно-мшистом типе леса присутствует весь спектр полнот. Состав сосняков смешанный, причем наибольшая доля сосны отмечена в сфагновом и багульниково-сфагновом типах леса (8–9 единиц), а наименьшее — в осоково-багульниковом и травяно-болотном (4–7 единиц), остальные типы леса занимают промежуточную позицию. В качестве содоминанта во всех типах леса выступает береза. Также содоминантами являются кедр и лиственница в осоково-багульниковом, травяно-болотном, мшисто-ягодном типах леса и осина — в разнотравном. Отчетливой связи состава с полнотой не выявлено, за исключением того, что высокополнотные древостои (0,8–1,0) более чистые по составу (присутствует меньшее количество пород-лесообразователей) и с большей долей сосны. То же можно сказать и о низкополнотных древостоях (0,3–0,4), но там связь менее выражена.

Поскольку сосна является светолюбивой породой-пионером, то динамика высоты и диаметра прямо пропорционально зависит от возраста. Наиболее рослыми являются древостои разнотравного, ягодно-мшистого и мшистого типов леса. То же относится и к толщине. Особых различий в возрасте не установлено, практически все спелые и перестойные насаждения всех типов леса имеют возраст в пределах 120...150 лет. Производительность у разных типов леса разная: высокобонитетными являются разнотравный, ягодно-мшистый и мшистый типы леса, остальные — низкобонитетными. Как правило, низкому бонитету соответствует низкий запас древесины. Несмотря на это, начиная с полноты 0,7 в насаждениях данных типов леса запасы древесины составляют 160...170 м³, что делает их привлекательными для зимних лесозаготовок.

Одной из главных целей работы было изучение оптимальных показателей спелых и перестойных древостоев, при которых накапливаются максимальное количество подроста и 2 яруса. По нашим данным, 2-й ярус в насаждениях со-

сны имеется только в мшистом, ягодно-мшистом и разнотравном типе леса, единично может встречаться в мшисто-ягодниковом типах леса, т. е. в наиболее продуктивных условиях местопроизрастания, в основном, при полноте 0,3–0,4, но в разнотравном типе леса — и при 0,5. При этом встречаемость 2-го яруса в разнотравном типе леса: при полноте 0,3 — 39 %, при 0,4 — 22 %, при 0,5 — 7 %, в мшистом типе леса; при полноте 0,3 — 83 %, при 0,4 — 27 %; в ягодно-мшистом типе леса; при полноте 0,3 — 50 %, при полноте 0,4 — 44 %.

Характеристика 2-го яруса спелых и перестойных насаждений сосны мшистого типа леса показывает, что и при полноте 0,3, и при полноте 0,4 в составе преобладают сосна (29...68 %) и береза (15...40 %), гораздо меньшую долю составляют кедр, ель, пихта и осина, т. е. в составе 2-го яруса повторяется состав 1-го. Значения остальных показателей следующие: высота 10...11,5 м, диаметр 10...11 см, возраст 40...45 лет, полнота 0,3...0,4, запас 55–60 м³/га.

Характеристика 2-го яруса спелых и перестойных насаждений сосны ягодно-мшистого типа леса показывает, что и при полноте 0,3, и при полноте 0,4 в составе преобладает сосна (84...88 %), в качестве примеси присутствуют береза и единично осина, темнохвойные породы отсутствуют полностью, т. е. в составе 2-го яруса повторяется состав 1-го. Значения остальных показателей следующие: высота 14...14,5 м, диаметр 12...13 см, возраст 45...50 лет, полнота 0,5...0,6, запас 100...115 м³/га.

Характеристика 2-го яруса спелых и перестойных насаждений сосны разнотравного типа леса показывает, что и при всех полнотах в составе преобладают сосна (15...50 %), береза (5...30 %) и осина (15...32 %), гораздо меньшую долю составляют кедр, ель, пихта и лиственница, т. е. в составе 2-го яруса повторяется состав 1-го. Значения остальных показателей следующие: высота 11...16 м, диаметр 9...15 см, возраст 35...60 лет, полнота 0,3...0,4, запас 55...80 м³/га.

Таким образом, 2-й ярус вполне может заменить верхний и способен обеспечить сокращение сроков созревания до 30...40 лет (с учетом того, что в насаждениях имеется и подрост в количестве 2–4 тыс. шт./га).

Обеспеченность подростом предварительных поколений колеблется как по типу леса, так и по полноте. Однако подрост есть во всех типах леса и практически при всех полнотах в том или ином количестве.

Колебания встречаемости подроста в багульниково-сфагновом типе леса составляют 25...80 %, в мшистом — 65...100 %, в осоково-сфагновом — 45...100 %, в разнотравном —

Т а б л и ц а 2

Характеристика подроста в сосняках
Characteristic of undergrowth in pine forests

Тип леса	Полнота	Состав, %	Высота, м	Возраст, лет	Густота, тыс. шт./га
БСФ	0,4	65К35С	1,5 ± 0,5	30 ± 0	1,5 ± 0,5
	0,5	52К38С9Е ед. Б	2,3 ± 0,3	28 ± 2	2,3 ± 0,4
	0,6	60К32С6Е ед. Б	2,3 ± 0,2	29 ± 1	2,8 ± 0,5
	0,7	51К41С8Е	2,2 ± 0,2	23 ± 1	2,5 ± 0,6
	0,8	53К47С	1,7 ± 0,2	28 ± 3	2,5 ± 0,6
	0,9	38К60С ед. Е	1,7 ± 0,2	28 ± 3	2,5 ± 0,6
МШ	0,3	36К48С10Е6П	1,0 ± 0,2	11 ± 2	2,0 ± 0,5
	0,4	32К43С10Е10Б5П	2,9 ± 0,2	24 ± 1	3,9 ± 0,5
	0,5	40К31С21Е6П ед. Ос, Л	2,9 ± 0,2	31 ± 1	4,4 ± 0,4
	0,6	46К36С12Е6П	2,9 ± 0,3	31 ± 2	4,1 ± 0,3
	0,7	50К30С18Е ед. П	2,6 ± 0,2	28 ± 1	3,7 ± 0,3
	0,8	50К38С9Е ед. П, Б	1,9 ± 0,2	21 ± 2	2,6 ± 0,2
	0,9	30К65С+Е	1,0 ± 0,1	15 ± 2	1,8 ± 0,7
МЯ	0,5	60К37С+П	2,4 ± 0,4	25 ± 5	3,0 ± 0,6
	0,6	45К20С20Е13П ед. Б	3,7 ± 0,3	33 ± 2	3,7 ± 0,2
	0,7	45К40Е10С+П	3,3 ± 1,8	28 ± 8	2,3 ± 0,8
	0,8	40К40Е20С	4,0 ± 0,0	35 ± 0	3,0 ± 0,0
ОСБ	0,5	43К39С11Е7Л	3,1 ± 0,7	32 ± 4	3,8 ± 0,8
	0,6	37К30Е25С+П, Л	2,3 ± 0,3	28 ± 2	3,0 ± 0,3
	0,7	56К17С14Л13Е	2,7 ± 0,2	29 ± 2	3,3 ± 0,3
ОСФ	0,3	90С10К	0,5 ± 0,0	10 ± 0	0,5 ± 0,0
	0,4	67С18Б15К	1,9 ± 0,3	29 ± 2	1,2 ± 0,3
	0,5	37К30Е25С+П, Л	2,0 ± 0,1	29 ± 1	1,9 ± 0,2
	0,6	39К47С14Е	2,4 ± 0,2	30 ± 1	3,0 ± 0,2
	0,7	39К47С14Е	2,0 ± 0,3	23 ± 3	2,7 ± 0,3
	0,8	39К47С14Е	2,0 ± 0,3	23 ± 3	2,3 ± 0,4
	0,9	53К40С7Б	1,7 ± 0,2	32 ± 4	2,3 ± 0,7
РТ	0,3	34С20К13Ос12Б10Е9П ед. Л	2,7 ± 0,4	22 ± 2	2,9 ± 0,5
	0,4	39К38С8Б7Е+Ос, Л	3,3 ± 0,4	25 ± 2	2,7 ± 0,4
	0,5	40К40С15П+Е	2,3 ± 0,3	21 ± 2	3,0 ± 0,3
	0,6	41К28С17Е13П ед. Б	3,5 ± 0,3	29 ± 2	3,4 ± 0,4
	0,7	36К43С15Е+Б, П	3,7 ± 0,3	28 ± 2	2,6 ± 0,3
	0,8	47К39С14Е	2,0 ± 0,3	23 ± 2	2,9 ± 0,5
	0,9	35К35С26Е+П ед. Л	2,4 ± 0,3	22 ± 2	3,6 ± 0,6
СФ	0,3	87С13Б	1,5 ± 0,2	27 ± 4	1,7 ± 0,3
	0,4	95С+К	2,3 ± 0,3	30 ± 2	2,0 ± 0,0
	0,5	53К47С	2,4 ± 0,2	28 ± 2	2,0 ± 0,3
	0,6	62К38С	1,9 ± 0,2	19 ± 3	1,4 ± 0,3
	0,7	49К48С ед. Е, Б	1,7 ± 0,1	25 ± 2	1,9 ± 0,3
	0,8	50К33С10Е7Б	2,5 ± 0,3	33 ± 3	1,5 ± 0,5
ТБ	0,5	35К54С8Б+Е	2,4 ± 0,3	30 ± 3	1,9 ± 0,5
	0,6	43К37С18Е ед. П, Л	3,1 ± 0,2	35 ± 2	2,5 ± 0,2
	0,7	53К27С16Е+Л ед. П	2,3 ± 0,2	30 ± 2	2,8 ± 0,3
	0,8	67С27К6Е	2,3 ± 0,2	28 ± 3	3,3 ± 0,3
	0,9	30К61С+Б, Е	2,5 ± 0,5	21 ± 2	3,6 ± 0,6
ЯМШ	0,4	57П39С+Л	3,0 ± 0,6	27 ± 3	2,9 ± 0,9
	0,5	38К47С8Е+П, Л	2,5 ± 0,2	28 ± 2	4,4 ± 0,4
	0,6	49К25С16Е9П ед. Л	2,6 ± 0,2	29 ± 1	3,9 ± 0,5
	0,7	47К33С10Е8П ед. Л, Б	2,2 ± 0,1	25 ± 1	4,3 ± 0,5
	0,8	44К46С10Е	1,8 ± 0,2	21 ± 1	4,4 ± 0,4
	0,9	52К36С11Е ед. П	1,8 ± 0,1	20 ± 1	3,2 ± 0,3
	1,0	52К42С6Е	1,6 ± 0,1	19 ± 1	3,0 ± 0,4

45...100 %, в ягодно-мшистом — 75...100 %, закономерно увеличиваясь с увеличением полноты. В мшисто-ягодном типе леса колебания встречаемости подроста составляют 100 %, в осоково-багульниковом — 80...85 % и не зависит от полноты. В сфагновом типе леса колебания встречаемости подроста составляют 15...55 %, в травяно-болотном — 30...75 % и имеют выраженный максимум в полноте 0,7. Таким образом, проявляется тенденция большей частоты встречаемости подроста в более автоморфных типах леса.

Подрост в насаждениях сосны имеет смешанный состав с преобладанием хвойных пород и незначительной примесью мягколиственных в низких и средних полнотах (до 20 %). По типам леса динамика выраженная. В багульниково-сфагновом и сфагновом типах леса преобладают кедр и сосна, в остальных к ним присоединяется ель. Пихта в качестве примеси присутствует в мшистом, разнотравном и ягодно-мшистом типах леса, а лиственница — в осоково-багульниковом. Четких тенденций в изменении состава в зависимости от полноты не выявлено. Все исследованные насаждения относятся к потенциальным кедровникам.

Динамика средних высот по типам леса выражена. Наиболее крупный подрост в мшисто-ягодниковом (2,4...4,0 м) и разнотравном (2,0...3,7 м) типах леса. Несколько менее крупный подрост в осоково-багульниковом (2,3...3,1 м) и травяно-болотном (2,3...3,1 м) типах леса. Наиболее низкий подрост в ягодно-мшистом (1,6...3,0 м), сфагновом (1,5...2,4 м), осоково-сфагновом (0,5...2,4 м), мшистом (1,0...2,9 м) и багульниково-сфагновом (1,5...2,3 м) типах леса. По крупности практически весь подрост относится к 3-й категории (выше 1,5 м).

Возраст подроста имеют слабую зависимость от полноты: как правило, возраст максимален в средних полнотах и минимален — в низких и высоких. Колебания по типам леса, лет: 23...30 в багульниково-сфагновом, 11...31 в мшистом, 25...35 в мшисто-ягодном, 28...32 в осоково-багульниковом, 10...32 в осоково-сфагновом, 21...29 в разнотравном, 19...30 в сфагновом, 28...35 в травяно-болотном, 19...29 в ягодно-мшистом, т. е. существенных различий не выявлено.

Густота подроста не имеет выраженной связи с полнотой, за исключением мшистого типа леса, в котором происходит накопление подроста от низких к средним полнотам, а затем его снижение в высоких. В осоково-сфагновом и травяно-болотном происходит увеличение подроста в средних и высоких полнотах. Колебания по типам леса составляют, тыс. шт./га: 1,5–2,8 в багульниково-сфагновом, 1,8–4,4 в мшистом,

2,3–3,7 в мшисто-ягодниковом, 3,3–3,8 в осоково-багульниковом, 0,5–3,0 в осоково-сфагновом, 2,6–3,6 в разнотравном, 1,4–2,0 в сфагновом, 1,5–3,3 в травяно-болотном и 2,9–4,4 в ягодно-мшистом, т. е. прослеживается типологическая закономерность. Более продуктивные типы леса более обеспечены подростом по сравнению с менее продуктивными.

Чтобы выяснить необходимость проведения лесовосстановительных мероприятий, после рубки был проведен сравнительный анализ вычисленных среднестатистических данных о густоте подроста с нормативными показателями [11]. Выяснилось, что практически для всех типов леса основным способом лесовосстановления является естественный путь сохранения подроста хозяйственно-ценных пород. Исключения составляют только низкополнотные (0,3–0,4) сосняки осоково-сфагновые и сфагновые, где подроста недостаточно и где, согласно действующим правилам, должны проектироваться культуры и комбинированное лесовосстановление. Однако ввиду гидроморфности и с учетом запасов древесины эти насаждения, скорее всего, в рубку не пойдут.

Выводы

1. Низкополнотные малопродуктивные сосновые насаждения гидроморфных типов леса должны быть исключены из расчетной лесосеки, поскольку лесопользование в них нецелесообразно как с экономической, так и с экологической точки зрения в силу малых значений запасов, диаметра и высоты данных насаждений, их экологической «хрупкости» и долгого периода восстановления.

2. Второй ярус в сосняках имеется только в низкополнотных насаждениях высоких классов бонитета автоморфных типов леса. Представлен он в основном светолюбивыми породами, что позволяет, учитывая его состояние и ветроустойчивость, рекомендовать его сохранение при рубках с целью ускоренного формирования новых древостоев. Это обеспечит сокращение посева древостоев.

3. Обеспеченность подростом предварительных поколений колеблется как по типу леса, так и по полноте. Однако подрост есть во всех типах леса и практически при всех полнотах в том или ином количестве, при этом более обеспечены насаждения автоморфных типов леса.

4. Возобновленные под пологом сосновые насаждения имеют смешанный состав, но преобладает крупный подрост хвойных пород. Наиболее крупный и густой подрост — в насаждениях автоморфных типов леса.

5. При сравнении вычисленных среднестатистических значений густоты подроста с нормативными значениями выяснилось, что в сосняках большинства типов леса при большинстве полнот насаждения после вырубki потребуются только мероприятий по сохранению подроста. Однако, на наш взгляд, в таких типах леса, как ягодно-мшистый, мшистый, разнотравный, мшисто-ягодный, следует ориентировать хозяйство на возобновление через минерализацию поверхности вырубok с оставлением источников обсеменения.

Список литературы

- [1] Дебков Н.М. Комплексная оценка природного потенциала формирования насаждений из подростa // Устойчивое лесопользование, 2013. № 2 (35). С. 18–30.
- [2] Мелехов И.С. Рубки и возобновления леса на Севере. Архангельск: Архангельское книжное издательство, 1960. 200 с.
- [3] Реймерс Н.Ф. Экология. М.: Россия молодая, 1994. 380 с.
- [4] Цветков В.Ф. Вопросы лесовозобновления в связи с рубками на Европейском Севере России // Некоторые вопросы лесоведения и лесоводства на Европейском Севере России: сб. науч. работ кафедры лесоводства и почвоведения. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2005. С. 29–76.
- [5] Дебков Н.М., Залесов С.В. Возобновительные процессы, под пологом насаждений, сформировавшихся из сохраненного подростa предварительной генерации // Аграрный вестник Урала, 2012. № 9 (101). С. 39–41.
- [6] Цветков В.Ф. Самовозобновление леса: текст лекций. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2008. 98 с.
- [7] Мелехов И.С. Лесоведение: учебник для вузов. М.: МГУЛ, 2002. 398 с.
- [8] Лесохозяйственный регламент Тимирязевского лесничества Томской области. Томск, 2013. 246 с.
- [9] Проект организации и ведения лесного хозяйства Тимирязевского лесхоза Агентства лесного хозяйства по Томской области. Томск, 2005. Т. 1. Кн. 1. 213 с.
- [10] Крылов Г.В., Потапович В.М., Кожеватова Н.Ф. Типы леса Западной Сибири. Новосибирск: Зап.-Сиб. филиал АН СССР; Отд. леса, Зап.-Сиб. аэрофотолесоустройт. трест, Науч.-тех. о-во лесной пром-сти Новосибир. правл., 1958. 211 с.
- [11] Правила лесовосстановления. Утв. Приказом МПР РФ от 16 июля 2007 г. № 183. М., 2007. 11 с.

Сведения об авторах

Дебков Никита Михайлович — канд. с.-х. наук, научный сотрудник Лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, e-mail: nikitadebkov@yandex.ru

Ильинцев Алексей Сергеевич — младший научный сотрудник, аспирант ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», кафедра лесной таксации и лесоустройства Лесотехнического института Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, e-mail: a.ilintsev@narfu.ru

Васильев Алексей Сергеевич — главный специалист Комитета государственного лесного и пожарного надзора Департамента лесного хозяйства Томской области, e-mail: vasiliv.a.s@mail.ru

Статья поступила в редакцию 05.01.2016 г.

THE EVALUATION OF REGENERATION UNDER THE PINE FOREST CANOPY OF SOUTHERN TAIGA IN THE TOMSK REGION

N.M. Debkov¹, A.S. Ilintsev^{2,3}, A.S. Vasil'ev⁴

¹Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskoy ave., 103, 634055, Tomsk, Russia

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severnoy Dviny Embankment, 17, 163002, Arkhangelsk, Russia

³Northern Research Institute of Forestry, Nikitov Str., 13, 163062, Arkhangelsk, Russia

⁴Department of Forestry of Tomsk Region, Kirov ave., 103, 634041, Tomsk, Russia

a.ilintsev@narfu.ru

The article deals with the state of regeneration under the canopy of mature and overmature pine forests in southern taiga of the Tomsk region. The availability of coniferous tree regeneration under the pine stand canopy is an important factor. This factor prevents an undesirable shift of coniferous stands to deciduous ones, with a proper organization of timber harvesting and subsequent thinning being provided. The purpose of this research is to determine the characteristics of the undergrowth accumulation under the pine forest canopy depending on the growing conditions, i.e. the forest type. The regeneration processes was studied on the 226 thousand hectare territory of the Timiryazev forest district in the Tomsk region, situated between the rivers Ob and Tom. 25 thousand forest plots and more than 2,500 plots of mature and overmature pine divisions were analyzed. As a result, the analysis has shown that

most of mature and overmature pine forests have enough coniferous undergrowth which enables them to provide natural regeneration. The stand regenerated under the pine forest canopy has a mixed composition, with large undergrowth of coniferous species prevailing. The only exception is low-density (0,3–0,4) pine forests (sedge-sphagnum and sphagnum), where the undergrowth is not enough and, according to the current regulations, certain forest tree species should be planted to provide a mixed (both natural and man-made) reforestation. Pine stands of hydromorphic forest types should be excluded from the annual allowable cutting because forest management in them is inefficient from both economic and environmental points of view. In such forest types as berry-bog, bog, forb, bog-berry, some measures must be taken to fertilize the soil and to keep enough seed trees.

Keywords: forest type, forest stand, composition, density, softwood, natural regeneration, undergrowth

Suggested citation: Debkov N.M., Ilintsev A.S., Vasilev A.S. *Otsenka podpologovogo vozobnovleniya v sosnyakh yuzhnoy taygi Tomskoy oblasti* [The evaluation of regeneration under the pine forest canopy of southern taiga in the Tomsk region]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no.1, pp. 28–35. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-28-35

References

- [1] Debkov N.M. *Kompleksnaya otsenka prirodnogo potentsiala formirovaniya nasazhdeniy iz podrosta* [Complex assessment of natural potential of the formation of stands of undergrowth]. *Ustoychivoe lesopol'zovanie* [Sustainable Forest Management] 2013, no. 2 (35), pp. 18–30. (in Russian)
- [2] Melekhov I.S. *Rubki i vozobnovleniya lesa na Severe* [Cuttings and regeneration in the North]. Arhangel'sk: Arhangel'skoe knizhnoe izdatel'stvo Publ., 1960. 200 p. (in Russian)
- [3] Reymers N.F. *Ekologiya* [Ecology], Moscow, 1994, 380 p. (in Russian)
- [4] Tsvetkov V.F. *Voprosy lesovozobnovleniya v svyazi s rubkami na Evropeyskom Severe Rossii* [Issues of regeneration after cuttings in the European North of Russia] *Nekotorye voprosy lesovedeniya i lesovodstva na Evropeyskom Severe Rossii: sb. nauch. rabot kafedry lesovodstva i pochvovedeniya* [Some issues of silvics and silviculture in the European North of Russia: collection of scientific papers], Arhangel'sk: Arkhangel'sk State Technical University Publ., 2005, pp. 29-76. (in Russian)
- [5] Debkov N.M., Zalesov S.V. *Vozobnovitel'nye protsessy, pod pologom nasazhdeniy, sformirovavshikhsya iz sokhrannogo podrosta predvaritel'noy generatsii* [Regeneration processes under the canopy of forest stands, formed from preserved undergrowth of preliminary generation]. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2012, no. 9 (101), pp. 39-41. (in Russian)
- [6] Tsvetkov V.F. *Samovozobnovlenie lesa* [Regeneration of the forest] Arhangel'sk: Arkhangel'sk State Technical University Publ., 2008. 98 p. (in Russian)
- [7] Melekhov I.S. *Lesovedenie* [Silvics] Moscow: MSFU Publ., 2002, 398 p. (in Russian)
- [8] *Lesokhozyaystvennyy reglament Timiryazevskogo lesnichestva Tomskoy oblasti* [Forestry reglement Timiryazev forest area of Tomsk region]. Tomsk, 2013, 246 p. (in Russian)
- [9] *Proekt organizatsii i vedeniya lesnogo khozyaystva Timiryazevskogo leskhoza Agentstva lesnogo khozyaystva po Tomskoy oblasti* [The project of organization and conducting of forestry Timiryazev Agency of the forestry of the Tomsk region]. Tomsk, 2005, 213 p. (in Russian)
- [10] Krylov G.V., Potapovich V.M., Kozhevatova N.F. *Tipy lesa Zapadnoy Sibiri* [Forest types in Western Siberia]. Novosibirsk, 1958, 211 p. (in Russian)
- [11] *Pravila lesovosstanovleniya: utv. prikazom MPR Rossii ot 16.07.2007 № 183* [Terms reforestation: Approved. Order of MNR from 16.07.2007 no 183] Available at: <http://www.rosleshoz.gov.ru> (accessed 1 November 2014).

Author's information

Debkov Nikita Mikhaylovich — Cand. Sci. (Agriculture), Researcher at Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, e-mail: nikitadebkov@yandex.ru

Il'intsev Aleksey Sergeevich — Research Assistant at the Northern Research Institute of Forestry, pg. of Forest Assessment and Management Department at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e-mail: a.ilintsev@narfu.ru

Vasil'ev Aleksey Sergeevich — Specialist at Department of Forestry of Tomsk Region, e-mail: vasiliv.a.s@mail.ru

Received 05.01.2016

ВЛИЯНИЕ ОСУШИТЕЛЬНОЙ МЕЛИОРАЦИИ НА ВЫХОД ЖИВИЦЫ СОСНЫ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРНОЙ ПОДЗОНЫ ТАЙГИ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Н.О. Пастухова, О.П. Лебедева, Ю.И. Поташева

Лесотехнический институт Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, 163002, Архангельск, Наб. Северной Двины, 17

hope203@yandex.ru

Смолопродуктивность хвойных пород, и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в частности, представляет собой биологическую способность дерева и древостоя в целом в сравнимых условиях за единицу времени выделять определенную массу живицы (ОСТ 13-80–79). Данная способность зависит от целого ряда лесоводственных и экологических факторов, которые определяются условиями произрастания древостоя. Отвод избытка влаги в почве обеспечивает улучшение аэрации корнеобитаемого слоя и повышение интенсивности процессов смолообразования и смоловыделения. Определение влияния осушения на выход живицы проводилось в средневозрастном сосновом древостое осушаемого кустарничково-сфагнового типа леса. В ходе исследований установлено: среднее значение длины потока живицы в осушаемом насаждении превышает данный показатель для заболоченного участка лесных земель. Способность выделять живицу у древостоя осушаемых территорий достоверно отличается от смолопродуктивности соснового древостоя в гидроморфных условиях произрастания. С помощью корреляционного и регрессионного анализа доказано наличие линейной зависимости выхода живицы от расстояния между деревом и осушительным каналом. Отмечается повышение процента высокосмолопродуктивных деревьев на осушенных территориях по сравнению с заболоченными участками леса. Следовательно, основным фактором, влияющим на выход живицы соснового древостоя, является осушение заболоченных лесных земель. Мелиорация территорий повышает процент смолопродуктивных форм сосны, а также продуктивность древостоя в целом.

Ключевые слова: осушительная мелиорация, смолопродуктивность сосны, категория смолопродуктивности деревьев, длина потока живицы, метод четырех ранений

Ссылка для цитирования: Пастухова Н.О., Лебедева О.П., Поташева Ю.И. Влияние осушительной мелиорации на выход живицы сосны в условиях северной подзоны тайги Архангельской области // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 36–40. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-36-40

Сосна обыкновенная обладает высокой ценностью и в научном, и в практическом плане. Она занимает 32 % покрытой лесом площади Архангельской области [6], 20 % из них — это заболоченные лесные земли. Древостои, произрастающие в подобных условиях, отличаются низкой продуктивностью, поэтому проведение гидромелиорации способствует улучшению произрастания и повышению производительности лесов. К настоящему времени в Архангельской области осушено около 400 тыс. га переувлажненных лесов [4]. Осушенные сосновые древостои являются весьма ценными и входят в лесной фонд заготовки живицы, поэтому влияние осушения территории на продуктивность сосны остается одним из основных вопросов, связанных с изучением смолопродуктивности сосновых насаждений. Данным направлением занимались различные исследователи длительный период времени [2, 3, 9], однако работ по влиянию гидроосушительной мелиорации на смолопродуктивную способность древостоев не так много [2, 9], хотя именно от интенсивности осушения зависит производительность лесов.

Сущность процесса осушения заключается в отводе избытка поверхностных вод и пониже-

ния уровня грунтовых вод. В поры почвы проникает воздух, и изменяется термический режим. Вследствие улучшения аэрации закисные процессы сменяются окисными, резко меняется стадия почвообразовательного процесса, в результате чего зольные элементы из недоступных форм переходят в формы, удобные для усвоения корневыми системами растений [1]. В силу этого осушение заболоченных лесных земель является одним из наиболее эффективных способов повышения смолопродуктивности сосновых насаждений.

Методика

С целью определения влияния осушения на смолопродуктивную способность сосны заложены пробные площади (ПП) на территории 20 квартала Исакогорского участкового лесничества Архангельской области в средневозрастном сосняке кустарничково-сфагнового типа леса (ПП-1) и на территории 108 квартала Усть-Двинского участкового лесничества в осушаемом средневозрастном кустарничково-сфагнового древостое поперек осушительного канала с удалением в межканальное пространство (ПП-2) (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Таксационная характеристика древостоев сосны
The taxation data of pine stands

Номер ПП	Тип леса	Состав	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Полнота	Класс бонитета
ПП-1	Сосняк кустарничково-сфагновый	10С+Б	8,5 ± 0,64	10,6 ± 0,69	0,6	IV
ПП-2	Сосняк кустарничково-сфагновый (осушенный)	7СЗБ	7,8 ± 0,46	10,5 ± 0,55	0,6	IV

Т а б л и ц а 2

Влияние осушения на смолопродуктивность сосны обыкновенной
The comparison of the drainage effect on the Scots pine soft resin yield

Тип леса	Статистические показатели							
	Длина потека живицы, см			Статистическое отклонение, см	Коэффициент вариации, %	Точность опыта, %	Достоверность	Критерий Стьюдента
	минимальная	максимальная	средняя					
Сосняк кустарничково-сфагновый	1,1	127,4	22,9 ± 0,72	16,52	71,86	3,13	31,88	6,62
Сосняк кустарничково-сфагновый (осуш.)	0,1	105,8	35,4 ± 1,72	20,87	59,01	4,85	20,61	

Гидромелиорация на осушаемом участке проведена в 1966 г. Глубина осушительного канала 1,5 м, уровень воды 70 см, расстояние между осушителями 60 м. Канал сильно зарос травянистой, древесной и кустарниковой растительностью, течение воды не наблюдается, однако функцию осушения канал выполняет. И на ПП-1, и на ПП-2 количество исследуемых деревьев составляло не менее 150 шт. Каждое дерево нумеровали и наносили ранения для определения смолопродуктивной способности и категории смолопродуктивности древостоя в целом. Для изучения влияния осушения отобрали деревья сосны диаметром 10 см и более.

Смолопродуктивность каждого дерева сосны определяли методом четырех ранений, нанесенных по сторонам света север – юг – запад – восток на подрумяненные стругом части ствола дерева, с вычислением средней арифметической длины потека живицы и статистических показателей смолопродуктивной способности соснового древостоя в целом. Всего выполнено 600 ранений на каждой ПП, что обеспечило высокую точность результатов. Ранения наносили клиновидным ударником под углом 45° в верхней части подготовленной поверхности. По истечении 10 часов замеряли длину потеков и рассчитывали среднее арифметическое значение выхода живицы. Влияние осушения определяли путем замера расстояния от осушительного канала до каждого отмеченного дерева сосны через каждые 5 м удаления в межканальное пространство (1, 5, 10 м и т. д.).

После обработки материала проведен подробный анализ полученных данных и рассчитаны статистические показатели изучаемых критериев, которые представлены в табл. 2. Расчет статистических показателей выполнен с помощью программного комплекса Statistica, версия 10.

Результаты

Наблюдаются достоверные различия показателей средней смолопродуктивности деревьев у заболоченного сосняка и соснового древостоя осушаемого кустарничково-сфагнового типа леса. Среднее значение длины потека живицы в осушаемом насаждении превышает данный показатель по сравнению с заболоченным участком, что говорит о наличии благоприятных условий произрастания и о повышении смолопродуктивной способности сосны обыкновенной. Смолопродуктивность осушенного сосняка достоверно отличается ($t = 6,62$) от смолопродуктивности соснового древостоя гидроморфных условий произрастания (см. табл. 2), следовательно, осушительная лесомелиорация является одним из наиболее эффективных способов повышения смолопродуктивности, и использовать заболоченный участок сосновых насаждений для целей подсочки можно только после проведения на нем осушения.

Смолопродуктивность осушаемых сосновых древостоев зависит от целого ряда факторов, к числу которых относится гидрологический режим, связанный с доброкачественной работой

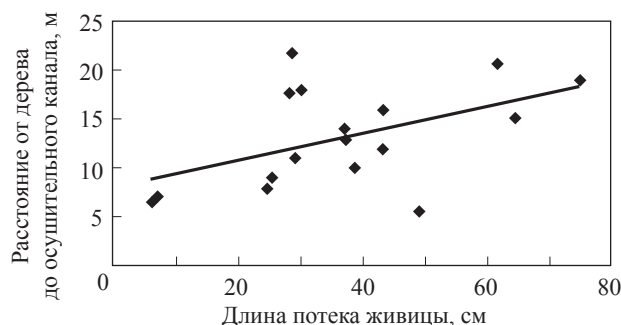
Распределение деревьев сосны обыкновенной на пробных площадях в зависимости от смолопродуктивной способности

Scots pine trees distribution on test plots, depending on the soft resin yield ability

Категория смолопродуктивности деревьев	Сосняк кустарничково-сфагновый, %	Осушенный сосняк кустарничково-сфагновый, %
Низкосмолопродуктивные	74	48
Среднесмолопродуктивные	22	44
Высокосмолопродуктивные	4	8
И т о г о	100	100

мелиоративной сети. Для оценки тесноты связи между выходом живицы и расстоянием от дерева до осушительного канала проведен корреляционный и регрессионный анализ, в результате установлена линейная зависимость выхода живицы от данного расстояния (рисунок). Силу связи устанавливали по критериям, предложенным С.А. Мамаевым [5].

Таким образом, в осушенном сосняке кустарничково-сфагновом прослеживается совершенно достоверная связь длины потока живицы с расстоянием от каждого отмеченного дерева до осушительного канала ($r = 0,49 \pm 0,183$), с достоверностью полученного значения $t_r = 2,701$. Согласно полученным данным, с повышением уровня грунтовых вод, т. е. с удалением в межканальное пространство, длина потока живицы увеличивается. Могут изменяться и физические свойства живицы: она становится менее вязкой, водянистой, способность ее истечения возрастает ($X_{\min} = 1,1$ см — сосняк кустарничково-сфагновый; $X_{\min} = 0,1$ см — сосняк кустарничково-сфагновый после осушения). При осушении изменяется тепловой режим почвы — она приобретает теплоизоляционные свойства, которые препятствуют проникновению тепла в глубь почвенных горизонтов. Чем интенсивнее лесосушение, тем холоднее торфянистые почвы. Холод влияет на корневую систе-



Зависимость длины потока живицы от расстояния между деревом и осушительным каналом
Contact the length of resin drip with the distance from the tree to the drainage channel

му, что отражается на процессе смолывыделения соснового древостоя [2].

При изучении влияния осушения на выход живицы сосны необходимо отметить процентное соотношение деревьев различной категории смолопродуктивности: низко-, средне- и высокосмолопродуктивные (классификация В.Н. Суханова, [10]) на лесных землях разной категории увлажнения (табл. 3).

Доля низкосмолопродуктивных форм сосны на заболоченных территориях значительно (на 26 %) превышает тот же показатель у осушаемых древостоев (см. табл. 3). Среднесмолопродуктивные формы преобладают на участках, подвергшихся гидромелиорации путем отвода избыточной влаги и улучшения аэрации почвы. В табл. 3 отражено преобладание высокосмолопродуктивных форм сосны в осушаемом древостое по отношению к заболоченному участку леса. Отмечается преобладание среднесмолопродуктивных (в 2 раза) и уменьшение низкосмолопродуктивных (в 1,5 раза) форм сосны обыкновенной, вследствие улучшений условий произрастания. Это обеспечивает больший выход живицы на осушаемых территориях по сравнению с заболоченными.

Выводы

1. Гидроосушительная мелиорация повышает процент высокосмолопродуктивных форм сосны в 2 раза.
2. Среднее значение длины потока живицы на осушаемых территориях в 1,5 раза превышает данный показатель для заболоченных участков леса.
3. Корреляционный анализ доказывает линейную зависимость длины потока живицы от расстояния между деревом и осушительным каналом и отражает биологический смысл явления.
4. На изучаемых территориях прослеживается высокая изменчивость длины потоков живицы и на осушаемых (59,01 %), и на заболоченных (71,86 %) участках леса.

Список литературы

- [1] Буш К.К., Клявиныш Я.Я., Майке П.М., Сабо Е.Д. Осушение лесных земель. Ленинград: Гослесбумиздат, 1960. 160 с.
- [2] Дружинин Н.А., Дружинин Ф.Н., Пестовский А.С. Прижизненное и побочное пользование осушаемых лесов Вологодской области. Вологда: ИЦ ВГМХА, 2011. 192 с.
- [3] Елпатьевский М.М., Кирюшкин В.Н., Константинов В.К. Лесохозяйственное освоение болот. М.: Лесная пром-сть, 1978. 135 с.
- [4] Коновалов В.Н., Зарубина Л.В. Эколого-физиологические особенности хвойных на осушенных землях. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2010. 295 с.
- [5] Мамаев С.А. Основные принципы методики исследования внутривидовой изменчивости древесных растений. Индивидуальная и эколого-географическая изменчивость растений. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1975. С. 3–14
- [6] Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А. Качественные характеристики сосны в культурах: учеб. пособие для вузов. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2005. 116 с.
- [7] Новоселов А.С., Федяев А.Л., Петрик В.В. Некоторые аспекты смолопродуктивности сосняков на объектах гидромелиорации в Вологодской области // Известия высших учебных заведений. Сер. Лесной журнал, 2009. № 5. С. 44
- [8] ОСТ 13-80-79. Подсочка сосны. Термины и определения. М.: Минлесбумдревпром, 1979. 20 с.
- [9] Рубцов В.Г., Книзе А.А. Ведение хозяйства в мелиорируемых лесах. М.: Лесная пром-сть, 1981. 116 с.
- [10] Суханов В.И., Ярунов А.Я., Петрик В.В., Федяев А.Л. Технологические и лесоводственные методы интенсификации подсочных насаждений. Архангельск: АИЛиИХ, 1991. 32 с.

Сведения об авторах

Пастухова Надежда Олеговна — аспирант кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов Лесотехнического института Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, e-mail: hope203@yandex.ru

Лебедева Ольга Петровна — аспирант кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов Лесотехнического института Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, e-mail: hope203@yandex.ru

Поташева Юлия Игоревна — канд. с.-х. наук, доцент кафедры геодезии и земельного кадастра Лесотехнического института Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова, e-mail: hope203@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 11.03.2016 г.

THE MARSHLAND RECLAMATION EFFECT ON SOFT RESIN YIELD OF *PINUS SYLVESTRIS* UNDER THE TAIGA NORTHERN SUBZONE CONDITIONS IN THE ARKHANGELSK REGION

N.O. Pastukhova, O.P. Lebedeva, Yu.I. Potasheva

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia

hope203@yandex.ru

The pine resin yield is primarily dependent on the stand growth conditions. Soil drainage provides better root aeration and increases the intensity of resin formation and resin exudation. The influence of drainage on resin exudation was studied on the territory of some plot areas, situated in the 108th compartment of the Ust-Dvinsk Arkhangelsk forest district, with a middle-aged pine forest stand of drained shrub-sphagnum forest types. The pine resin yield was determined with a method of «four wounds» to the cardinal points. The wounds were made with a wedge-shaped hammer at an 45° angle at the upper part of the prepared surface; in 10 hours the resin drip length was measured and the average value of resin exudation was calculated. The drainage influence on the tree stand was determined by measuring the distance from each marked tree to the drainage canal. The research showed that the average resin drip length in drained plantations exceeds that of pines growing on the swamped areas of forest land. The resin exudation ability on drained areas is definitely different from the resin yield of pine stands under the hydromorphic growing conditions. The correlation ratio between the resin exudation and the distance from the tree to the drainage channel is revealed by the correlation and regression analyzes that prove a reliable linear relationship between the studied characteristics. The percentage of resin yield shows an increase of high resin productive pine trees on drained areas unlike those on the swamped ones. Therefore, draining of swamped areas of forest is the main criterion that effects the pine stands resin output. The forest area melioration increases the percentage of resin exuding pine species and the resin yield ability of the pine stand as a whole.

Keywords: hydro-drainage forest melioration, pine resin yield, the category of resin exuding pine tree ability, the resin drip length, a «four wounds» method

Suggested citation: Pastukhova N.O., Lebedeva O.P., Potasheva Yu.I. *Vliyaniye osushitel'noy melioratsii na vykhod zhivitsy sosny v usloviyakh severnoy podzony taygi Arkhangel'skoy oblasti* [Effect of reclamation of marshland on soft resin yield of *Pinus sylvestris*] *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no.1, pp. 36–40. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-36-40

Reference

- [1] Bush K.K., Klyavin'sh Ya.Ya., Mayke P.M., Sabo E.D. *Osushenie lesnykh zemel'* [Drainage of forest land]. Leningrad: Goslesbumizdat, 1960. 160 p. (in Russian)
- [2] Druzhinin N.A., Druzhinin F.N., Pestovskiy A.S. *Prizhiznennoe i pobochnoe pol'zovanie osushaemykh lesov Vologodskoy oblasti* [In vivo and incidental use of drained forests of the Vologda region]. Vologda: ITS VGMKhA Publ., 2011. 192 p. (in Russian)
- [3] Elpat'evskiy M.M., Kiryushkin V.N., Konstantinov V.K. *Lesokhozyaystvennoe osvoenie bolot* [Forestry development bogs]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 135 p. (in Russian)
- [4] Konovalov V.N., Zarubina L.V. *Ekologo-fiziologicheskie osobennosti khvoynykh na osushennykh zemlyakh* [Ecological and physiological characteristics of conifers on reclaimed lands]. Arkhangelsk: Severnyy (Arkticheskiy) federal'nyy universitet Publ., 2010. 295 p. (in Russian)
- [5] Mamaev S.A. *Osnovnye printsipy metodiki issledovaniya vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy. Individual'naya i ekologo-geograficheskaya izmenchivost' rasteniy* [Basic principles of research methodology of intraspecific variation of woody plants. Individual and ecological and geographical variability of plants]. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR Publ., 1975. pp. 3-14. (in Russian)
- [6] Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A. *Kachestvennye kharakteristiki sosny v kul'turakh* [Qualitative characteristics of pine cultures]. Arkhangelsk: Arkhangelsk State Technical University Publ., 2005, 116 p. (in Russian)
- [7] Novoselov A.S., Fedyaev A.L., Petrik V.V. *Nekotorye aspekty smoloproduktivnosti sosnyakov na ob'ektakh gidromelioratsii v Vologodskoy oblasti* [Some aspects pine resin productivity on reclamation facilities in the Vologda region]. *Izvestie vysshikh uchebnykh zavedeniy «Lesnoy zhurnal»*, 2009. № 5. pp. 44. (in Russian)
- [8] OST 13-80-79. *Podsochka sosny. Terminy i opredeleniya* [OST 13-80-79. Tapping of pine. Terms and Definitions]. Moscow: Minlesbumdrevprom Publ., 1979, 20 p. (in Russian)
- [9] Rubtsov V.G., Knize A.A. *Vedenie khozyaystva v melioriruemyykh lesakh* [Management activities in reclaimed woods]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ., 1981, 116 p. (in Russian)
- [10] Sukhanov V.I., Yaronov A.Ya., Petrik V.V., Fedyaev A.L. *Tekhnologicheskie i lesovodstvennykh metody intensivifikatsii podsochnykh nasazhdeniy* [Technological and silvicultural techniques intensification podsochnogo plantations]. Arkhangelsk, 1991. 32 p. (in Russian)

Author's information

Pastukhova Nadezhda Olegovna — pg. of the Department of landscape architecture and afforestation at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e-mail: hope203@yandex.ru

Lebedeva Ol'ga Petrovna — pg. of the Department of landscape architecture and afforestation at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e-mail: hope203@yandex.ru

Potasheva Yuliya Igorevna — Cand. Sci. (Agriculture), Assoc. Prof. of the Department of Geodesy and Cadastre at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e-mail: hope203@yandex.ru

Received 11.03.2016

О ПРОДУКЦИИ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА В КОНТЕКСТЕ ЕГО ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

А.А. Измestьев

ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет»
664003, Россия, г. Иркутск, ул. Ленина, 11

izm77@rambler.ru

Экономический подход к организации того или иного вида хозяйственной деятельности предполагает сопоставление желаемого результата этой деятельности, в качестве которого выступает продукция (услуга) в стоимостном выражении, с затратами на достижение этого результата. Среди видов деятельности, воспроизводящих материальные блага, лесное хозяйство (ЛХ) — единственный вид, для которого установление продукции является вопросом дискуссионным на протяжении уже многих десятилетий. Основная причина нерешенности вопроса о продукции ЛХ кроется в главной его особенности — чрезвычайно длительном периоде выращивания лесов, беспрецедентно длительном в сравнении с любым другим производственным циклом. В теории и практике экономической организации ЛХ в России известны несколько подходов. Автор сравнивает их по основному показателю — периоду времени, по прошествии которого фиксируется результат лесохозяйственного производства. При существующем сметно-бюджетном подходе к финансированию ведения ЛХ лесхозами объектом формирования субсидий являются годовые объемы работ. Такая организация деятельности является административной. Сторонники другого подхода предлагают признать готовой продукцией в воспроизводстве леса ухоженные молодняки в возрасте смыкания крон. Данный подход не соответствует модели европейских государственных коммерческих лесохозяйственных организаций, так как основе его лежит все то же бюджетное финансирование промежуточных результатов лесохозяйственного производства. Логически завершенная и технологически обусловленная система экономической организации лесного хозяйства выстраивается только с позиции воспроизводства конечных продуктов и полезностей леса. Это суть третьего подхода, при котором доходы от реализации конечных продуктов лесного хозяйства сопоставляются с затратами, базой формирования которых является пространственно-временная модель воспроизводства леса. Данный вывод можно рассматривать как экономическое обоснование классического учения о лесном хозяйстве как о диалектическом единстве рубок и мероприятий по лесовосстановлению и уходу за лесом. Сделанный вывод не завершает исследований экономической организации лесного хозяйства. Далее анализ должен переходить в институциональную плоскость: в рамках каких форм организации лесных хозяйств возможна и целесообразна реализация пространственно-временной модели воспроизводства конечных ресурсов леса и какие институциональные условия для этого должны быть созданы?

Ключевые слова: лесное хозяйство, экономическая организация лесного хозяйства, продукция лесного хозяйства, главная особенность лесного хозяйства, доход лесного хозяйства, экономический механизм, модель воспроизводства леса

Ссылка для цитирования: Измestьев А.А. О продукции лесного хозяйства в контексте его экономической организации // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 41–47. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-41-47

Не прекращаются дискуссии об экономической организации лесного хозяйства (ЛХ) в России. Под ЛХ в настоящей статье понимается совокупность хозяйственных (производственных) мероприятий по охране, защите, воспроизводству лесов. Выстраивание системы экономической организации ЛХ предполагает решение следующих взаимосвязанных проблем:

- установление продукции и услуг ЛХ;
- разработка институциональной организации лесохозяйственного производства на территориях лесного фонда, не закрепленных за лесопользователями, и механизмов обеспечения выполнения лесопользователями лесохозяйственных мероприятий;
- формирование и распределение платежей за пользование ресурсами леса.

В данной статье ставится задача обобщить существующую практику и подходы известных отечественных ученых — экономистов ЛХ к

решению проблемы установления продукции (услуг) этого вида деятельности и дать оценку этим подходам в контексте особенностей ЛХ и учения о непрерывном, неистощительном пользовании лесом с позиции общего для всех видов деятельности понимания экономической категории «продукция» и методологического подхода к экономической организации деятельности. Проводимый анализ будет сопровождаться выявлением действия или бездействия различных экономических механизмов, связанных с установлением продукции лесохозяйственного производства. Другие указанные проблемы экономической организации могут быть предметом отдельных публикаций и в данной статье будут затрагиваться лишь в связи с проблемой продукции (услуг) ЛХ.

Экономический подход к организации того или иного вида деятельности предполагает сопоставление желаемых результатов этой де-

тельности, в качестве которых и выступают продукция и услуги в стоимостном выражении, с затратами на достижение этих результатов. Без этого сопоставления организация деятельности является, по сути, административной.

Среди видов деятельности, воспроизводящих материальные блага, ЛХ — единственный вид, для которого установление продукции и услуг является вопросом дискуссионным на протяжении уже многих десятилетий — начиная с 1960-х гг., когда вышла серия статей Т.С. Лобовикова по проблемам экономической организации ЛХ. Основная, но не единственная причина нерешенности вопроса о продукции (услугах) ЛХ кроется в главной особенности ЛХ — чрезвычайно длительном периоде выращивания лесов [1]. Именно с длительностью процесса лесовыращивания связано требование непрерывного, неистощительного пользования лесом, лежащее в основе теории воспроизводства леса. Указанная особенность выделяет ЛХ не только среди видов деятельности, воспроизводящих материальные блага, но и вообще среди всех видов экономической деятельности.

Главная цель экономической организации любой деятельности заключается в обеспечении гарантированного воспроизводства этой деятельности, что достигается за счет возмещения полных затрат, обусловленных соответствующей моделью воспроизводства, в результате оплаты потребителем готовой (конечной) продукции (услуг) по окончании каждого производственного цикла. Применительно к ЛХ это означает, что логически завершенная и технологически обусловленная система его экономической организации может выстраиваться только в масштабе всего производственного цикла в том его понимании, какое следует из теории воспроизводства леса на основе принципа непрерывного неистощительного пользования им: доходы от реализации конечных продуктов и услуг лесохозяйственного производства следует сопоставлять с затратами, базой формирования которых является пространственно-временная модель леса — объекта хозяйства. Данная концептуальная установка, принимаемая в настоящей статье, принципиальна для оценки разных моделей экономической организации ЛХ в силу его главной особенности.

Указанная цель экономической организации бесспорна и актуальна для всех видов экономической деятельности. Однако в теории и практике экономической организации ЛХ известны несколько подходов, различающихся периодом времени, по прошествии которого констатируется (фиксируется) результат лесохозяйственного производства.

Первым в порядке возрастания указанного периода времени выступает существующий в России сметно-бюджетный подход к финансированию лесохозяйственных мероприятий на землях лесного фонда, не закрепленных за лесопользователями. Речь идет о финансировании выполнения лесохозяйственных мероприятий государственными бюджетными и автономными учреждениями, подведомственными органам исполнительной власти субъектов Российской Федерации. В разных регионах эти учреждения могут иметь различные наименования, но, как правило, это лесхозы. Органы исполнительной власти регионов доводят до лесхозов субсидии на выполнение госзаданий по охране, защите, воспроизводству лесов. Объектом формирования субсидий являются годовые объемы работ. При этом бюджетные субсидии обеспечивают финансирование только текущих расходов на выполнение лесохозяйственных мероприятий [2].

Сметно-бюджетная организация лесохозяйственного производства сохраняется в нашей стране с 30-х гг. XX в., когда при переводе экономики на отраслевую систему управления были институционально, технологически и экономически разделены лесное хозяйство и лесозаготовки и впервые были образованы лесхозы [3, 4]. С тех пор финансовое состояние лесхозов не зависит от платежей за изъятие ресурсов леса, которые поступают в бюджетную систему и обезличиваются в ней. Исключение составляет период с 1997 по 2001 г., когда денежные средства в размере превышения фактической цены древесины на корню на торгах над начальной ценой поступали на расчетные счета лесхозов [5]. Бюджетные средства на проведение лесохозяйственных мероприятий направляются лесхозам «авансом», вне зависимости от полученных в предыдущем году результатов, т. е. финансируется не результат, а работа. Поэтому у лесхозов нет экономического дохода, если понимать под ним поступления от оплаты конечных продуктов и услуг лесохозяйственного производства. То, что есть, — просто бюджетные поступления, не связанные с финансовым оборотом, обслуживающим производственный цикл в том его понимании, какое следует из теории воспроизводства леса на основе принципа непрерывного неистощительного пользования им.

Таким образом, в рамках сметно-бюджетной организации у лесхоза отсутствует возможность соизмерения доходов с затратами, что позволяет квалифицировать такую организацию деятельности как административную. При такой организации невозможно применять показате-

ли товарной продукции, себестоимости, цены и прибыли. Следовательно, не работает экономический (финансовый) механизм стимулирования снижения затрат и повышения качества выполнения мероприятий.

Для таких видов производственной деятельности, как лесовосстановление и проходные рубки, годичный «учетный период» никоим образом не может быть использован для фиксации результата. Это означает полное бездействие механизма целеполагания в условиях длительных производственных циклов, невозможность ведения целевого хозяйства, ориентированного, например, на воспроизводство определенных сортиментов древесины. Что касается таких видов деятельности, как охрана и защита лесов, — при существующей практике большая часть средств тратится на ликвидацию последствий уже свершившихся негативных явлений. Так, например, в 2015 г. субвенции федерального бюджета на охрану лесов от пожаров и тушение лесных пожаров в Иркутской области составили 399,8 млн руб., в том числе 261,3 млн руб. (65 %) — на тушение возникших лесных пожаров. При таком подходе экономический механизм стимулирования работает в обратном направлении — становится выгодным, чтобы леса горели или страдали в результате действий вредителей либо вследствие заболеваний.

Следующим подходом в порядке возрастания периода времени, по прошествии которого констатируется (фиксируется) результат лесохозяйственного производства, является подход, одним из наиболее известных современных представителей которого является доктор экономических наук, профессор, ректор Всероссийского института повышения квалификации руководящих работников и специалистов лесного хозяйства (ФАО ВИПКЛХ) А.П. Петров. Критикуя сметно-бюджетную организацию лесохозяйственного производства, Петров считает главным негативным последствием преобразований 30-х гг. XX в. потерю лесным хозяйством своего дохода и переход на бюджетное финансирование [2, 4]. Поэтому важнейшим условием экономической организации ЛХ является признание наличия продукции этой деятельности в виде «законченных объектов, подлежащих приемке и оплате», в качестве которых не могут и не должны выступать годовые объемы работ, оцениваемые натуральными показателями.

Готовой продукцией в воспроизводстве леса — стержневой сфере лесохозяйственного производства — Петров предлагает признать:

— молодняки в возрасте смыкания крон, созданные посадкой лесных культур или содействием естественному возобновлению;

— площади, пройденные рубками ухода.

Отметим, что в части установления готовой продукции в воспроизводстве леса предложения Петрова повторяют предложения профессора Лобовикова, называющего указанные объекты «законченной производством и предъявленной к реализации продукцией» в своей концепции хозрасчетной организации лесохозяйственного производства [6].

При таком подходе экономический механизм стимулирования снижения затрат и повышения качества выполнения мероприятий становится ориентированным на более отдаленные во времени результаты, так как ухоженные молодняки в возрасте перевода в покрытую лесом площадь представляют собой, в отличие от ежегодно устанавливаемых объемов работ, результат определенного (первого) этапа воспроизводства леса протяженностью несколько лет. Но для того чтобы механизм стимулирования работал, необходимо, чтобы данный результат оплачивался заинтересованным покупателем в зависимости от его лесоводственного качества. Тогда появляется экономическая заинтересованность исполнителя лесохозяйственных работ в улучшении результата и снижении затрат. Обратной стороной экономического стимулирования на основе использования стоимостных показателей является вменение экономической ответственности — возможность контроля эффективности лесохозяйственной деятельности. Кто может выступать покупателем указанной выше готовой продукции и соответствует ли данный подход принятому в начале статьи концептуальному видению экономической организации ЛХ?

Рекомендуемая Петровым институциональная модель экономической организации лесохозяйственного производства на лесных землях, не закрепленных за лесопользователями, — государственная коммерческая организация по примеру европейских государств. Такими организациями являются, например, финское государственное унитарное предприятие «Лесная служба» (Metsähallitus) и акционерное общество со стопроцентным участием государства «Леса Латвии» [7]. Экономической основой деятельности данных организаций является доход от разных видов использования лесов, таких как заготовка древесины, семян, производство и продажа саженцев, предоставление услуг в сфере туризма, охоты и рыболовства, разработка песчаных и каменных карьеров. Этот доход и обеспечивает финансирование на плановой основе текущих затрат на ведение лесного хозяйства, а также инвестирование в развитие его материальной базы, включая строительство дорог и других долговременных объектов.

Здесь необходимо подчеркнуть, что доход указанных государственных организаций является доходом от реализации конечных для ЛХ ресурсов и полезностей леса, тогда как молодняки в возрасте смыкания крон и площади, пройденные рубками ухода, представляют собой лишь промежуточные результаты лесохозяйственного производства. Очевидно, что экономическая модель европейских государственных коммерческих лесохозяйственных организаций и модель, в основе которой лежит оплата промежуточных результатов лесохозяйственного производства, принципиально различны, так как последняя базируется на бюджетном финансировании. В данной статье не рассматриваются межотраслевые договорные отношения, при которых арендатор-лесозаготовитель заказывает у лесохозяйственной организации выполнение мероприятий по лесовосстановлению и уходу за лесом.

Приведенные данные о европейском опыте, а также принятое в статье концептуальное видение проблемы экономической организации ЛХ с позиции воспроизводства конечных продуктов и полезностей леса ориентируют на понимание «своего дохода» лесного хозяйства как дохода, поступающего напрямую от лесопользователей в лесохозяйственную организацию и используемого на плановой основе для финансирования расходов на выполнение лесохозяйственных мероприятий. Здесь принципиальны три положения, следующие из общеэкономических представлений о производственном цикле и обслуживающем его финансовом обороте:

– доход должен поступать напрямую от лесопользователей, что означает отсутствие опосредования финансовых потоков бюджетной системой;

– доход образуется от оплаты конечных, а не промежуточных, результатов лесохозяйственного производства;

– финансирование лесохозяйственных мероприятий за счет зарабатываемого дохода от продажи конечных ресурсов и полезностей леса позволяет планировать эти мероприятия на долговременной основе и вести целевое хозяйство.

В случае с признанием готовой продукцией молодняков в возрасте смыкания крон и площадей, пройденных рубками ухода, все эти положения не реализуются. Оплачивать такую «продукцию» может только государство. При том что платежи за древесину на корню в полном объеме поступают в бюджетную систему, налицо отсутствие замкнутого (неопосредованного) финансового оборота, обслуживающего производственный цикл воспроизводства леса.

Несмотря на то что ухоженные молодняки в возрасте перевода в покрытую лесом площадь представляют собой результат определенной стадии воспроизводства леса, горизонт планирования, соответствующий данному возрасту, явно недостаточен для ведения целевого хозяйства. А ЛХ, как и другие сферы хозяйственной деятельности человека, должно быть целевым — ориентированным на воспроизводство определенных продуктов и полезностей леса, а не просто молодняков, переведенных в покрытые лесом земли [8].

Таким образом, в случае с предлагаемыми Петровым в качестве готовой продукции в воспроизводстве леса объектами, являющимися промежуточными результатами лесохозяйственного производства, можно констатировать отсутствие у ЛХ «своего дохода», что уважаемый профессор справедливо считает критичным для его экономической организации. Данный подход не учитывает истинной длительности производственного цикла и не ориентирован на организацию воспроизводства конечных продуктов и услуг леса, а значит, и на ведение целевого хозяйства. В результате вне поля зрения оказывается пространственно-временная модель непрерывного неистощительного пользования лесом, обуславливающая затраты на производство конечных продуктов и услуг ЛХ.

С предложениями Петрова в отношении установления результатов таких видов деятельности, как охрана и защита лесов, можно полностью согласиться: результатом здесь следует считать состояние лесов, не нарушенное пожарами, вредителями и заболеваниями [2]. Рассмотрим данный подход на примере охраны лесов от пожаров. До начала пожароопасного периода региону выделяется минимально необходимая часть средств на предупреждение лесных пожаров. Другая часть средств выделяется по результатам пожароопасного периода с учетом погодных условий в размере, находящемся в обратной зависимости от нанесенного пожарами ущерба, — чем больше ущерб, тем меньше данное финансирование. Часть этих средств используется на стимулирование работников, часть — на финансирование мер противопожарного обустройства лесов капитального характера. Только при таком подходе экономический механизм стимулирования будет работать в направлении снижения ущерба и улучшения состояния лесов.

Еще один известный ученый — экономист ЛХ профессор Н.А. Моисеев — высказывает иную точку зрения в отношении сущности продукции ЛХ. К проблеме экономической ор-

ганизации ЛХ он подходит с позиции воспроизводства конечных продуктов и полезностей леса: «...сами авторы всерьез не отождествляли планируемые ими промежуточные объекты общего процесса лесовыращивания с продукцией лесного хозяйства, которая по общепринятым понятиям должна иметь спрос, конкретного потребителя и возмещать затраты на ее производство» [9]. Полагая, что ЛХ в плане экономической организации должно базироваться на общих для всех видов деятельности экономических категориях и общем методологическом подходе, Моисеев исходит из целевого характера ЛХ: «Итак, для ведения лесного хозяйства с самого начала надо определиться с его целями, т. е. с теми видами продукции, на которые оно должно быть ориентировано» [9]. Руководствуясь общим методологическим подходом к экономической организации деятельности, Моисеев связывает затраты на производство конечных продуктов и полезностей леса с пространственно-временной моделью его воспроизводства — преемственным пространственно-возрастным рядом насаждений для сплошнолесосеочного хозяйства и преемственно-возрастными поколениями для выборочного хозяйства [9, 10].

При таком подходе учитывается главная особенность ЛХ — длительность лесовыращивания, а основой служит воспроизводственная модель, обеспечивающая реализацию принципа непрерывного неистощительного пользования лесом. В этом последнем подходе Моисеева соответствует классическому учению об обороте рубки по лесной ренте, системно изложенному в работе [11]. В несколько измененном по форме (не по сути) виде формула лесной ренты следующая:

$$r_w = (A_u + \Sigma D - Sa)/S,$$

где r_w — лесная рента — фактически получаемый (не фиктивный-расчетный) ежегодный доход в расчете на 1 га хозяйственного целого;

A_u — ежегодный доход от главного пользования за вычетом расходов, связанных с рубкой, и расходов по лесовозобновлению;

ΣD — ежегодный доход от промежуточных рубок в насаждениях разных возрастов за вычетом производственных затрат;

S — площадь хозяйственного целого, состоящего из разновозрастных насаждений от одного года до возраста рубки; возраст рубки, при котором лесная рента будет максимальной, определяет оборот рубки по лесной ренте;

a — ежегодные расходы на 1 га площади хозяйственного целого (у Орлова это расходы только на «управление и охранение», а по сути — затраты на проведение обоснованной региональной системы лесохозяйственных мероприятий, определяющие себестоимость воспроизводства целевых для данного хозяйства ресурсов леса).

Данная формула отражает сквозное планирование лесохозяйственных мероприятий и, соответственно, сквозной учет затрат на производство конечных ресурсов леса в рамках преемственного пространственно-возрастного ряда насаждений, образующих в совокупности объект хозяйства, называемый «хозяйственное целое». Это означает, что объем заготовки древесины, т. е. ежегодный доход, увязан с лесохозяйственными мероприятиями определенной структуры и интенсивности по хозяйственному целому, т. е. ежегодными расходами. Такой связи нет в модели функционирования европейских государственных коммерческих лесохозяйственных организаций. В отсутствие сквозного планирования по хозяйственному целому в этой модели нет механизмов, которые не позволяли бы нарушать баланс между изъятием готового продукта (рубкой) и затратами воспроизводственными, охранными и защитными мероприятиями в целях достижения более высокого финансового результата в краткосрочном периоде.

При этом стоит отметить, что долгосрочный экономический механизм стимулирования выполнения затратных мероприятий в европейской модели присутствует — это вменение улучшения состояния и увеличения стоимости лесов в качестве главной цели государственной лесохозяйственной организации. Однако ввиду того что балансирование доходов (пусть и от реализации конечных для ЛХ ресурсов и полезностей леса) и расходов осуществляется без сквозного планирования по хозяйственному целому, европейскую модель можно квалифицировать как модель псевдоэкономической организации ЛХ.

Таким образом, только при сквозном планировании мероприятий и учете затрат на производство конечных ресурсов леса в рамках воспроизводственной модели — хозяйственного целого — сущность таких экономических категорий, как «продукция» и «экономическая организация», раскрывается применительно к ЛХ полноценно — в соответствии с общими для всех видов деятельности представлениями. Именно такой подход соответствует классическому пониманию лесного хозяйства как диа-

лектического единства рубок и мероприятий по лесовосстановлению и уходу за лесом. Здесь рубка перестает быть самостоятельным актом и становится обусловленной, регламентированной лесоводственным замыслом и соответствующей этому замыслу воспроизводственной моделью данного лесного хозяйства. С точки зрения модели воспроизводства конечных продуктов леса не наблюдается принципиальных различий между сметно-бюджетной организацией ЛХ и подходом Петрова. Различие сводится к неодинаковой продолжительности периода фиксации промежуточных результатов лесохозяйственного производства.

Дальнейшее исследование экономической организации ЛХ переводит анализ в институциональную плоскость: в рамках каких форм организации лесных хозяйств возможна и целесообразна реализация классической пространственно-временной модели воспроизводства конечных ресурсов леса и какие институциональные условия для этого должны быть созданы? Модель эта в настоящее время не работает в России — вместо оборота рубки учитывается лишь соответствующий этому обороту возраст рубки; отдельное лесничество, по которому определяется расчетная лесосека, не является хозяйственным целым.

Сведения об авторе

Измestъев Александр Анатольевич — канд. экон. наук, доцент, Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, доцент кафедры экономики и управления бизнесом (по внутреннему совместительству), ученый секретарь ученого совета ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет», e-mail: izm77@rambler.ru

Список литературы

- [1] Иванюта В.М., Кожухов Н.И., Моисеев Н.А. Экономика лесного хозяйства: учебник для вузов. М.: Лесная пром-сть, 1983. 272 с.
- [2] Петров А.П. Экономические отношения в лесном хозяйстве: из прошлого в будущее. Матер. к докл. на науч. дебатах «Экономика лесных отношений», г. Москва, 25 февраля 2016 г. <http://www.cepl.rssi.ru/?q=node/265>
- [3] Петров А.П., Мамаев Б.М., Тепляков В.К., Щетинский Е.А. Государственное управление лесным хозяйством: учеб. пособие. М.: ВНИИЦлесресурс, 1997. 304 с.
- [4] Петров А.П. Назад в будущее? // Российские лесные вести, 2014. 21 марта. <http://lesvesti.ru/news/expert/7336/>
- [5] Лесной кодекс Российской Федерации: Федеральный закон. Принят Государственной думой 22 января 1997 г. // Российская газета, 1997. 4 февраля. № 23.
- [6] Лобовиков Т.С. Концепция хозрасчетной организации лесохозяйственного производства // Лесное хозяйство, 1989. № 5. С. 8–12.
- [7] Петров А.П. Не в прошлое, а в будущее // Российские лесные вести. 2013. 16 авг. <http://lesvesti.ru/news/expert/5658/>
- [8] Измestъев А.А. Институциональные возможности повышения прозрачности и эффективности санитарных рубок лесхозов в рамках действующего законодательства // Управленец, 2015. № 4 (56). С. 4–8.
- [9] Моисеев Н.А. О продукции лесного хозяйства, ее себестоимости и цене // Лесной вестник, 2002. № 4. С. 14–20.
- [10] Моисеев Н. А. Экономика лесного хозяйства: учеб. пособие. 2-е изд. М.: МГУЛ, 2008. 384 с.
- [11] Орлов М.М. Лесоустройство: учебник. Л.: Издание журнала «Лесное хозяйство, лесопромышленность и топливо», 1927. Т. 1. 1120 с.

Статья поступила в редакцию 18.10.2016 г.

ABOUT FORESTRY PRODUCTS IN THE CONTEXT OF ITS ECONOMIC ORGANIZATION

A.A. Izmet's'ev

Baikal State University, 664003, Russia, Irkutsk, Lenina St., 11

izm77@rambler.ru

The economic approach to the organization of economic activity implies the comparison of desirable result of these activities to the cost needed to achieve this result, the result products (services) being in value term. If the above comparison is not available the economic working arrangement is, in fact, administrative. Among various types of activities to produce material benefits, forestry management is unique as its range of final products (services) has been questionable for already many decades. The main reason of the forestry product range problem being unsolved results from its main feature — the extremely long period of wood cultivation when compared to any production cycle. The theory and practice of forestry economic working arrangement in Russia have several approaches to the above problem. The time period after which the forestry production result is available is the basis for the comparison of these approaches in this article. In case of the existing cost estimate and budget approach to financing the forest management by a forest enterprise, the subsidy schemes are based on the annual amount of work. Such economic working arrangement is administrative. The supporters of another approach suggest recognizing the wood of well-groomed young growths at the age of turning them into the forested area as finished goods. This approach doesn't conform with the model of the European state commercial forestry institutions as it implies budget financing of intermediate results of forestry production. The conclusion has been drawn that a logically completed and technologically caused system of the forestry economic working arrangement can be built only in terms of reproducing forest end products and its other benefits. It is an essence of the third approach which implies that the income from forest end product sales is compared with the costs which result from the space-time model of forest reclamation. This conclusion is considered to economically substantiate the classical doctrine of forestry as a dialectic unity of felling operations and reforestation ones to take care of forest stands. The drawn conclusion cannot complete comprehensive research of the economic working arrangement used in forestry. Onwards, the analysis has to pass into the institutional plane: within what forms of the forestry working arrangement the implementation of the space-time model to reproduce forest end products becomes possible and reasonable and what institutional conditions must be created to provide this purpose?

Keywords: forestry, economic working arrangement in forestry, forestry products, the main feature of forestry, income of forestry, an economic mechanism, the model of forest reclamation

Suggested citation: Izmet's'ev A.A. *O produktii lesnogo khozyaystva v kontekste ego ekonomicheskoy organizatsii* [About forestry products in the context of its economic organization]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 41–47. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-41-47

References

- [1] Ivanyuta V.M., Kozhukhov N.I., Moiseev N.A. *Ekonomika lesnogo khozyaystva* [Forestry economics]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ., 1983. 272 p. (in Russian)
- [2] Petrov A.P. *Ekonomicheskie otnosheniya v lesnom khozyaystve: iz proshlogo v budushchee* [The economic relations in forestry: from the past in the future]. *Materialy k dokladu na nauchnykh debatakh «Ekonomika lesnykh otnosheniy»*, Moskva, 25 fevralya 2016 g. [Materials to the report on a scientific debate «Economy of the forest relations», on February 25, 2016]. Available at: <http://www.cepl.rssi.ru/?q=node/265> (accessed 25 July 2016). (in Russian)
- [3] Petrov A.P., Mamaev B.M., Teplyakov V.K., Shchetinskiy E.A. *Gosudarstvennoe upravlenie lesnym khozyaystvom* [Public forest management]. Moscow, VNIITslesresurs' Publ., 1997. 304 p. (in Russian)
- [4] Petrov A.P. *Nazad v budushchee?* [Back in the future?]. *Rossiyskie lesnye vesti* [Russian forest news], 2014, March 21. Available at: <http://lesvesti.ru/news/expert/7336/> (accessed 18 July 2016). (in Russian)
- [5] *Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 29 yanvarya 1997 g. № 22-FZ* [Forest code of the Russian Federation of January 29, 1997 № 22-FZ], www.consultant.ru. (in Russian)
- [6] Lobovikov T.S. *Kontseptsiya khozraschetnoy organizatsii lesokhozyaystvennogo proizvodstva* [Concept of the self-supporting organization of forestry production]. *Lesnoe khozyaystvo* [Forestry], 1989, no.5, pp. 8-12. (in Russian)
- [7] Petrov A.P. *Ne v proshloe, a v budushchee* [Not in the past, and in the future]. *Rossiyskie lesnye vesti* [Russian forest news], 2013, August 16. Available at: <http://lesvesti.ru/news/expert/5658/> (accessed 18 July 2016). (in Russian)
- [8] Izmet's'ev A.A. *Institutsional'nye vozmozhnosti povysheniya prozrachnosti i effektivnosti sanitarnykh rubok leskhozov v ramkakh deystviyushchego zakonodatel'stva* [Institutional possibilities to increase transparency and efficiency of sanitary cuttings of forestries under the current legislation]. *Upravlenets*, 2015, no. 4(56), pp. 4-8. (in Russian)
- [9] Moiseev N.A. *O produktii lesnogo khozyaystva, ee sebestoimosti i tsene* [About products of forestry, its cost value and the price]. Moscow state forest university bulletin – *Lesnoy vestnik*, 2002, no. 4, pp.14-20. (in Russian)
- [10] Moiseev N.A. *Ekonomika lesnogo khozyaystva* [Forestry economics]. Moscow, MGUL' Publ., 2008. 384 p. (in Russian)
- [11] Orlov M.M. *Lesoustroystvo* [Forest management], Leningrad: Lesnoe khozyaystvo, Lesopromyshlennost' i Topливо magazine' Publ., 1927. 1120 p. (in Russian)

Author's information

Izmet's'ev Aleksandr Anatol'evich — Cand. Sci. (Economics), Assoc. Prof., Honorary worker of higher education of the Russian Federation, Baikal State University, e-mail: izm77@rambler.ru

Received 18.10. 2016

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА СМЕШАННОГО РЕЗАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ НА ШПОН

А.Н. Чемоданов, Ренат Х. Гайнуллин, Ришат Х. Гайнуллин

Поволжский государственный технологический университет, 424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3.
chemodanovan@volgatech.net

В литературе часто описывают получение шпона строганием поперек или вдоль волокон. Эти виды строгания достаточно хорошо изучены, экспериментальным путем получены поправочные коэффициенты, необходимые для расчетов энергосиловых параметров резания. Между тем определенный интерес представляет смешанное строгание. Для его обоснования необходим комплекс теоретических и экспериментальных исследований, разработка математической модели процесса смешанного резания, определение поправочных коэффициентов, заключение об эффективности реализации смешанного строгания, выработка предложений по проектированию необходимого оборудования. В статье отражены причины необходимости уточнения результатов исследования продольного и поперечного строгания и их неприменимости к получению шпона смешанным строганием. Описана методика расчета усилий резания при смешанном строгании древесины на шпон. Для разработки математической модели процесса строгания поставлена задача объемным методом определить усилия, возникающие в процессе строгания, а также получить значения поправочных коэффициентов для учета степени обжима и толщины шпона. Для сравнительной оценки способов строгания и выбора лучшего в качестве критериев оценки могут быть использованы качество поверхности (шероховатость) шпона и удельная энергоёмкость процесса строгания. Такие данные необходимы по основным, образующим состав насаждений, породам, используемым в качестве сырья для производства шпона. Данные необходимо свести в таблицу для размещения в нормативно-справочной литературе с целью последующего использования.

Ключевые слова: древесина, шпон, смешанное строгание, поправочные коэффициенты, математическая модель

Ссылка для цитирования: Чемоданов А.Н., Гайнуллин Ренат Х., Гайнуллин Ришат Х. Определение силовых характеристик процесса смешанного резания древесины на шпон // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 48–53. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-48-53

Разработка современных технологий механической обработки древесины подразумевает создание и новых видов оборудования. Однако невозможно создать оборудование, не зная закономерностей процессов, происходящих при обработке древесины. Основная часть процессов механической обработки древесины характеризуется энергосиловыми параметрами. Не является исключением и процесс изготовления строганого шпона при смешанном резании вращающимся режущим блоком. В данном случае при проектировании оборудования необходимо отталкиваться от силовых характеристик процесса строгания, которые непосредственно связаны с теорией резания древесины.

Вопросы стружкообразования при строгании древесины на шпон подробно освещены в трудах различных авторов ([1–4] и др.). Однако все они относятся к получению шпона строганием поперек или вдоль волокон. Соответственно, и силовые расчеты процесса, строгания шпона тоже относятся к поперечному и продольному строганию. С появлением технологии и оборудования для смешанного строгания древесины на шпон [5, 6] возникла необходимость в выявлении закономерностей процессов образования стружки, энергозатрат и т. д.

Большинством авторов [2, 3, 7] при поступательно движущемся режущем инструменте усилие резания при строгании древесины на шпон определялось как сумма двух составляющих, действующих со стороны лезвия ножа (P_{Δ}) и прижимной линейки (P_{Π}), объединенных в одно усилие ($P_{\text{бл}}$) (рис. 1)

$$P_{\text{бл}} = P_{\Delta} + P_{\Pi}$$

Для упрощения расчетов в работах [2, 7] силу $P_{\text{бл}}$, действующую на заготовку со стороны блока нож – прижимная линейка, принимают как произведение

$$P_{\text{бл}} = P_1 b,$$

где P_1 — единичная сила резания гидротермически обработанной древесины с обжимом стружки прижимной линейкой, Н;
 b — ширина стружки, равная длине заготовки, м.

Для определения единичной силы резания авторы [3, 7] воспользовались формулой

$$P_1 = P_{1 \text{ табл}} a_{\Pi} a_t a_p a_{\phi},$$

где $P_{1 \text{ табл}}$ — табличное значение единичной силы резания гидротермически обработанной древесины, Н;

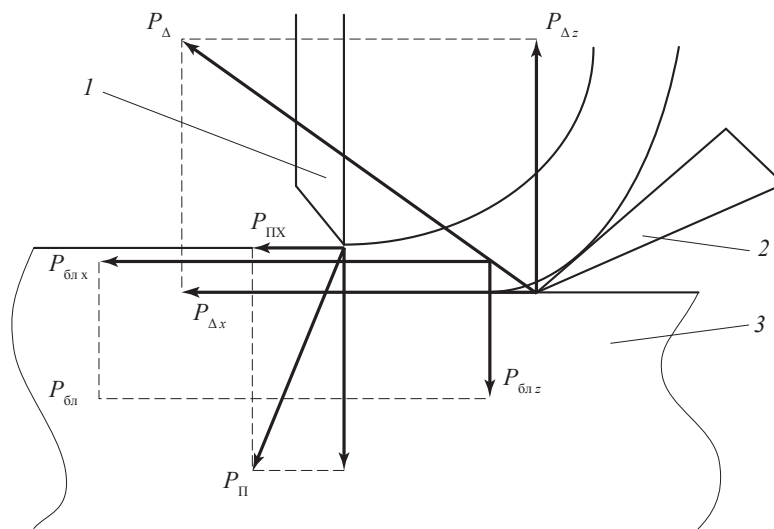


Рис. 1. Схема сил, действующих на заготовку со стороны реза и прижимной линейки при строгании шпона поперек волокон древесины: 1 — прижимная линейка, 2 — резец, 3 — заготовка

Fig. 1. Diagram of the forces acting on the workpiece by the tool and the hold-down device when planing across the grain of the wood veneer 1 — a hold-down device, 2 — a cutter, 3 — a workpiece

$a_{п}, a_p, a_r, a_φ$ — поправочные коэффициенты для учета соответственно: породы древесины, температуры древесины, затупления ножа и линейки, угла наклона лезвия ножа к направлению волокон древесины.

Численные значения $P_{1\text{ бл табл}}$ определяются экспериментальным путем для различных условий. Данный метод очень трудоемок ввиду большого количества опытов.

В работах [8, 9] усилие резания при строгании определяется как сумма сил P_p резания древесины и силы P_T трения от обжима,

$$P_{\text{бл}} = P_p + P_T. \tag{1}$$

В свою очередь, силы P_p резания и P_T трения определяются по зависимостям

$$P_p = Kbe, P_T = pbf,$$

где K — удельное сопротивление резанию древесины, H/m^2 ;

b — ширина стружки, м;

e — толщина стружки, м;

p — интенсивность обжима на единицу длины прижимной линейки, $\text{H}/\text{м}$;

f — коэффициент трения прижимной линейки по древесине.

Значения p и f определяют экспериментальным путем. Однако указанные величины изменяются в широких пределах, что затрудняет их определение при различных условиях.

Зависимость (1) подробно рассмотрена в работе [4] с точки зрения механико-математического метода исследования процессов резания древесины применительно к продольному строганию шпона. Данная методика справедлива

исключительно для прямолинейного движения режущего суппорта.

Авторами [1, 10, 11] для определения усилия резания при строгании предложена формула

$$P_{\text{бл}} = Kel, \tag{2}$$

где K — удельное сопротивление резанию при строгании, H/m^2 ;

e — толщина шпона, м;

l — длина заготовки, м.

При дальнейших расчетах удельного сопротивления резанию при строгании авторы [1, 11] на основании экспериментальных данных получили уравнение

$$K = 0,118V^{-0,266}e^{-0,314t-0,173\Delta}0,4+0,5S+1,1/\Delta,$$

где V — скорость резания, м/с;

e — толщина шпона, м;

t — температура заготовки, $^{\circ}\text{C}$;

Δ — степень обжима древесины.

Вычисление удельного сопротивления K резанию при строгании затрудняется без наличия вычислительной техники ввиду сложных степенных зависимостей.

Для упрощения расчетов указанная зависимость автором [10] представлена в виде

$$K = K_0 a_{п} a_v a_h a_r a_{\Delta}, \tag{3}$$

где K_0 — основное удельное сопротивление резанию, H/m^2 ;

$a_{п}, a_v, a_h, a_r, a_{\Delta}$ — поправочные коэффициенты для учета соответственно: породы древесины, скорости резания, толщины шпона, температуры древесины, степени обжима древесины.

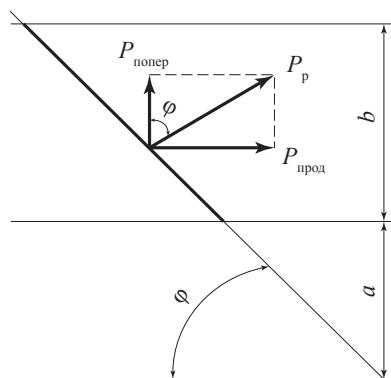


Рис 2. Схема направления сил резания при смешанном строгании древесины

Fig. 2. The scheme of the direction of cutting forces in combined wood planing

Вышеупомянутые поправочные коэффициенты определены экспериментально и широко используются для технологических расчетов.

Смешанное резание древесины при вращающемся движении диска с ножами происходит в рубительных машинах. Однако сходство со строганием шпона заключается только во вращательном движении режущего органа. Конструкция режущего суппорта рубительных машин не имеет прижимной линейки, а плоскость резания не параллельна волокнам древесины, в результате чего получается щеп, а не шпон. Соответственно, и методика силовых расчетов не подходит для строгания шпона.

Наиболее близкой по технической сути является конструкция дощестрогального станка дискового (ротационного) типа [9]. Для определения силовых характеристик работы данной конструкции используется выражение (1).

Все описанные методики расчета усилий резания справедливы для поперечного и продольного строгания древесины на шпон. Ни в одной из методик не учитываются изменения характеристик при строгании древесины вращающимся механизмом резания. Таким образом, рассмотренные методики не позволяют определять усилия резания при смешанном строгании.

Целью настоящей работы является создание математической модели процесса смешанного строгания древесины на шпон вращающимся механизмом резания. Для этого необходимо решить следующие задачи: объемным методом определить усилия, возникающие в процессе смешанного строгания; аналитико-экспериментальным методом получить численные значения поправочных коэффициентов для учета толщины и степени обжима шпона.

Аналитическое моделирование

Наиболее подходящей для расчета усилий резания при смешанном строгании шпона вращаю-

щимся механизмом резания является формула (2) предложенная авторами [10, 11]. Необходимо оговориться, что выражение (2) для нашего случая будет выглядеть следующим образом

$$P_{\text{вл}} = kbh,$$

где k — удельное сопротивление резанию при строгании древесины с обжимом, Н/м²;

b — ширина заготовки, м;

h — толщина шпона, м.

Рассмотрим каждую из составляющих в отдельности.

Величина b — ширина заготовки — является постоянной. Толщина шпона h варьируется в зависимости от нужд производства. Основной интересующей нас величиной является k — удельное сопротивление резанию при строгании. Рассмотрим случай резания древесины вращающимся ножом без обжима (рис. 2).

Для этого случая усилие P_p резания в алгебраической форме примет вид

$$P_p = \sqrt{P_{\text{попер}}^2 + P_{\text{прод}}^2}, \tag{4}$$

где $P_{\text{попер}}$ и $P_{\text{прод}}$ — усилия резания, направленные соответственно перпендикулярно и вдоль волокон древесины, определяются по выражениям

$$P_{\text{попер}} = k_{\text{попер}} h b \cos \varphi, \tag{5}$$

$$P_{\text{прод}} = k_{\text{прод}} h b \sin \varphi, \tag{6}$$

где $k_{\text{попер}}$ и $k_{\text{прод}}$ — удельное сопротивление резанию соответственно поперек и вдоль волокон древесины, Н/м²;

$b \cos \varphi$ — ширина срезаемой стружки в поперечном направлении, м;

$b \sin \varphi$ — ширина срезаемой стружки в продольном направлении, м.

С учетом (5) и (6) выражение (4) примет вид

$$P_p = \sqrt{(k_{\text{попер}} h b \cos \varphi)^2 + (k_{\text{прод}} h b \sin \varphi)^2}. \tag{7}$$

Выделив из подкоренного выражения (7) величины h и b , получим

$$P_p = hb \sqrt{(k_{\text{попер}} \cos \varphi)^2 + (k_{\text{прод}} \sin \varphi)^2}, \tag{8}$$

где $\sqrt{(k_{\text{попер}} \cos \varphi)^2 + (k_{\text{прод}} \sin \varphi)^2}$ — удельное сопротивление резанию при вращательном движении ножа.

При идеальных условиях $k_{\text{попер}} = k_0^\# = 4,9$ МПа; $k_{\text{прод}} = k_0^// = 6,9$ МПа.

Обозначим через k_0^φ основное значение удельного сопротивления резанию древесины при различных углах φ . Тогда

$$k_0^\varphi = \sqrt{(k_0^\# \cos \varphi)^2 + (k_0^// \sin \varphi)^2}. \tag{9}$$

**Сравнение экспериментальных и теоретических данных
о силе резания при строгании шпона**

The comparison of the experimental and theoretical data on the strength of the cutting planing veneer

Опыт	Толщина шпона h , мм	Степень обжима Δ , %	Сила резания, Н		Отклонение (ошибка), %
			экспериментальная	теоретическая вычисленная по (11) с учетом (10), (12–14)	
1	1,0	10	365	362,25	0,75
2	1,0	15	378	379,5	0,4
3	1,0	20	395	396,75	0,44
4	1,5	10	409	407,5	0,37
5	1,5	20	443	446,3	0,74
6	2,0	10	526	521,64	0,83
7	2,0	15	544	546,5	0,46
8	2,0	20	575	571,3	0,64

Значения удельного сопротивления k_0^ϕ резанию древесины при различных углах ϕ

$\phi,^\circ$	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
k_0^ϕ , МПа.....	4,9	5,06	5,47	5,98	6,45	6,78	6,90

Аналогично (3), удельное сопротивление резанию при смешанном строгании шпона вращающимся механизмом резания можно записать как

$$k^\phi = k_0^\phi a_{\text{попр}},$$

где $a_{\text{попр}}$ — коэффициент поправки на различные условия.

Значение $a_{\text{попр}}$ будет представлять собой произведение различных коэффициентов для учета толщины строгаемого шпона, степени обжима, породы, влажности, температуры древесины и т. д. Основными интересующими нас коэффициентами являются a_Δ — коэффициент поправки на степень обжима шпона, a_h — коэффициент поправки на толщину срезаемого шпона. Произведение оставшихся поправочных коэффициентов обозначим как $a_{\text{попр}}$ — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, удельное сопротивление резанию при смешанном строгании шпона

$$k^\phi = k_0^\phi a_\Delta a_h a_{\text{попр}}. \tag{10}$$

Поскольку в формуле (8) не учитывается обжим древесины, с помощью формулы (10) определим усилие на блоке нож–прижимная линейка как

$$P_{\text{бл}} = k^\phi hb. \tag{11}$$

Исходя из условий проведения эксперимента и его результатов [12], определим численные

значения вышеуказанных коэффициентов. Коэффициент a_Δ находим из выражения

$$a_\Delta = k^\phi / k_0^\phi. \tag{12}$$

Здесь необходимо внести ясность. Величина k^ϕ будет рассчитываться не по выражению (10), а исходя из экспериментальных данных по формуле

$$k^\phi = P_{\text{бл}} / hb.$$

Коэффициент a_Δ не зависит от толщины строгаемого шпона.

Численные значения коэффициента поправки на степень обжима

Степень обжима, %.....	10	15	20
Значение коэффициента a_Δ	1,05	1,10	1,15

Таким образом, коэффициент поправки на толщину срезаемого шпона

$$a_h = (P_{\text{бл}}^h / h) / P_{\text{бл}}^{1,0}, \tag{13}$$

где $P_{\text{бл}}^h$ — усилие резания при строгании шпона толщиной, отличной от 1 мм, Н;

$P_{\text{бл}}^{1,0}$ — усилие резания при строгании шпона толщиной 1 мм, Н.

Численные значения коэффициента a_h , определенные для разных толщин шпона, полученного при одинаковых степенях обжима

Толщина шпона, мм.....	1	1,5	2,0
Значение коэффициента a_h	1,0	0,75	0,72

Оставшийся коэффициент $a_{\text{проп}}$, вероятнее всего, будет представлять собой произведение

некоторых коэффициентов, влияние которых не принято во внимание. Однако численное значение данного коэффициента приблизительно равно отношению

$$a_{\text{проп}} = k_0^\varphi / k_0^{\prime\prime}. \quad (14)$$

Значение данного коэффициента справедливо при $\varphi \geq 60^\circ$ (из условий эксперимента). Таким образом, удельное сопротивление резанию при смешанном строгании шпона

$$k^\varphi = k_0^\varphi a_{\Delta} a_h (k_0^\varphi / k_0^{\prime\prime}).$$

Для определения степени соответствия расчетных значений усилия резания, найденных по выражению (11), сравним их с экспериментальными данными, как показано в таблице.

Выводы

1. Аналитическим методом определено основное значение удельного сопротивления резанию древесины при различных углах φ (см. формулу (9)).

2. Сопоставлением экспериментальных и теоретических данных получены численные значения поправочных коэффициентов:

— a_{Δ} при строгании шпона разными степенями обжима;

— a_h при строгании шпона различной толщины;

— $a_{\text{проп}}$ — коэффициент пропорциональности (см. формулу (14)).

3. Разработана математическая модель (см. формулу (11)) процесса смешанного резания древесины на шпон вращающимся механизмом резания с учетом поправочных коэффициентов.

4. Сравнение теоретических и экспериментальных данных показало высокую степень их согласованности (см. таблицу).

Список литературы

- [1] Грубе А.Э. Дереворежущие инструменты. М.: Лесная пром-сть, 1971. 344 с.
- [2] Любченко В.И. Резание древесины и древесных материалов: учеб. пособие для вузов. М.: Лесная пром-сть, 1986. 296 с.
- [3] Михеев И.И., Воронов В.А., Любченко В.И. Производство лущеного и строганого шпона. М.: Высш. шк., 1970. 246 с.
- [4] Гайнуллин Ренат Х. Обоснование технологических параметров продольного резания древесины на шпонострогальном станке. Дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01, 05.21.05; защищена 27.12.10; утв. 06.05.11. Йошкар-Ола, 2010. 153 с.
- [5] Гайнуллин Ренат Х., Гайнуллин Ришат Х. Патент 2373047 Россия. МПК В27L5/00. Способ изготовления строганого шпона. (РФ) № 2008140549/12; заявл. 13.10.2008; опубл. 20.11.2009, бюл. № 32.
- [6] Патент 2484952 Россия. МПК В27L5/06. Шпонострогальный станок. / Гайнуллин Ришат Х., Гайнуллин Ренат Х., Чемоданов А.Н., Анисимов С.Е., Царев П.Е. (РФ) № 2011147949/13; заявл. 24.11.2011; опубл. 20.06.2013, бюл. № 17.
- [7] Плахов В.Н. Производство строганого шпона. М.: Лесная пром-сть, 1975. 128 с.
- [8] Дешевой М.А. Механическая технология дерева. Л.: Кубуч, 1934. Ч. I. 550 с.
- [9] Манжос Ф.М. Дереворежущие станки. 2-е изд., перераб. М.: Лесная пром-сть., 1974. 456 с.
- [10] Бершадский А.Л. Резание древесины. М.: Гослесбуиздат, 1955. 328 с.
- [11] Ивановский Е.Г. Станки и инструменты по механической обработке древесины. Л.: ВЗЛТИ, 1959. 63 с.
- [12] Чемоданов А.Н., Гайнуллин Ренат Х., Гайнуллин Ришат Х. Результаты исследования процесса смешанного резания древесины на шпон // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2016. Т. 20. № 6. С. 67–72.

Сведения об авторах

Чемоданов Александр Николаевич — канд. техн. наук, профессор, зав. кафедрой деревообрабатывающих производств ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», e-mail: chemodanovan@volgatech.net

Гайнуллин Ренат Харисович — канд. техн. наук, доцент кафедрой деревообрабатывающих производств ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», e-mail: gainylinrh@yandex.ru

Гайнуллин Ришат Харисович — аспирант ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет», e-mail: rishat_000@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11.11.2016 г.

THE DETERMINATION OF THE MIXED WOOD CUTTING PROCESS POWER CHARACTERISTICS IN VENEER-SAWING INDUSTRY

A.N. Chemodanov, Ren.Kh. Gainullin, Rish.Kh. Gainullin

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Volga State University of Technology»
Lenin Sq., 3, Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, 424000, Russia

chemodanovan@volgatech.net

The remarkable thing is that the scientific works by most of the authors are about veneer production with planing across or along grain. These types of planing are rather well-studied, there have also been found some correction factors which are necessary to calculate the cutting fuel cell indexes. Meanwhile, the mixed planing is of a particular interest. It is necessary to get the complex of both theoretical and experimental research to develop a mathematical model of the mixed cutting process, to determine the correction factors, to make the conclusion about the efficiency of implementation of mixed planing, and to suggest some offers on designing the necessary equipment. The article deals with the reasons which make it necessary to precise the results of longitudinal and transversal planing studies and to show the inapplicability of these results in the mixed planing veneer production. It describes the method of the cutting efforts calculation in the case of mixed wood planing. To develop a mathematical model of the planning process it is useful to determine the planing efforts during the volumetric procedure and to get the correction factors taking into account the crimp degree and the veneer thickness. The surface quality (veneer roughness) and energy intensity of the planning process can be used to make a comparative evaluation and a planing way choice. It is necessary to get such data on the composition forming species used as raw materials in the veneer production. The data need to be tabulated and published in regulatory reference books for the subsequent use.

Keywords: wood, veneer, mixed planing, correction factors, a mathematical model

Suggested citation: Chemodanov A.N., Gainullin Ren.Kh., Gainullin Rish.Kh. *Opređenje silovyykh kharakteristik protsessy smeshannogo rezaniya drevesiny na shpon* [The determination of the mixed wood cutting process power characteristics in veneer-sawing industry]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 48–53. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-48-53

References

- [1] Grube A.E. *Derevrezhushchie instrumenty* [Woodworking tools]. Moscow. Lesnaya promyshlennost' Publ, 1971, 344 p.
- [2] Lyubchenko V.I. *Rezanie drevesiny i drevesnykh materialov* [Cutting of wood and wood materials], Moscow. Lesnaya promyshlennost' Publ, 1986, 296 p. (in Russian)
- [3] Mikheev I.I., Voronov V.A., Lyubchenko V.I. *Proizvodstvo lushchenogo i stroganogo shpona* [Production of peeled and sliced veneer], Moscow, 1970. 246 p. (in Russian)
- [4] Gaynullin R.Kh. *Obosnovanie tekhnologicheskikh parametrov prodol'nogo rezaniya drevesiny na shponostrogal'nom stanke* [Substantiation of technological parameters of the longitudinal wood cutting on the slicing machine], Yoshkar-Ola, 2010, 153 p. (in Russian)
- [5] Gaynullin Ren.Kh., Gaynullin Rish.Kh. *Sposob izgotovleniya stroganogo shpona* [Sliced veneer manufacturing method], Patent RF, no. 2373047, 2009. (in Russian)
- [6] Gaynullin Rish.Kh., Gaynullin Ren.Kh., Chemodanov A.N., Anisimov S.E., Tsarev P.E. *Shponostrogal'nyy stanok* [Slicing machine], Patent RF, no. 2484952, 2013. (in Russian)
- [7] Plakhov V.N. *Proizvodstvo stroganogo shpona* [Production of veneer]. Moscow. Lesnaya promyshlennost' Publ, 1975, 128 p. (in Russian)
- [8] Deshevoy M.A. *Mekhanicheskaya tekhnologiya dereva* [Mechanical wood technology], Leningrad, 1934, 550 p.
- [9] Manzhos F.M. *Derevrezhushchie stanki* [Wood-cutting machines]. Moscow. Lesnaya promyshlennost' [Timber industry], 1986, 296 p. (in Russian)
- [10] Bershadskiy A.L. *Rezanie drevesiny* [Wood cutting], Moscow, 1955, 328 p. (in Russian)
- [11] Ivanovskiy E.G. *Stanki i instrumenty po mekhanicheskoy obrabotke drevesiny* [Machines and tools for mechanical wood processing], Leningrad, 1959, 63 p. (in Russian)
- [12] Chemodanov A.N., Gainullin Renat Kh., Gainullin Rishat Kh. *Rezultaty issledovaniya protsessy smeshannogo rezaniya drevesiny na shpon* [The results of the mixed wood cutting process research in veneer-sawing industry]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2016, v. 20, no. 6, pp. 67–72. (in Russian)

Author's information

Chemodanov Aleksandr Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Professor, Head of the woodworking Volga State University of Technology, e-mail: chemodanovan@volgatech.net

Gaynullin Renat Kharisovich — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of woodworking Volga State University of Technology, e-mail: gainyllinrh@yandex.ru

Gaynullin Rishat Kharisovich — pg. Volga State University of Technology, e-mail: rishat_000@mail.ru

Received 11.11.2016

ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАТОПЛЕННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Е.А. Петрунина, С.Р. Лоскутов, А.С. Шишкин

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок д. 50, стр. 28

epetrunal24@mail.ru

Проведено сравнение результатов термического анализа свежесрубленной и затопленной древесины лиственницы сибирской, сосны обыкновенной, пихты сибирской и березы повислой из зоны затопления Богучанской ГЭС. Представлены термические характеристики древесины, полученные с помощью методов термогравиметрии (ТГ/ДТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при нагревании в окислительной атмосфере со скоростью $10\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ от 25 до $750\text{ }^\circ\text{C}$ и от 25 до $590\text{ }^\circ\text{C}$ соответственно. Установлены стадии термического разложения древесинного вещества опытных образцов в условиях программируемого нагрева, их температурные интервалы, убыль массы, скорость потери массы, температура максимумов на кривых ДТГ/ДСК; определены тепловые эффекты испарения связанной влаги и процесса термического разложения древесинного вещества. По результатам термогравиметрических измерений рассчитана энергия активации (E_a) термодеструкции компонентов древесинного вещества по кинетической модели Бройдо. Установлено, что изъятие водорастворимых веществ из древесины свежесрубленных и затопленных деревьев приводит к изменению температуры и амплитуды пиков ДТГ испарения влаги и термодеструкции углеводного комплекса древесины. При этом эндоэффект испарения гигроскопической влаги затопленной древесины (по сравнению со свежесрубленной) уменьшается на 12,8...23,2%. Удаление водорастворимых веществ из древесины приводит к уменьшению интегрального теплового эффекта окисления (сгорания) на 2,9...19,6%. Потеря массы в температурном диапазоне от 350...455 до 373...513 $^\circ\text{C}$ образцов затопленной и свежесрубленной древесины, проэкстрагированной горячей водой, положительно коррелирует с интегральным экзотермическим эффектом $Q_{\text{экз}}$ термического разложения — уравнений регрессии $y = 0,2827x + 1,2208$ ($R^2 = 0,905$) и $y = 0,303x + 1,0667$ ($R^2 = 0,986$) соответственно. Для древесины всех исследованных пород отмечается увеличение E_a термодеструкции целлюлозы после исчерпывающей экстракции водорастворимых веществ на 8,3...16,0% (повышение термостабильности). При этом энергия активации термического разложения лигнина, кДж/моль — в большинстве случаев остается практически на одном уровне: для древесины лиственниц — 20,4...18,7, сосны — 17,7...18,3, пихты — 19,2...22,9, березы — 16,0...18,0. В отношении гемицеллюлоз четкой закономерности не установлено — E_a изменяется хаотически в диапазоне 54,0...91,1 кДж/моль.

Ключевые слова: термогравиметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия, затопленная древесина лиственницы сибирской, затопленная древесина сосны обыкновенной, затопленная древесина пихты сибирской, затопленная древесина березы повислой

Ссылка для цитирования: Петрунина Е.А., Лоскутов С.Р., Шишкин А.С. Термический анализ затопленной древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 54–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-54-63

Актуальной проблемой рационального использования древесных ресурсов является создание инновационных технологий переработки древесины, находящейся в акваториях водохранилищ ГЭС, построенных на Енисее и Ангаре. Привлечение этих ресурсов для получения традиционных и новых лесопродуктов будет способствовать, с одной стороны, снятию остроты экологических проблем водохранилищ и прибрежных территорий, а с другой — получению экономической выгоды от реализации новой продукции [1–4].

Одним из перспективных направлений использования затопленной на корню и топяковой древесины, а также отходов лесоперерабатывающих предприятий является разработка технологий в области биоэнергетики. Устойчивая генерация тепла и электроэнергии находится в настоящее время в центре научных и промышленных интересов в связи с уменьшением использования ископаемого топлива генерирующими энергетическими системами, загрязняющими окружающую среду опасными поллютантами.

Биомасса дерева является ресурсом с коротким циклом углерода, что крайне важно для будущих энергетических потребностей. Поэтому древесина остается одним из наиболее перспективных биоматериалов, поскольку является высокопродуктивным и возобновляемым ресурсом [5].

Эти обстоятельства обусловили существенно возросший в последние годы интерес лесоведов к термическим характеристикам древесины, включая кинетические закономерности ее термодеструкции, получаемые с помощью современных методов термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии [6–10]. Это связано с потребностью в информации о: термоустойчивости древесины индивидуальных пород как конструкционного материала, разработке новых технологий термического модифицирования древесины, создании новых огнеустойчивых композиционных материалов на основе древесины, а также новых технологий пиролиза и утилизации отходов лесопиления и производства целлюлозы как биоэнергетического ресурса. Однако подобных сведений о затоп-

ленной (и/или топляковой) древесине в литературе найти не удается.

Последнее обстоятельство побудило нас к исследованию, цель которого — провести сравнительный анализ термических характеристик затопленной и свежесрубленной древесины лиственницы сибирской, сосны обыкновенной, пихты сибирской и березы повислой из зоны затопления Богучанской ГЭС; установить влияние водорастворимых веществ древесины на эти характеристики.

Материалы и методы

Образцы свежесрубленной и затопленной (деревья находились в затопленном состоянии в течение одного года) древесины лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth.) были заготовлены в прибрежной зоне Богучанского водохранилища в виде дисков. Подготовку образцов для проведения термического анализа (фракция опилок ~ 0,1...0,3 мм), включая экстракцию горячей водой, осуществляли в соответствии с методическими указаниями [11]. Все образцы древесины кондиционировали до постоянной влажности при температуре $20 \pm 1,5$ °С и относительной влажности воздуха 50...55 %.

Термогравиметрию и дифференциальную сканирующую калориметрию осуществляли с помощью приборов TG 209 F1 и DSC 204 F1 (NETZSCH, Германия) соответственно. Образцы древесины проанализированы в атмосфере воздуха при следующих условиях.

Термогравиметрия (ТГ): скорость нагрева 10 °С · мин⁻¹ от 25 до 750 °С, скорость потока защитного и продувочного газов 20 мл · мин⁻¹; масса образца $3,03$... $9,13$ мг, тигель платиновый цилиндрической формы.

Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК): скорость нагрева 10 °С · мин⁻¹ от 25 до 590 °С, скорость потока защитного и продувочного газов 20 мл · мин⁻¹; масса образца $0,70$... $0,89$ мг, тигель алюминиевый с перфорированной крышкой; эталон — пустой алюминиевый тигель.

Калибровка TG 209 F1 и DSC 204 F1 выполнена по инструкции с использованием реперных веществ, прилагаемым к приборам. Массу образцов для анализа определяли на лабораторных весах XFR-125E. Обработка результатов измерений осуществлялась с помощью пакета программ NETZSCH. Proteus Thermal Analysis. 4.8.4, поставляемого с приборами.

Анализ кинетики термодеструкции древесины проводили на основании термогравиметрических данных с использованием кинетической модели

Бройдо [12]. Расчеты осуществляли в программах Excel 2007 и TablCurve 2D v. 5.01.

Уравнение

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{y} \right) \right] = -\frac{E_a}{RT} + \ln \left(\frac{ART_m^2}{\beta E_a} \right),$$

впервые полученное Бройдо, применялось им для расчета энергии активации термического разложения целлюлозы [13]. Здесь y — массовая доля неразложившегося вещества исследуемого образца; E_a — энергия активации (рассчитываемая величина E_a термодеструкции древесины по ТГ-кривым является, строго говоря, кажущейся энергией активации (в зарубежной литературе — apparent activation energy [14]), так как соответствует одновременному протеканию нескольких реакций); R — универсальная газовая постоянная; T — температура; A — предэкспоненциальный множитель (частотный фактор); T_m — температура, соответствующая максимуму на кривой ДТГ; β — скорость нагрева.

В последние годы метод Бройдо широко используется для расчета кинетических характеристик термодеструкции, протекающей по механизму реакции порядка $n \leq 1$, не только целлюлозы и древесины, но и других материалов [15, 16]. Из уравнения Бройдо следует, что энергия активации E_a определяется по углу наклона прямой, построенной в координатах

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{y} \right) \right] - \frac{1}{T}.$$

Следует отметить, что в отечественной и зарубежной литературе при анализе кинетических закономерностей превращений (реакций) анализируемого образца в термогравиметрическом эксперименте часто используется степень конверсии

$$\alpha = (m_0 - m)/(m_0 - m_f),$$

где m_0 — начальная масса образца в термогравиметрическом опыте;

m — текущее значение массы при температуре T ;

m_f — масса образца после завершения процесса термодеструкции [14] (y и α связаны равенством $y = 1 - \alpha$).

Для удобства обсуждения результатов исследования введем следующие обозначения. Для древесины лиственницы: Л — древесина свежесрубленного дерева; ЛЭВ — древесина свежесрубленной лиственницы; проэкстрагированная горячей водой; ЛЗ — древесина лиственницы, затопленной на корню; ЛЗЭВ — древесина затопленной лиственницы, проэкстрагированная горячей водой. Аналогично обозначим образцы

Т а б л и ц а 1

Стадии термического разложения древесины в окислительной среде: температурные интервалы (в числителе) и соответствующие им потери массы (в знаменателе)
 Thermal decomposition steps of wood in an oxidizing environment: temperature ranges and their corresponding mass loss

Порода	Температурный интервал, °С					Доля остаточной массы*, %
	Потеря массы, %					
Л	$\frac{27-115}{2,94}$	$\frac{154-305}{22,10}$	$\frac{305-368}{43,53}$	$\frac{368-409}{8,14}$	$\frac{409-494}{21,94}$	1,08
ЛЭВ	$\frac{27-105}{3,84}$	$\frac{186-367}{65,21}$		$\frac{367-512}{27,31}$		3,40
ЛЗ	$\frac{27-105}{3,53}$	$\frac{160-306}{24,02}$	$\frac{306-368}{43,24}$	$\frac{368-404}{6,91}$	$\frac{404-485}{21,30}$	0,59
ЛЗЭВ	$\frac{27-105}{3,83}$	$\frac{181-369}{68,22}$		$\frac{369-407}{6,16}$	$\frac{407-509}{19,24}$	2,10
С	$\frac{27-105}{2,77}$	$\frac{141-308}{23,99}$	$\frac{308-368}{43,62}$	$\frac{368-410}{6,84}$	$\frac{410-503}{19,95}$	2,65
СЭВ	$\frac{27-105}{3,56}$	$\frac{157-367}{67,56}$		$\frac{367-409}{6,27}$	$\frac{409-513}{19,38}$	2,93
СЗ	$\frac{27-105}{3,36}$	$\frac{149-306}{22,58}$	$\frac{306-366}{44,33}$	$\frac{366-409}{7,22}$	$\frac{409-484}{19,40}$	2,68
СЗЭВ	$\frac{27-105}{3,69}$	$\frac{143-360}{68,11}$		$\frac{408-455}{7,18}$	$\frac{455-501}{18,46}$	2,47
П	$\frac{27-105}{2,47}$	$\frac{165-308}{40,23}$	$\frac{308-350}{24,50}$	$\frac{350-368}{4,04}$	$\frac{368-485}{34,63}$	3,61
ПЭВ	$\frac{27-105}{3,22}$	$\frac{164-368}{71,73}$		$\frac{368-409}{7,05}$	$\frac{409-484}{16,47}$	1,10
ПЗ	$\frac{27-108}{3,57}$	$\frac{167-299}{25,91}$	$\frac{299-353}{36,32}$	$\frac{353-373}{4,28}$	$\frac{373-483}{25,17}$	3,10
ПЗЭВ	$\frac{27-105}{3,63}$	$\frac{173-358}{66,77}$		$\frac{358-397}{6,60}$	$\frac{397-484}{19,99}$	2,82
Б	$\frac{27-105}{2,54}$	$\frac{160-295}{23,02}$	$\frac{295-357}{48,39}$	$\frac{357-407}{8,20}$	$\frac{407-479}{15,66}$	1,87
БЭВ	$\frac{27-105}{3,24}$	$\frac{185-288}{15,55}$	$\frac{288-355}{57,00}$	$\frac{355-409}{7,8}$	$\frac{409-489}{12,87}$	3,19
БЗ	$\frac{27-105}{2,83}$	$\frac{167-295}{24,74}$	$\frac{295-358}{48,20}$	$\frac{358-403}{6,49}$	$\frac{403-478}{15,77}$	1,69
БЗЭВ	$\frac{27-105}{3,23}$	$\frac{188-294}{20,60}$	$\frac{294-355}{54,40}$	$\frac{355-405}{6,09}$	$\frac{405-495}{13,76}$	1,69

* Зольные вещества и недоокисленный уголь.

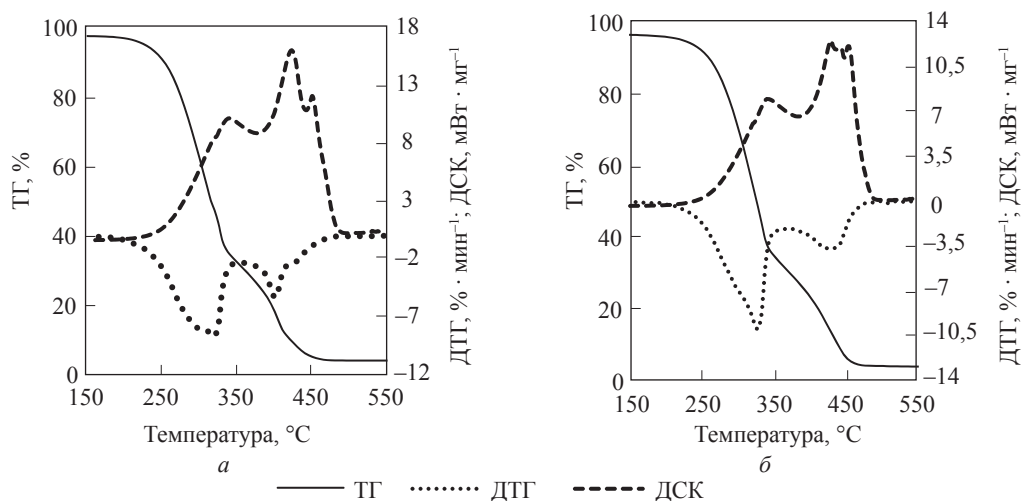


Рис. 1. Результаты термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии древесины пихты: а — П, б — ПЗ

Fig. 1. The results of thermogravimetry and differential scanning calorimetry of fir wood: a — П, б — ПЗ

Т а б л и ц а 2

Показатели скорости термодеструкции древесины: температуры максимумов и соответствующие им величины ДТГ при нагревании образца со скоростью $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ в окислительной среде
The indicators of thermal destruction rate: maxima temperatures and corresponding temperature values of DTG while heating the sample at $10\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{мин}^{-1}$ in oxidizing environment

Порода	t_{\max}	ДТГ _{max}	t_{\max}	ДТГ _{max}	t_{\max}	ДТГ _{max}
Л	67,7	-0,61	328,2	-13,26	450,4	-14,19
ЛЭВ	58,6	-0,83	328,6	-16,54	459,4	-3,85
ЛЗ	66,6	-0,76	328,0	-13,76	447,3	-12,84
ЛЗЭВ	51,9	-0,86	330,4	-17,58	457,2	-3,21
С	58,2	-0,66	330,9	-15,16	465,1	-3,94
СЭВ	52,9	-0,80	329,4	-17,62	466,0	-3,47
СЗ	55,3	-0,76	330,7	-15,84	456,4	-9,56
СЗЭВ	52,4	-0,90	330,8	-18,65	463,5	-3,52
П	62,8	-0,59	321,2	-8,72	402,4	-5,37
ПЭВ	52,8	-0,74	333,7	-19,58	448,7	-3,39
ПЗ	56,5	-0,85	325,8	-10,4	421,1; 431,9	-3,70; -3,66
ПЗЭВ	54,5	-0,84	332,7	-18,51	451,3	-3,88
Б	64,8	-0,58	327,6	-15,59	448,6	-6,44
БЭВ	53,7	-0,74	326,9	-19,14	440,3	-2,94
БЗ	53,4	-0,69	327,1	-16,50	445,9	-9,78
БЗЭВ	51,3	-0,76	326,3	-20,49	461,5	-3,16

Примечание: t_{\max} — температура максимума на кривой ДТГ, $^{\circ}\text{C}$; ДТГ_{max} — скорость потери массы, $\% \cdot \text{мин}^{-1}$.

древесины сосны (С, СЭВ, СЗ, СЗЭВ), пихты (П, ПЭВ, ПЗ, ПЗЭВ) и березы (Б, БЭВ, БЗ, БЗЭВ).

Результаты и обсуждение

На рис. 1 в качестве примера приведены записи кривых ТГ/ДТГ и ДСК свежесрубленной и затопленной древесины пихты.

В целом графики термического разложения представленных образцов (ТГ/ДТГ- и ДСК-кривые) похожи и различаются значениями основных термических параметров. В процессе деструкции пики ДТГ свежесрубленной и затопленной древесины имеют неодинаковую ширину и температуру максимумов, потерю массы и скорость убыли массы в соответствующих температурных интервалах. На ДСК-кривых амплитуды соответствующих экзотермических максимумов существенно отличаются друг от друга, что связано с различием тепловых эффектов термодеструкции в данном температурном интервале.

Согласно работе [5], по термогравиметрическим кривым древесины можно выделить четыре температурных диапазона с изменяющейся скоростью потери массы (с максимумом или точкой перегиба на кривой ДТГ) и один — с относительно малой постоянной или медленно меняющейся скоростью убыли массы. Параметры термодеструкции индивидуальных образцов древесины, исследованных в настоящей работе, представлены в табл. 1–4.

На первом этапе нагревания древесины происходит ее сушка и удаление легколетучих компонентов при температуре от 27 до 115 $^{\circ}\text{C}$ (табл. 1). При этом изменение массы исследованных образцов составляет 2,47...3,83 % — большая потеря массы (испарение влаги) отмечена для образцов затопленной древесины. (Напомним, что все образцы древесины кондиционировали до постоянной влажности при температуре $20 \pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха 50...55 %.)

При дальнейшем повышении температуры до $\sim 370\text{ }^{\circ}\text{C}$ (второй и третий температурные интервалы, см. табл. 1) наблюдается большая потеря массы, связанная с термодеструкцией гемицеллюлоз, целлюлозы и частично — лигнина. В температурном диапазоне от 350...455 до 373...513 $^{\circ}\text{C}$ завершается термическое разложение лигнина и происходит сгорание образовавшегося угля. Количественные показатели термогравиметрии всех исследованных образцов древесины представлены в табл. 1 и 2. Сходная картина окислительной термодеструкции лигниноцеллюлозного сырья с описанием выделяющихся продуктов приводится в работах [17–19].

В соответствии с методическими рекомендациями [11] все измерения ТГ/ДТГ и ДСК проведены с использованием усредненных образцов. Статистический анализ определяемых величин в пяти аналитических повторностях выполнен для образца древесины лиственницы. В частности,

стандартное отклонение потери массы на разных стадиях изменялось в пределах 0,21...1,07 %, температуры максимумов ДТГ — 0,36...0,84 °C; ДТГ_{max} — 0,08...0,68 °C · мин⁻¹ (P = 0,05) (см. табл. 1).

Известно, что химический состав гемицеллюлоз у хвойных и у лиственных пород разный [20]. Содержание гемицеллюлоз в лиственных породах приблизительно в 1,5 раза больше, чем в хвойных. В гемицеллюлозах хвойных преобладают гексозаны — глюкоманнаны и галактоглюкоманнаны. В древесине лиственницы содержится до ~12...17 % водорастворимого арабиногалактана. Гемицеллюлозы древесины лиственных пород представлены пентозанами — в основном ксиланом; глюкоманнаны и арабогалактаны обнаружены в небольшом количестве [21]. Эти различия в составе гемицеллюлоз обуславливают неодинаковые показатели термодеструкции исследованной древесины в температурном интервале от 134...180 до 288...308 °C (см. табл. 1).

Гемицеллюлозы и экстрагируемые вещества менее термостабильны, чем целлюлоза и лигнин. Повышенное содержание гемицеллюлоз и экстрактивных веществ, включая водорастворимые, приводит к снижению температуры начала термического разложения полимерного углеводного комплекса древесинного вещества и появлению на нисходящей ветви ДТГ-кривой четкого максимума или точки перегиба (плеча): Л — плечо 305 °C; ЛЗ — плечо 307 °C; С — плечо 308 °C; СЗ — плечо 306 °C; П — плечо 308 °C; Б — плечо 296 °C; БЭВ — плечо 288 °C; БЗ — максимум 291 °C; БЗЭВ — плечо 294 °C.

По потере массы древесинного вещества, связанной с термическим разложением углеводного комплекса в целом, исследованные образцы образуют следующие ряды.

Образец древесины	Потеря массы, %
П <	64,73
Л <	65,63
С <	67,61
Б	71,74
ЛЭВ <	65,21
СЭВ <	67,56
ПЭВ <	71,73
БЭВ	72,55
ПЗ <	62,23
СЗ <	66,91
ЛЗ <	67,26
БЗ	72,94
ПЗЭВ <	66,77
СЗЭВ <	68,11
ЛЗЭВ <	68,22
БЗЭВ	75

По убыли массы при термическом разложении основного количества лигнина и сгорания угля, образовавшегося в процессе окислительной термодеструкции древесинного вещества, образцы древесины располагаются в следующих рядах.

Образец древесины	Потеря массы, %
Б <	23,86
С <	26,79
П <	28,67
Л	30,08
БЭВ <	20,67
ПЭВ <	23,52
СЭВ <	25,65
ЛЭВ	27,31
БЗ <	22,26
СЗ <	26,62
ЛЗ <	28,21
ПЗ	29,45
БЗЭВ <	19,85
ЛЗЭВ <	25,4
СЗЭВ <	25,64
ПЗЭВ	26,59

В табл. 2 представлены параметры трех основных пиков ДТГ (см. выше). Анализ изменений амплитуды пика ДТГ и температуры в связи с экстрагированием древесины горячей водой показал следующее.

Удаление водорастворимых веществ из древесины свежесрубленных и затопленных деревьев всех исследованных пород (см. ниже) приводит к снижению температуры пика ДТГ испарения влаги и увеличению его амплитуды.

Содержание растворимых в горячей воде веществ свежесрубленной и затопленной древесины

Образец древесины	Содержание водорастворимых веществ, %							
	Л	ЛЗ	С	СЗ	П	ПЗ	Б	БЗ
	7,28	10,98	3,49	2,59	5,64	4,34	3,07	2,31

Соотношение этих показателей для пика, отвечающего термодеструкции углеводного компонента древесинного вещества, иное: для лиственницы и пихты они изменяются симбатно, а для сосны и березы — антибатно. Третий пик характеризуется антибатным характером изменения температуры и амплитуды для хвойных пород и «смешанным» — для березы (см. табл. 2).

На рис. 2 в качестве примера показано применение метода Бройда для расчета энергии активации термического разложения древесины пихты и березы на разных стадиях, а в табл. 3 представлены все результаты расчета E_a.

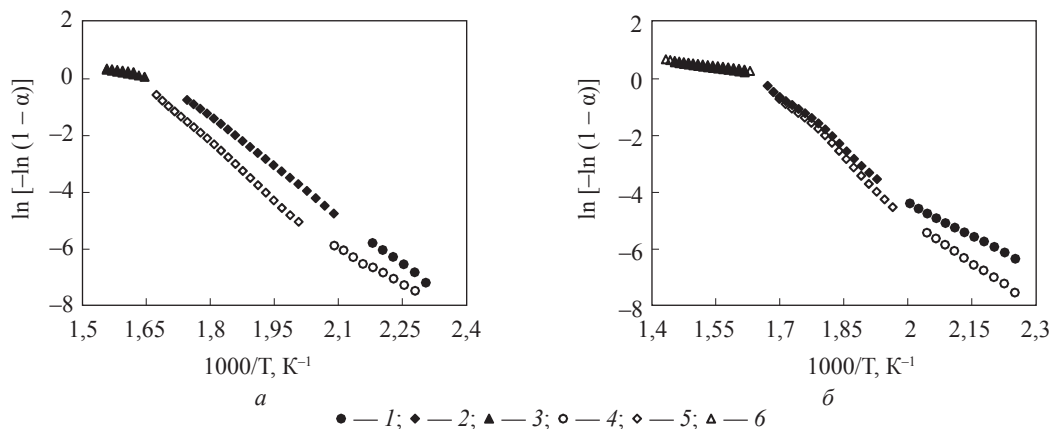


Рис. 2. Линейные анаморфозы ТГ-кривых в координатах уравнения Бройдо. *a:* 1–3 — древесина свежесрубленной пихты (П); 4–6 — древесина свежесрубленной пихты, проэкстрагированная горячей водой (ПЭВ); *b:* 1–3 — затопленная древесина березы (БЗ); 4–6 — затопленная древесина березы, проэкстрагированная горячей водой (БЗЭВ).

Fig. 2. Linear anamorphoses thermogravimetric curves in the coordinates Broido equation. *a:* 1–3 — freshly cut fir timber (П); 4–6 — freshly cut fir wood, extracted with hot water (ПЭВ); *b:* 1–3 — flooded birch wood (БЗ); 4–6 — flooded birch wood, extracted with hot water (БЗЭВ)

Фрагменты графиков 1, 4 соответствуют термическому разложению гемицеллюлоз, 2, 5 — преимущественной термодеструкции целлюлозы, 3, 6 — преимущественному разложению лигнина. Уравнения регрессии и рассчитанные по ним величины энергии активации:

a: 1 — $y = -10,957x + 18,085$; $R^2 = 0,996$; $E_a = 91,1$ кДж/моль; 2 — $y = -11,609x + 19,508$; $R^2 = 1$; $E_a = 96,5$ кДж/моль; 3 — $y = -2,753x + 4,584$; $R^2 = 0,999$; $E_a = 22,9$ кДж/моль; 4 — $y = -8,315x + 11,461$; $R^2 = 0,997$; $E_a = 69,1$ кДж/моль; 5 — $y = -13,418x + 21,836$; $R^2 = 0,999$; $E_a = 111,5$ кДж/моль; 6 — $y = -1,993x + 3,445$; $R^2 = 1$; $E_a = 16,6$ кДж/моль.

b: 1 — $y = -7,717x + 11,75$; $R^2 = 0,999$; $E_a = 64,1$ кДж/моль; 2 — $y = -12,849x + 21,326$; $R^2 = 0,993$; $E_a = 106,8$ кДж/моль; 3 — $y = -2,094x + 3,688$; $R^2 = 0,998$; $E_a = 17,4$ кДж/моль; 4 — $y = -10,155x + 15,354$; $R^2 = 0,999$; $E_a = 84,4$ кДж/моль; 5 — $y = -14,724x + 24,466$; $R^2 = 0,995$; $E_a = 122,4$ кДж/моль; 6 — $y = -1,925x + 3,505$; $R^2 = 0,996$; $E_a = 16,0$ кДж/моль.

Из анализа результатов расчета энергии активации термического разложения древесинного вещества (см. табл. 3) можно выделить диапазоны степени конверсии гемицеллюлоз (от 0,001...0,003 до 0,003...0,013), целлюлозы (от 0,007...0,030 до 0,369...0,574), основной массы лигнина (от 0,610...0,761 до 0,746...0,884) и соответствующие им интервалы изменения энергии активации: 54,0...91,1; 89,4...122,8 и 16,0...26,7 кДж/моль.

Общая тенденция изменения энергии активации на разных стадиях в связи с извлечением из древесины водорастворимых веществ иллюст-

рируется рис. 3. на примере древесины лиственницы. Для древесины всех исследованных пород отмечается увеличение E_a термодеструкции целлюлозы после исчерпывающей экстракции водорастворимых веществ. При этом энергия активации термического разложения лигнина в большинстве случаев остается практически на одном уровне. В отношении гемицеллюлоз четкой закономерности не установлено — E_a изменяется хаотически.

В табл. 4 представлены основные термические характеристики древесины, полученные в результате дифференциальной сканирующей калориметрии опытных образцов. Вымывание водорастворимых веществ из древесины в результате затопления и экстракции горячей водой привели к снижению температуры максимума эндотермы (испарение влаги) для всех образцов с 1,4 до 16,9 % (из этой категории «выпал» лишь один образец затопленной древесины лиственницы). При этом эндоэффект испарения гигроскопической влаги затопленной древесины (по сравнению со свежесрубленной) уменьшился на 12,8...23,2 %.

Максимальный экзотермический эффект окисления (сгорания) $Q_{\text{экзо}}$ древесины отмечен для образца древесины пихты (П), минимальный — для образца БЗЭВ (см. табл. 4). Из сравнения величин $Q_{\text{экзо}}$ всех изученных образцов следует, что удаление водорастворимых веществ из древесины приводит к уменьшению этого эффекта на 2,9...19,6 % по сравнению с древесиной свежесрубленных деревьев. Инструментальная погрешность определения теплового эффекта ($Q_{\text{эндо/экзо}}$) не превышала 5 %.

Т а б л и ц а 3

Энергия активации E_a термического разложения древесины, рассчитанная по методу Бройдо [14] (коэффициент корреляции изменяется от 0,994 до 0,999)

The E_a activation energy of thermal wood decomposition, calculated by Broido's method [14] (the correlation coefficient ranges from 0,994 to 0,999)

Образец древесины	Энергия активации, кДж/моль	Степень конверсии	Энергия активации, кДж/моль	Степень конверсии	Энергия активации, кДж/моль	Степень конверсии
Л	70,0	0,001–0,007	98,8	0,014–0,503	20,4	0,673–0,765
ЛЭВ	66,6	0,001–0,003	110,6	0,008–0,432	19,4	0,686–0,808
ЛЗ	70,6	0,001–0,006	103,1	0,012–0,396	23,3	0,610–0,810
ЛЗЭВ	58,5	0,001–0,005	112,1	0,013–0,574	18,7	0,706–0,814
С	74,8	0,001–0,008	90,0	0,015–0,369	17,7	0,664–0,789
СЭВ	78,6	0,001–0,005	98,2	0,011–0,448	17,8	0,707–0,825
СЗ	68,9	0,002–0,012	89,4	0,020–0,442	19,5	0,697–0,819
СЗЭВ	54,0	0,002–0,006	97,4	0,011–0,359	18,3	0,710–0,848
П	91,1	0,001–0,003	96,5	0,009–0,377	22,9	0,655–0,746
ПЭВ	69,1	0,001–0,003	111,5	0,007–0,482	19,2	0,715–0,844
ПЗ	66,9	0,001–0,009	90,9	0,020–0,474	26,7	0,617–0,849
ПЗЭВ	83,3	0,001–0,004	112,2	0,010–0,363	19,2	0,703–0,815
Б	69,2	0,001–0,004	105,5	0,013–0,550	18,0	0,727–0,817
БЭВ	85,7	0,003–0,005	122,8	0,011–0,398	17,6	0,746–0,826
БЗ	64,1	0,002–0,013	106,8	0,030–0,569	17,4	0,742–0,857
БЗЭВ	84,4	0,001–0,005	122,4	0,011–0,489	16,0	0,761–0,884

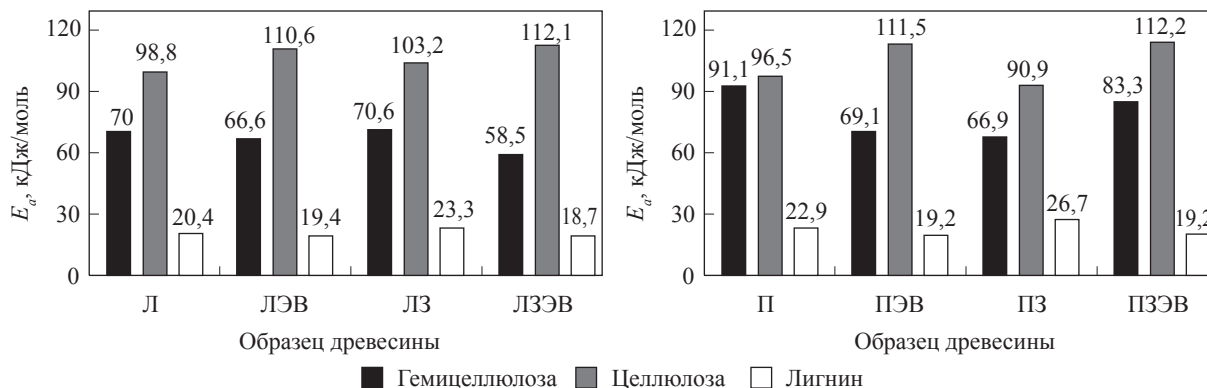


Рис. 3. Энергия активации термического разложения основных компонентов древесины свежесрубленной и затопленной лиственницы и пихты до и после экстракции горячей водой

Fig. 3. The activation energies of thermal decomposition of the main components of freshly cut wood of flooded larch and fir before and after extraction with hot water

Выводы

1. Сравнение результатов термического анализа свежесрубленной и затопленной древесины лиственницы сибирской, сосны обыкновенной, пихты сибирской и березы повислой указывает на неодинаковость термических характеристик опытных образцов, что обусловлено, с одной стороны, различием их химического состава, а с другой — удалением водорастворимых веществ. Вымывание водорастворимых веществ в результате пребывания древесины под водой приводит к повышению ее термостабильности по сравнению с древесиной свежесрубленных деревьев по температуре начала термического разложения

гемиллюлоз (до 8 °С) и увеличению энергии активации термодеструкции целлюлозы в среднем на 12,2 %.

2. Удаление водорастворимых веществ из древесины всех исследованных пород приводит к снижению температуры пика ДТГ испарения влаги и увеличению его амплитуды. При этом эндозффект испарения гигроскопической влаги затопленной древесины (по сравнению со свежесрубленной) уменьшается на 12,8...23,2 %. Соотношение этих показателей для пика, отвечающего термодеструкции углеводного комплекса, иное: для лиственницы и пихты они изменяются симбатно, а для сосны и березы — антибатно.

Основные параметры древесины, полученные в эксперименте ДСК

The main parameters of wood obtained in a DSC experiment

Образец древесины	Температурный интервал, °С	t_{\min} эндо-термы, °С	$Q_{\text{эндо}}^?$ Дж · г ⁻¹	Температурный интервал, °С	t_{\max} экзотермы, °С			$Q_{\text{экзо}}^?$ кДж · г ⁻¹
Л	33–118	72	67,2	209–518	335	351	464	10,2
ЛЭВ	34–117	69	75,6	211–517	337	351	477	10,0
ЛЗ	34–121	73	58,6	191–515	334	351	430*; 449*; 465	9,5
ЛЗЭВ	33–114	67	53,7	210–518	337	349	473	8,6
С	30–120	71	64,5	204–518	336	348	480	9,3
СЭВ	31–110	65	65,8	198–536	336	348	481	8,9
СЗ	33–108	70	51,2	210–513	336	347	456*; 475	9,0
СЗЭВ	35–104	64	48,9	197–528	339	347	480	9,0
П	32–126	71	63,0	165–501	320	340	423; 451	11,5
ПЭВ	32–108	66	83,9	202–510	339	347	457*; 471	9,5
ПЗ	32–108	70	54,0	179–508	320*; 340	429	443; 453	9,2
ПЗЭВ	26–103	67	53,5	185–527	343	347	471	9,2
Б	31–112	71	50,2	181–520	333	342	433*; 449; 466	9,2
БЭВ	31–110	67	73,8	180–531	334	344	453*; 462	8,7
БЗ	30–115	68	38,6	186–520	302*; 333	340	470	7,4
БЗЭВ	29–101	59	39,0	189–527	292*; 333	342	477	7,1

* Температура в точке перегиба ДСК-кривой.

Третий пик характеризуется антибатным характером изменения температуры и амплитуды для хвойных пород и «смешанным» — для березы.

3. Удаление водорастворимых веществ из древесины приводит к уменьшению интегрального теплового эффекта окисления (сгорания) на 2,9...19,6 %. Потеря массы в температурном диапазоне от 350...455 до 373...513 °С образцами древесины затопленной древесины и свежесрубленной, проэкстрагированной горячей водой, положительно коррелирует с интегральным экзоэффектом $Q_{\text{экзо}}$ термического разложения (уравнения регрессии $y = 0,2827x + 1,2208$ ($R^2 = 0,905$) и $y = 0,303x + 1,0667$ ($R^2 = 0,986$) соответственно).

4. Повышенное содержание гемицеллюлоз и водорастворимых веществ обуславливает снижение температуры начала термического разложения углеводного комплекса древесины (понижение термоустойчивости) и появление на нисходящей ветви ДТГ-кривой четкого максимума или точки перегиба (плеча): Л — плечо 305 °С; ЛЗ — плечо 307 °С; С — плечо 308 °С; СЗ — плечо 306 °С; П — плечо 308 °С; Б — плечо 296 °С; БЭВ — плечо 288 °С; БЗ — максимум 291 °С; БЗЭВ — плечо 294 °С.

5. По потере массы древесинного вещества, связанной с термическим разложением углеводного комплекса, исследованные образцы образуют ряды: П < Л < С < Б; ЛЭВ < СЭВ < ПЭВ < БЭВ; ПЗ < СЗ < ЛЗ < БЗ, а по убыли массы при термическом разложении основного количества

лигнина и сгорания угля — ряды: Б < С < П < Л; БЭВ < ПЭВ < СЭВ < ЛЭВ; БЗ < СЗ < ЛЗ < ПЗ.

6. Для древесины всех исследованных пород отмечается увеличение E_a термодеструкции целлюлозы после исчерпывающей экстракции водорастворимых веществ на 8,3...16,0 % (повышение термостабильности). При этом энергия активации термического разложения лигнина, кДж/моль, в большинстве случаев остается практически на одном уровне: для древесины лиственниц — 20,4...18,7; сосны — 17,7...18,3; пихты — 19,2...22,9; березы — 16,0...18,0. В отношении гемицеллюлоз четкой закономерности не установлено — E_a изменяется хаотически в интервале 54,0...91,1 кДж/моль.

Список литературы

- [1] Куликов В.А., Леонтьева М.М. Использование древесины лиственницы в производстве клеевых конструкций. Л.: ЛДНТП, 1981. 28 с.
- [2] Урьясьева И.Д. Опыт подъема топяка. Лесозэксплуатация и лесосплав. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1984. Вып. 5. 28 с.
- [3] Расев А.И. Проблемы использования топяковой древесины в деревообрабатывающей промышленности // Строение, свойства и качество древесины 96: сб. науч. тр. М.: Изд-во МГУЛ, 1997. 378 с.
- [4] Иванов В.А. Обоснование технологии и оборудования для освоения и переработки древесины прибрежной зоны ложа водохранилищ. Дис. ... д-ра техн. наук. СПб, 2008. 39 с.
- [5] Poletto M., Zattera A.J., Santana R.M.C. Thermal decomposition of wood: Kinetics and degradation mechanisms. Bioresource Technology, 2012, v. 126, pp. 7–12.

- [6] Лоскутов С.Р., Шапченко О.А., Анискина А.А. Термический анализ древесины основных лесообразующих пород Средней Сибири // Сибирский лесной журнал, 2015. № 6. С. 17–30.
- [7] Tsujiyaama Sh.-I., Miyamori A. Assignment of DSC Thermograms of wood and its components. *Thermochimica Acta*, 2000, v. 351, pp. 177–181.
- [8] Brostow W., Menard K.P., Menard N. Combustion properties of several species of wood. *Chem. Chem. Technol*, 2009, v. 3, no. 3, pp. 173–176.
- [9] Barneto A.G., Hernandez R.B., Berenguer J.M. Thermogravimetric characterization of eucalyptus wood. *O PAPEL*, 2011, v. 72, no. 7, pp. 53–56.
- [10] Sebjo-Puñal T., Naya S., López-Beceiro J., Tarrío-Saaverda J. Artiaga R. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. *J. Therm. Anal. Calorim*, 2012, v. 109, no. 3, pp. 1163–1167.
- [11] Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. М.: Экология, 1991. 320 с.
- [12] Gao M., Sun C.Y., Wang C.X. Thermal degradation of wood treated with flame retardants. *J. Therm. Anal. Calorim*, 2006, v. 85, no. 3, pp. 765–769.
- [13] Уэндландт У. Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 526 с.
- [14] Mamleev V., Dourbigot S., Le Bras M., Lefebvre J. Three model-free methods for calculation of activation energy in TG. *J. Therm. Anal. Calorim*, 2004, v. 78, no. 3, pp. 1009–1027.
- [15] Muralidhara K.S., Sreenivasan S. Thermal degradation kinetic data of polyester, cotton and polyester-cotton blended textile material. *World Appl. Sci. J*, 2010, v. 11, no. 2, pp. 184–189.
- [16] Saiyed B.A. The study of thermal stability and decomposition in cadmium oxalate single crystals. *IJERT*, 2012, v. 1, iss. 8, pp. 1–5.
- [17] Nakanishi M., Ogi N., Fukuda Y. Thermogravimetric analysis in steam and oxygen with gas chromatograph mass spectrometry for basic study of biomass gasification. *J. Therm. Anal. Calorim*, 2010, v. 101, no. 1, pp. 391–396.
- [18] Poletto M., Dettenborn J., Pistor V., Zeni M., Zattera A.J. Materials produced from plant biomass. Part I: Evaluation of thermal stability and pyrolysis of wood. *Materials Res*, 2010, v. 13, no. 3, pp. 375–379.
- [19] Jin W., Singh K., Zondlo J. Pyrolysis kinetics of physical components of wood and wood polymers using isoconversion method. *Agriculture*, 2013, no. 3, pp. 12–32.
- [20] Шарков В.И., Куйбина Н.И., Соловьева Ю.П., Павлова Т.А. Количественный химический анализ растительного сырья. М.: Лесная пром-сть, 1976. 72 с.
- [21] Богомолов Б.Д. Химия древесины и основы химии высокомолекулярных соединений. М.: Лесная пром-сть, 1973. 399 с.

Сведения об авторах

Петрунина Елена Александровна — инженер Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, e-mail: epetrunal24@mail.ru

Лоскутов Сергей Реджинальдович — д-р хим. наук, академик ИАВС, зам. директора Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, e-mail: lsr@ksc.krasn.ru

Шишкин Александр Сергеевич — д-р биол. наук, зав. лабораторией техногенных лесных экосистем Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, e-mail: shishikin@ksc.krasn.ru

Статья поступила в редакцию 01.08.2016 г.

THERMAL ANALYSIS OF FLOODED WOOD

E.A. Petrunina, S.R. Loskutov, A.S. Shishikin

V.N. Sukachev Institute of Forest, Akademgorodok, 50, build 28, Krasnoyarsk, 660036, Russia

epetrunal24@mail.ru

This paper deals with thermal analysis of freshly cut vs. flooded wood samples of Siberian larch, Scots pine, Siberian fir, and drooping birch taken from the flood zone of Boguchany Hydropower Station. We have used the methods of thermogravimetry (TG/DTG) and differential scanning calorimetry (DSC) to obtain thermal characteristics of wood samples during heating in an oxidizing medium at 10 °C·min⁻¹ in the ranges from 25 to 750 °C and from 25 to 590 °C, respectively. We have identified certain thermal wood decomposition stages including their temperature intervals, under programmed wood heating, and have determined the wood mass loss, the above loss rates, the temperatures at the peaks of DTG/DSC curves and the thermal effects of both the bound moisture evaporation and the thermal wood decomposition process. We used the thermogravimetric measurements and Broido kinetic model to calculate the activation energy (E_a) of wood components' thermal destruction. It was found that the extraction of water-soluble substances from both freshly cut and sunken wood samples resulted in changing both temperatures and amplitudes of DTG peaks of moisture evaporation and in the wood carbohydrate complex thermodestruction. The endoeffect of hygroscopic moisture evaporation decreased by 12,8–23,2 % in sunken wood as compared to freshly cut samples. The extraction of water-soluble substances resulted in that the integral thermal effect of oxidation (combustion) decreased by 2,9–19,6 %. In a temperature range of (350..455)–(373..513) °C, weight losses of freshly cut and sunken wood samples, after they were subject to hot water extraction, showed a positive correlation with the integral exoeffect (Q_{exo}) of thermal decomposition, with the respective regressions being $y = 0,2827x + 1,2208$ ($R^2 = 0,905$) and $y = 0,303x + 1,0667$ ($R^2 = 0,986$). After complete extraction of water-soluble substances, E_a of cellulose thermal destruction increased by 8,3–16,0 % (a thermostability increase) for all tree species of interest, whereas E_a of thermal decomposition of lignin remained the same for most of the species:

20,4–18,7 kJ/mole for larch, 17,7–18,3 kJ/mole for Scots pine, 19,2–22,9 kJ/mole fir, and 16,0–18,0 kJ/mole for birch. No clear regularity was observed for hemicelluloses. Its thermal destruction E_a changed “chaotically” from 54,0 kJ/mole to 91,1 kJ/mole.

Keywords: thermogravimetry, differential scanning calorimetry, sunken wood of Siberian larch, Scots pine, Siberian fir, and drooping birch, Siberian larch, Scots pine, Siberian fir, and drooping birch

Suggested citation: Petrunina E.A., Loskutov S.R., Shishikin A.S. *Termicheskiy analiz zatoplennoy drevesiny* [Thermal analysis of flooded wood], *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 54–63. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-54-63

References

- [1] Kulikov V.A., Leontyeva M.M. *Ispolzovanie drevesiny listvennitsy v proizvodstve kleevykh konstruktsiy* [Using larch wood in the production of adhesive structures], Leningrad: LDNTP Publ., 1981. 28 p. (in Russian)
- [2] Ur'yas'eva I.D. *Opyt podyma toplyaka. Lesoekspluatatsiya i lesosplav* [Sinkers salvage. Forest exploitation and timber rafting]. Moscow: VNIPIElesprom Publ., 1984, vol. 5, 28 p. (in Russian)
- [3] Rasev A.I. *Problemy ispolzovaniya toplyakovoy drevesiny v derevoobrabatyvayushchey promyshlennosti* [Using submerged wood in the woodworking industry] *Siroenie, svoystva i kachestvo drevesiny 96* [Wood structure, properties, and quality 96: Collected scientific papers], Moscow: MGUL Publ., 1997, 378 p. (in Russian)
- [4] Ivanov V.A. *Obosnovaniye tekhnologii i oborudovaniya dlya osvoeniya i pererabotki drevesiny pribrezhnoy zony lozha vodokhranilishch* Diss. dokt. tekhn. nauk [Technology and equipment for extracting and processing wood from the coastal zones of artificial seas: dissertation for the degree of doctor of technical sciences. Dr. tech. sci. diss.]. St. Petersburg, 2008. 39 p. (in Russian)
- [5] Poletto M., Zattera A.J., Santana R.M.C. Thermal decomposition of wood: Kinetics and degradation mechanisms. *Bioresource Technology*. 2012, vol. 126, pp. 7-12. (in Russian)
- [6] Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. *Termicheskiy analiz drevesiny osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Sredney Sibiri* [Thermal analysis of the main kinds of timber in Central Siberia], *Sibirskiy lesnoy zhurnal*, 2015, no. 6, pp. 17-30. (in Russian)
- [7] Tsujiyaama Sh-I., Miyamori A. Assignment of DSC Thermograms of wood and its components. *Thermochimica Acta*, 2000, v. 351, pp. 177-181.
- [8] Brostow W., Menard K.P., Menard N. Combustion properties of several species of wood. *Chem. Chem. Technol*, 2009, v. 3, no. 3, pp. 173-176.
- [9] Barneto A.G., Hernandez R.B., Berenguer J.M. Thermogravimetric characterization of eucalyptus wood. *O PAPEL*, 2011, v. 72, no. 7, pp. 53-56.
- [10] Sebío-Puñal T., Naya S., López-Beceiro J., Tarrío-Saaverda J. Artiaga R. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose, and lignin from five wood species. *J. Therm. Anal. Calorim*, 2012, v. 109, no. 3, pp. 1163-1167.
- [11] Obolenskaya A.V. *Laboratornye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy* [Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose]. Moscow: Ekologiya Publ., 1991, 320 p. (in Russian)
- [12] Gao M., Sun C.Y., Wang C.X. Thermal degradation of wood treated with flame retardants. *J. Therm. Anal. Calorim*, 2006, v. 85, no. 3, pp. 765-769.
- [13] Uendlandt U. *Termicheskie metody analiza* [Thermal methods of analysis], Moscow: Mir Publ., 1978, 526 p. (in Russian)
- [14] Mamleev V., Dourbigot S., Le Bras M., Lefebvre J. Three model-free methods for calculation of activation energy in TG. *J. Therm. Anal. Calorim*. 2004, v. 78, no. 3, pp. 1009-1027.
- [15] Muralidhara K.S., Sreenivasan S. Thermal degradation kinetic data of polyester, cotton and polyester-cotton blended textile material. *World Appl. Sci. J.* 2010, vol. 11, no. 2, pp. 184-189.
- [16] Saiyed B.A. The study of thermal stability and decomposition in cadmium oxalate single crystals. *IJERT*. 2012, vol. 1, iss. 8, pp. 1-5.
- [17] Nakanishi M., Ogi N., Fukuda Y. Thermogravimetric analysis in steam and oxygen with gas chromatograph mass spectrometry for basic study of biomass gasification. *J. Therm. Anal. Calorim*. 2010, v. 101, no. 1, pp. 391-396.
- [18] Poletto M., Dettenborn J., Pistor V., Zeni M., Zattera A.J. Materials produced from plant biomass. Part I: Evaluation of thermal stability and pyrolysis of wood. *Materials Res.* 2010, v. 13, no. 3, pp. 375-379.
- [19] Jin W., Singh K., Zondlo J. Pyrolysis kinetics of physical components of wood and wood polymers using isoconversion method. *Agriculture*, 2013, no. 3, pp. 12-32.
- [20] Sharkov V.I., Kujbina N.I., Solovyeva Yu.P., Pavlova T.A. *Kolichestvennyy khimicheskiy analiz rastitelnogo syrya* [Quantitative chemical analysis of vegetable raw materials]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 72 p. (in Russian)
- [21] Bogomolov B.D. *Khimiya drevesiny i osnovy khimii vysokomolekulyarnykh soyedineniy* [Wood chemistry and the basics of high-molecular compound chemistry]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973, 399 p. (in Russian)

Author's information

Petrunina Elena Alexandrovna — Engineer of V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, e-mail: epetruninaI24@mail.ru

Loskutov Sergei Reginaldovich — Dr. Sci. (Chemistry), Fellow of the IAWS, V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, e-mail: lsr@ksc.krasn.ru

Shishikin Alexander Sergeevich — Dr. Sci. (Biology), V.N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, e-mail: shishikin@ksc.krasn.ru

Received 01.08.2016

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОТЫ СГОРАНИЯ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА ПРИ ТОРРЕФИКАЦИИ

М.Г. Ермоченков, А.Г. Евстигнеев

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

Торрефикация — это процесс низкотемпературного пиролиза древесины, используемый для улучшения свойств древесного топлива. Торрефицированное топливо имеет ряд преимуществ по сравнению с исходным. Термическая деструкция вызывает изменение массы и состава древесины с увеличением процентного содержания углерода, что приводит к увеличению теплоты сгорания (Q). Термодеструкция является многостадийным процессом. Степень разложения материала зависит от температуры, времени и кинетических параметров каждой стадии процесса. В статье приведены результаты исследования теплоты сгорания торрефицированной древесной биомассы и ее зависимость от степени термического разложения. Для проведения экспериментальных исследований была разработана и изготовлена экспериментальная установка. Проверка работоспособности установки показала, что погрешность определения теплоты сгорания составляет около 2 %. Для проведения экспериментальных исследований зависимости теплоты сгорания от степени термической деструкции были подготовлены образцы древесины при ее неглубоком разложении. Термическая обработка образцов осуществлялась в среде инертного газа — гелия. Получены значения теплоты сгорания образцов древесного топлива с различной степенью термодеструкции. Предложена модель зависимости теплоты сгорания от относительной массы древесного топлива (ω). Приведены кинетические параметры многостадийного процесса термодеструкции в гелиевой среде для древесины сосны и березы. Представлена математическая модель, позволяющая определять относительную массу древесины как функцию температуры и времени. Получена в явном виде зависимость теплоты сгорания от ω .

Ключевые слова: торрефикация, теплота сгорания, термическая деструкция, кинетические параметры

Ссылка для цитирования: Ермоченков М.Г., Евстигнеев А.Г. Изменение теплоты сгорания древесного топлива при торрефикации // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 64–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-64-68

Древесное биотопливо находит все более широкое применение при производстве тепловой энергии. К такому топливу можно отнести и торрефицированную древесину.

Торрефикация является видом термического модифицирования древесины. Это процесс низкотемпературного пиролиза древесных материалов, используемых для производства топливных пеллет. Тепловая обработка проводится для улучшения свойств получаемого биотоплива [1, 2].

К преимуществам модифицированных пеллет по сравнению с древесной биомассой можно отнести:

- более высокое содержание углерода в единице количества топлива;
- более высокую теплоту сгорания;
- возможность производства топлива с определенной теплотой сгорания;
- снижение выхода вредных веществ, в том числе оксида азота, тяжелых металлов, оксида серы и т. п.;
- высокую однородность получаемого топлива;
- снижение равновесной влажности;
- повышение стойкости к биологическому поражению;
- увеличение насыпной плотности и, как следствие, снижение логистических затрат на единицу количества получаемой теплоты;

— отсутствие проблемы спекания топлива в топках котлов.

В табл. 1 приведены данные по отдельным характеристикам древесной щепы, традиционных и торрефицированных пеллет [3].

Конкретные значения показателей свойств торрефицированного биотоплива зависят от породы древесины, интенсивности и времени термического воздействия, т. е., от степени термической деструкции. В связи с этим стоит задача определения зависимости степени термического разложения материала от температуры и времени нагрева, а также зависимости свойств торрефицированных пеллет от степени деструкции.

Результаты исследования

Результаты исследования кинетики термической деструкции различных пород древесины приведены в работах [4–7]. Термическое разложение рассматривается как многостадийный процесс. Кинетические параметры деструкции древесины сосны и березы приведены в табл. 2.

Относительная масса образца может быть определена из соотношения [8–10]

$$\omega(T, \tau) = \sum_{\gamma} \omega_{0,\gamma} \exp \left[-A_{\gamma} \int_0^{\tau} \exp \left(-\frac{E_{\gamma}}{RT} \right) dt \right], \quad (1)$$

где γ — номер стадии;

ω_0 — начальная масса стадии;

Т а б л и ц а 1

**Сравнение отдельных характеристик древесной щепы,
традиционных и торрефицированных пеллет**
The comparison of the individual characteristics of wood chips, traditional pellets and torrefied ones

Характеристики	Древесная щепа	Обычные древесные пеллеты	Торрефицированные древесные пеллеты
Низшая теплота сгорания (в зависимости от влажности и вида древесины), МДж/кг	7,4–11,4	17–18	21–22
Влажность, %	30–50	< 10	< 1
Плотность, кг/м ³	250–400	650	900
Энергетическая плотность, кВт/м ³	815	3150	5085

Т а б л и ц а 2

Кинетические параметры термической деструкции древесины в гелии
Kinetic parameters of thermal degradation of timber in helium

Номер стадии	Береза			Сосна		
	Начальная масса стадии ω_0	Энергия активации E/R , К	Частотный фактор A , с ⁻¹	Начальная масса стадии ω_0	Энергия активации E/R , К	Частотный фактор A , с ⁻¹
1	0,164	21 274	$3,666 \cdot 10^{14}$	0,023	13 941	$2,987 \cdot 10^9$
2	0,246	26 006	$7,347 \cdot 10^{16}$	0,077	19 460	$7,567 \cdot 10^{12}$
3	0,216	17 997	$4,988 \cdot 10^{10}$	0,606	17 991	$3,319 \cdot 10^{10}$
4	0,179	5 823	10,448	0,134	8 535	571
5	0,195	10 049	500,765	0,160	11 793	$3,005 \cdot 10^3$

A — предэкспоненциальный множитель (частотный фактор), с⁻¹;

E/R — энергия активации реакции, К;

T — температура, К;

τ — время воздействия, с.

Для исследования теплоты сгорания древесины и ее изменения при термической обработке разработана и изготовлена экспериментальная установка. Схема установки приведена на рис. 1. Она состоит из медного цилиндра 1, в верхней части цилиндра находится дросселирующая и экранирующая набивка 10 из медной проволоки. Проволока служит для уменьшения скорости конвективного переноса внутри цилиндра и интенсификации теплообмена с продуктами горения топлива. Образец топлива 3 подвешивается на выдвижной штанге 11. Поджиг древесины осуществляется вне установки, а затем штанга с образцом поднимается внутрь цилиндра, где и происходит горение. Теплота от продуктов горения передается стенкам и медной проволоке. Температура медного цилиндра измеряется хромель-копелевой термопарой 6 с выводом информации на записывающее устройство. Для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду медный цилиндр помещают внутри алюминиевого цилиндра 2. Равномерность зазора между цилиндрами обеспечивают фторопластовые кольца 9. Для интенсификации процесса горения

и уменьшения потерь от неполноты сгорания в зону горения подается небольшое количество кислорода через патрубок 4 от баллона 5, находящегося за внешней стеной 7 лаборатории.

Горение образца топлива приводит к изменению температуры установки. Масса установки

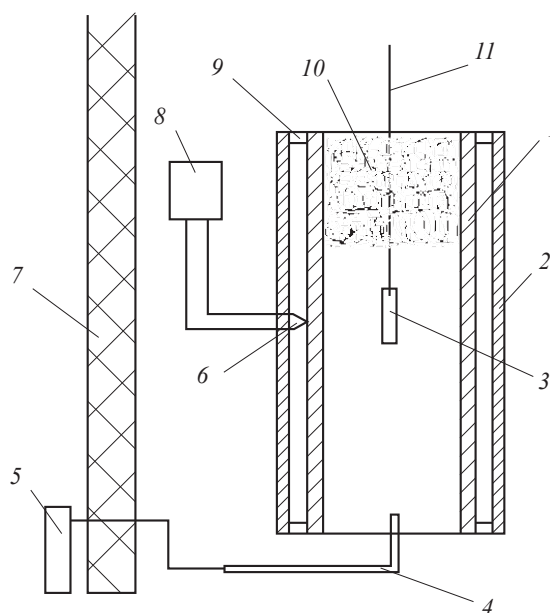


Рис. 1. Схема установки для определения теплоты сгорания топлива

Fig. 1. Apparatus to determine combustion heat

Т а б л и ц а 3

Зависимость теплоты сгорания от степени термической деструкции
The results of studying the calorific value depending on the degree of thermal degradation

	Относительная масса летучих в древесине ω	Относительная влажность образца, %	Средняя теплота сгорания, МДж/кг
Исходная древесина	1	10	17,8
Выход стадии I-1	0,991	6	18,1
Выход стадии I-2	0,985	6	17,9
Выход стадии II-1	0,902	5	19,1
Выход стадии II-2	0,895	5	19,3
Выход стадии III	0,68	4	20,6
Выход 60 % летучих	0,40	–	23,1
Древесный уголь	0,0	–	28,9

составляет 233 г. Количество теплоты на нагрев установки определяется из соотношения

$$Q_y = m_y c_y \Delta T_y,$$

где m_y — масса экспериментальной установки, кг;
 c_y — теплоемкость материала установки, Дж/(кгК);

ΔT_y — изменение температуры установки.

Так как масса образца $m_o \approx 50$ мг, горение топлива не приводит к значительному увеличению температуры установки, $\Delta T_y \approx 10$ К. Время процесса горения $\Delta t \approx 10 \dots 15$ с. Все это способствует тому, что потери теплоты за счет излучения и конвекции с поверхности внешнего цилиндра не превышают 0,002 % от общего количества выде-

лившейся теплоты Q . Температура продуктов горения на выходе из путанки из медной проволоки в верхней части установки равна температуре внутреннего цилиндра потому, что потери теплоты с уходящими газами не превышают 2,5 % от Q . В этом случае, пренебрегая потерями, можно допустить, что $Q = Q_y$.

Была проведена экспериментальная проверка работоспособности изготовленной установки. Для этого вместо образца устанавливали спираль электрического нагревателя и определяли количество выделившейся теплоты. Экспериментально установлено, что относительная погрешность определения количества подведенной теплоты $\delta = 2$ %.

Для определения зависимости теплоты сгорания древесины от степени термической деструкции был проведен непродельный отжиг образцов древесины сосны. Нагрев проводили в среде инертного газа гелия до выхода различного количества летучих — от 0 до 100 %. После термической обработки определяли теплоту сгорания. Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 3.

На рис. 2 приведен график изменения теплоты сгорания древесного топлива (Q) от степени термической деструкции (относительной массы ω). Исходя из экспериментальных данных получено уравнение зависимости Q от ω :

$$Q = 28,26 - 10,45\omega, \text{ МДж/кг.} \quad (2)$$

На графике сплошная линия соответствует расчету по уравнению (2), точки — средние экспериментальные значения.

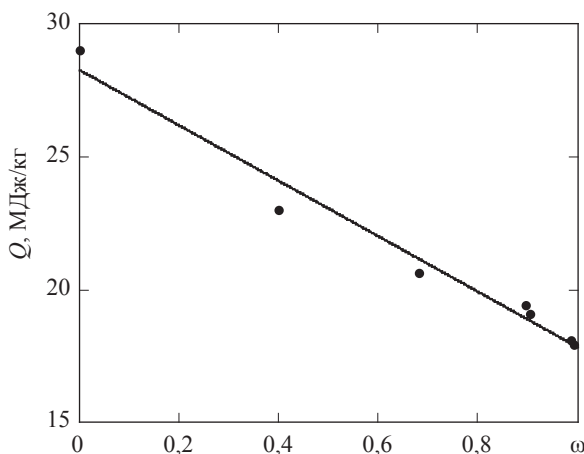


Рис. 2. Зависимость теплоты сгорания от относительной массы летучих в древесине

Fig. 2. The dependence of the calorific value on the volatile substance relative weight in wood

Выводы

Таким образом, полученное соотношение удовлетворительно описывает зависимость теплоты сгорания древесного топлива от степени торрефикации. Для прогнозирования значения Q топлива после термообработки необходимо знать поле значений температуры. Если известны температура, время нагрева и кинетические параметры термической деструкции, по уравнению (1) может быть рассчитано изменение относительной массы древесины, а по уравнению (2) — ее теплота сгорания.

Список литературы

- [1] Кислицын А.Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. М.: Лесная пром-сть, 1990. 312 с.
- [2] Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р., Разумов Е.Ю., Оладьшкина Н.А. Термомодифицирование древесины в среде топочных газов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2010. № 4 (73). С. 115–119.
- [3] Передерий С. Какие пеллеты лучше: черные или белые? СПб.: ЛесПромИнформ, 2012. № 3 (85). С. 158–164.
- [4] Ермоченков М.Г. Кинетика термической деструкции древесины в среде инертных газов // Технология и оборудование для переработки древесины: науч. тр. М.: МГУЛ, 2014. Вып. 370. С. 113–118.
- [5] Ермоченков М.Г. Прогнозирование свойств термически модифицированной древесины // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2010. № 4 (73). С. 111–115.
- [6] Ермоченков М.Г. Внутренние источники теплоты и массы в древесине при термическом модифицировании // 14-й Минский Междунар. форум по тепломассообмену. Минск, 2012.
- [7] Кувик Т.Е. Кинетика термической деструкции древесины в приложении к прогнозированию свойств термомодифицированной древесины // 4-я Междунар. науч.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ». М.: МГАУ, 2011. Т. 2. С. 144–148.
- [8] Шведов Б.А. Энерго- и массообмен в материалах тепловой защиты многоразовых ракетно-космических систем. Дис. ... д-ра техн. наук. М.: МЛТИ, 1990. 542 с.
- [9] Жигунов С.В. Тепломассообмен и кинетика термодеструкции при высокотемпературном нагреве композиционных материалов. Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУЛ, 1990. 184 с.
- [10] Венгер А.Е., Фрайман Ю.Е. Исследование кинетики процессов термического разложения полимерных материалов посредством термогравиметрического анализа // ИФЖ, 1981. Т. 40. № 2. С. 278–287.

Сведения об авторах

Ермоченков Михаил Геннадьевич — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: ermochenkov@mgul.ac.ru

Евстигнеев Алексей Георгиевич — зав. лабораторией, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: evstigneev@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 26.12.2016 г.

CHANGES OF THE CALORIFIC VALUE OF WOOD FUEL AFTER TORREFACTION

M.G. Ermochenkov, A.G. Evstigneev

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

ermochenkov@mgul.ac.ru

Torrefaction is the process of low-temperature pyrolysis of wood, used to improve the properties of wood fuel. Torrefied fuel has a number of advantages as compared to the original one. Thermal degradation causes a change in wood mass and its composition with the carbon percentage increased which results in increasing a calorific value Q . Thermodestruction is a multistage process. The degree of the material decomposition depends on temperature, time and the kinetic parameters of each stage of the process. The results of studying the calorific value of torrefied wood biomass and its dependence on the degree of thermal expansion have been given in this article. To carry out the experimental studies, the experimental plant has been designed and built. The experimental verification of installation performance showed that the error in determining the calorific value of wood fuel is about 2 %. To carry out the experimental studies of the calorific value depending on the degree of thermal degradation, some wood samples were pre-processed under their limited deterioration conditions. The thermal treatment of the samples was carried out in an inert gas helium chamber. Different calorific values of the fuel wood samples depending on various degrees of thermal degradation have been determined. A model of the calorific value depending on the relative weight of wood fuel ω has been suggested. The kinetic parameters of multi-stage thermal degradation

process in helium environment for pine and birch are given. A mathematical model allowing to determine the relative weight of the timber as a function of temperature and time has been developed. There has been obtained the dependence of the calorific value on ω in an explicit form.

Keywords: torrefication, a calorific value, thermal degradation, kinetic parameters

Suggested citation: Ermochenkova M.G., Evstigneev A.G. *Izmenenie teploty sgoraniya drevesnogo topliva pri torrefikatsii* [[Changes of the calorific value of wood fuel after torrefication]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 64–68. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-64-68

Reference

- [1] Kisilitsin A.N. *Piroliz drevesiny: himizm, kinetika, produkty, novye protsessy* [Pyrolysis of Wood: chemistry, kinetics, products, new processes], Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry], 1990, 312 p. (in Russian)
- [2] Safin R.R. *Termomodifitsirovanie drevesiny v srede topochnykh gazov* [Thermal modification of wood in the flue gas environment], *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik*, no. 4 (73), 2010, pp. 115-119. (in Russian)
- [3] Perederiy S. *Kakie pellety luchshe: chernye ili belye?* [What better pellets: black or white?]. SPb.: Lesprominform Publ., 2012, pp. 158-164. (in Russian)
- [4] Ermochenkova M.G. *Kinetika termicheskoy destruktivnoy drevesiny v srede inertnykh gazov* [Kinetics of thermal degradation of wood in inert gases]. *Tehnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny* [Scientific works], 2014, no. 370, pp. 113-118. (in Russian)
- [5] Ermochenkova M.G. *Prognozirovanie svoystv termicheski modifitsirovannoy drevesiny* [Predicting the properties of thermally modified wood]. *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoi Vestnik*, 2010, № 4 (73), pp. 111-115. (in Russian)
- [6] Ermochenkova M.G. *Vnutrennie istochniki teploty i massy v drevesine pri termicheskom modifitsirovanii* [Internal sources of heat and mass in the wood during the thermal modification]. 14-th Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer, Minsk, 2012. (in Russian)
- [7] Kuvik T.E. *Kinetika termicheskoy destruktivnoy drevesiny v prilozhenii k prognozirovaniyu svoystv termomodifitsirovannoy drevesiny* [Kinetics of thermal degradation of wood in the annex to predict the properties of wood thermomodified]. *4 Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Sovremennyye energoberegayushye teplovyye tehnologii (sushka u termovlazhnostnaya obrabotka materialov) SETT"* [The Fourth International scientific-practical conference «Modern energy-saving heat technology (drying and hydrothermal treatment of materials) SETT»], Moscow, 2011, t. 2, pp. 144-148. (in Russian)
- [8] Shvedov B.A. *Energo- i massoobmen v materialakh teplovoyy zashity mnogorazovykh raketno-kosmicheskikh system* Diss. dokt. tekhn. nauk [Energy and mass transfer in thermal protection materials reusable space-rocket systems. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 1990. (in Russian)
- [9] Zhigunov S.V. *Teplomassoobmen i kinetika termodestrutivnoy pri vysokotemperaturnom nagreve kompozitsionnykh materialov*. Diss. cand. tekhn. nauk [Heat and mass transfer and kinetics of thermal degradation at high temperature composite materials. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1990. (in Russian)
- [10] Venger A.E., Frayman U.E. *Issledovanie kinetiki protsessov termicheskogo razlozheniya polimernykh materialov posredstvom termogravimetricheskogo analiza* [Investigation kinetics of thermal decomposition of polymeric materials by TGA]. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1981, v. 40, no. 2, pp. 278-287. (in Russian)

Author's information

Ermochenkova Mikhail Gennad'evich — Cand. Sci. (Tech.) Assoc. Prof. BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia, e-mail: ermochenkova@mgul.ac.ru

Evstigneev Aleksey Georgievich — Head. of laboratory of the BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia, e-mail: evstigneev@mgul.ac.ru

Received 26.12.2016

ПРОЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕБЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ, РАЗЛИЧНЫХ ПО УРОВНЮ ТЕХНИЧЕСКОЙ ОСНАЩЕННОСТИ И РЕЖИМАМ РАБОТЫ

В.А. Лавриченко, Б.М. Рыбин, И.А. Завражнова

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

При проектировании, реконструкции, техническом перевооружении предприятий главная проблема заключается в выборе максимально возможного объема выпуска продукции. С одной стороны, он ограничен спросом на продукцию и инвестиционными возможностями, с другой — эффективностью организации производства. В основу исследования положен метод проектного моделирования технико-экономических показателей предприятий. Он заключается в следующем: разрабатывается проект предприятия и определяются его основные технико-экономические показатели. Затем вносят изменения в изучаемые параметры при постоянных значениях остальных и снова рассчитывают все показатели. После нескольких итераций появляется возможность найти зависимости расчетных показателей от изменяемых параметров производства. Такой подход подобен планированию эксперимента в технических задачах. В работе на примере проектов мебельных предприятий с использованием компьютерной модели получены количественные значения зависимости технико-экономических показателей от факторов производственной мощности предприятия — технического уровня (производительности) и времени использования (режима работы). Знание взаимосвязей технико-экономических параметров и показателей, рассчитанных на проектной модели мебельного предприятия в компьютерном варианте, позволит инвесторам выбирать эффективные стратегии развития производства и осуществлять контроль управления действующего предприятия по главному экономическому критерию — стоимости.

Ключевые слова: проектное моделирование, эффективность, мебельное производство, уровень технической оснащенности, режим работы

Ссылка для цитирования: Лавриченко В.А., Рыбин Б.М., Завражнова И.А. Проектное моделирование эффективности мебельных предприятий, различных по уровню технической оснащенности и режимам работы // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 69–76. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-69-76

При проектировании новых, а также реконструкции, техническом перевооружении мебельных, да и многих других, предприятий, главная проблема заключается в выборе производственной мощности — максимально возможном объеме выпуска продукции. Основным фактором, определяющим ее величину, — производительность технологического оборудования и режим работы (использование оборудования по времени). При выборе производственной мощности предприятия проектировщик, с одной стороны, ограничен спросом продукции на рынке, с другой — инвестиционными возможностями.

Рынок мебели отличается большим разнообразием продукции: мебель мягкая, для гостиной, спальни, детской, прихожей, отдельные изделия (столы, стулья, шкафы) и др. Разнообразны и режимы работы для производства мебели: односменный (8, 10, 12 ч), двухсменный 16 ч (по 8 ч) и даже круглосуточный — двухсменный и трехсменный (по 8 ч работы). В некоторых случаях предусмотрена работа без выходных, почти 360 дней в году, например, в фирмах «Феликс», «Проммебель» (Москва, офисная мебель).

Известно, что крупные предприятия имеют преимущество перед малыми из-за масштаба

выпуска продукции и, соответственно, массы прибыли, но нет объективных данных о том, как размер производства связан с показателями его эффективности. В нынешних рыночных условиях экономические исследования реального производства сопряжены с большими трудностями. С одной стороны, нет заказов на исследования и, соответственно, нет финансирования. С другой стороны, руководители частных предприятий не обязаны и не заинтересованы раскрывать информацию о своей финансово-хозяйственной деятельности. Есть еще и объективные причины, связанные со сложностью проведения экономических исследований. Так, факторы внешней и внутренней среды, влияющие на деятельность предприятий, настолько разнообразны, многочисленны и взаимосвязаны, что выявить достоверно их конкретное воздействие косвенными методами не представляется возможным.

Методика

Результаты использования статистических моделей для прогнозирования микро-экономических процессов в 60–70 гг. XX в. экономистами — авторами многих опубликованных работ — свидетельствуют о бесполезности многофакторных регрессионных уравнений для

изучения взаимосвязей параметров и результатов производства и, соответственно, для принятия реальных экономических решений. Поэтому в основу нашего исследования положен метод проектного моделирования предприятий. Этот метод заключается в следующем: вначале разрабатывают проект предприятия и определяют его основные технико-экономические параметры и показатели (ТЭП). Затем вносят изменения в исследуемые параметры при постоянных значениях остальных и снова рассчитывают все показатели. После нескольких итераций появляется возможность найти зависимости расчетных показателей от изменяющихся параметров производства. Такой подход подобен методу планирования эксперимента в технических задачах. Методика расчетов технико-экономических показателей предприятий общеизвестна, однако по поводу расчетов обобщающих показателей эффективности инвестиций возникают вопросы.

Общепризнанными показателями эффективности инвестиций являются чистый интегральный (накопленный) доход (ЧИД) и чистая текущая стоимость (ЧТС). ЧИД характеризует доходы предприятия в конце действия проекта (его жизненного цикла), а ЧТС — стоимость предприятия на определенный (начальный) момент времени. Эта стоимость может быть больше или меньше инвестиций — средств, необходимых для запуска проекта, или чистых активов действующего предприятия. На это влияет множество факторов, и прежде всего — уровень проектирования, а после запуска — уровень менеджмента, управления предприятием, который теперь все признают главным ресурс-фактором производства [1].

Общий вид этих показателей:

$$\text{ЧИД}_t = \sum_{i=1}^T (B_i - C_i), \quad (1)$$

$$\text{ЧИД}_t = \sum_{i=1}^T (B_i - C_i) d_i^t, \quad (2)$$

где t — шаг расчетов, год;

B_i — выручка от реализации продукции;

C_i — операционные и инвестиционные затраты, налоговые и страховые выплаты, кроме амортизационных отчислений;

d_i — коэффициент дисконтирования.

Срок действия проекта (T) для обрабатывающих производств [2] может быть ограничен полным износом оборудования и составляет примерно 7 лет.

Коэффициент дисконтирования может быть представлен как

$$d_i = 1/(1 + E)^i,$$

где E — норма дисконта (заданный уровень рентабельности инвестиций), $E > 0$.

Минимальная величина нормы дисконта определяется по ставке депозита в надежных банках (например, ставка Сбербанка РФ в 2016 г. — примерно 8...10 %), которую можно получать без всяких хлопот и риска, непременно возникающих в период производственной деятельности предприятия. Обычно к ставке депозита добавляется несколько процентов для учета возможных рисков в реальной производственной деятельности.

В формуле (2) значение разности показателей ($B_i - C_i$) представляет собой чистую прибыль и амортизационные отчисления, т. е. чистый доход (D) предприятия. Однако в таком виде формула статично характеризует проект, B_i и C_i (и, соответственно, D_i) могут меняться по годам только за счет внешнего воздействия. В данной статье предлагается логическая интерпретация динамики этих показателей: любой коммерческий инвестиционный проект является «генератором» доходов, а часть генерируемого проектом потока доходов может реинвестироваться (превращаться) в активы — ценные бумаги, новые производства; другая часть (свободные денежные потоки) потребляется акционерами в виде дивидендов [3–6]. Эти активы, в свою очередь, генерируют доходы с некоторым уровнем рентабельности f , и этот процесс продолжается до окончания срока действия проекта (кругооборот капитала).

Введем некоторые упрощения и примем, что:

- годовой доход от начального капитала не меняется в течение расчетного периода (аннуитет);
- инвестиции (собственные) вкладываются только в запуск проекта;
- часть доходов потребляется в виде свободных денежных средств;
- часть доходов капитализируется для наращивания активов (эти активы, в свою очередь, также генерируют доходы, которые делятся на свободные денежные средства и реинвестируемые в активы);
- инвестиции могут быть использованы альтернативно, например (в самом простом случае), путем размещения на депозитах банков;
- в течение расчетного периода не происходит инфляционного изменения цен и не изменяется норма дисконта.

Тогда формулу (1) для расчета ЧИД можно представить в следующем модифицированном виде

$$\text{ЧИД}_t = \text{СДС}_t + \text{НА}_t + \text{ЛС}_t - \text{АДИ}_t, \quad (3)$$

где СДС_t — потоки свободных денежных средств;

НА_t — наращенные активы проекта;

ЛС_t — ликвидационная стоимость проекта;

АДИ_t — альтернативные (условные) доходы инвестора.

Первая составляющая формулы (3) характеризует свободные денежные потоки средств, расходуемые на потребление (дивиденды, социальный пакет и т. п.), и может быть представлена в виде

$$СДС_t = (1 - w)Д \sum_{t=1}^T K_n, \quad (4)$$

где w — доля годового дохода, выделяемая на развитие, $0 < w < 1$;

K_n — коэффициент наращивания (компаундирования).

Из формулы (4) вытекает, что значение $(1 - w)$ соответствует доле потребляемых доходов в виде свободных денежных средств.

Коэффициент наращивания доходов определяется как

$$K_n = (1 + wf)^t, \quad (5)$$

где f — рентабельность активов, созданных за счет реинвестируемых доходов.

С учетом формулы (5) суммарную величину коэффициентов наращивания за все время действия проекта можно определить по выражению

$$\sum_{t=1}^T K_n = (1 + wf) + (1 + wf)^2 + \dots + (1 + wf)^T. \quad (6)$$

Вторая составляющая формулы (3) определяет наращенные (новые) активы проекта ($НА_t$) за счет реинвестирования (капитализации) доходов с учетом амортизации и ликвидности активов и может быть представлена в виде

$$НА_t = (1 + a_{ам})wДK_n \sum_{t=1}^T K_n K_{ам},$$

где K_n — коэффициент ликвидности активов, $1 > K_n > 0$;

$K_{ам}$ — коэффициент амортизации наращенных активов.

Коэффициент амортизации наращенных активов можно определить по следующей формуле

$$K_{ам} = 1 - a_{ам}t,$$

где $a_{ам}$ — средневзвешенная годовая норма износа активов, %.

Третья составляющая формулы (3) определяет ликвидационную стоимость активов проекта ($ЛС_t$).

При сворачивании производства в последний год расчетного периода высвобождаются оборотные активы, вложенные ранее в материально-производственные запасы, а также часть основных активов, формально равных остаточной стоимости пассивной части основных средств предприятия (здания и сооружения). Рыночная стоимость имущества, бывшего в употреблении (**ликвидационная стоимость**), зависит от мно-

гих факторов, что увеличивает неопределенность проектных расчетов. В качестве ликвидационной стоимости ($ЛС_t$, млн руб.) можно принять остаточную стоимость активной (оборудование $ОС_{t\text{ акт}}$) и пассивной частей (здания и сооружения $ОС_{t\text{ пас}}$) основных средств предприятия ($ОС_t$) вместе с суммой стоимости земельного участка ($ОС_{зy}$) и остатка оборотных средств (ОБС); ее можно представить в виде

$$ЛС_t = (ОС_{t\text{ акт}} - A_{\text{акт}}t) + (ОС_{t\text{ пас}} - A_{\text{пас}}t) + ОС_{зy} + ОБС$$

где $A_{\text{акт}}$ — средневзвешенная норма амортизационных отчислений на оборудование;

$A_{\text{пас}}$ — средневзвешенная норма амортизационных отчислений для зданий и сооружений.

Четвертая составляющая формулы (3) выражает альтернативные, условные доходы инвестора за счет помещения инвестиций на депозиты банка по ставке E (другая интерпретация E — издержки, плата за привлечение инвестиций) и определяется как

$$АДИ_t = И(1 + E)^t,$$

где $И$ — инвестиции проекта.

Показатель ЧИД служит для сравнения будущих доходов от реализации проекта и альтернативных возможных доходов от использования инвестиций за период действия за жизненный цикл проекта. Управление эффективностью проекта в течение его жизненного цикла осуществляется путем выбора значений w и повышения рентабельности реинвестированных (капитализируемых) доходов f . Доходы полностью потребляются при $w = 0$; доходы просто накапливаются на счетах предприятия в виде денежных средств при $w = 1$ и $f = 0$; при $w = 1$ и $f > 0$ все доходы реинвестируются по ставке f , наращивая, по формуле сложных процентов $(1 + f)^t$, активы (имущество) проекта. В этом случае активы растут очень быстро: при $f = 30\%$ доходы за 7 лет по формуле сложных процентов возрастают почти в 23 раза.

При быстром развитии бизнеса возникают проблемы связанные с конвертацией (ликвидности) активов проекта в свободные денежные средства и распределением их в форме дивидендов, по требованию акционеров, в течение срока действия проекта и по стоимости акций при его завершении. Как правило, продажа имущества, бывшего в употреблении, требует достаточно длительного времени и сопровождается потерями в его стоимости, даже по сравнению с остаточной величиной.

Оптимальное соотношение части доходов w , реинвестируемых в развитие проекта, и другой

части $(1 - w)$, распределяемой в виде свободных денежных средств среди акционеров (дивиденды) и, частично, в резервный фонд, может меняться в зависимости от экономической ситуации. Логично предположить, что на растущем рынке доля расходов на потребление $(1 - w)$ должна быть минимальной (в пределах ставки банковских депозитов — E), а на стагнирующем рынке — максимальной.

Индекс доходности инвестиций (ИДИ) определяет, во сколько раз потребленные и накопленные (наращенные за счет реинвестированных доходов) за срок действия проекта чистые активы предприятия превысят доходы при альтернативном использовании инвестиций. Этот показатель можно определить по формуле

$$ИДИ_t = 1 + ЧИД_t / I(1 + E).$$

Основным критерием эффективности инвестиций является чистая текущая стоимость (ЧТС), млн руб., интегральный экономический эффект или чистый интегральный дисконтированный доход (англ. Net Present Value — NPV). По определению, стоимость — это количественное соотношение, используемое при добровольном обмене товарами. Стоимость действительно постоянно изменяется под влиянием множества факторов (пример — динамика курса валют).

Дисконтирование (уценка) — действие, обратное компаундированию (наращиванию). Оно применяется в том случае, когда необходимо определить исходное значение числа при известном конечном результате, рассчитанном по формуле сложных процентов. При таком подходе определение **текущей стоимости** можно представить как решение банковской задачи: рассчитать сумму средств, которую следует разместить на депозите банка с целью получения в будущем таких же, как рассчитанные в проекте, доходов. **Чистая текущая стоимость** определяется вычитанием инвестиций проекта.

Расчет ЧТС может быть произведен по формуле

$$ЧТС_t = (1 - w)D \sum_{t=1}^T K_n d_t + (1 + a_{ам})d K_{л} K_{ам} \sum_{t=1}^T K_n K_{ам} + ЛС_t d_t - И. \quad (7)$$

Величину

$$\sum_{t=1}^T K_n d_t$$

с учетом формулы (6) можно представить в виде

$$\sum_{t=1}^T K_n d_t = [(1 + wf)/(1 + E)] + [(1 + wf)/(1 + E)]^2 + \dots + [(1 + wf)/(1 + E)]^T.$$

В связи с тем что ликвидационная стоимость основных активов может быть возвращена только в конце действия проекта, третья составляющая формулы (7) — $ЛС_t$ — делится на дисконтирующий множитель последнего года.

Положительное значение ЧТС означает, что новая, добавленная, стоимость, создаваемая проектом, больше необходимых для проекта инвестиций. Используемое в определении показателя словосочетание «текущая стоимость» следует интерпретировать как «в данный период времени» или «при заданных технико-экономических параметрах проекта». С течением времени при изменении параметров стоимость также изменяется.

Индекс доходности дисконтированных инвестиций (ИДДИ) — рентабельность инвестиций — дополняет предыдущий абсолютный показатель расчетом его относительной величины и рассчитывается по соотношению

$$ИДДИ_t = ЧТС_t / I.$$

Эффективность проекта также дополняется показателями: производительность труда, рентабельность продукции, рентабельность производства (активов). Для оценки финансовой устойчивости проекта определяется точка безубыточности предприятия.

Нам не удалось обнаружить в многочисленных экономических работах по этой проблеме (эффективности инвестиций и оценки стоимости бизнеса) учета возможного наращивания активов проекта в течение его жизненного цикла, разделения доходов на чистые денежные потоки и активы. Близкие подходы изложены в работах [2, 4, 7], поэтому представление показателей экономической эффективности формулами (3) и (7) можно отнести к научной новизне данной работы. В качестве объекта исследования выбраны предприятия по производству корпусной мебели для жилых помещений. Эта продукция имеет наибольший удельный вес в общем объеме производства мебели. В основе проектирования предприятий лежит конструкторская подготовка производства. Она заключается в выборе или разработке изделия, определении необходимых конструктивных материалов, размеров деталей и др.

В качестве типичного изделия взят комод с габаритными размерами $1400 \times 1400 \times 650$ мм, с 5 ящиками и открытыми закругленными полками по краям. Материалы для корпуса и передней стенки ящиков — ламинированная древесно-стружечная плита (ЛДССтП), толщиной 16 мм, для задней стенки — древесноволокнистая плита (ДВП) толщиной 3 мм. Ящики пластмассовые и фурнитура — покупные комплектующие изделия.

Технологическая подготовка производства заключается в определении необходимых техноло-

Т а б л и ц а 1

Производственные параметры предприятий разных уровней
Production parameters of enterprises of different levels

Уровень предприятия	Производительность, комплектов в час	Трудоемкость единицы продукции, норма-час	Производственная площадь, м ²	Мощность электродвигателей, кВт	Стоимость комплекса, тыс. руб.
Малое	2,5	5,8	1200	60	5000
Среднее	7,5	3,3	2000	110	25 000
Крупное	25	2,6	5000	550	100 000

гических процессов обработки, норм расхода материалов, расчетов производительности отдельных видов оборудования и всего комплекса в целом.

Технологическая схема производственного процесса изготовления изделия включает следующие операции: раскрой плит ЛДСП и ДВП, раскрой кратных заготовок, обработку криволинейных заготовок, облицовывание кромок заготовок, сверление отверстий для крепежа и фурнитуры, контроль качества деталей, комплектование, упаковку изделия в разобранном виде.

Поскольку мебель поставляется потребителям в разобранном виде, необходимо предусмотреть также сборку ее квалифицированными рабочими на месте у покупателя (по его желанию). Оборудование для производства мебели отличается большим разнообразием видов, моделей, технических характеристик, производительности, цен. Однако это разнообразие не хаотично, оборудование можно классифицировать по производительности — для малых, средних и крупных предприятий. Набор оборудования (производственный комплекс) для **малых** предприятий составляют станки: круглопильный, фрезерный, кромкооблицовочный с ручной подачей и сверлильно-присадочный. Для **среднего** предприятия — пильный центр, круглопильный станок, обрабатывающий центр с числовым программным управлением (ЧПУ), односторонний кромкооблицовочный станок с автоматической подачей, кромкооблицовочный станок с ручной подачей и сверлильно-присадочный станок. Для **крупного** предприятия — угловой пильный центр, двухсторонний кромкооблицовочный станок с автоматической подачей, обрабатывающий центр с ЧПУ, кромкооблицовочный станок с ручной подачей и сверлильно-присадочные станки.

Результаты и обсуждения

По результатам технологических расчетов [8–10] определен ряд параметров производственных комплексов мебельных предприятий (табл. 1).

Другие параметры приняты по нормативам, либо по экспертным оценкам, либо на уровне стоимости, сложившейся на рынках инвестиций, рабочей силы, материалов, с учетом трудового и налогового законодательства и др.

Обычно проектирование и строительство зданий является самой трудоемкой и затратной частью проекта. В 2000-е гг. здесь произошли значительные изменения. Ушли в прошлое здания из кирпича и бетона, на возведение которых уходило несколько лет (за это время устаревала технологическая часть проекта). Появились сборные арочного типа ангары, с оболочкой из оцинкованного металла, толщиной 1...1,55 мм, с утеплением полиуретановой пеной, стоимостью от 2000 руб. за 1 м² площади. Сроки их сборки — до 3 месяцев. Для них не требуется длительных бюрократических согласований.

Это обстоятельство, при условии роста спроса на мебель, должно способствовать созданию новых и расширению действующих предприятий.

Для оценки влияния производственных параметров проекта на конечные показатели, эти параметры подвергали изменениям при неизменности или необходимой коррекции других. Например, на крупных предприятиях с автоматизированными линиями квалификация работников выше, соответственно, и уровень заработной платы на 20...30 % выше. Кроме того, при больших объемах закупок материалов оптовые цены существенно, на 25...35 %, ниже, чем при малых закупках, а работа в ночные часы компенсируется надбавками к заработной плате и т. д.

Технико-экономическая проектная модель предприятия реализована в виде компьютерной модели в таблицах Excel. Исходные данные модели включают 51 технико-экономический параметр, конечных расчетных показателей за год — 58, итого за 7 лет жизненного цикла (полный износ технологического оборудования) и с учетом нулевого года (времени строительства) за одну итерацию проводится 464 расчета.

Всего проведено 15 итераций расчетов для трех уровней технической оснащенности (производительности) предприятий и при пяти значениях режима суточной работы — 8, 10, 12, 16, 24 ч. Результаты расчетов приведены в табл. 2–5. Объемы инвестиций в зависимости от уровня и режима работы предприятий представлены в табл. 2.

Рост инвестиций с 38 до 245 млн руб. при повышении уровня предприятия определяется увеличением всех составляющих инвестиций —

Т а б л и ц а 2

Объем инвестиций на предприятиях с различными режимами работы, млн руб.
The volume of investments into the enterprises of different working time patterns, million rubles

Уровень предприятия	Режим работ, ч				
	8	10	12	16	24
Малое	38,2	39,6	41,0	44,0	49,6
Среднее	91,4	96,2	101,0	110,4	129,4
Крупное	245,0	260,0	274,5	305,0	364,0

Т а б л и ц а 3

Показатели рентабельности производства и рентабельности продукции на предприятиях с различными режимами работы, %
Indicators of the enterprise profitability and the product profitability produced at enterprises of different working time patterns, %

Уровень предприятия	Показатель рентабельности	Режим работы, ч				
		8	10	12	16	24
Малое	Продукции	14,4	15,1	15,7	16,6	17,4
	Производства	19,3	24,6	30,0	38,4	53,0
Среднее	Продукции	16,1	17,0	18,0	18,3	19,0
	Производства	29,2	36,3	42,7	54,0	71,0
Крупное	Продукции	14,1	15,0	15,6	16,4	17,2
	Производства	30,2	37,5	43,0	55,0	72,0

Т а б л и ц а 4

Чистый интегральный доход и индекс доходности инвестиций для предприятий разного уровня с различными режимами работы
Net income and profitability of the integral index of investment for enterprises of different levels and working time patterns

Уровень предприятия	Режим работы, ч									
	8		10		12		16		24	
	ЧИД, млн руб.	ИДИ	ЧИД, млн руб.	ИДИ	ЧИД, млн руб.	ИДИ	ЧИД, млн руб.	ИДИ	ЧИД, млн руб.	ИДИ
Малое	118,3	2,6	165,5	3,1	212,7	3,7	307,2	4,6	496	6,2
Среднее	478	3,7	642	4,4	805	5,1	1132	6,3	1 786	8
Крупное	1 345	3,8	1 811	4,6	2 276	5,3	3 206	6,4	5 068	8,2

Т а б л и ц а 5

Чистая текущая стоимость и индекс дисконтированных инвестиций для предприятий разного уровня с различными режимами работы
The net current value and the index of discounted investment for enterprises of different levels and working time patterns

Уровень предприятия	Режим работы, ч									
	8		10		12		16		24	
	ЧТС, млн руб.	ИДДИ	ЧТС, млн руб.	ИДДИ	ЧТС, млн руб.	ИДДИ	ЧТС, млн руб.	ИДДИ	ЧТС, млн руб.	ИДДИ
Малое	84,4	3,2	115	4	146	4,7	207	5,7	331	7,7
Среднее	329	4,6	436	5,5	542	6,4	756	7,85	1 184	10,1
Крупное	926	4,8	1 230	5,7	1 534	6,6	2 142	8	3 360	10,2

стоимости оборудования, земельных участков, производственных зданий и сооружений, транспортных средств, оборотных средств и нематериальных активов и пр. Рост инвестиций в зависимости от режима работы обуславливается только приростом оборотных средств.

В табл. 3 показано влияние уровня технической оснащенности и режима работы (факторов мощ-

ности) предприятий на показатели рентабельности производства и рентабельности продукции.

Очевидны значительные различия показателей рентабельности производства как за счет технической оснащенности, так и за счет увеличения выпуска продукции. При практически неизменных основных средствах рост составил от 19,3 до 30,2 % при 8 ч работы и от 53 до 72 % при 24 ч.

Показатели рентабельности продукции практически не различаются ни в зависимости от уровня производства, ни в зависимости от режима работы из-за высокой материалоемкости продукции — более 60 % ее себестоимости. При расчетах цены на продукцию корректировались в сторону снижения на крупном предприятии — с 30 до 24 тыс. руб.

Влияние оцениваемых параметров на показатель чистого интегрального дохода представлено в табл. 4. Расчеты проведены при $w = 0,6$; $K_d = 0,8$; $f = 30$ %.

Показатели ЧИД возрастают с увеличением количества рабочего времени в сутки. Динамика результатов особенно значительна для крупного проекта.

Влияние оцениваемых параметров на показатель чистой текущей стоимости представлено в табл. 5. Там же приведены результаты расчетов для индекса доходности дисконтированных инвестиций.

Индекс ЧТС для крупного предприятия при 24-часовом режиме работы свидетельствует, что альтернативный вариант, обеспечивающий ЧТС в размере 3360 млн руб. за семилетний период, при рентабельности инвестиций 10 % ($E = 0,1$) (малорискованный вариант — депозит банка) потребует инвестиций в 10,2 раза больше. Для проекта предприятия внутренняя норма доходности, определяемая значением E , при котором ЧТС = 0, составляет более 95 %. Крупные предприятия эффективнее малых, преимущество их также растет по мере увеличения режима работы.

Выводы

На основании полученных результатов исследования взаимосвязей технико-экономических параметров и показателей при использовании проектной модели мебельного предприятия в компьютерном варианте можно сделать следующие выводы:

— метод проектного моделирования позволяет провести количественную оценку зависимости технико-экономических показателей от параметров производства;

— расчетные зависимости ТЭП от параметров производства не противоречат здравому смыслу и знаниям об экономике производства;

— при оценке экономической эффективности проекта следует учитывать возможность наращивания его активов за счет капитализации части собственной прибыли в течение жизненного цикла проекта. Это обстоятельство существенно приближает методику расчетов к реальности, а инвестиционные проекты становятся более привлекательными для инвесторов;

— многовариантное технико-экономическое обоснование проектов с помощью моделирования улучшает понимание проектировщиками и инвесторами экономических процессов производства;

— предлагаемый метод моделирования экономики проекта позволяет использовать его и как экспресс-метод контроля инвесторов за управлением действующего предприятия по главному критерию — стоимости.

Список литературы

- [1] Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов. М.: Экономика, 2000. 10 с.
- [2] Дасковский В.Б., Киселев В.Б. Фактор времени при оценке эффективности инвестиционных проектов // Экономист. 2008. № 1. 55–67 с.
- [3] Лавриченко В.А. Совершенствование системы оценки инвестиционных проектов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2014. № 3 (18). С. 128–134.
- [4] Чернов В.А. Инвестиционный анализ. М.: Юнити, 2009. 160 с.
- [5] Иванов И.Н. Производственный менеджмент. Теория и практика. М.: Юрайт, 2014. 574 с.
- [6] Бурдин Н.А., Гукасян А.Г. Организация и финансирование инвестиций в лесопромышленном комплексе: учеб. пособие. М.: МГУЛ, 2008. 210 с.
- [7] Коупленд Т., Коллер Т., Муррин Д. Стоимость компаний: оценка и управление. М.: Олимп Бизнес, 2008. 575 с.
- [8] Макконнел К., Брю С.Л. Экономист: принципы, проблемы и политика, в 2 т. М.: Республика, 1995. Т. 2. 400 с.
- [9] Рыбин Б.М., Лавриченко В.А. Экономические расчеты в курсовом проектировании по технологии деревообработки: учеб.-метод. пособие. М.: МГУЛ, 2007, 14 с.
- [10] Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Андреева Ю.Г. Эффективность технологических процессов механической обработки деталей и узлов мебели из плитных материалов // Технология и оборудование для переработки древесины: сб. научн. тр. М.: МГУЛ, 2014. Вып. 370. С. 48–52.

Сведения об авторах

Лавриченко Валерий Алексеевич — канд. экон. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: valar@yandex.ru

Рыбин Борис Матвеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры древесиноведения и технологии деревообработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: rybin@mgul.ac.ru

Завражнова Ирина Анатольевна — старший преподаватель кафедры древесиноведения и технологии деревообработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: zavrazhnova@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 22.12.2016 г.

DESIGN MODELING OF EFFICIENCY AT FURNITURE ENTERPRISES WITH DIFFERENT TECHNICAL EQUIPMENT LEVEL AND VARIOUS WORKING TIME PATTERNS

V.A. Lavrichenko, B.M. Rybin, I.A. Zavrazhnova

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

valar@yandex.ru

When the design, reconstruction, technical re-equipment of a company is being carried out the main problem is the choice of techniques providing the maximum possible output. On the one hand, it is limited by the demand for products and the investment opportunities, on the other, by the industrial management efficiency. The research is based on the method of design modeling of the enterprise technical and economic performance. It is as follows: the company setup is developed and its main technical and economic indicators are determined. Then, some changes in the studied parameters are made at constant values of the others, and all the indicators are calculated again. After several iterations, it is possible to find the dependence of the calculated indices on the variable production parameters. This approach is similar to designing an experiment to solve a technological problem. In this paper, an example of furniture enterprise projects, using a computer simulation, provides the quantitative values of the technological and economic indicators dependence on the factors of the enterprise production capacity, i.e., its technical level (performance) and the working time pattern (operation). If the relationship of technical and economic parameters and the indicators, calculated at a project model furniture company in the CBT, are known it will allow investors to choose the efficient production strategy and to implement management control of a business, taking into account the main economic criterion — its cost.

Keywords: design modeling, efficiency, furniture production, technical equipment, operation

Suggested citation: Lavrichenko V.A., Rybin B.M., Zavrazhnova I.A. *Proektnoe modelirovanie effektivnosti mebel'nykh predpriyatiy, razlichnykh po urovnyu tekhnicheskoy osnashchennosti i rezhimam raboty* [Design modeling of efficiency at furniture enterprises with different technical equipment level and various working time patterns]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 69–76. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-69-76

References

- [1] *Metodicheskie rekomendatsii po ocenke investitsionnykh proektov* [Guidelines on the assessment of investment projects] The official publication, Moscow: Economics Publ., 2000, 10 p. (in Russian)
- [2] Daskovski V.B., Kiselev V.B. *Faktor vremeni pri ocenke effektivnosti investitsionnykh proektov* [The time factor in assessing the effectiveness of investment projects] *The Economist*, 2008, no 1, pp. 55-56. (in Russian)
- [3] Lavrichenko V.A. *Soverhenstvovanie sistemi ochenki investitsionnykh proektov* [Improving the investment projects assessment system.] *Moscow state university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2014, no. 3, pp. 128-134. (in Russian)
- [4] Chernov V.A. *Investitsionni analiz* [Investment analysis.], Moscow: Unity Publ., 2009. 160 p. (in Russian)
- [5] *Proizvodstvenni menedzhment. Teoriya i praktika* [Production management. Theory and practice], Moscow: Yurayt Publ., 2014, 574 p. (in Russian)
- [6] Byrdin N.A., Ghukasyan A.G. *Organizatsiya i finansirovanie investitsii v lesopromyshlennom komplekse* [Organization and financing of investments in the timber industry] Moscow: MGUL Publ., 2008. 210 p. (in Russian)
- [7] Kouplend T., Koller T., Murrin D. *Stoimost' kompaniy: otsenka i upravlenie* [Cost companies: Assessment and Management], Moscow: JSC «Olympus Business» Publ., 2008, 575 p. (in Russian)
- [8] Makkonnel Kempbell, Bryu Stenli L. *Ekonomist: printsipy, problemy i politika* [Principles, Problems and Policies], Moscow: Republic Publ., 1995, v. 2, 400 p. (in Russian)
- [9] Rybin B.M., Lavrichenko V.A. *Ekonomicheskie raschety v kursovom proektirovanii po tekhnologii derevoobrabotki* [Economic calculations in the course design for woodworking technology], Moscow: MGUL Publ., 2007, 14 p. (in Russian)
- [10] Rybin B.M., Zavrazhnova I.A., Andreeva Yu.G. *Effektivnost' tekhnologicheskikh protsessov mekhanicheskoy obrabotki detaley i uzlov mebeli iz plitnykh materialov* [The efficiency of technological processes of machining of parts and components of furniture from board materials] *Technology and equipment for wood processing*. Moscow: MGUL Publ., 2014, v. 370, pp. 48-52. (in Russian)

Author's information

Lavrichenko Valeriy Alekseevich — Cand. Sci. (Economics)? Assoc. Prof. BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: valar@yandex.ru

Rybin Boris Matveevich — Dr. Sci. (Tech.), Prof. Department of Wood-and Wood Technology BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: rybin@mgul.ac.ru

Zavrazhnova Irina Anatol'evna — Senior Lecturer Department of Wood-and Wood Technology, BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: zavrazhnova@mgul.ac.ru

Received 22.12.2016

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ БЛЕСКА ПРОЗРАЧНЫХ ЛАКОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ДРЕВЕСИНЕ

Б.М. Рыбин, И.А. Завражнова

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

Блеск — одна из декоративных характеристик внешнего вида прозрачных покрытий на древесине. Покрытия на древесине по характеру отражения (блеску) условно подразделяются на зеркальные, глянцевые и матовые. Покрытия с зеркальным блеском создают изображения окружающих предметов без какого-либо искажения, так как эти покрытия обладают гладкой поверхностью, имеющей высоту неровностей, сравнимую с половиной длины волны видимого света. Матовые покрытия диффузно отражают падающие на них лучи света. Это связано с тем, что на поверхности таких покрытий создана искусственная шероховатость с помощью специальных средств. Промежуточную область составляют глянцевые покрытия, к которым не применяют специальных мер получения зеркального и диффузного отражения света. Такие покрытия дают изображение окружающих предметов более или менее искаженными. Для оценки блеска покрытий используют блескомеры с различными углами падения отражения света (20, 45, 60, 75, 80 и 85°). Такое разнообразие блескомеров связано с тем, что на их показания помимо лучей света, отраженных покрытием, оказывает влияние целый ряд факторов. Одним из факторов являются лучи света, отраженные древесиной, которые суммируются с лучами света от покрытия и тем самым вносят ошибку в контролируемый показатель блеска. Математически модель отражения света различными защитно-декоративными покрытиями на древесине позволила оценить долю световых потоков, фиксируемых блескомером, от поверхности покрытия и поверхности древесины. При оценке блеска зеркальных, глянцевых и матовых покрытий на показания блескомеров существенное влияние оказывает светлота древесины. Ее влияние на показания блескомеров для покрытий с шероховатой поверхностью (матовых) остается таким же, как и для зеркальных покрытий, но доля светового потока, отраженного поверхностью древесины, становится значительно больше по сравнению со световым потоком, отраженным лаковым покрытием. С увеличением угла падения отражения света доля светового потока, вносимая древесиной подложкой в показания блескомера, уменьшается, но является существенной при оценке блеска контролируемой поверхности. Результаты работы могут быть использованы для обоснования условий оценки блеска различных защитно-декоративных покрытий на древесине.

Ключевые слова: блеск покрытий, светлота поверхности древесины, шероховатость поверхности покрытия

Ссылка для цитирования: Рыбин Б.М., Завражнова И.А. К вопросу оценки блеска прозрачных лаковых покрытий на древесине // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 77–83. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-77-83

По характеру отражения света покрытия на древесине можно условно разделить на три группы — зеркальные, глянцевые и матовые [1].

Зеркальные покрытия обладают гладкой поверхностью, высота неровностей не превышает половины длины волны видимого света. Падающий на такую поверхность световой поток отражается без сколько-нибудь существенного рассеивания и создает зеркальное изображение окружающих предметов.

К глянцевым относятся покрытия на древесине, к которым не применяют специальных мер для получения эффекта зеркального или диффузного отражения света. Так как поверхность древесной подложки всегда обладает неровностями анатомического и другого происхождения, нанесенный на подложку слой жидкого лака при отверждении утрачивает первоначальную зеркальную гладкость. Под влиянием усадки на поверхности покрытия возникают впадины — просадка над порами и другими неровностями подложки. В отличие от зеркально гладких, такие покрытия дают изображения ок-

ружающих предметов более или менее искаженными, в зависимости от неровностей покрытий.

Особую группу составляют матовые покрытия, на поверхности которых с помощью специальных средств (матовых добавок и др.) создается искусственная шероховатость. Такие покрытия диффузно отражают большую часть падающих на них лучей света и поэтому не дают изображения окружающих предметов, однако обладают некоторой способностью к блеску, зависящей от метода придания им шероховатости и степени сглаженности неровностей [2].

Целью данной работы является рассмотрение математической модели отражения света различными защитно-декоративными покрытиями на древесине.

Методика исследования

Проявление оптических свойств лаковых покрытий обусловлено их взаимодействием со световым потоком, представляющим электромагнитное поле. Высокомолекулярные вещества, к которым относятся и лаковые покрытия, не имеют поглощения в видимой области спектра,

кроме случаев, когда они окрашены или приобрели цвет в результате структурных изменений. Поэтому светопропускание их в области видимого света обусловлено в основном их светопропускающей и отражательной способностью.

Для оценки светового потока, зеркально отраженного от поверхности покрытия, воспользуемся законом О. Френеля [3]. Направленно-рассеянное отражение будем оценивать предложенной А.С. Топорцом зависимостью [4–6]. Световой поток, диффузно отраженный покрытием, будем оценивать через коэффициент диффузного отражения. Световой поток, прошедший через лаковое покрытие и отраженный от подложки, зависит от светопропускающей способности лаковой пленки и будет оцениваться коэффициентом пропускания. Отражательная способность подложки будет характеризоваться коэффициентом отражения.

Если не учитывать многократного отражения света внутри лакового покрытия, то световой поток, отраженный поверхностью покрытия и подложки, можно определить, используя закон Г. Кирхгофа, по формуле

$$I = I_e r^k + I_e d + I_e (1 - d - r^k)^2 \tau^{2H} \rho, \quad (1)$$

где I_e — падающий световой поток;

r — коэффициент зеркального отражения света полированной поверхностью покрытия, образованной из того же материала, что и контролируемая поверхность, определяется по формуле Френеля

$$k = -9,7 \sigma^2 \frac{\cos^2 \varphi}{\lambda^2}$$

(σ — среднее квадратическое отклонение высоты неровностей профиля;

φ — угол зеркального отражения света;

λ — длина волны падающего света);

$I_e r^k$ — световой поток, зеркально отраженный поверхностью покрытия (формула Топорца);

$I_e d$ — световой поток, диффузно отраженный поверхностью покрытия;

d — коэффициент диффузного отражения;

$I_e (1 - d - r^k)^2 \tau^{2H} \rho$ — световой поток, отраженный подложкой и прошедший через границу лакового покрытие — воздух;

τ — коэффициент пропускания света лаковым покрытием;

H — толщина лакового покрытия;

ρ — коэффициент отражения света поверхностью древесины.

Для определения коэффициента k (степени основания натуральных логарифмов) можно воспользоваться известной зависимостью [7] между средним квадратическим отклонением

высоты неровности профиля σ и средним арифметическим отклонением профиля Ra

$$Ra = \sigma \sqrt{\frac{2}{\pi}}. \quad (2)$$

В дальнейшем с учетом формулы (2) коэффициент k будем определять по формуле

$$k = -9,7 Ra^2 \frac{\pi \cos^2 \varphi}{2 \lambda^2}.$$

При $\pi = 3,14$ и $\lambda = 0,55$ мкм (зеленая область видимого света) коэффициент k определяется по формуле

$$k = -50,34 Ra^2 \cos^2 \varphi. \quad (3)$$

С учетом уравнения (3) световой поток, отраженный поверхностью покрытия и подложки (формула (1)), можно определить по формуле

$$I = I_e r e^{-50,34 Ra^2 \cos^2 \varphi} + I_e d + I_e (1 - d - r e^{-50,34 Ra^2 \cos^2 \varphi})^2 \tau^{2H} \rho. \quad (4)$$

Зависимость (4) позволяет обобщить явление отражения света как от поверхностей с высотой неровностей больше длины волны видимого света, так и для поверхностей, у которых высота неровностей меньше половины длины волны видимого света. Выражение (4) при $Ra = 0$ и $d = 0$ можно преобразовать

$$I = I_e r + I_e (1 - r)^2 \tau^{2H} \rho. \quad (5)$$

Формула (5) позволяет оценить световой поток, отраженный от покрытия с зеркальным блеском.

Если в формуле (5) выполнить преобразование $I_r = I_e r$, получим выражение

$$I = I_r + \frac{1}{I_e} (I_e - I_r)^2 \tau^{2H} \rho. \quad (6)$$

Поскольку прозрачные покрытия с зеркальным блеском обладают незначительным светорассеиванием и поглощением внутри лаковой пленки, можно считать, что коэффициент $\tau^{2H} \approx 1$. Тогда формулу (6) можно преобразовать так

$$I = I_r + \frac{1}{I_e} (I_e - I_r)^2 \rho. \quad (7)$$

В формуле (7) переменным фактором, влияющим на световой поток, отраженный от контролируемой поверхности покрытия, является коэффициент отражения света поверхностью древесины (ρ). Он зависит от светлоты подложки [6]. Полученная формула (7) позволяет оценить влияние светлоты подложки в общем световом потоке, отраженном от контролируемой поверхности характеризующем блеск зеркальных покрытий.

Падающий световой поток I_e можно определить из формулы Френеля [3]

$$I_e = 2 \left[\frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{\sin^2(\varphi + \psi)} + \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi - \psi)}{\operatorname{tg}^2(\varphi + \psi)} \right]^{-1}, \quad (8)$$

где φ — угол падения света;

ψ — угол преломления света ($\sin \psi = \sin \varphi / n$,
 n — показатель преломления).

Определяя световой поток по формуле (8), считаем, что подложка отражает падающие лучи света только с поверхности (т. е. лучи света, прошедшие в подложку, полностью поглощаются). В качестве такой подложки может быть использована черная полированная пластинка инфракрасного стекла ИКС-6 [9], являющаяся эталоном настройки блескомеров. При показателе преломления стекла 1,567 и $\varphi = 45^\circ$ получим $I_r = 0,0598I_e$. При настройке блескомера на $I_r = 65$ усл. ед. получим $I_e = 65/0,0598 = 1085$ усл. ед.

Зная падающий световой поток, можно определить световой поток, отраженный лаковым покрытием. При показателе преломления лакового покрытия $n = 1,56$; $\varphi = 45^\circ$; $I_r = 0,0598I_e$ или при $I_e = 1085$ усл. ед. получим $I_r = 64,06$ усл. ед.

Подставив числовые значения I_r и I_e (для лакового покрытия и $\varphi = 45^\circ$) в (7), получим

$$I_{45} = 64,06 + 960\rho. \quad (9)$$

Физический смысл формулы (9) заключается в том, что при поглощающей подложке прибором будут фиксироваться только лучи света, отраженные поверхностью лакового покрытия. При $\rho = 0$ прибор будет фиксировать световой поток, равный 64,06 усл. ед. (для зеркальных лаковых покрытий с $n = 1,56$).

Используя формулы (7) и (8), аналогичные зависимости, можно получить для углов падения света 20, 60, 75, 80 и 85° :

$$I_{20} = 63,58 + 1243\rho, \quad (10)$$

$$I_{60} = 64,35 + 527\rho, \quad (11)$$

$$I_{75} = 64,51 + 133\rho, \quad (12)$$

$$I_{80} = 64,63 + 59\rho, \quad (13)$$

$$I_{85} = 64,95 + 15\rho. \quad (14)$$

Зависимости (9) — (14) оценивают общий световой поток, отраженный контролируемой поверхностью при различных углах падения-отражения света. Первый член уравнений характеризует световой поток, отраженный от поверхности покрытия. Второй член уравнения оценивает световой поток, отраженный от подложки. Чем больше коэффициент отражения света поверхностью подложки, тем больше ее светлота, тем значительнее доля светового потока, отраженного от ее поверхности [10].

Углы падения-отражения света 20, 45, 60, 75, 80 и 85° были выбраны для анализа не случайно, так как в отечественных и зарубежных блескомерах оценка блеска технических поверхностей, в том числе и лаковых покрытий на древесине, производится при этих условиях.

Оценим влияние на показания блескомеров при указанных углах падения-отражения света световых потоков, отраженных как от покрытия, так и от подложки.

Коэффициент отражения света поверхностью древесины в большей степени зависит от диффузного отражения света. Световой поток, проходящий через границу раздела воздух — лаковое покрытие для $\varphi = 45^\circ$ составляет 94,12 % ($100 - 5,88$) светового потока, падающего на поверхность. Если принять показатели преломления лакового покрытия и древесины соответственно 1,56 и 1,52 [11, 2], угол падения света на поверхность древесины под покрытием составит $26^\circ 53'$. По формуле (8) определим количество света, направленно отраженного поверхностью подложки (древесины). Оно равно 0,0241 % падающего света, т. е. незначительно и не будет оказывать влияние на показания блескомера. Количество света, направленно отраженного древесиной под лаковым покрытием, для угла падения света $\varphi = 60^\circ$ составит 0,0233 % падающего света, такое количество также незначительно и не будет оказывать влияние на показания блескомеров (угол падения света на поверхность древесины под покрытием равен $33^\circ 42'$).

То же наблюдается при углах падения света 20, 75, 80, 85° .

Однако практика показывает, что на светлых подложках влияние светового потока, прошедшего лаковое покрытие и отраженного древесиной, существенно и достигает 10 % [8, 10] светового потока, фиксируемого прибором. Увеличение отражательной способности подложки объясняется тем, что воздух между полостями клеток не полностью вытесняется лаком и отражение света происходит от границы раздела древесина-воздух. Наличие анатомических неровностей и шероховатости поверхности древесины будет также способствовать возрастанию отраженного светового потока за счет увеличения угла отражения света от наклонных микроплощадок поверхности древесины [10].

Если принять угол отражения света от поверхности древесины под покрытием равным 30° (при угле падения света 45° он равен $26^\circ 53'$, при 60° — $30^\circ 42'$), считая, что свет отражается от границы древесина — воздух, то по формуле (8) интенсивность света отраженного древесиной при углах падения 45 и 60° составит 4,42 %.

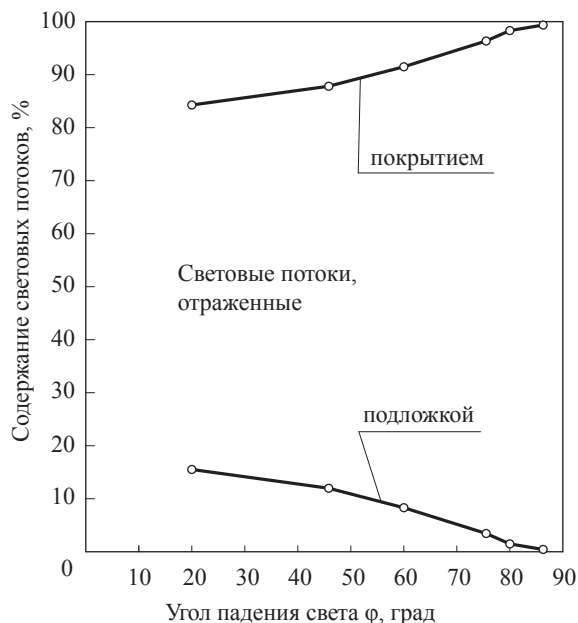


Рис. 1. Зависимость световых потоков, отраженных покрытием и подложкой, от угла падения света

Fig. 1. The dependence of the reflected light fluxes on the coated substrate and the angle of incidence

Для угла падения света 20° интенсивность света, отраженного древесиной, составит 4,2 %, а для углов 75, 80 и 85° — 4,8 %.

Еще одним доказательством полученного вывода является использование полученных зависимостей (9) — (14). Если принять коэффициент отражения света древесной подложкой $\rho = 0,01$ (1 %), можно определить влияние световых потоков, отраженных покрытием и подложкой, в общем потоке, отраженном контролируемой поверхностью. На рис. 1 приведены графики зависимости влияния световых потоков, отраженных покрытием и подложкой от угла падения света.

Приведенные графики подтверждают практические выводы о 10 % влиянии светлоты подложки на показания блескомеров при определении блеска под углом падения света 20, 45 и 60°. При дальнейшем увеличении угла падения света влияние светлоты подложки на показания приборов становятся незначительными, достигая значения 1...2 % при углах 80 и 85°.

На рис. 2 приведены графики зависимости блеска покрытия от среднего арифметического отклонения профиля (Ra) контролируемой поверхности при различном угле падения-отражения света (см. формулу (4)). Чем больше значение параметра Ra на поверхности, тем больше влияние неровностей на снижение блеска покрытий [12]. Это существенное влияние наблюда-

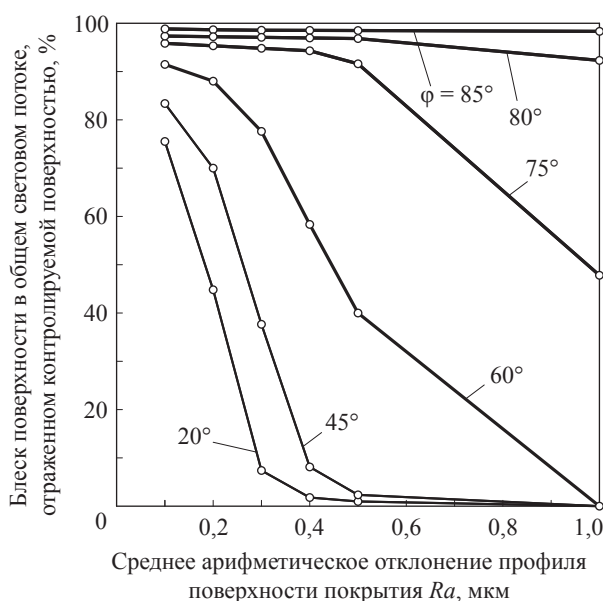


Рис. 2. Зависимость блеска покрытия от среднего арифметического отклонения профиля поверхности покрытия при различных углах падения-отражения света

Fig. 2. The dependence of gloss coating deviations on the average surface coverage profile at different angle of incidence and light reflection

ется при углах падения-отражения света 20, 45 и 60°.

На рис. 3 показаны зависимости блеска покрытий от коэффициента отражения света древесиной, построенные по формуле (4) при $d = 0$ и $\tau^{2H} = 1,0$ для различных углов падения-отражения света. Серия графиков построена для различных значений Ra (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 1,0 мкм). Значения блеска покрытий приведены для блескомеров с углом падения-отражения света 20, 45, 60, 75, 80 и 85°.

Влияние светлоты подложки (ρ) на показания блескомеров для покрытий с шероховатой поверхностью, т. е. глянцевых и матовых, остается таким же, как и для зеркальных покрытий, но доля светового потока, отраженного поверхностью древесины, становится значительно больше по сравнению со световым потоком, отраженным лаковым покрытием. Так, при $Ra = 0,3$ мкм процентное соотношение светового потока, отраженного древесиной и покрытием, составит соответственно 92 и 8 % при угле падения света 20°. Значение коэффициента отражения света древесиной принято 1 %. Для тех же значений при угле падения света 45° соотношения световых потоков отраженных древесиной и покрытием составляет соответственно 62 и 38 %. Так, увеличение Ra с 0,3 до 0,5 мкм при угле падения света 45° снижает световой поток, отраженный покрытием, примерно в 40 раз. Для угла

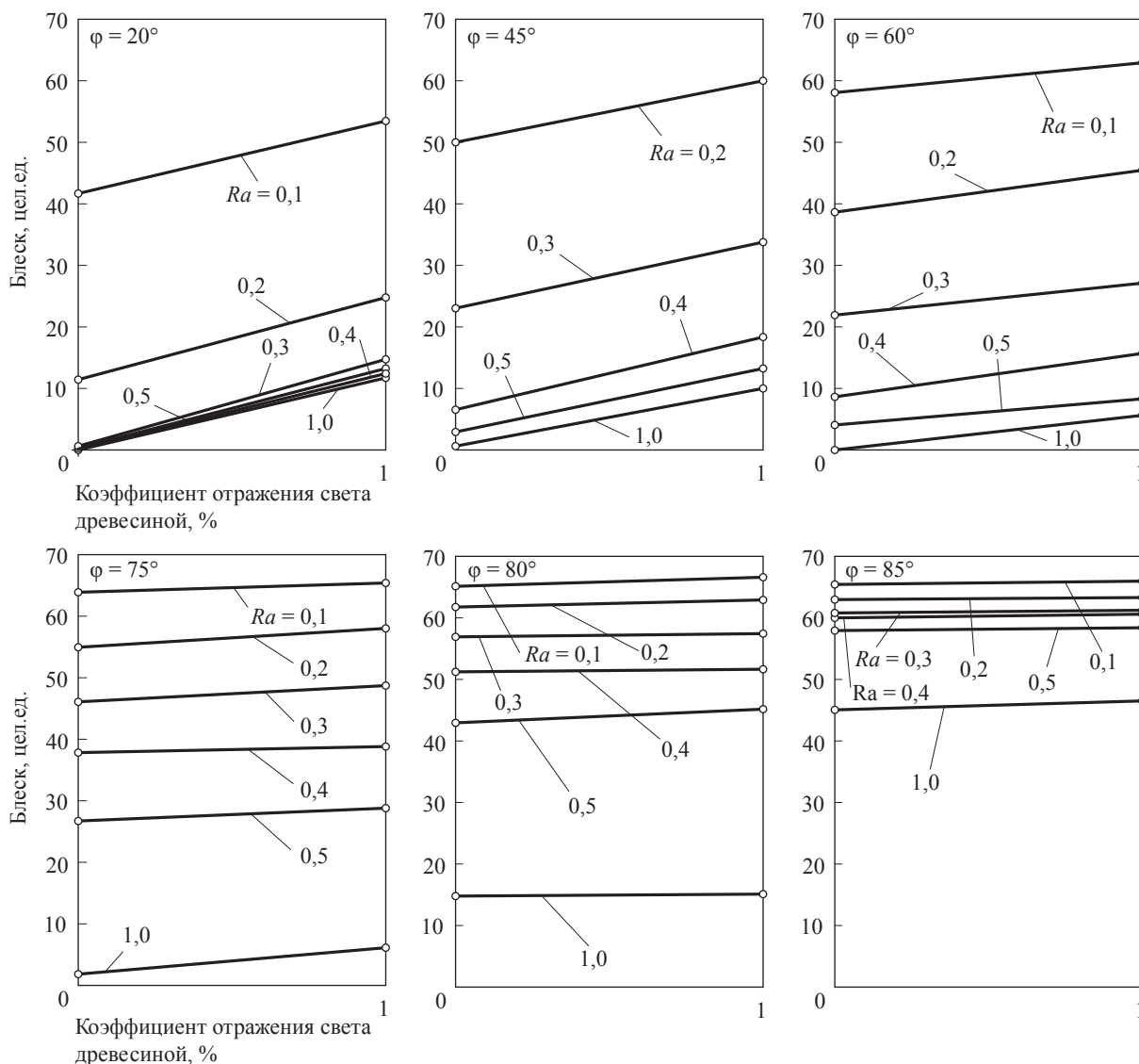


Рис. 3. Зависимость блеска покрытий от коэффициента отражения света древесиной при различных углах падения-отражения света φ
Fig. 3. The dependence of coating gloss on wood light reflectance at different angles of incidence and light reflection φ

60° увеличение Ra в тех же пределах примерно в 2,5 раза снижает световой поток, отраженный покрытием.

Приведенный анализ математической модели отражения света различными защитно-декоративными покрытиями на древесине подтвердил влияние светлоты подложки и шероховатости покрытий на блеск контролируемых поверхностей при использовании блескомеров с различными углами падения-отражения света. Результаты работы могут быть использованы для обоснования условий оценки блеска различных защитно-декоративных покрытий на древесине.

Выводы

1. Условное деление прозрачных лаковых покрытий по характеру отражения света на зер-

кальные, глянцевые и матовые отвечает практике оценки качества внешнего вида контролируемых поверхностей защитно-декоративных покрытий на древесине.

2. Представленная математическая модель отражения света различными защитно-декоративными покрытиями на древесине достаточно наглядно характеризует световые потоки, отраженные поверхностью покрытия и подложки.

3. При оценке блеска зеркальных, глянцевых и матовых покрытий на показания блескомеров существенное влияние оказывает светлота подложки (древесины).

4. Влияние светлоты подложки на показание блескомеров для покрытий с шероховатой поверхностью остается таким же, как и для зеркальных покрытий, но доля светового потока, отра-

женного поверхностью древесины, становится значительно больше по сравнению со световым потоком, отраженным лаковым покрытием.

5. С увеличением угла падения-отражения света доля светового потока, вносимая подложкой в показания блескомера, уменьшается, но является существенной при оценке блеска контролируемой поверхности.

6. Математическая модель надежно описывает влияние высоты неровностей на блеск защитно-декоративных покрытий на древесине. Чем больше шероховатость контролируемой поверхности, тем больше снижение блеска покрытия. Это существенно при углах падения-отражения света 20, 45 и 60°.

Список литературы

- [1] Буглай Б.М., Рыбин Б.М. О методах оценки блеска матированных покрытий // *Деревообрабатывающая промышленность*, 1981. № 10. С. 2–5.
- [2] Рыбин Б.М. Технология и оборудование защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов: учебник для вузов. М.: МГУЛ, 2007. 508 с.
- [3] Мешков В.В. Основы светотехники. Ч. 1. М.: Энергия, 1979. 367 с.
- [4] Топорец А.С. Зеркальное отражение от шероховатой поверхности // *Оптика и спектроскопия*, 1964. Т. 16. Вып. 1. С. 102.
- [5] Топорец А.С. Зеркальное отражение от зеркальной поверхности // *Оптика и спектроскопия*, 1968. Т. 24. Вып. 1. С. 128–131.
- [6] Топорец А.С. Фотометрический метод определения средней высоты микронеровностей шероховатой поверхности // *Оптико-механическая промышленность*, 1969. № 6. С. 60–64.
- [7] Лукьянов В.С., Рудзит Я.А. Параметры шероховатости. М.: Издательство стандартов, 1979. 162 с.
- [8] Рыбин Б.М. Исследование влияния светлоты подложки на показания прибора ФБ-2 при оценке блеска зеркальных лаковых покрытий // *Сб. науч. тр. МЛТИ*, 1982. Вып. 140. С. 39–42.
- [9] Мельников Ю.Ф. Светотехнические материалы: учеб. пособие для техникумов. М.: Высш. шк., 1978. 151 с.
- [10] Рыбин Б.М. Оценка блеска прозрачных лаковых покрытий // *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 1990. № 6. С. 53–58.
- [11] Рыбин Б.М., Жуков Е.В. Метод определения показателя преломления прозрачных лаковых покрытий // *Деревообрабатывающая промышленность*, 1984. № 7. С. 9–10.
- [12] Рыбин Б.М. Оценка блеска матированных лаковых покрытий фотозлектрическими блескомерами // *Сб. науч. тр. МЛТИ*, 1983. Вып. 149. С. 52–55.

Сведения об авторах

Рыбин Борис Матвеевич — д-р техн. наук, профессор кафедры древесиноведения и технологии деревообработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: rybin@mgul.ac.ru

Завражнова Ирина Анатольевна — старший преподаватель кафедры древесиноведения и технологии деревообработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: zavrazhnova@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 22.12.2016 г.

ESTIMATION OF GLOSS OF TRANSPARENT LAQUER COATING ON WOOD

B.M. Rybin, I.A. Zavrazhnova

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

rybin@mgul.ac.ru

Gloss is one of the decorative characteristics of transparent coatings on wood. In practice, according to the reflection (gloss) characteristics all wood coatings are divided into high-luster, glossy and matte-finished. High-luster coatings create images of the surrounding objects without any distortion, because such coatings have a smooth surface with the ribbing height which is comparable with half the wavelength of visible light. Matte finish diffusely reflects light rays. This is due to the fact that the surface of such coatings has man-made roughness produced with special tools. The intermediate region belongs to glossy coatings which are not subject to special measures to obtain specular or diffuse reflection of light. Such coatings give an image of the surrounding objects more or less distorted. To assess the gloss of coatings some glossmeters with different incidence angles of light reflection (20°, 45°, 60°, 75°, 80° and 85°) have been used. Such a variety of glossmeters is due to the fact that their readings can be influenced by a number of factors in addition to the light rays reflected by the coating. One of them covers rays of light reflected by wood which are added to rays of light from the coating and, thereby, this results in an error in a controlled measure of gloss. A mathematical model of light reflection of different protective and decorative coatings on wood allowed us to estimate the proportion of the light fluxes picked up by glossmeters from the surface of the coating and the surface of the wood. It has been found that while assessing high-luster, glossy and matte-finished surfaces the glossmeter readings were significantly influenced by the wood colour. Its influence on the glossmeter readings

for a coating with a rough surface (matte) remains the same as for the high-luster coatings, but the proportion of the light flux reflected by the wood surface increases as compared to the light flux reflected by lacquer finish if the wood colour is fair. It has been discovered that as the incidence and reflex angle increases, the proportion of the luminous flux made by the wood substrate in the glossmeter readings decreases, but it is still significant in the evaluation of the controlled surface gloss. The research results can be used to substantiate certain conditions of assessing the gloss of various protective and decorative coatings on wood.

Keywords: glitter coatings, the lightness of the wood surface, the surface roughness of the coating.

Suggested citation: Rybin B.M., Zavrzhnova I.A. *K voprosu otsenki bleska prozrachnykh lakovykh pokrytiy na drevesine* [Estimation of gloss transparent lacquer coating on wood]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 77–83. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-77-83

References

- [1] Buglay B.M., Rybin B.M. *O metodakh otsenki bleska matirovannykh pokrytiy* [Methods for assessing the glitter frosted coatings], Moscow: Wood industry Publ., 1981, no 10, pp. 2-5. (in Russian)
- [2] Rybin B.M. *Tekhnologiya i oborudovanie zashchitno-dekorativnykh pokrytiy drevesiny i drevesnykh materialov* [Technology and equipment of protective and decorative coatings of wood and wood-based materials], Moscow: MSFU Publ., 2007, 508 p. (in Russian)
- [3] Meshkov V.V. *Osnovy svetotekhniki* [Fundamentals of lighting]. Moscow: Energy Publ., 1979, P. I, 367 p. (in Russian)
- [4] Toporets A.S. *Zerkal'noe otrazhenie ot sherokhovatoy poverkhnosti* [Specular reflection from rough surfaces] *Optics and spectroscopy*, T. 16. vol. 1. 1964. pp. 102. (in Russian)
- [5] Toporets A.S. *Zerkal'noe otrazhenie ot zerkal'noy poverkhnosti* [Specular reflection from the mirror surface] *Optics and spectroscopy*, T. 24. vol. 1. 1968. pp. 128-131. (in Russian)
- [6] Toporets A.S. *Fotometricheskii metod opredeleniya sredney vysoty mikronerovnostey sherokhovatoy poverkhnosti* [Photometric method for the determination of the average height of asperities of rough surface] *Optomechanical industry*, 1969, no 6, p. 60-64. (in Russian)
- [7] Luk'yanov V.S., Rudzit Ya.A. *Parametry sherokhovatosti* [Roughness parameters] Publishing house of standards, 1979, 162 p. (in Russian)
- [8] Rybin B.M. *Issledovanie vliyaniya svetloty podlozhki na pokazaniya pribora FB-2 pri otsenke bleska zerkal'nykh lakovykh pokrytiy* [Investigation of the effect of the lightness of the substrate on the readings of FB-2 in the evaluation of gloss mirrored lacquer coatings], Collection of scientific works MLTI, 1982, v. 140, pp. 39-42. (in Russian)
- [9] Melnikov Y. F. *Svetotekhnicheskie materialy* [Lighting materials] / Y. F. Melnikov // textbook for technical schools. Moscow: Higher school Publ., 1978, 151 p. (in Russian)
- [10] Rybin B.M. *Otsenka bleska prozrachnykh lakovykh pokrytiy* [Evaluation of gloss transparent lacquer coating] *News of higher educational institutions. Forestry journal*, 1990, no. 6, pp. 53-58. (in Russian)
- [11] Rybin B.M., Zhukov E.V. *Metod opredeleniya pokazatelya prelomleniya prozrachnykh lakovykh pokrytiy* [Method for the determination of refractive index of transparent varnish coatings] *Wood industry*, 1984, no. 7, pp. 9-10. (in Russian)
- [12] Rybin B.M. *Otsenka bleska matirovannykh lakovykh pokrytiy fotoelektricheskimi bleskometerami* [Evaluation of Shine Matt varnish coatings photovoltaic blastomere] Collection of scientific works MLTI, 1983, v. 149, pp. 52-55. (in Russian)

Author's information

Rybin Boris Matveevich — Dr. Sci. (Tech.), Prof. Department of Wood-and Wood Technology BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: rybin@mgul.ac.ru

Zavrzhnova Irina Anatol'evna — Senior Lecturer Department of Wood-and Wood Technology, BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: zavrzhnova@mgul.ac.ru

Received 22.12.2016

УДК 662.638

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-84-87

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕТУЛИНСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ОКОРКИ ДРЕВЕСИНЫ В КАЧЕСТВЕ КОМПЛЕКСНОГО СОРБЕНТА

Г.Н. Кононов¹, А.В. Кудряшов¹, А.Н. Веревкин¹, Ю.В. Сердюкова¹, К.Л. Косарев²

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

² ООО «Биовет-фермент», 117570, г. Москва, ул. Днепропетровская, 18 Б

verevkin@mgul.ac.ru

В процессе переработки на целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих предприятиях образуется большое количество березовой коры. Содержание коры составляет примерно 12,5 % массы древесины. По анатомическому строению березовая кора разделяется на две зоны: внутренний слой, непосредственно примыкающий к камбию, состоящий в основном из ситовидных элементов (луб), и наружный слой, выполняющий защитную функцию (береста). Внутренний и наружный слои коры, имеющие различное функциональное назначение и строение, существенно отличаются друг от друга и по химическому составу. Эти слои значительно различаются количественным содержанием углеводной части, представляющей собой комплекс полисахаридов (целлюлоза, гексозаны, пентозаны), а также ароматической части (лигнин). Наиболее богат экстрактивными веществами наружный слой коры — береста, в экстрактах которой преобладают пентациклические тритерпеноиды ряда лупана и β-амирина; их смесь называется бетулином, а основным компонентом является бетулинол. Березовая кора содержит смесь сложных полиэфиров, содержащих высокомолекулярные жирные кислоты и гидроксикислоты, называемую суберином. Бетулин и его производные проявляют широкий спектр биологической активности. Суберин и протолигнин вследствие полифункциональности и развитой поверхности обладают хемосорбционными свойствами, а резервные питательные вещества, которые накапливаются в лубе в виде низкомолекулярных сахаров, белков и жиров, представляют интерес как источник питательных веществ. В работе рассмотрены анатомические особенности строения коры березы. Выработаны предложения по использованию коры березы в качестве основы биологически активного комплексного сорбента широкого спектра действия, в котором активным компонентом будут выступать бетулин и протолигнин.

Ключевые слова: кора березы, бетулин, суберин, протолигнин, сорбент

Ссылка для цитирования: Перспективы использования бетулинсодержащих отходов окорки древесины в качестве комплексного сорбента / Кононов Г.Н., Кудряшов А.В., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Косарев К.Л. // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 84–87. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-84-87

Береза — одно из наиболее распространенных древесных растений в лесах Сибири и европейской части России [1]. В процессе переработки на целлюлозно-бумажных и деревообрабатывающих предприятиях образуется большое количество березовой коры. Содержание коры составляет примерно 12,5 % массы древесины [2].

По анатомическому строению березовая кора разделяется на две зоны (рис. 1): внутренний слой (луб) и корковый камбий. Внутренний слой (луб) непосредственно примыкает к камбию и состоит в основном из ситовидных элементов (проводящая флоэма), выполняющих проводящую функцию воды и питательных веществ от кроны дерева к его корневой системе, и каменистых клеток (непроводящая флоэма), выполняющих механическую функцию. Корковый камбий продуцирует клетки как непроводящей флоэмы, так и наружного слоя коры (бересты) [3, 4].

Береста представляет собой продукт деятельности пробкового камбия. В ней, как и в древесине, наблюдается чередование годичных слоев. Весной пробковый камбий отделяют правильные ряды тонкостенных четырехугольных, широкополостных клеток (4–6 рядов), наполненных мелкозернистым содержимым белого цвета (бетулин); летом же откладывается 2 ряда тол-

стостенных клеток, сильно сплюснутых радиально и практически не имеющих полостей (см. рис. 1). Разрыв между полосками бересты всегда происходит по границе годичного слоя, причем внутренние ряды тонкостенных клеток разрываются и из них высыпается белый кристаллический порошок бетулина (рис. 2) [5].

Внутренний и наружный слои коры имеют различное строение и функциональное назначение. Они отличаются друг от друга и по составу. У них различное количественное содержание холоцеллюлозы — углеводной части коры, представляющей собой комплекс полисахаридов (целлюлоза, гексозаны, пентозаны), а также лигнина — ароматической части коры, состоящей из смеси ароматических высокомолекулярных соединений родственного строения [6].

Наиболее богат экстрактивными веществами наружный слой коры — береста, в экстрактах которой преобладают пентациклические тритерпеноиды ряда лупана и β-амирина, смесь которых называется бетулином, а основным компонентом является бетулинол [7, 8]. В состав березовой коры также входит суберин — смесь сложных полиэфиров, содержащих высокомолекулярные жирные кислоты и гидроксикислоты. Содержание суберина в бересте коры березы составляет

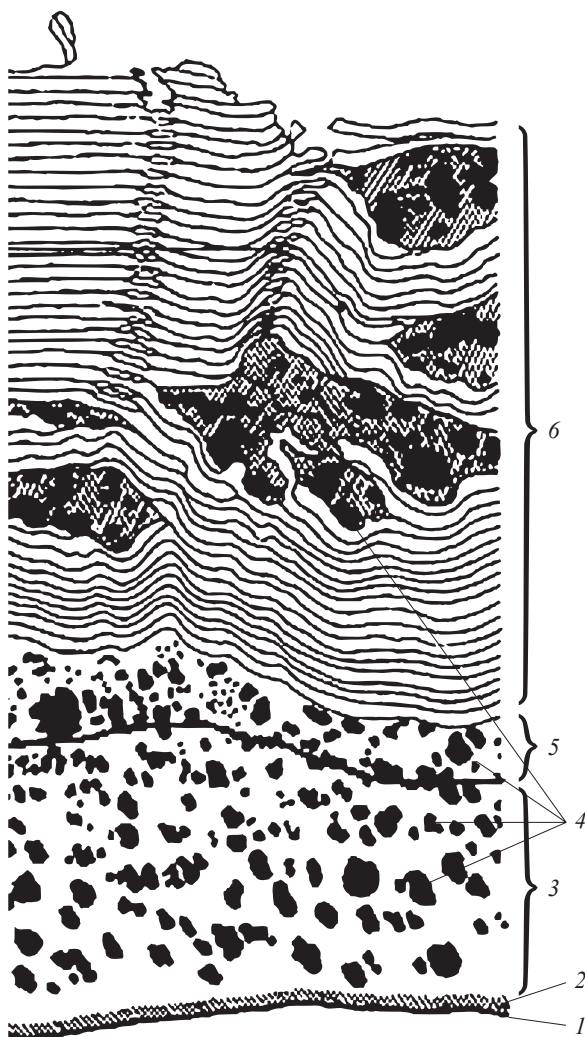


Рис.1. Поперечный разрез коры березы: 1 — камбий; 2 — проводящая флоэма; 3 — непроводящая флоэма; 4 — каменистые клетки; 5 — пробковый камбий; 6 — годовичные слои бересты [4]

Fig. 1. Cross section of birch bark: 1 — a cambium, 2 — a conductive floema, 3 — a nonconductive floema, 4 — stony cages, 5 — pith cambium, 6 — annual layers of birch bark [4]

от 20 до 30 %. Суберин локализуется преимущественно в каменистых клетках коры березы. В связи с тем что выделить его в чистом виде из ткани коры без разрушения указанных полиэфиров не представляется возможным, часто суберином называют соли кислот, образующиеся при его выделении спиртовыми растворами щелочей. С «химической» точки зрения это совершенно разные вещества: суберин — полиэфир (полиэстолид), а кислоты (или их соли) — смесь элементарных компонентов, из которых построен полиэфир суберин. Поэтому кислоты, получаемые при омылении суберина, более корректно называть субериновыми кислотами, а не суберином [7].

Бетулин и его производные проявляют широкий спектр биологической активности (противо-

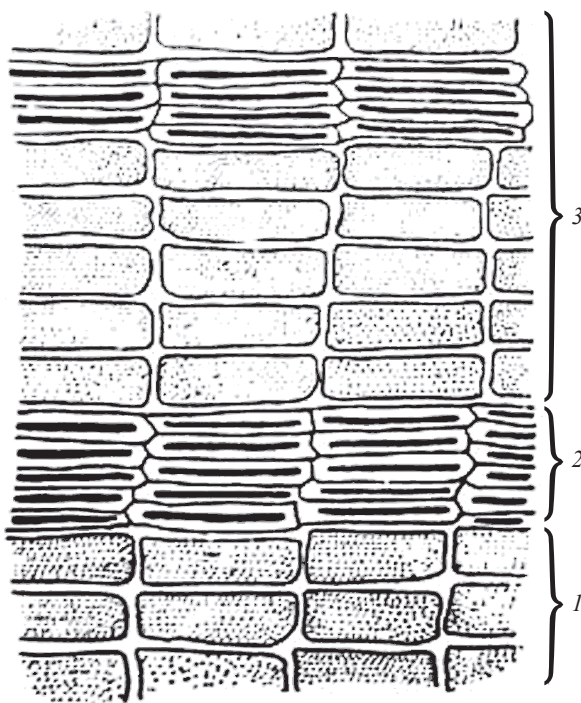


Рис. 2. Поперечный разрез наружного слоя коры березы — бересты: 1 — тонкостенные клетки, содержащие бетулин; 2 — толстостенные клетки; 3 — годовичный слой бересты [5]

Fig. 2. A cross section of the skin of birch bark: 1 — the thin-walled cells containing betulin, 2 — thick-walled cells, 3 — annual layer of birch bark [5]

вирусную, противоязвенную, противоопухолевую, капилляроукрепляющую и т. д.). Суберин и протолигнин вследствие полифункциональности и развитой поверхности обладают хемосорбционными свойствами, а резервные питательные вещества, которые накапливаются в лубе в виде низкомолекулярных сахаров, белков и жиров, представляют интерес как источник питательных веществ. Химический состав коры березы представлен в таблице.

По мнению авторов, кора березы, с ее естественным компонентным составом и при условии дополнительной механохимической активации, может быть с успехом применена в качестве основы биологически активного комплексного сорбента.

Отделение луба от бересты технологически осуществимо, что делает возможным как совместную, так и отдельную переработку частей коры с получением ряда ценных продуктов [10].

Проводились исследования по разработке комплексного сорбента с использованием бетулина в качестве активного компонента для использования его в качестве кормовой добавки для сельскохозяйственных животных. В 2014 г. был проведен ряд сертификационных испытаний, необходимых для последующей регистра-

Т а б л и ц а

Химический состав коры березы (% от массы исходного сухого сырья) [9]
The chemical composition of the birch bark (% by weight of dry original crude materials) [9]

№	Компонентный состав	Состав коры березы	
		Береста	Кора без бересты
1	Целлюлоза	1,17	20,47
2	Гексозаны	2,16	25,98
3	Пентозаны (без уроновых кислот)	2,72	21,52
4	Лигнин	10,87	25,50
5	Уроновые кислоты	0,32	8,25
6	Суберин	39,48	—
7	Азотсодержащие вещества (в пересчете на белок N x 6,25)	2,62	4,00
8	Вещества, экстрагируемые водой при 20 °С	1,42	4,70
9	Вещества, экстрагируемые этанолом	32,28	2,13
10	Зольные вещества	0,26	1,09

ции разработанной кормовой добавки на территории России. В их число, согласно регламенту Россельхознадзора России, вошли следующие испытания: токсикологические, кормовые, испытания на стабильность состава.

Результаты исследований говорят о положительном влиянии кормовой добавки на продуктивность и биологическую активность сельскохозяйственных животных, без отрицательного влияния на биохимические показатели крови и иммунный статус организма. Введение полученной кормовой добавки обеспечивает хорошую усвояемость питательных веществ корма и повышение содержания общего белка и его фракций, а также увеличивает содержание гемоглобина в крови.

По результатам успешных сертификационных испытаний продукт проходит регистрацию в Россельхознадзоре.

Список литературы

[1] Черняева Г.Н., Долгодворова С.Я., Бондаренко С.М. Экстрактивные вещества березы. Красноярск: Институт леса и древесины АН СССР, 1986. 123 с.

- [2] Веселов А.А. Использование древесных отходов фанерного и спичечного производств. М.: Лесная промышленность, 1987. 160 с.
- [3] Кононов Г.Н. Химия древесины и ее основных компонентов: учеб. пособие для студентов специальностей 260200, 260300. М.: МГУЛ, 2002. 259 с.
- [4] Коровин В.В. Структурные особенности коры березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) // Научные доклады высшей школы. Биологические науки, 1970. № 11. С. 55–60.
- [5] Перельгин Л.М. Строение древесины. М.: АН СССР, 1954. 200 с.
- [6] Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров: учебник для вузов. СПб.: СПбГЛТА, 1999. 628 с.
- [7] Кислицын А.Н. Экстрактивные вещества бересты: выделение, состав, применение. Обзор // Химия древесины, 1994. № 3. С. 3–28.
- [8] Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонович А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы: учеб. пособие для вузов. М.: Экология, 1991. 320 с.
- [9] Шарков В.И. Количественный химический анализ растительного сырья. М.: Лесная промышленность, 1976. 72 с.
- [10] Воскресенский В.Е. Обоснование эффективной технологии и параметров оборудования для разделения березовой коры на компоненты. Дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.05. СПб., 1998. 351 с.

Сведения об авторах

Кононов Георгий Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры химии МГТУ им. Н.Э. Баумана, чл.-корр. РАЕН, ученый секретарь секции «Химия и химическая технология древесины» РХО им. Д.И. Менделеева, e-mail: verevkin@mgul.ac.ru

Кудряшов Антон Владимирович — аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: verevkin@mgul.ac.ru

Веревкин Алексей Николаевич — канд. хим. наук, доцент кафедры химии МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: verevkin@mgul.ac.ru

Сердюкова Юлия Владимировна — доцент кафедры химии МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: verevkin@mgul.ac.ru

Косарев Константин Леонидович — канд. техн. наук, инженер-технолог ООО «Биовет-фермент», e-mail: verevkin@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 17.11.2016 г.

PPROSPECTS OF USING THE BETULIN CONTAINING WOOD DEBARKING WASTE AS A COMPLEX SORBENT

G.N. Kononov ¹, A.V. Kudryashov ¹, A.N. Verevkin ¹, Yu.V. Serdyukova ¹, K.L. Kosarev ²

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

² ООО «Biovet-ferment», st. Dnepropetrovskaya, 18 B, Moscow, 117570, Russia

verevkin@mgul.ac.ru

During the recycling process all pulp, paper-making and wood-processing enterprises produce enormous amount of birch bark. Bark content is about 12.5 % by weight of the wood. As far as its anatomical structure is concerned, birch bark is divided into two zones: the inner layer (bast), directly adjoining the cambium and mainly consisting of sieve elements, and the outer layer, performing the protective function (birch bark). The inner and outer layers of birch bark, which have distinctive functional purpose and structure, differ significantly from each other in chemical composition. These layers are significantly different in quantitative content of the carbohydrate part, containing complex polysaccharides (cellulose, hexosans, pentosans), and that of the aromatic part (lignin). It is also important to note that the outer layer of birch bark is the most rich one in extraneous substances which are found in the extracts with dominating pentacyclic triterpenoids of a variety of lupane and β -amyrin, this mixture being called betulin with the main component that is betulinol. In addition, birch bark contains a mixture of polyester resins, including the high molecular fatty acids and hydroxyacids, this mixture being called suberin. Betulin and its derivatives exhibit a broad spectrum of biological activity. Suberin and protolignin due to their multi-functionality and well-developed surface possess chemisorption properties, and reserved nutrients that accumulate in the phloem in the form of low molecular weight sugars, proteins and fats, are of great interest as a source of nutrients. In this paper the anatomical features of the birch bark structure have been discussed, and a lot of research has been carried out; the above research can result in suggesting the use of birch bark as the basis of a biologically active complex sorbent with a broad operational range in which the active component will be betulin and protolignin.

Keywords: birch bark, betulin, suberin, protolignin, sorbent

Suggested citation: Kononov G.N., Kudryashov A.V., Verevkin A.N., Serdyukova Yu.V., Kosarev K.L. *Perspektivy ispol'zovaniya betulinsoderzhashchikh otkhodov okorki drevesiny v kachestve kompleksnogo sorbenta* [Prospects of using the betulin containing wood debarking waste as a complex sorbent]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, № 1, pp. 84–87. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-84-87

References

- [1] Chernyaeva G.N., Dolgodvorova S.Ya., Bondarenko S.M. *Ekstraktivnye veshchestva berezy* [Birch extractives]. Krasnoyarsk: Institute of forest and wood AS USSR Publ., 1986, 123 p. (in Russian)
- [2] Veselov A.A. *Ispol'zovanie drevesnykh otkhodov fanernogo i spichechnogo proizvodstv* [The use of wood waste of plywood and match industries]. Moscow: Forest industry Publ., 1987, 160 p. (in Russian)
- [3] Kononov G.N. *Khimiya drevesiny i ee osnovnykh komponentov: Uchebnoe posobie dlya studentov spetsial'nostey 260200, 260300* [Wood chemistry and its main components: a textbook for students majoring in 260200, 260300]. Moscow: MSFU Publ., 2002, 259 p. (in Russian)
- [4] Korovin V.V. *Strukturnye osobennosti kory berezy pushistoy* (*Betula pubescens* Ehrh.) [Structural features of the bark birch (*Betula pubescens* Ehrh.)]. *Nauchnye doklady vysshey shkoly. Biologicheskie nauki* [Scientific reports of high school. Biological sciences.], 1970, no. 11, pp. 55–60. (in Russian)
- [5] Pereygin L.M. *Stroenie drevesiny* [Wood structure]. Moscow: AS USSR Publ., 1954, 200 p. (in Russian)
- [6] Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaya A.V. *Khimiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Chemistry of wood and synthetic polymers]. St. Petersburg: SPbFTA Publ., 1999, 628 p. (in Russian)
- [7] Kislitsyn A.N. *Ekstraktivnye veshchestva berezy: vydelenie, sostav, primenenie. Obzor* [Birch bark extractives: isolation, structure and application. Overview] *Khimiya drevesiny*. [Wood chemistry], 1994, no. 3, pp. 3-28. (in Russian)
- [8] Obolenskaya A.V., El'nitskaya Z.P., Leonovich A.A. *Laboratornye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy* [Laboratory works on chemistry of wood and cellulose] Moscow: Ecology Publ., 1991, 320 p. (in Russian)
- [9] Sharkov V.I. *Kolichestvennyy khimicheskiy analiz rastitel'nogo syr'ya* [Quantitative chemical analysis of plant raw materials] Moscow, Forest industry Publ., 1976, 72 p. (in Russian)
- [10] Voskresenskiy V.E. *Obosnovanie effektivnoy tekhnologii i parametrov oborudovaniya dlya razdeleniya berezovoy kory na komponenty* Diss. dokt. tekhn. nauk [Justification efficient technology and equipment parameters for the separation of components on a birch bark. Dr. tech. sci. diss.] St.-Petersburg, 1998, 351 p. (in Russian)

Author's information

Kononov Georgiy Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of Department of Chemistry BMSTU, 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, e-mail: verevkin@mgul.ac.ru

Kudryashov Anton Vladimirovich — pg. of BMSTU, e-mail: verevkin@mgul.ac.ru

Verevkin Alexey Nikolaevich — Cand. Sci. (Chemistry), Assoc. Prof. of Department of Chemistry BMSTU, e-mail: verevkin@mgul.ac.ru

Serdyukova Yulia Vladimirovna — Assoc. Prof. of Department of Chemistry MSTU after N.E. Bauman, e-mail: verevkin@mgul.ac.ru

Kosarev Konstantin Leonidovich — Cand. Sci. (Tech.), engineer-technologist of «Biovet-ferment», e-mail: verevkin@mgul.ac.ru

Received 17.11.2016

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ДРЕВЕСНО-СТРУЖЕЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ПНЕВМОСИСТЕМ

В.В. Лозовецкий, А.А. Шадрин, М.В. Кохреидзе, С.А. Катков

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

Представлена модель движения засыпки измельченной древесины и продуктов на ее основе в цилиндроконическом бункере, которая базируется на представлении таких засыпок как некоторой квазиньютоновской жидкости с эффективной вязкостью, зависящей от физико-механических свойств, характерных для материалов такого типа. Получены уравнения, описывающие граничные условия процесса, учитывающие проскальзывание частиц засыпки на стенках цилиндроконического бункера. Предложены универсальные граничные условия, основанные на физико-механических свойствах засыпки измельченной древесины и продуктов на ее основе, позволяющие аналитически описать движение таких сыпучих сред в бункерах с одним центральным разгрузочным отверстием. Предложенная модель существенно снижает затраты на создание надежных систем для транспортировки аналогичных сред, используемых в различных технологических процессах. Описаны экспериментальная установка и методики проведения исследования. Эксперименты проведены на моделях бункеров с одним центральным разгрузочным отверстием с учетом критериев теории подобия позволили получить данные, характеризующие влияние угла наклона конической части бункера, диаметра разгрузочного отверстия и физико-механических свойств засыпки на процесс гравитационного движения измельченной древесины и продуктов на ее основе. Получены формулы скорости проскальзывания древесных частиц в элементах бункера пневмотранспорта, изменения скорости частиц в засыпке на оси и стенках модели бункера на входной и выходной границе. Результаты расчетов процессов, протекающих в исследуемом бункере системы пневмотранспорта, с использованием этого универсального граничного условия для вихревой функции и полученные экспериментальные данные хорошо согласуются между собой, что позволяет проводить сравнительный анализ технико-экономической эффективности различных проектных решений.

Ключевые слова: древесно-стружечные материалы, квазиньютоновская жидкость, коэффициенты внутреннего и внешнего трения, коэффициент кажущейся вязкости, функция тока, вихревая функция

Ссылка для цитирования: Лозовецкий В.В., Шадрин А.А., Кохреидзе М.В., Катков С.А. Экспериментально-аналитические исследования движения древесно-стружечных материалов в элементах пневмосистем // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 88–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-88-94

При проектировании магистралей для перемещения древесно-стружечных материалов, отходов лесозаготовительных и лесопильно-деревоперерабатывающих производств (рубленной массы или щепы, древесных опилок), а также аналогичных им дискретных сред (зерновых, цемента, угля, биомассы и пр.) в элементах пневмосистем: трубопроводах, бункерах, загрузочных воронках — необходимо обеспечить по возможности более равномерное их движение по объему, с тем чтобы предотвратить образование застойных зон в местах перехода от цилиндрической части бункера к конической и сводообразование, приводящее к пробкам, переполнению бункера и нарушению технологического процесса.

В настоящее время практически отсутствуют работы, в которых существующие теоретические модели движения таких сред [1–9] доведены до конкретных результатов расчета. Это затрудняет оценку пригодности моделей для расчета течения указанных сред, проектирование надежно работающих бункеров, так как оценка проводится на основании сравнения результатов расчетов с данными экспериментов.

Экспериментальные исследования [10–12], проведенные в трубопроводах и бункерах осесимметричной формы с одним разгрузочным отверстием и коническим днищем, свидетельствуют о том, что движение в них засыпки, состоящей из элементов различной формы, при соотношении диаметра бункера D и размера элемента дискретной среды, приведенного к диаметру сферы d , $D/d \geq 40$, аналогично движению сплошной среды в ламинарном режиме. Вследствие этого дискретная среда при указанном соотношении может рассматриваться как некая квазиньютоновская жидкость, для описания движения которой может быть использована система уравнений, аналогичных уравнениям Навье — Стокса, с вязкостью, соответствующей кажущейся вязкости сыпучей среды [13–15],

$$\rho_+(W\Delta)W = \rho_+g - \text{grad } p + \mu\Delta^2W, \text{ div } W = 0, \quad (1)$$

где ρ_+ — кажущаяся плотность сыпучей среды;
 W — вектор абсолютной скорости сыпучей среды;
 p — внутреннее давление засыпки;
 μ — кажущаяся вязкость сыпучей среды.

С точки зрения программной реализации это уравнение имеет важное преимущество, поскольку методы его решения хорошо разработаны [16]. В то же время вопрос граничных условий для такого представления дискретной среды остается открытым. Поэтому модель движения засыпки в приближении вязкой несжимаемой жидкости не является формальным повторением существующей в гидродинамике модели.

Запишем уравнение (1) в прямоугольной системе координат:

$$W_x \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_z \frac{\partial W_x}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_x}{\partial z^2} \right),$$

$$W_x \frac{\partial W_z}{\partial x} + W_z \frac{\partial W_z}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 W_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_z}{\partial z^2} \right).$$

Продифференцируем первое уравнение по z , а второе по x , полагая, что $\nu = \mu/\rho = \text{const}$:

$$\frac{\partial W_x}{\partial z} \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_x \frac{\partial^2 W_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial W_z}{\partial z} \frac{\partial W_x}{\partial z} + W_z \frac{\partial^2 W_x}{\partial z^2} =$$

$$= \frac{\partial X}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial z} + \nu \left(\frac{\partial^3 W_x}{\partial x^2 \partial z} + \frac{\partial^3 W_x}{\partial z^3} \right),$$

$$\frac{\partial W_x}{\partial x} \frac{\partial W_z}{\partial x} + W_x \frac{\partial^2 W_z}{\partial x^2} + \frac{\partial W_z}{\partial x} \frac{\partial W_z}{\partial z} + W_z \frac{\partial^2 W_z}{\partial z \partial x} =$$

$$= \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial z \partial x} + \nu \left(\frac{\partial^3 W_z}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 W_z}{\partial z^2 \partial x} \right).$$

Преобразуем левую часть этих уравнений, используя уравнение неразрывности

$$W_x \frac{\partial^2 W_x}{\partial x \partial z} + W_z \frac{\partial^2 W_x}{\partial z^2} =$$

$$= \frac{\partial X}{\partial z} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial z} + \nu \left(\frac{\partial^3 W_x}{\partial x^2 \partial z} + \frac{\partial^3 W_x}{\partial z^3} \right),$$

$$W_x \frac{\partial^2 W_z}{\partial x^2} + W_z \frac{\partial^2 W_z}{\partial z \partial x} =$$

$$= \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p}{\partial z \partial x} + \nu \left(\frac{\partial^3 W_z}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 W_z}{\partial z^2 \partial x} \right).$$

Вычтем из первого уравнения второе и, полагая, что все смешанные производные непрерывны [17], получим

$$W_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial W_x}{\partial z} - \frac{\partial W_z}{\partial x} \right) + W_z \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial W_x}{\partial z} - \frac{\partial W_z}{\partial x} \right) =$$

$$= \nu \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{\partial W_x}{\partial z} - \frac{\partial W_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(\frac{\partial W_x}{\partial z} - \frac{\partial W_z}{\partial x} \right) \right].$$

Данное уравнение можно преобразовать к виду, удобному для интегрирования, введя новые переменные: функцию тока ψ , удовлетворяющую уравнению неразрывности, и вихревую функцию ω , которая имеет вид

$$\omega = \left(\frac{\partial W_x}{\partial z} - \frac{\partial W_z}{\partial x} \right).$$

Окончательно получим следующую систему уравнений с переменными — функцией тока ψ и вихревой функцией ω :

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial z} - \frac{\partial \psi}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial x} = \nu \nabla^2 \omega,$$

$$\nabla^2 \psi = \omega,$$

которая для случая осесимметричного движения может быть представлена в виде

$$\rho_+ r^2 \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\omega}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\omega}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right] =$$

$$= \frac{\partial}{\partial z} \left[r^3 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_+ \omega}{r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[r^3 \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\mu_+ \omega}{r} \right) \right], \quad (2)$$

$$\omega = -\frac{1}{r} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right). \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) имеют второй порядок, и в силу сложности граничных условий, о которых будет сказано ниже, при их решении был использован итерационный алгоритм, основанный на последовательном интегрировании двух связанных уравнений второго порядка для переноса вихря и функции тока. В качестве численной схемы была выбрана так называемая схема, ориентированная «против потока», стабилизирующее влияние которой на вычисление конечных разностей известно [13].

В отличие от вязкой жидкости, для которой скорость на твердой, ограничивающей поток стенке равна нулю, для сыпучей среды это условие не соблюдается. В зависимости от шероховатости поверхности стенки и элементов дискретной среды, что учитывается с помощью коэффициента внешнего трения f_- , скорость проскальзывания этих элементов на вертикальных и наклонных стенках конического бункера может изменяться от нуля до какого-либо конечного значения. Как показали наши исследования, наличие проскальзывания на стенке не приводит к изменению вида уравнения движения, которое может быть использовано и для этого специфического случая движения среды.

На твердой границе (вертикальной и наклонной стенках) значение вихревой функции при решении системы уравнений (2) и (3) задавалось двумя способами.

Так как стенка непроницаема, функция тока на ней $\psi = \text{const}$, что соответствует полному расходу через рассматриваемую область. Для задания вихревой функции ω рассмотрим наиболее общий случай — наклонную стенку, что соответствует коническому днищу. Эти рассуждения

будут справедливы и для вертикальной цилиндрической стенки. Наклонная стенка расположена под углом φ к оси z цилиндрической системы координат r, z (рис. 1).

Прямоугольная сетка в плоскости rOz строится так, чтобы узловые точки лежали на стенке. Из ближайших к наклонной стенке узловых точек проводятся линии нормальные к стенке. В точке N пересечения нормали со стенкой функция тока ψ раскладывается в ряд Тейлора

$$\psi_{ij} = \psi_N + \frac{\partial\psi}{\partial n}\Big|_N \Delta n + \frac{1}{2} \frac{\partial^2\psi}{\partial n^2}\Big|_N \Delta n^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3\psi}{\partial n^3}\Big|_N \Delta n^3 + \dots \quad (4)$$

Производная от функции тока ψ в направлении вектора n определяется выражением

$$\frac{\partial\psi}{\partial n} = \frac{\partial\psi}{\partial r} \cos(n \wedge r) + \frac{\partial\psi}{\partial z} \cos(n \wedge z).$$

С учетом зависимостей для косинусов (см. рис. 1) и функции тока

$$\cos(n \wedge r) = -\cos\varphi; \quad \cos(n \wedge z) = -\sin\varphi;$$

$$\frac{\partial\psi}{\partial r} = rW_z; \quad \frac{\partial\psi}{\partial z} = -rW_r$$

полученное выражение можно представить в таком виде:

$$\frac{\partial\psi}{\partial n} = r(W_r \sin\varphi - W_z \cos\varphi).$$

Произведя ряд подстановок с учетом обозначений, приведенных на рис. 1, получим следующее выражение:

$$\frac{\partial\psi}{\partial n} = r(W_r \sin\varphi - W_z \cos\varphi) = -rW_\tau.$$

В рассматриваемом течении (осесимметричном без закрутки)

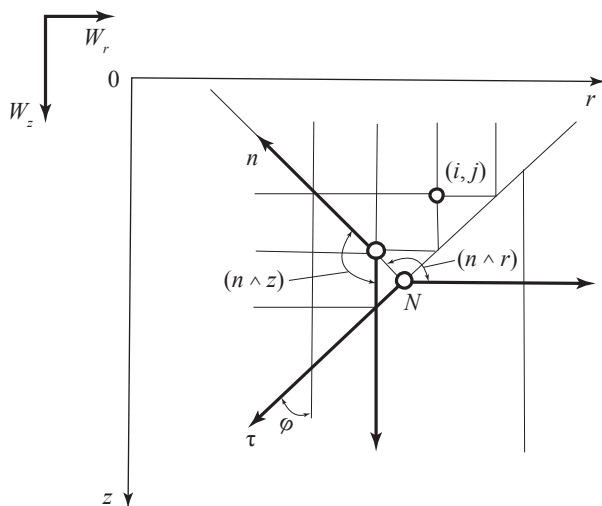


Рис. 1. К определению вихревой функции на наклонной стенке

Fig. 1. To the definition of function on the inclined wall

$$\text{rot}W = e_\theta \left(\frac{\partial W_r}{\partial z} - \frac{\partial W_z}{\partial r} \right)$$

направлен по нормали к плоскости rOz (e_θ — единичный вектор), инвариантен относительно поворота и перемещения начала системы координат в плоскости rOz . Формально это следует из соотношения для преобразования компонентов векторов (в данном случае $\text{rot}W$) в произвольной криволинейной системе координат.

Из инвариантности следует соотношение

$$\omega = \frac{\partial W_r}{\partial z} - \frac{\partial W_z}{\partial r} = \frac{\partial W_\tau}{\partial n} - \frac{\partial W_n}{\partial \tau}.$$

Так как твердая непроницаемая стенка является линией тока,

$$\frac{\partial W_n}{\partial \tau} = 0.$$

Вихрь в точке N можно представить в таком виде

$$\omega_N = \left(\frac{\partial W_\tau}{\partial n} - \frac{\partial W_n}{\partial \tau} \right) \Big|_N = \frac{\partial W_\tau}{\partial n} \Big|_N.$$

Первая и вторая производные от функции тока в формуле (4) равны

$$\frac{\partial\psi}{\partial n} \Big|_N = -r_N W_\tau \Big|_N;$$

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial n^2} \Big|_N = \frac{\partial}{\partial n} (-rW_\tau) \Big|_N = -r_N \frac{\partial W_\tau}{\partial n} \Big|_N = -r_N \omega_N.$$

Третью производную можно представить в таком виде:

$$\frac{\partial^3\psi}{\partial n^3} \Big|_N = \frac{\partial}{\partial n} (-r\omega) \Big|_N = -r_N \frac{(r\omega)_{ij} - (r\omega)_N}{\Delta n} =$$

$$= -\frac{r_N \left(\frac{r_{ij}}{r_N} \omega_{ij} - \omega_N \right)}{\Delta n}.$$

После подстановки этих производных в уравнение (4) и соответствующих преобразований получим выражение для вихревой функции на стенке ω_N , т. е. второе граничное условие

$$\omega_N = -\frac{3(\psi_{ij} - \psi_N)}{r_N \Delta n^2} - \frac{1}{2} \frac{r_{ij}}{r_N} \omega_{ij} - \frac{3W_N^+}{\Delta n},$$

где ψ_{ij} , ω_{ij} — значения функции тока и вихревой функции в узле ij в потоке сыпучей среды;

ψ_N , ω_N — значения функции тока и вихревой функции в точке N на стенке бункера;

r_N — расстояние от оси бункера до точки N на стенке;

W_N^+ — скорость проскальзывания на стенке, отнесенная к средней скорости (см. рис. 1).

В первом случае было получено выражение для вихревой функции с учетом скорости проскальзывания.

При таком задании вихревой функции скорость проскальзывания элементов сыпучей среды на стенке определялась из эмпирических зависимостей, полученных путем обработки опытных данных, одна из которых имеет вид

$$W_N^+ = W_N^+|_{z_+=1} \frac{(d_+ / D)^{1-z_+} (d / D)^{0,02(1-z_+)}}{r_+^3},$$

где $W_N^+|_{z_+=1}$ — относительная скорость проскальзывания элементов дискретной среды на стенке в сечении, соответствующем свободной поверхности дискретной среды (при относительной высоте $z_+ = 1$);

d_+, D, d — диаметры соответственно разгрузочного отверстия, цилиндрической части бункера, элемента дискретной среды;

r_+ — относительный радиус.

Экспериментальная установка для получения таких зависимостей имела бункер, днище которого могло изменять свою геометрию, что позволяло проводить исследования течения продуктов измельченной древесины при порционной и непрерывной выгрузке частиц засыпки, при изменении большого числа параметров в широком диапазоне их варьирования.

Результаты экспериментов на моделях с прозрачными стенками и с центральной прозрачной плоской стенкой показали, что картина движения засыпки практически не изменяется при выгрузке от 100 до 600 частиц в минуту и при $8 \cdot 10^4$ частиц в минуту. Это соответствует свободному истечению частиц из разгрузочного отверстия под действием силы тяжести.

Экспериментальные исследования, проведенные в бункере с одним разгрузочным отверстием и соотношением основных размеров $D/d_+ = 4,0; 5,0; 6,66; D/d \approx 40; 55$ с углом наклона конической части $\alpha = 30; 45; 60^\circ$ при движении элементов древесных материалов с эквивалентным диаметром $d = 7,2 \cdot 10^{-3}$ м и $10,2 \cdot 10^{-3}$ м, показали, что $W_N^+|_{z_+=1}$ линейно зависит от коэффициента внешнего трения f_- в достаточно широком диапазоне его изменения и определяется выражением

$$W_N^+|_{z_+=1} = 1 - 1,335 f_-.$$

Так как стенка непроницаема, функция тока $\psi_N = 1$, что соответствует полному расходу через рассматриваемую область.

На входной границе задавалось распределение скорости (рис. 2), соответствующее физико-механическим свойствам засыпки сферических элементов, которое может быть описано следующей эмпирической зависимостью

$$W(r_+)|_{z_+=1} = A(f_+)(W_{\max}^+ - W_N^+|_{z_+=1})(1 - r_+^2) + W_N^+|_{z_+=1}$$

где $r_+ = 2r/D$ — текущее значение относительно-го радиуса;

$A(f_+) = f_+^{k r_+}$ ($k = 0,1$ — эмпирический коэффициент);

W_{\max}^+ — относительная максимальная скорость, отнесенная средней скорости.

На выходной границе предполагалось $\partial\psi/\partial r = \partial\omega/\partial r = 0$. При численных расчетах использовали коэффициент кажущейся вязкости дискретной среды (коэффициент внутреннего трения) и коэффициент внешнего трения, которые определяли по рекомендациям [12]. Результаты расчетов с использованием указанных граничных условий сопоставляли с результатами экспериментов, полученными в бункере с одним центральным разгрузочным отверстием (рис. 3).

Расчетные и экспериментальные профили скорости и линии тока удовлетворительно совпадают между собой в большей части объема бункера.

При приближении к разгрузочному отверстию ($z_+ \leq 0,05$) экспериментальные данные могут существенно отличаться от результатов расчетов, так как в этой области проявляется дискретность исследуемой среды при ее гравитационной выгрузке. Используемые в этих расчетах граничные условия для вихревой функции на вертикальной и наклонной стенках носят частный характер, поскольку справедливы в достаточно узком диапазоне изменения геометрических и физико-механических параметров.

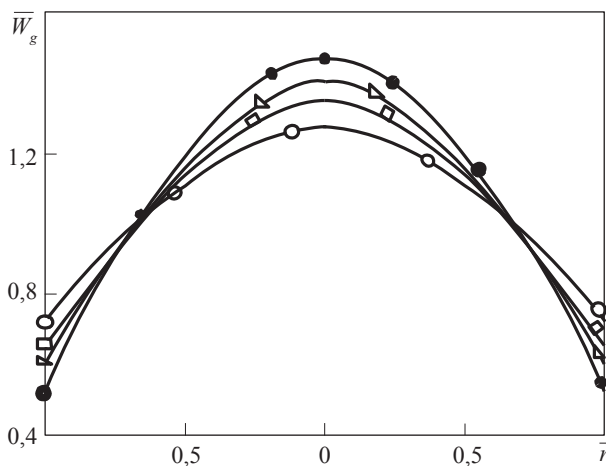


Рис. 2. Профили скорости квазисферических элементов в сечении на высоте $z = D$ от разгрузочного отверстия: \circ — $f_- = 0,218, f_+ = 0,36$; \square — $f_- = 0,268, f_+ = 0,68$; ∇ — $f_- = 0,3, f_+ = 0,36$; \bullet — $f_- = 0,36, f_+ = 0,68$

Fig. 2. The velocity profiles of the quaspherical elements in the cross section at height $z = D$ from the discharge aperture: \circ — $f_- = 0,218, f_+ = 0,36$; \square — $f_- = 0,268, f_+ = 0,68$; ∇ — $f_- = 0,3, f_+ = 0,36$; \bullet — $f_- = 0,36, f_+ = 0,68$

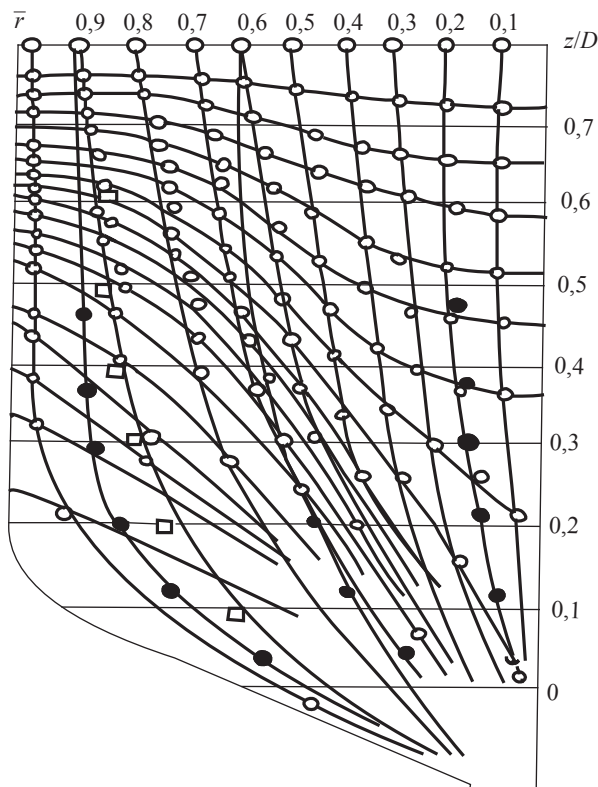


Рис. 3. Сравнение экспериментальных и расчетных данных, полученных в модели осесимметричного бункера: \circ — эксперимент, \bullet — расчет по модели потенциального течения, \square — расчет с учетом кажущейся вязкости
Fig. 3. The comparison of experimental and calculated data obtained in the model of axisymmetrical hopper: \circ — experiment, \bullet — the calculation of the potential flow model, \square — calculation based on apparent viscosity

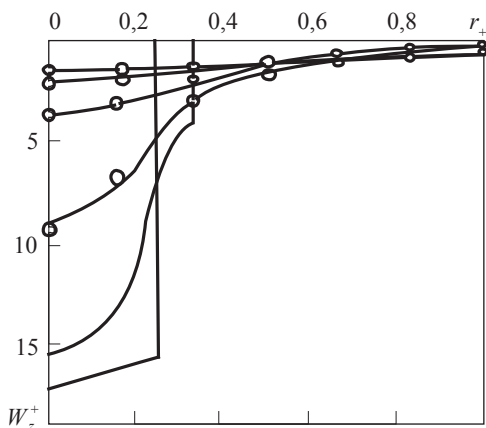


Рис. 4. Изменение профиля относительной скорости W_z^+ квазисферических элементов по высоте модели с соотношением размеров $D/d = 40$; $D/d_+ = 4$; $d = 10,2$ мм; $f_+ = 0,36$; $f_- = 0,3$: \circ — эксперимент; — — расчет с использованием универсальных граничных условий
Fig. 4. Change of the profile of the relative velocity W_z^+ quasispherical elements according to the model height with aspect ratio $D/d = 40$; $D/d_+ = 4$; $d = 10,2$ мм; $f_+ = 0,36$; $f_- = 0,3$: \circ — experiment; — — calculation using some universal boundary conditions

Более универсальное граничное условие получено нами из предположения [8], согласно которому для сыпучей среды справедливо обобщенное правило, определяемое для осесимметричного случая системой дифференциальных уравнений:

$$\left(\frac{\partial W_r}{\partial r} - \frac{\partial W_z}{\partial z}\right) \sin 2\gamma - \left(\frac{\partial W_z}{\partial z}\right) \cos 2\gamma = 0,$$

$$\frac{\partial W_r}{\partial r} (\sin \delta_+ - \cos \gamma) - \frac{\partial W_z}{\partial z} (\sin \delta_+ + \cos 2\gamma) = 0,$$

где W_r, W_z — проекции абсолютной скорости; γ — угол наклона алгебраически большего главного напряжения к оси r , $\gamma = \pi/4 + \delta_+/2$ [8].

После ряда преобразований [3] можно получить выражение, связывающее угол внешнего трения δ_- с производными проекций скорости на стенках бункера

$$\text{tg} \delta_- = \frac{2W_z(\partial z)^{-1}|_N}{\partial W_r(\partial z)^{-1}|_N + \partial W_z(\partial r)^{-1}|_N},$$

из которого следует зависимость для вихревой функции на стенке бункера

$$\omega_N = \frac{2}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r \partial z} \text{tg} \delta_-^{-1} - 2 \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right),$$

где δ_- — угол внешнего трения.

Остальные граничные условия аналогичны граничным условиям, рассмотренным выше. Результаты расчетов с использованием универсального граничного условия для вихревой функции сопоставлены (рис. 4) с экспериментальными данными, полученными в бункере с центральным разгрузочным отверстием.

Совпадение расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное. Предложенный метод расчета может быть использован при проектировании бункерных устройств осесимметричной формы с одним разгрузочным отверстием при движении в них дискретных или сыпучих сред.

Список литературы

- [1] Крымасов В.Н. Сыпучая среда как модель неньютоновской жидкости // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомная водородная энергия и технология. М., 1980. Вып. 2. С. 138–141.
- [2] Дженике Э.В. Нагрузка на бункеры. Ч. 2: Основные понятия // Труды Американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. М.: Мир, 1973. № 2. С. 254–258.
- [3] Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического деформирования сыпучих сред // Прикладная математика и механика, 1971. Т. 35. № 6. С. 411–420.

- [4] Гениев Г.А. Вопросы динамики сыпучей среды. М.: Госстройиздат, 1958. 178 с.
- [5] Josseling de Iong G. The daible sliding free rotating model for granular assemblies. *Geotechnique*, 1971, v. 21, pp. 155–163.
- [6] Hill R. *The mathematical theory of plasticity*. Clarendon. Oxford, 1956, 347 p.
- [7] Goodman M.A., Cowin S.L. A continuum theory for granular materials. *Arch., Rat. Mech. Anal.*, 1972, v. 44, pp. 249–260.
- [8] Druker D., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quart. Appl., Math*, 1952, v. 10, pp. 157–165.
- [9] Bedenig D. Theoretisches Model zur Beschreibung des Kugelhaufenfließverhaltens im Core eines Kugelhaufenreaktors. *Nucl., Engng. and Desing*, 1967, no. 6, pp. 479–488.
- [10] Лозовецкий В.В., Крымасов В.Н. Гидромеханические и тепловые процессы в ядерных реакторах с микротвэльным топливом. М.: ВИНТИ РАН, 2003. 326 с.
- [11] Bedenig D. Untersuchungen zum Strömungsverhalten eines Kugelhaufens im Core eines Kugelhaufenreaktors. Dissertation Technische Hochschule. Wien. EUROATOM, 1966, no. 3284d. 171 p.
- [12] Крымасов В.Н., Лозовецкий В.В., Мордвинцев В.М. Расчет движения шаровых твэлов в активной зоне ВТГР // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомная водородная энергия и технология. 1990. Вып. 2. С. 44–46.
- [13] Jilly D.K. On the computational stability of numerical solution of time-dependent nonlinear geophysical fluid dynamics problems. *U.S. Weather Bureau Monthly Weather Review*, 1965, pp. 93.
- [14] Ревуженко А.Ф. Механика упруго-пластических сред и нестандартный анализ. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2000. 426 с.
- [15] Крымасов В.Н. Движение сыпучей среды как неньютоновской жидкости. Отчет ИАЭ. Инв. № 35/248182, 1982.
- [16] Поттер Д. Вычислительные методы в физике. М.: Мир. 1975. 326 с.
- [17] Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: Наука, 1969. 421 с.

Сведения об авторах

Лозовецкий Вячеслав Владимирович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1, e-mail: lozovetsky@mail.ru

Шадрин Анатолий Александрович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1, e-mail: shadrin@mgul.ac.ru

Кохреидзе Мурман Васильевич — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1, e-mail: kohreidze-murman@mail.ru

Катков Сергей Александрович, аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1., e-mail: katkovsa@ya.ru

Статья поступила в редакцию 24.09.2016 г.

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDIES OF THE MOVEMENT OF HOGGED WOOD MATERIALS IN THE PARTS OF PNEUMATICS SYSTEMS

V.V. Lozovetskiy, A.A. Shadrin, M.V. Kokhreidze, S.A. Katkov

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

lozovetsky@mail.ru

There has been introduced a model of hogged wood and its particle-based products bunkering in a conical-cylindrical hopper, the model being based on the conception of such fillings as some quasi-Newton liquid with an effective viscosity which depends on the physical and mechanical properties characteristic of this type of content. The equations describing their boundary conditions, taking into account the filling particle slippage on the walls of the conical-cylindrical hopper. There have been proposed some universal boundary conditions based on the use of physical and mechanical properties of the backfill hogged wood and its particle-based products which allows to analytically describe the movement of granular materials in a hopper with a single central dumping hole, which significantly reduces the cost of developing reliable systems to transport similar materials used in various technological processes. The experimental setup and the research techniques have been described. The experiments were carried out on some models of a hopper with a single central dumping hole, taking into account the similarity theory criteria which allowed us to obtain data describing the impact of a hopper conical portion bevel angle, of the dumping hole diameter and physico-mechanical properties on the process of gravitational movement of hogged

wood and its particle-based products. There has been found the dependence for the rate of wood particles slipping inside the parts of a pneumatic hopper, as well as the change in the particle speed during the filling process on the axis and the walls of the hopper model at the inlet and outlet boundaries. The results of the calculated processes occurring in the pneumatic transportation system under study with the use of these universal boundary conditions for the vortex functions and the obtained experimental results are in good conformity with each other, which allows to make comparative analysis of technical and economic efficiency of various design decisions.

Keywords: chipboard materials, qasi-Newton liquid, the coefficients of inner and external friction, the ratio of the apparent viscosity, the flow function, the vortex function

Suggested citation: Lozovetskiy V.V., Shadrin A.A., Kokhreizde M.V., Katkov S.A. *Ekspperimental'no-analiticheskie issledovaniya dvizheniya drevesno-struzhechnykh materialov v elementakh pnevmosistem* [Experimental and analytical studies of the movement of hogged wood materials in the parts of pneumatics systems]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 88–94. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-88-94

References

- [1] Krymasov V.N. *Sypuchaya sreda kak model' nen'yutonovskoy zhidkosti* [Granular medium as a model of neo-Newtonian fluid] *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Problems of atomic science and technology] Moscow, 1980, v. 2, pp. 138-141. (in Russian)
- [2] Dzenike E.V. *Nagruzka na bunkery. Chast' 2. Osnovnye ponyatiya. Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya* [Load bins. Part 2. Basic concepts. Proceedings of the American society of mechanical engineers. Design and mechanical engineering] Moscow: Mir Publ., 1973, no. 2, pp. 254-258. (in Russian)
- [3] Nikolaevskiy V.N. *Opredelyayushchie uravneniya plasticheskogo deformirovaniya sypuchikh sred* [Constitutive equations for plastic deformation of granular media] *AMM*, 1971, T. 35, no. 6, pp. 411-420. (in Russian)
- [4] Geniev G.A. *Voprosy dinamiki sypuchey sredy*. [The problems of dynamics of granular media] Moscow: Gosstroyizdat Publ., 1958, 178 p. (in Russian)
- [5] Josseling de Jong G. The daible sliding free rotating model for granular assemblies. *Geotechnique*. 1971, v. 21, pp. 155-163.
- [6] Hill R. *The mathematical theory of plasticity* clarendon. Oxford, 1956, 347 p.
- [7] Goodman M.A., Cowin S. L. A continuum theory for granular materials. *Arch., Rat. Mech. Anal.*, 1972, v. 44, pp. 249-260.
- [8] Druker D., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. *Quart. Appl., Math.* 1952, v. 10, pp. 157-165.
- [9] Bedenig D., Theoretisches Model zur Beschreibung des Kugelhaufenfließverhaltens im Core eines Kugelhaufenreaktors. *Nucl., Engng. And Desing*, 1967, no. 6, pp. 479-488.
- [10] Lozovetskiy V.V., Krymasov V.N. *Gidromekhanicheskie i teplovye protsessy v yadernykh reaktorakh s mikrotvel'ny'm toplivom*. [Hydro-mechanical and thermal processes in nuclear reactors microvellum fuel] Moscow: VINITI RAN Publ., 2003, pp. 326. (in Russian)
- [11] Bedenig D. Untersuchungen zum Strömungsverhalten eines Kugehaufens im Core eines Kugehaufenreaktors. – Dissertation Technische Hochschule. Wien. EUROATOM, 1966, no 3284d. pp. 171.
- [12] Krymasov V.N., Lozovetskiy V.V., Mordvintsev V.M. *Raschet dvizheniya sharovykh tvelov v aktivnoy zone VTGR*. [Calculation of the motion of spherical fuel elements in the reactor HTGR. Problems of atomic science and technology.] Moscow, 1990, v. 2, pp. 44-46. (in Russian)
- [13] Jilly D.K. On the computational stability of numerical solution of time-dependent nonlinear geophysical fluid dynamics problems. *U.S. Weather Bureau Monthly Weather Review*. 1965, pp. 93.
- [14] Revuzhenko A.F. *Mekhanika uprugoplasticheskikh sred i nestandartnyy analiz*. [Mechanics of elastic-plastic media and non-standard analysis] Ed NSU. Novosibirsk, 2000, 426 p. (in Russian)
- [15] Krymasov V.N. *Dvizhenie sypuchey sredy kak nen'yutonovskoy zhidkosti*. [The movement of the granular medium as a non-Newtonian fluid] *Otchet IAE. Inv. № 35/248182*. 1982. (in Russian)
- [16] Potter D. *Vychislitel'nye metody v fizike* Computational methods in physics] Moscow: Mir Publ., 1975. pp. 326. (in Russian)
- [17] Fihngol'ts G.M. *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya*. [Course of differential and integral calculus] Moscow: Nauka. Publ. 1969. 421 p. (in Russian)

Author's information

Lozovetskiy Vyacheslav Vladimirovich — Dr. Sci. (Tech.), Prof. BMSTU (Mytishchi branch), 1st Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia, e-mail: lozovetsky@mail.ru

Shadrin Anatoliy Aleksandrovich — Dr. Sci. (Tech.), Prof. BMSTU (Mytishchi branch), 1st Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia, e-mail: shadrin@mgul.ac.ru

Kokhreizde Murman Vasil'evich — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. BMSTU (Mytishchi branch), 1st Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia, e-mail: kohreizde-murman@mail.ru

Katkov Sergey Aleksandrovich — pg. BMSTU (Mytishchi branch), 1st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia, e-mail: katkovsa@ya.ru

Received 24.09.2016

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ ОТКРЫТОГО БАРЖЕВОГО МОДУЛЯ

С.В. Посыпанов, А.В. Коробицын

ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова»
163002, г. Архангельск, наб. Сев. Двины, 17

s.posypanov@narfu.ru

При недостатке дорог в основных лесных регионах РФ обеспечить экономическую доступность значительной доли древесного сырья можно только при использовании развитой сети средних и малых рек. Одним из экологически щадящих и экономичных способов транспортировки лесоматериалов по воде являются судовые перевозки. Однако возможности применения обычных судов на средних и малых реках весьма ограничены. Рассматриваемые в статье открытые баржевые модули (ОБМ) являются альтернативой этим судам на таких реках. Из ОБМ предполагается формирование баржевых составов, размеры которых определяются количеством установленных в них модулей и диктуются путевыми условиями конкретных рек в данный период. Использование ОБМ обеспечивает возможности транспортировки лесоматериалов недостаточной плавучести, уменьшение осадки лесотранспортных единиц. Для выполнения инженерных расчетов, связанных с проектированием и эксплуатацией ОБМ, нужны сведения о сопротивлении воды движению этих устройств, в частности равномерному. Опираясь на положения гидромеханики, авторы установили первичные факторы, определяющие силу сопротивления воды равномерному движению ОБМ. Представлено символическое решение задачи в критериальной форме. Обоснована возможность исключения числа Рейнольдса из перечня определяющих факторов. Итоговое символическое решение записано как зависимость коэффициента сопротивления воды равномерному движению ОБМ от числа Фруда, а также ширины и длины модуля, отнесенных к его осадке. Для получения этой зависимости в явном виде проведены эксперименты на моделях. По результатам экспериментов для указанного коэффициента получена регрессионная модель. Использование ее совместно с формулой Ньютона позволяет определять силу сопротивления воды равномерному движению ОБМ. В результате анализа модели установлено, что увеличение скорости движения ОБМ и длины модуля, отнесенной к его осадке, в пределах принятых диапазонов варьирования приводит к небольшому возрастанию коэффициента сопротивления соответственно на 3...11 и 7...15 %. Наибольшее влияние на коэффициент оказывает ширина модуля, отнесенная к осадке. Изменение относительной ширины модуля в пределах принятого диапазона приводит к увеличению коэффициента сопротивления на 50...60 %.

Ключевые слова: транспорт лесоматериалов, открытый баржевой модуль, сопротивление воды, равномерное движение

Ссылка для цитирования: Посыпанов С.В., Коробицын А.В. Исследование равномерного движения открытого баржевого модуля // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 95–100. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-95-100

В основных лесных регионах России при значительном недостатке автомобильных и железных дорог обеспечить экономическую доступность большой доли древесного сырья зачастую возможно только при использовании хорошо развитой речной сети, основу которой составляют средние и малые реки. После прекращения молевого сплава реки для транспортировки леса используют весьма незначительно. В настоящее время речные перевозки лесоматериалов допустимы непосредственно по воде только в пакетированном виде либо на судах. Эти способы имеют свои достоинства и недостатки; при этом они являются выигрышными как в экономическом, так и в экологическом плане по сравнению с сухопутными перевозками [1]. Размеры судов для транспортировки лесоматериалов (чаще всего это баржи) таковы, что их использование на средних реках возможно, как правило, только в течение сравнительно короткого периода весеннего половодья. Малые реки для них практически закрыты. Для средних и малых рек

предложена новая лесотранспортная единица — открытый баржевой модуль (ОБМ). Из таких модулей предполагается формировать баржевые составы, размеры которых определяются количеством установленных в них по длине и по ширине ОБМ и диктуются путевыми условиями конкретных рек в данный период. Этот модуль назван открытым, потому что он, в отличие от жесткого плавучего контейнера [2], также называемого баржевым модулем, не имеет герметичной обшивки. Предложенное устройство (рис. 1) представляет собой пару поплавков, соединенных между собой и снабженных вертикальными стойками. Стойки имеют стопоры для гибких связей, которые позволяют фиксировать круглые лесоматериалы в устройстве. ОБМ обеспечивают возможность транспортировки лесоматериалов недостаточной плавучести (лиственных, тонкомерных) по водным путям, наличие у них поплавков способствует уменьшению осадки. Более подробные сведения о конструкции ОБМ и технологических аспектах, связанных с их ис-

пользованием, можно получить из источников [3, 4].

Для выполнения инженерных расчетов, связанных с эксплуатацией ОБМ, нужна информация о сопротивлении воды перемещению этих устройств. На первом этапе логично рассмотреть равномерное движение. Исследованиям равномерного движения твердых тел в жидкости посвящено довольно много работ. Большой вклад в развитие этой отрасли знаний внесли исследователи, занимавшиеся изучением движения судов. Их труды (например, такие как [5–11]) послужили основой при проведении подобных исследований с лесотранспортными единицами. Из указанных единиц больше всего внимания уделялось плотам. Применительно к рассматриваемому случаю наибольший интерес представляют исследования В.П. Корпачева [6], связанные с равномерным движением в воде лесосплавных пучков. Заметим, что при наличии некоторых аналогий ОБМ, загруженный круглыми лесоматериалами, все же существенно отличается от лесосплавного пучка. ОБМ имеет выступающие вертикальные стойки и горизонтальные балки основания, а также отличную от лесосплавного пучка форму поперечного сечения загруженной пачки круглых лесоматериалов. Указанные отличия предполагают и отличия в сопротивлении воды равномерному движению сравниваемых лесотранспортных единиц. На основании изложенного было принято решение о выполнении данной работы. Формула для рас-

чета сопротивления воды равномерному движению твердого тела известна [7]. Задача в таких случаях сводится к определению коэффициента этого сопротивления.

Материалы и методы исследования

Цель работы — получение математической модели для определения коэффициента сопротивления воды равномерному движению ОБМ, установление характера и степени влияния определяющих факторов на величину этого коэффициента.

Метод исследования — экспериментально-теоретический.

Согласно положениям гидромеханики [7], величина силы R сопротивления жидкости равномерному движению находящегося на плаву твердого тела зависит от размеров и формы его погруженной в жидкость части, направления движения, вязкости и плотности жидкости, характеристики поля гравитационных сил и скорости буксировки. Существенная геометрическая ограниченность потока также оказывает влияние на величину упомянутой силы. Однако на данном этапе исследований рассматриваются случаи, когда это влияние незначительно. Форму и размеры подводной части ОБМ можно охарактеризовать его осадкой T и двумя безразмерными параметрами — длиной и шириной, отнесенными к осадке, — соответственно B/T и L/T . Тогда символическое решение задачи можно записать следующим образом

$$R = f(\rho; \mu; g; v; T; B/T; L/T), \quad (1)$$

где ρ — плотность воды, кг/м³;

μ — динамический коэффициент вязкости воды, Па · с;

g — характеристика поля гравитационных сил, м/с²;

v — скорость перемещения ОБМ относительно воды, м/с.

Представим решение в критериальной форме. Согласно первой теореме подобия [8], приведем зависимость (1) к безразмерному виду. Выполним с учетом положений теории размерностей и подобия ряд преобразований, получим

$$\frac{R}{\rho v^2 T^2} = \Phi \left(1; \frac{\mu}{\rho v T}; 1; \frac{gT}{v^2}; 1; \frac{B}{T}; \frac{L}{T} \right). \quad (2)$$

Умножим левую и правую части выражения (2) на $2T/B$

$$\frac{R}{0,5\rho v^2 BT} = \frac{2T}{B} \Phi \left(1; \frac{\mu}{\rho v T}; 1; \frac{gT}{v^2}; 1; \frac{B}{T}; \frac{L}{T} \right). \quad (3)$$

Отметим, что силу сопротивления равномерному движению твердого тела в воде в гидромеханике определяют по формуле Ньютона [7]

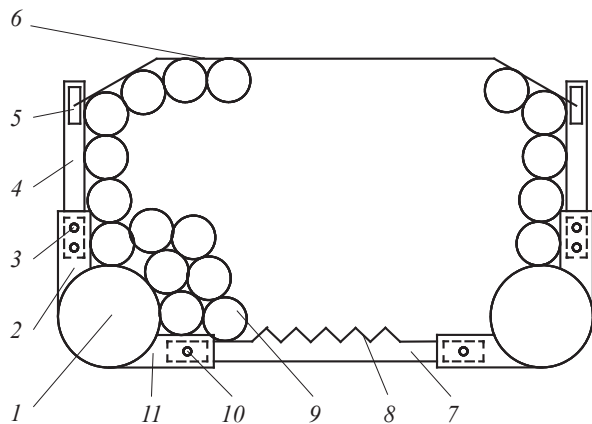


Рис. 1. Схема открытого баржевого модуля: 1 — поплавок; 2 — гнездо стойки; 3 — фиксатор стойки; 4 — стойка; 5 — стопор; 6 — гибкая связь; 7 — основание; 8 — шип; 9 — лесоматериалы круглые; 10 — фиксатор основания; 11 — гнездо основания

Fig. 1. Open barge module: 1 — displacer; 2 — pole mortise; 3 — pole holder; 4 — pole; 5 — stop; 6 — elastic brace; 7 — basement; 8 — dowel; 9 — logs; 10 — basement holder; 11 — basement mortise

$$R = 0,5c\rho\Omega v^2, \quad (4)$$

где c — коэффициент сопротивления;
 Ω — характерная площадь, m^2 .

По аналогии с лесосплавными пучками [6] при продольном движении

$$\Omega = BT. \quad (5)$$

Приняв к сведению формулы (4), (5), легко убедиться, что левая часть выражения (3) равна коэффициенту сопротивления c . В гидромеханике [7] известны такие критерии, как число Рейнольдса $Re = \rho vT/\mu$ и число Фруда

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gT}}.$$

С учетом изложенного преобразуем выражение (3)

$$c = \frac{2T}{B} \varphi \left(1; \frac{1}{Re}; 1; \frac{1}{Fr^2}; 1; \frac{B}{T}; \frac{L}{T} \right).$$

Изменив знак функции, можем представить символическое решение в более простом виде

$$c = \psi(Re; Fr; B/T; L/T). \quad (6)$$

Таким образом, теоретически для коэффициента c определяющими являются четыре фактора, приведенные в скобках в выражении (6). Эти безразмерные величины являются также и критериями подобия, равенство которых в натуральных и модельных условиях необходимо обеспечить в случае физического моделирования рассматриваемого процесса. Известно, что одновременное моделирование по Fr и Re практически невозможно [8]. Однако ОБМ является типичным плохообтекаемым телом с фиксированными зонами отрыва пограничного слоя [6, 7]. Таковыми зонами в данном случае служат кромки лесоматериалов, вертикальных стоек, горизонтальных балок основания. Для тел указанного вида установлен факт несущественной зависимости коэффициента сопротивления c от числа Re [8], ее при подобных исследованиях не учитывают. С учетом этого факта запишем итоговый вариант символического решения

$$c = \gamma(Fr; B/T; L/T).$$

Для получения явного вида этой зависимости обратились к экспериментальным исследованиям. Из-за довольно высокой трудоемкости и ряда проблем, связанных с натурными опытами, указанные исследования провели на моделях в лаборатории водного транспорта леса и гидравлики САФУ. Приняв к сведению базовые размеры ОБМ [3] и габариты опытового бассейна, геометрический масштаб моделирования задали 1:20. Диапазоны варьирования определяющих факторов назначили исходя из базовых размеров ОБМ и предполагаемых скоростей перемещения модулей. Относи-

тельную ширину B/T варьировали от 3,00 до 9,55, относительную длину L/T — от 4,57 до 29,09. Так как мы имеем дело с баржевыми модулями, полагаем, что скорости их перемещения должны быть несколько больше, чем у обычных лесотранспортных единиц, принятый для них диапазон в натуральных условиях 0,6...1,3 м/с. Переход к значениям скоростей моделей осуществляли из условия равенства чисел Fr для натурального ОБМ и модели.

Для буксировки моделей ОБМ использовали нитеблочную систему с трехкратными полиспастами. Скорость равномерного движения моделей варьировали, меняя тяговое усилие, которое создавалось буксировочными грузами. Значение упомянутой скорости определяли с помощью бесконтактного датчика оборотов ВС-401, благодаря которому фиксировали частоту прохождения мимо него светоотражающих меток вращающегося блока, огибаемого кордовой нитью буксировочной системы. Сигналы от датчика после прохождения через дифференциальный усилитель и аналого-цифровой преобразователь поступали на компьютер, где обрабатывались с помощью программы ZETLAB. В результате для каждого опыта программа выдавала зависимость указанной частоты от времени в табличной и графической форме. По этим данным с помощью макроса, написанного в MS Office Excell, получали соответствующие таблицу и график для зависимости скорости движения модели от времени.

Так как ОБМ является плохообтекаемым телом с фиксированными зонами отрыва пограничного слоя и имеет относительно небольшую площадь трения, доля составляющей трения в силе сопротивления воды равномерному движению модуля довольно мала [6, 8]. Поэтому в данном исследовании мы не использовали прием разделения полного сопротивления жидкости на составляющие, реализация которого связана с пересчетом сопротивления трения при переходе от модельных показателей к натурным. При указанных обстоятельствах такой весьма приблизительный пересчет дает поправку в пределах статистической погрешности. В связи с этим логично применение здесь так называемой одночленной формулы (4), используя которую совместно с выражением (5), мы определяли экспериментальное значение коэффициента c . При этом силу R сопротивления воды равномерному движению модели принимали равной тяговому усилию.

Эксперимент выполняли по B -плану второго порядка [9]. В ходе его осуществления провели 14 серий опытов. Каждая серия состоит из 5 продублированных опытов. Общее количество опытов равно 70. Требуемое число дублей опытов установили соответствующим расчетом после проведения пробной серии. Уровень значимости

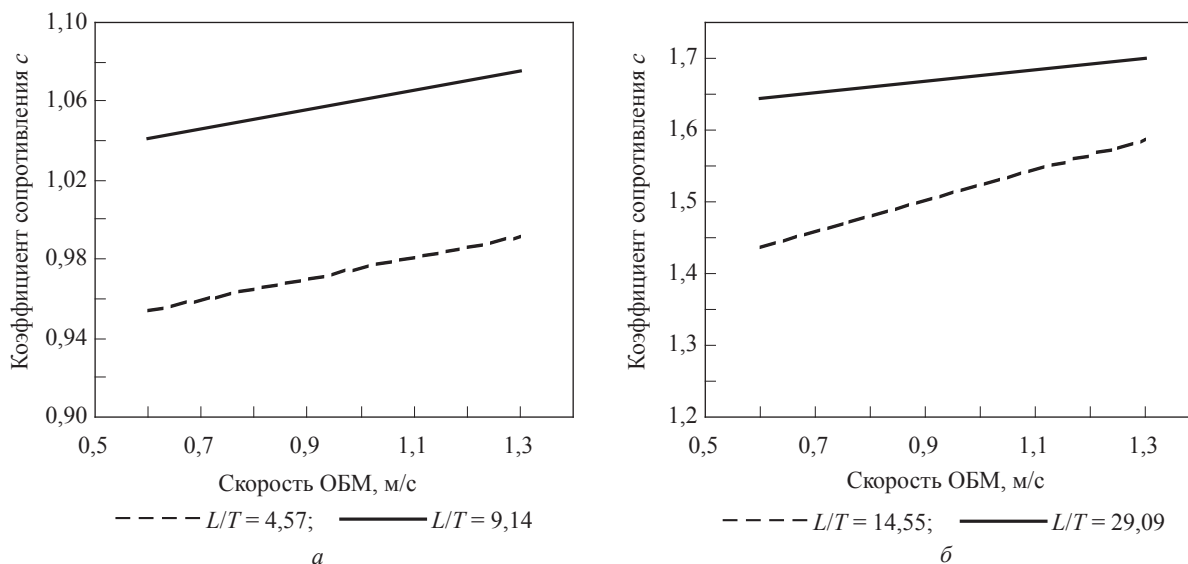


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента сопротивления воды c равномерному движению ОБМ от скорости: a — при $B/T = 3,00$; b — при $B/T = 9,55$

Fig. 2. Graphs of dependence of the water resistance coefficient c on the velocity: a — at $B/T = 3,00$; b — at $B/T = 9,55$

при этом был принят 0,05, допустимая относительная ошибка 5 %.

Обработку данных эксперимента выполняли с использованием программы Statistica. В процессе проведения этой обработки принята гипотеза об однородности дисперсии опытов, так как расчетное значение G -критерия Кохрена (0,21) оказалось меньше табличного (0,24) [9]. Дисперсия воспроизводимости опытов получилась равной 0,000324. С целью получения для коэффициента сопротивления c математической модели использовали методику множественного регрессионного анализа. После исключения незначимых коэффициентов с их предварительной оценкой по t -критерию Стьюдента модель приобрела вид уравнения первого порядка, в котором учитывается взаимодействие факторов

$$c = 0,745 + 0,0279 \frac{B}{T} + 0,0202 \frac{L}{T} + 0,0769 Fr \frac{B}{T} - 0,00207 Fr \frac{B L}{T T}. \quad (7)$$

Достоверность аппроксимации [12] довольно высокая: $R^2 = 0,997$.

Применение этого уравнения совместно с формулами (4), (5) позволяет определять силу сопротивления воды равномерному движению ОБМ.

Интерпретация результатов

Полученная модель (7) позволяет оценить характер и степень влияния определяющих факторов на величину коэффициента сопротивления c . При разработке модели мы по ранее указанным причинам перешли от скорости движения ОБМ к

безразмерному критерию Fr . На практике предпочтительнее рассмотрение зависимости коэффициента c от скорости. Принято считать, что у обычных лесотранспортных единиц, являющихся плохообтекаемыми телами с фиксированными зонами отрыва пограничного слоя, указанный коэффициент при наиболее вероятных скоростях перемещения от этих скоростей не зависит. Соответственно, и в рассматриваемом уравнении регрессии коэффициент при Fr оказался незначимым. Тем не менее число Фруда Fr , а следовательно, и скорость оказывают некоторое влияние на коэффициент сопротивления c , так как это число присутствует в слагаемых, учитывающих взаимодействие факторов. Наглядно зависимость c от скорости демонстрируют графики, приведенные на рис. 2.

Изменение скорости от 0,6 до 1,3 м/с при $B/T = 3$ приводит к увеличению коэффициента c всего на 3...4 % (рис. 2, a), при $B/T = 9,55$ — на 3...11 %. Несмотря на небольшую зависимость коэффициента c от скорости число Fr оставлено в уравнении регрессии, поскольку соответствующие коэффициенты в нем при проверке по t -критерию Стьюдента оказались значимыми. Полагаем, что наличие некоторой зависимости от указанного фактора объясняется в данном случае тем, что ОБМ буксировали со скоростями несколько большими, чем те, с которыми принято перемещать обычные лесотранспортные единицы. Это связано с увеличением доли волнового сопротивления и, соответственно, с зависимостью от скорости и потому — от числа Fr [5]. Наиболее существенна зависимость от скорости при малых осадках

и малой длине ОБМ, обуславливающей большее волновое сопротивление, что соответствует положениям гидромеханики [7].

По взаимному расположению графиков на рис. 2 понятно, что увеличение относительной длины L/T приводит к увеличению коэффициента c . При малой относительной ширине $B/T = 3,00$ увеличение L/T в пределах рассматриваемого диапазона приводит к возрастанию указанного коэффициента на 8...9 % (см. рис. 2, а), при наибольшем значении $B/T = 9,55$ — на 7...15 % (рис. 2, б). Причем большее возрастание характерно для меньших скоростей. Полагая, что возрастание коэффициента c в данном случае обусловлено увеличением площади трения и, соответственно, составляющей трения в общем сопротивлении. Поскольку преобладающим у таких тел все же является сопротивление формы, указанное возрастание невелико.

Наибольшее влияние на величину коэффициента c оказывает относительная ширина B/T . Увеличение ее с 3,00 до 9,55 в результате уменьшения осадки конкретного модуля от максимального до минимального значения обуславливает возрастание указанного коэффициента на 50...60 %. Нижняя граница этого диапазона связана с наименьшей скоростью и наименьшей длиной ОБМ. При увеличении осадки ОБМ с минимального до максимального значения характерная площадь Ω , согласно формуле (5), увеличивается в 3,18 раза, а коэффициент c уменьшается в 1,5–1,6 раза. В итоге сила сопротивления воды в соответствии с формулой (4) возрастает в 1,99–2,12 раза.

Выводы

В результате исследования, выполненного по данным проведенного эксперимента, получена регрессионная модель для коэффициента сопротивления воды c равномерному движению ОБМ. Использование этой модели обеспечивает возможность определения силы указанного сопротивления с помощью формул (4), (5).

Определяющими факторами для упомянутого коэффициента являются число Фруда Fr , относительные длина L/T и ширина B/T ОБМ. Увеличение скорости движения и относительной длины модуля в пределах принятых диапазонов варьирования приводит к небольшому возрастанию

коэффициента c на 3...11 % и 7...15 % соответственно. Наибольшее влияние на коэффициент сопротивления c оказывает относительная ширина модуля. Ее изменение с 3,00 до 9,55 приводит к увеличению коэффициента c на 50...60 %.

Полученная информация необходима для выполнения инженерных расчетов, связанных с проектированием и эксплуатацией ОБМ, применение которых предполагает создание новых возможностей по организации экономичного, экологически безопасного водного транспорта для перевозки круглых лесоматериалов, в том числе ограниченной плавучести.

Список литературы

- [1] Посыпанов С.В. Экологические и экономические аспекты транспорта древесины из удаленных лесных массивов // Эколого- и ресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве: сб. науч. тр. Воронеж: ВГЛТА, 2014. Вып. № 3. Ч. 4 (8–4). С. 135–139.
- [2] Суров Г.Я., Барабанов В.А., Кудрявцев Г.В. Контейнер. Пат. 147720 U1 Российская Федерация, МПК В65D88/00. Заявитель и патентообладатель САФУ. № 2014125335/12; заявл. 23.06.2014; опубл. 20.11.2014.
- [3] Суров Г.Я., Посыпанов С.В., Коробицын А.В. Технические решения для транспортировки по воде круглых лесоматериалов с недостаточной плавучестью // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр. Воронеж: ВГЛТУ, 2015. Вып. № 9. Ч. 3 (20–3). С. 92–95.
- [4] Коробицын А.В., Посыпанов С.В. Организация разгрузочных устройств для транспортировки лесоматериалов ограниченной плавучести по воде // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. науч. тр. Воронеж: ВГЛТУ, 2015. Вып. № 8. Ч. 2 (19–2). С. 236–238.
- [5] Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. 2-е изд., доп. и перераб. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.
- [6] Корпачев В.П., Рябоконт Ю.И. Сопротивление воды движению лесотранспортных единиц в водном потоке. Красноярск: РИО СТИ, 1978. 62 с.
- [7] Войткунский Я.И., Фадеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 568 с.
- [8] Родионов П.М. Метод подобия и его применение к решению задач лесосплава. Л.: ЛТА, 1982. 84 с.
- [9] Пижурин А.А. Основы научных исследований в деревообработке. М.: МГУЛ, 2005. 305 с.
- [10] Kleinstreuer C. Modern Fluid Dynamics. Springer Netherlands, 2010.
- [11] Larsson L., Stern F., Visonneau M. Numerical ship hydrodynamics. Springer Netherlands, 2014.
- [12] Weisberg S. Applied Linear Regression: Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005, 329 p.

Сведения об авторах

Посыпанов Сергей Валентинович — канд. техн. наук, доцент ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», e-mail: s.posypanov@narfu.ru

Коробицын Андрей Владимирович — аспирант ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», e-mail: andreykorob@bk.ru

Статья поступила в редакцию 02.06.2016 г.

INVESTIGATION OF AN OPEN BARGE MODULE UNIFORM MOTION

S.V. Posypanov, A.V. Korobitsyn

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (NARFU),
nab. Severnoy Dviny, 17, 163002, Arkhangelsk, Russia

s.posypanov@narfu.ru

Taking into consideration the low density of roads in the basic forest regions of Russia, accessibility of wood resources can be provided by using a network of the medium-scale and small rivers. One of eco-friendly and feasible methods of transportation of forest products is haulage by vessels. However, the use of conventional vessels at the medium-scale and small rivers is restrained. The paper presents an alternative: the open barge modules (OBM). Forming of barge trains consisting of the OBMs has been proposed. The train dimensions are to be determined by the conditions of a given river during the desired season. The usage of OBMs provides transportation of the low floatability logs and minimization of a vessel's draft. The designing and usage of an OBM have to be based on information concerning water resistance — particularly to the uniform motion of a floating vessel. The examination of relevant publications proved the necessity of the proposed study. Based on the hydromechanics provisions, the primary factors of the resistance force to an OBM uniform motion were determined. The criterial form of the task solution has been presented. Excluding the Reynolds number from the determining factors has been explained. The resulting symbolic solution presents the dependence of a coefficient of water drag resistance to a uniform OBM motion on the Froude number and on a module's length/beam, relatively to its draft. To discover the above dependence in an explicit form some experiments with the modules under study were carried out. As a result of these experiments, the regression equation for the drag coefficient was developed. Applying the equation together with the Newton formula enables us to determine the force of water resistance to a uniform OBM motion. The investigation of the model allows to make the following conclusion: the increase of the OBM velocity and of its relative length gives the increase of the water resistance coefficient as follows 3...11 % and 7...15 % correspondingly. The most significant factor is the module's beam related to draft; its variation within a given range causes 50..60 % increase of a resistance coefficient.

Keywords: round wood transportation, open barge module, water resistance, uniform motion

Suggested citation: Posypanov S.V., Korobitsyn A.V. *Issledovanie ravnomernogo dvizheniya otkrytogo barzhevogo modulya* [Investigation of an open barge module uniform motion]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 95–100. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-95-100

References

- [1] Posypanov S.V. *Ekologicheskiye i ekonomicheskiye aspekty transporta drevesiny iz udalennykh lesnykh massivov* [Ecological and economic aspects of forest products transportation from the remote woodlands]. *Ekologo- i resursosberegayushchie tekhnologii i sistemy v lesnom i sel'skom khozyaystve: sborn. nauchn. tr. po material. mezhdunarod. zaoch. nauch.-prakt. konf.* [Ecological and resource-saving technologies and systems in forestry and agriculture: Proc. International Open Scient.-Pract. Conf.] Voronezh: VGLTA Publ., 2014, v. 3, part 4 (8–4), pp. 135-139. (in Russian)
- [2] Surov G. Ya., Barabanov V.A., Kudryavtsev G.V. *RF Patent No. 147720 U1, MPK B65D88/00* [Applicant and patent holder: NARFU No. 2014125335/12, appl. 23.06.2014; publ. 20.11.2014.] (in Russian)
- [3] Surov G. Ya., Posypanov S.V., Korobitsyn A.V. *Tekhnicheskiye resheniya dlya transportirovki po vode kruglykh lesomaterialov s nedostatochnoy plavuchesti* [Technical solutions of low-buoyant round wood water transportation] *Proc. Actual trends of scientific researches in XXI century: theory and practice.* Voronezh, 2015, no. 9, p. 3 (20–3), pp. 92-95. (in Russian)
- [4] Korobitsyn A.V., Posypanov S.V. *Organizatsiya razgruzki ustroystv dlya transportirovki po vode lesomaterialov s nedostatochnoy plavuchesti* [Arrangement of discharging of facilities for of low-buoyant round wood water transportation] *Proc. Actual trends of scientific researches in XXI century: theory and practice.* Voronezh, 2015, no. 8, p. 2 (19-2), pp. 236-238. (in Russian)
- [5] Voytkunskiy Ya.I. *Soprotivleniye dvizheniyu sudov* [Resistance to vessels motion]. Leningrad: Sudostroyeniye Publ., 1988, 288 p. (in Russian)
- [6] Korpachyov V.P. *Soprotivleniye vody dvizheniyu lesotransportnykh edinit v vodnom potoke* [Water resistance to motion of the rafting units in a water current] Krasnoyarsk: STI, 1978, 62 p. (in Russian)
- [7] Voytkunskiy Ya.I. *Gidromekhanika* [Hydromechanics] Leningrad: Sudostroyeniye Publ., 1982, 568 p. (in Russian)
- [8] Rodionov P.M. *Metod podobija i yego primeneniye k resheniyu zadach lesoplava* [The resemblance method and its appliance to the problems of timber floating] Leningrad: LTA Publ., 1982, 84 p. (in Russian)
- [9] Pizhurin A.A. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke* [Basis of scientific researches in woodworking] Moscow: MGUL Publ., 2005, 305 p. (in Russian)
- [10] Kleinstreuer C. *Modern Fluid Dynamics.* Springer Netherlands, 2010.
- [11] Larsson L., Stern F., Visonneau M. *Numerical ship hydrodynamics.* Springer Netherlands, 2014.
- [12] Weisberg S. *Applied Linear Regression: Third edition.* Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 329 p.

Author's information

Posypanov Sergey Valentinovich — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. at the Northern Research Institute of Forestry, Forest Assessment and Management Department at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e-mail: s.posypanov@narfu.ru

Korobitsyn Andrey Vladimirovich — pg. at the Northern Research Institute of Forestry, Forest Assessment and Management Department at the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, e-mail: andreykorob@bk.ru

Received 02.06.2016

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА СОРТИМЕНТОВ НА ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ БЕРЕГОВОГО СКЛАДА

С.П. Карпачев, В.И. Запруднов, А.Н. Комяков, М.А. Сорокин

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

karpachev@mgul.ac.ru

Изучены вопросы влияния сокращения сортиментов на транспортно-технологические показатели работы берегового склада. Ликвидация части накопителей при сокращении числа сортиментов может привести к переполнению накопителей с массовыми сортиментами, что приведет к аварийной остановке сортировочной системы. Слишком большое число резервных накопителей ведет к большим капитальным затратам. Рассматривались две стратегии перевода сокращаемых сортиментов в массовые, в которых длина сокращаемых сортиментов принималась:

- равной длине того сортимента, куда переводятся сокращаемые (стратегия 1),
- одинаковой и равной 6,5 м (стратегия 2).

После сокращения числа сортиментов по стратегии 1 производительность берегового склада не только не возросла, но даже несколько упала. Объяснить это можно тем, что при постоянном объеме число бревен после сокращения числа сортиментов возросло с 457 426 до 543 670 шт. Увеличение числа бревен приводит к уменьшению интенсивности их поступления в накопители, что и объясняет отсутствие роста производительности. После сокращения числа сортиментов по стратегии 2 производительность берегового склада возросла. Объяснить это можно тем, что при постоянном объеме число бревен после сокращения числа сортиментов уменьшилось с 457 426 до 415 177 шт. Уменьшение числа бревен приводит к увеличению интенсивности их поступления в накопители, что и вызвало рост производительности.

Ключевые слова: сортименты, береговой склад, накопители бревен

Ссылка для цитирования: Карпачев С.П., Запруднов В.И., Комяков А.Н., Сорокин М.А. Влияние числа сортиментов на транспортно-технологические показатели работы берегового склада // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 101–107. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-101-107

В статье рассматриваются вопросы влияния сокращения сортиментов на технологические показатели работы берегового склада.

Число сортиментов в сплаве часто является избыточным и может быть сокращено без ущерба для качества конечной продукции. Часть редких сортиментов может быть заменена на массовые [1]. Предполагается, что при сокращении редких сортиментов они будут переведены в массовые — пиловочник, фанерный кряж или баланс и, соответственно, будут отсортировываться в существующие накопители для этих сортиментов. Что касается накопителей сокращаемых редких сортиментов, то они будут просто ликвидированы.

Ликвидация части накопителей при сокращении числа сортиментов может привести к переполнению накопителей с массовыми сортиментами, что вызовет аварийную остановку сортировочной системы. Слишком большое число резервных накопителей ведет к большим капитальным затратам.

Для исследования этих вопросов мы применили подход, основанный на математическом моделировании технологических процессов работы берегового склада [2–6]. Поскольку технологические процессы береговых складов можно рассматривать как дискретные, моделирование проводилось в среде GPSS-W.

В качестве объекта исследований был выбран береговой склад Лемпиха на Камском водохранилище.

Береговой склад рассчитан на сортировку лесоматериалов на 14 групп. Сплотка и перемещение леса к месту формирования плотов осуществляется сплотно-транспортным агрегатом (СТА) типа В-43. Сортировочная система склада имеет 14 накопителей. После сокращения редких сортиментов (путем перевода их в пиловочник, фанерный кряж и баланс) предполагается ликвидировать несколько накопителей.

Технологическая схема берегового склада представлена на рис. 1.

Поступившие на сортировку лесоматериалы сортируют в соответствии с сортиментным планом, данные которого приведены в таблице.

Работа берегового склада может быть представлена в виде модели с очередями (рис. 2) [2–10]. Поступление лесоматериалов на сортировку можно рассматривать как дискретный поток заявок на обслуживание отдельных бревен или групп бревен единичного объема. Для удобства составления модели в данной работе рассматривается поток заявок в виде отдельных бревен расчетного объема.

Поступление заявок в систему U принято через интервалы времени, являющиеся

Т а б л и ц а

Сортиментный план берегового склада
The assortment plan of a coastal warehouse

Номер накопителя	Наименование сортимента	Длина сортимента, м	Общий объем сортиментов, тыс. м ³	Доля от общего объема, %
1	Дрова технологические	4,5	3,4	5,85
2	Дрова топливные	4,5	1,2	2,07
3	Баланс лиственный	4,5	1,1	1,89
4	Пиловочное бревно лиственное	4,5	0,5	0,86
5	Баланс хвойный	2	1,1	1,89
6	Пиловочное бревно (спецназначение)	6,5	5,9	10,15
7	Фанерный кряж	4,5	5	8,61
8	Фанерный кряж	6,5	5	8,61
9	Баланс хвойный	4,5	1,1	1,89
10	Пиловочное бревно лиственное	6,5	9	15,49
11	Баланс хвойный	6,5	1,1	1,89
12	Пиловочное бревно хвойное	4,5	21,7	37,35
13	Резонансный кряж	4,5	0,6	1,03
14	Судостроительный кряж	8,5	1,4	2,42
С у м м а			58,1	100

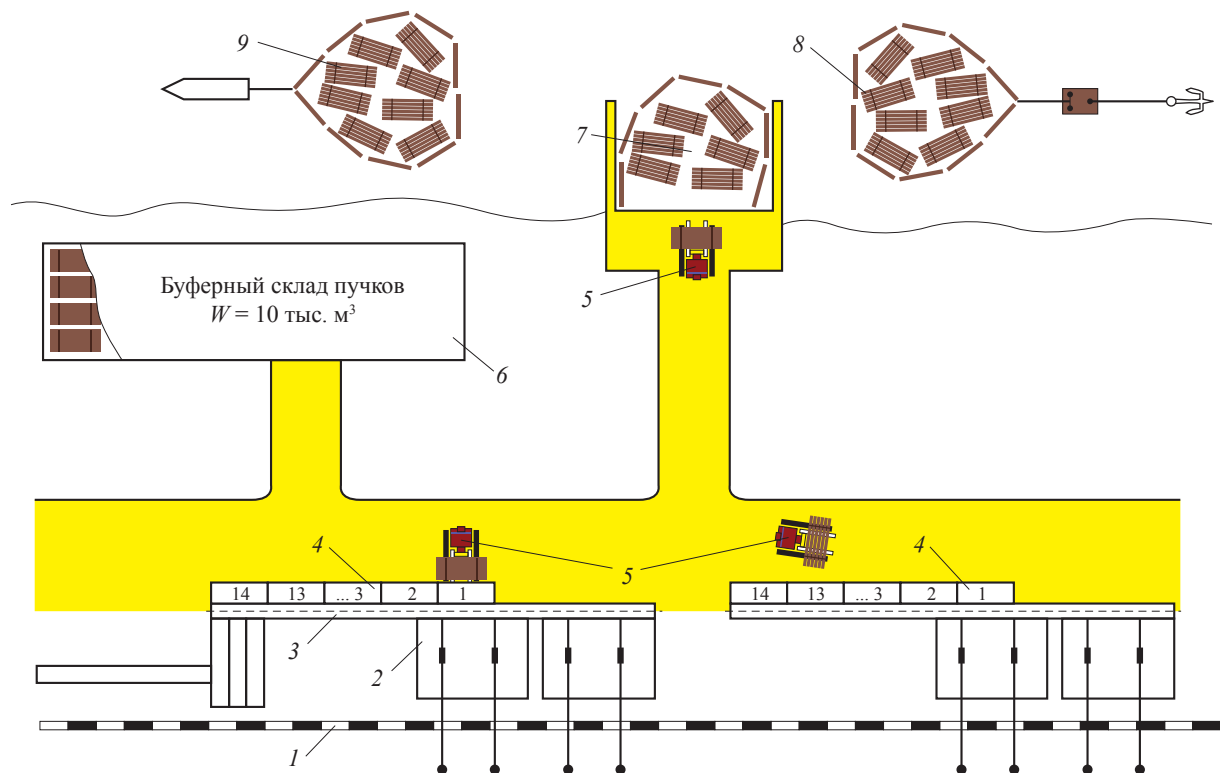


Рис. 1. Схема берегового склада Лемпиха: 1 — УЖД; 2 — раскряжевочная эстакада; 3 — конвейер; 4 — накопители; 5 — СТА; 6 — буферный склад; 7 — накопитель пучков на воде; 8 — кошель; 9 — буксировка кошеля
Fig. 1. Scheme of Lempiha coastal warehouse: 1 — UZ; 2 — bucking rack; 3 — conveyor; 4 — Drives; 5 — BT (a bundling tractor); 6 — buffer store; 7 — drive beams on the water; 8 — purse; 9 — towing purse

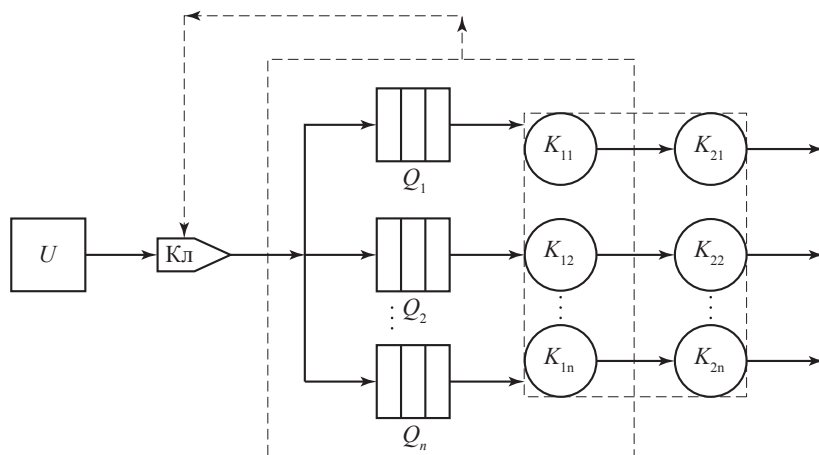


Рис. 2. Концептуальная модель работы берегового склада
Fig. 2. The conceptual model of a coastal warehouse operation

случайными числами с экспоненциальным законом распределения с интенсивностью $\lambda_1 = 6,62 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ (величина определена расчетами). Вид функции определен по натурным замерам.

Каждой заявке присваивается свой номер, который соответствует определенному сортименту. Присвоение заявке номера моделируется в соответствии с сортиментным планом (см. таблицу). Для этого разыгрывается случайное число RN в интервале $[0, 100]$. В зависимости от того, в какой процентный интервал попало случайное число RN , заявке назначается номер соответствующего сортимента.

Объем каждого сортимента определяется как случайное число, распределенное по равномерному закону со средним значением и интервалом варьирования.

После того как заявка идентифицирована, она направляется в соответствующий накопитель, где ставится в соответствующую очередь Q_i .

Объем пучка на береговом складе составляет $28 \pm 5 \text{ м}^3$. В модели пучок представлен группой заявок (бревен), которые собираются в накопителе и затем формируют ансамбль (пучок). Число заявок (бревен) в ансамбле зависит от сортимента. Объем пучка определяется как сумма объемов отдельных бревен.

Событие заполнения любого накопителя вызывает остановку всей сортировочной системы. Поступление новых заявок в систему перекрывается клапаном Кл. Система будет заблокирована до тех пор, пока соответствующий накопитель не освободится и не откроет клапан Кл.

Заявки, попадая в накопитель, встают в очередь к многоканальному обслуживающему прибору — сплотно-транспортному агрегату. Заявки могут быть обслужены только после их накопления до объема пучка.

Когда группа заявок (бревен) достигает заданного числа, группа поступает на обслуживающий прибор (СТА). Если прибор занят, ансамбль ожидает обслуживания, пока СТА не освободится.

Обслуживание группы заявок прибором (СТА) в модели производится в два этапа:

- 1) группа заявок обслуживается СТА в накопителе (сплотка пучка) и формирует ансамбль (пучок);
- 2) ансамбль (пучок) транспортируется СТА на плотбище.

Время обслуживания ансамбля прибором является случайным числом с экспоненциальным законом распределения. Интенсивность обслуживания на первом этапе $\lambda_2 = 3,968 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ (величина определена расчетами). Вид функции установлен по натурным замерам.

Интенсивность обслуживания λ_3 на втором этапе зависит от времени цикла транспортировки пучка на плотбище и обратно и составляет

$$\lambda_3 = 1/t_{\text{ц}},$$

где $t_{\text{ц}}$ — время цикла транспортировки пучка СТА.

Величину $t_{\text{ц}}$ рассчитывают следующим образом

$$t_{\text{ц}} = \frac{l}{v_{\text{гр}}} + \frac{l}{v_{\text{х.х.}}},$$

где l — расстояние транспортировки пучка СТА;

$v_{\text{гр}}$ — скорость движения СТА с пучком, 8 км/ч;

$v_{\text{х.х.}}$ — скорость движения СТА без пучка, 10 км/ч.

Первоначально нами были проведены исследования работы берегового склада Лемпиха с 14 сортиментами. Моделировалась работа нескольких СТА (1, 2, 3 и 4 агрегата) при разном

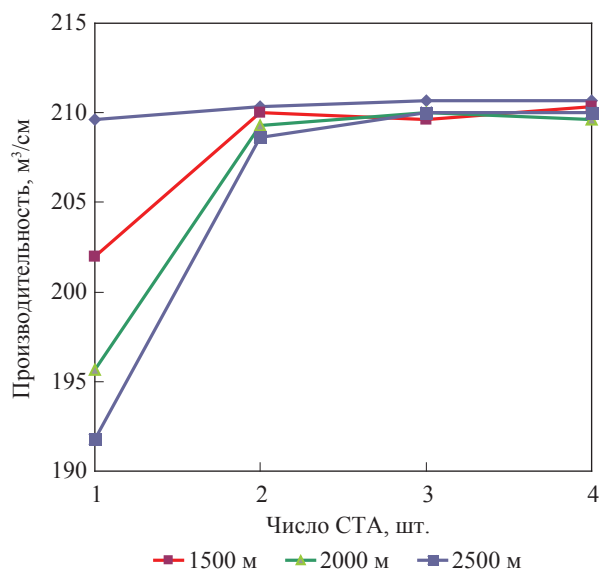


Рис. 3. Зависимость производительности склада от числа СТА при различных расстояниях транспортировки пучков на плотбище
Fig. 3. The dependence of the warehouse performance on the number of BT at different distances to the beam transportation rafting ground

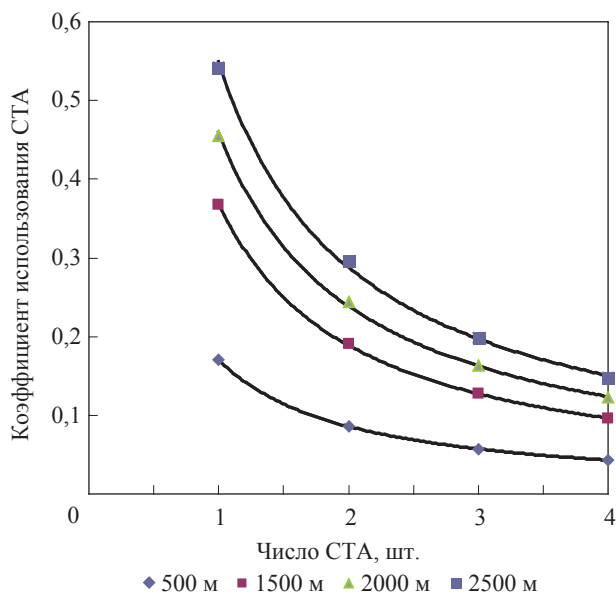


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования СТА от числа СТА при различных расстояниях транспортировки пучков на плотбище
Fig. 4. The dependence of BT utilization with a various number of BT and the beam transportation distance to the rafting ground

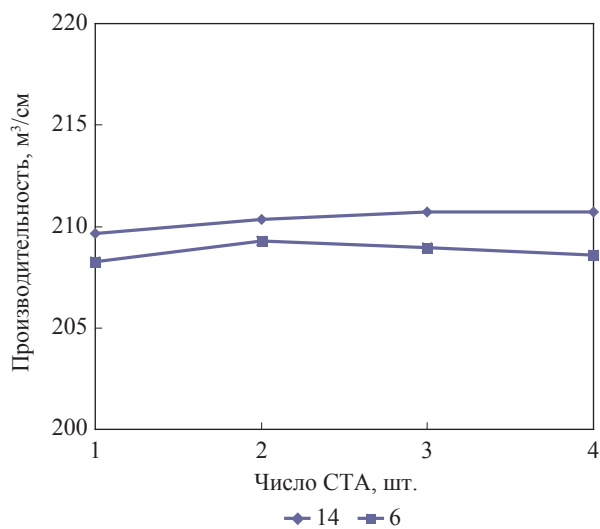


Рис. 5. Зависимость производительности склада от числа СТА при изменении числа сортиментов (стратегия 1)
Fig. 5. The dependence of warehouse performance on the number of BT with different numbers of assortments (strategy 1)

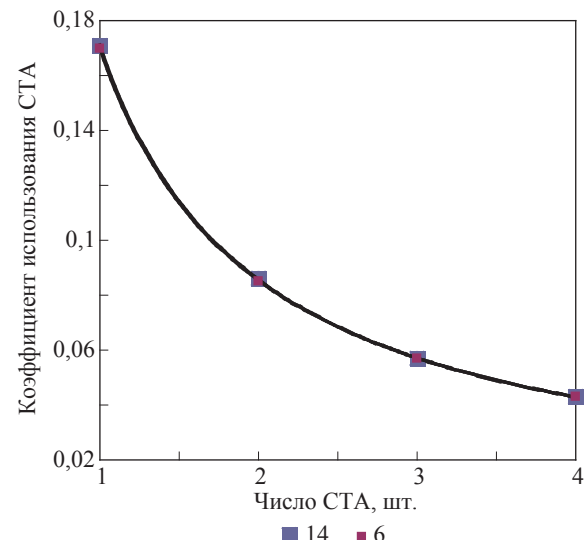


Рис. 6. Зависимость коэффициента использования СТА от числа СТА при изменении числа сортиментов (стратегия 1)
Fig. 6. The dependence of BT utilization coefficient on a different number of BT and that of assortments (strategy 1)

расстоянии транспортировки пучков на плотбище (от 500 до 2500 м). Результаты экспериментов приведены на графиках (рис. 3, 4).

Как видно из графика на рис. 3, увеличение числа СТА практически не сказывается на производительности склада при расстоянии транспортировки до 500 м. Увеличение числа СТА с

одного до двух заметно сказывается на расстояниях свыше 1000 м. Однако увеличение числа СТА до трех и более не приводит к заметному росту производительности даже при расстояниях до плотбища 2500 м. Полученные результаты объясняются тем, что работа СТА зависит от интенсивности заполнения накопителей бревнами.

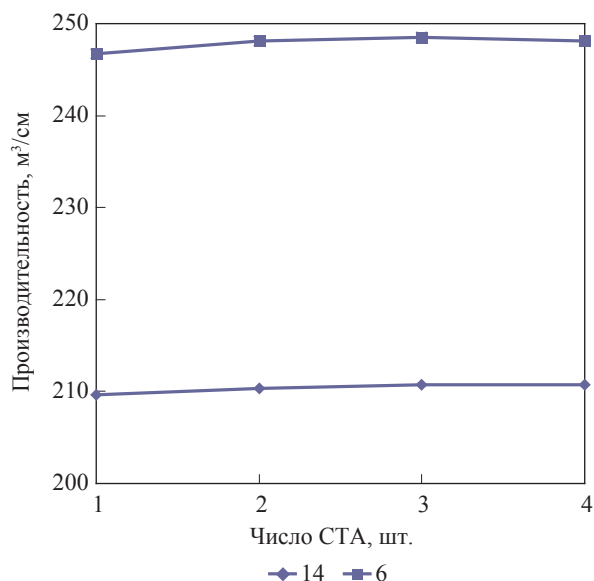


Рис. 7. Зависимость производительности склада от числа СТА при изменении числа сортиментов (стратегия 2)

Fig. 7. The dependence of the warehouse performance on the BT number with various amount of assortments (strategy 2)

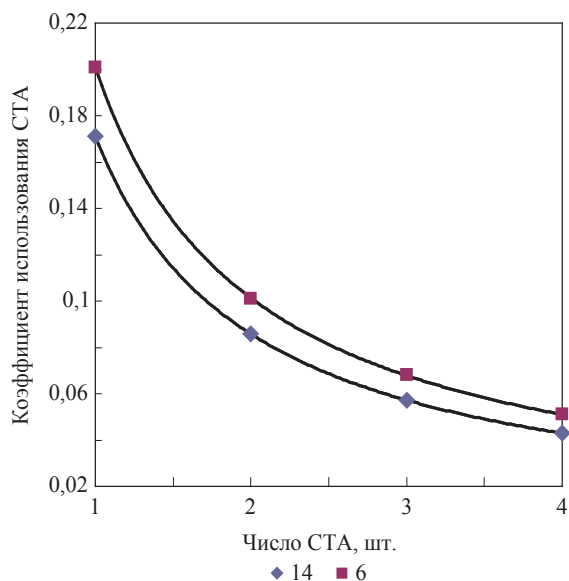


Рис. 8. Зависимость коэффициента использования СТА от числа СТА при изменении числа сортиментов (стратегия 2)

Fig. 8. The dependence of the BT utilization coefficient on the BT number with various amount of assortments (strategy 2)

Увеличение числа СТА при одной и той же интенсивности поступления сортиментов не обязательно приводит к росту производительности труда. Отметим, что с увеличением числа СТА заметно уменьшается коэффициент использования (загрузки) СТА (см. рис. 4).

Для склада Лемпиха (см. рис. 1) при числе групп сортировки, равном 14, и расстоянии до буферного склада и накопителя пучков до 500 м один СТА на каждую сортировочную линию можно считать оптимальным количеством.

Рассмотрим, как повлияет сокращение числа сортиментов на работу берегового склада Лемпиха.

Анализ сортиментного плана (см. таблицу) показывает, что число сортиментов может быть сокращено с 14 до 6. Сокращаемые сортименты могут быть переведены в следующие массовые сортименты:

- 1) дрова технологические;
- 2) баланс лиственный;
- 3) пиловочное бревно лиственное;
- 4) баланс хвойный;
- 5) фанерный кряж;
- 6) пиловочное бревно хвойное.

Будем рассматривать две стратегии перевода сокращаемых сортиментов в массовые:

1. Длина сокращаемых сортиментов принимается равной длине того сортимента, в который переводятся сокращаемые (стратегия 1).

2. Длина сокращаемых сортиментов принимается одинаковой и равной 6,5 м (стратегия 2).

При обеих стратегиях общий объем сортиментов остается неизменным (58,1 тыс. м³). Число сортиментов, в отличие от объема, будет зависеть от принятой стратегии: для стратегии 1 — 543 670 шт., для стратегии 2 — 415 177 шт.

Расчетным путем были определены процент содержания бревен каждого сортимента и интенсивность поступления сортиментов в накопители. Для стратегии 1 интенсивность $\lambda_1 = 7,87 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, для стратегии 2 интенсивность $\lambda_1 = 6,01 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Результаты экспериментов по стратегии 1 приведены на рис. 5 и 6.

Из графика на рис. 5 хорошо видно, что после сокращения числа сортиментов по стратегии 1 производительность берегового склада не только не возросла, но даже несколько упала. Объяснить это можно тем, что при постоянном объеме число бревен при сокращении числа сортиментов возросло с 457 426 до 543 670 шт. Увеличение числа бревен приводит к уменьшению интенсивности их поступления в накопители, что и объясняет отсутствие роста производительности. Коэффициент использования СТА также не увеличился (см. рис. 6).

Результаты экспериментов по стратегии 2 приведены на рис. 7, 8.

Из графика на рис. 7 хорошо видно, что после сокращения числа сортиментов по стратегии 2 производительность берегового склада возросла. Объяснить это можно тем, что при постоянном объеме число бревен при сокращении числа сортиментов по стратегии 2 уменьшилось с

457 426 до 415 177 шт. Уменьшение числа бревен приводит к увеличению интенсивности их поступления в накопители, что и вызвало рост производительности. Коэффициент использования СТА также увеличился (см. рис. 8).

В целом по результатам исследований можно сделать вывод, что сокращение числа сортиментов не обязательно приводит к увеличению производительности труда. Для увеличения производительности труда необходимо стремиться к тому, чтобы при сокращении числа сортиментов общее число бревен не увеличилось.

Список литературы

- [1] Карпачев С.П., Куприн Б.В. Моделирование на ЭВМ сокращения числа сортиментов на технологию берегового склада // Технология и механизация лесопромышленного производства: сб. науч. тр. М.: МЛТИ, 1989. Вып. 212. С. 47–53.
- [2] Карпачев С.П., Шмырев В.И., Шмырев Д.В. Моделирование доставки круглых лесоматериалов потребителям автопоездами // Экологические системы и приборы, 2016. № 2. С. 18–22.
- [3] Карпачев С.П. Логистика. Моделирование технологических процессов береговых складов. М.: МГУЛ, 2005. 132 с.
- [4] Карпачев С.П., Шмырев В.И., Шмырев Д.В. Моделирование раскрывки хлыстов сучкорезно-раскрывочной установкой и штабелевкой сортиментов погрузчиками разного типа // Транспорт: наука, техника, управление, 2016. № 3. С. 58–61.
- [5] Карпачев С.П., Шмырев В.И., Шмырев Д.В. Моделирование разгрузки пачек хлыстов и укладки их в плот сплотно-транспортно-штабелевочными агрегатами // Транспорт: наука, техника, управление, 2016. № 1. С. 57–59.
- [6] Карпачев С.П., Лозовецкий В.В., Щербаков Е.Н. Моделирование логистических систем лесных материалополюсов // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. РАН ВИНТИ, 2011. № 8. С. 16–20.
- [7] Комяков А.Н., Карпачев С.П. Применение большегрузных плавучих контейнеров для нужд биоэнергетики // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2010. № 4 (73). С. 104–107.
- [8] Карпачев С.П., Щербаков Е.Н., Солдатова Е.В. Моделирование технологических процессов освоения древесины на ложе водохранилищ // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2013. № 1. С. 56–61.
- [9] Карпачев С.П., Щербаков Е.Н. Транспортная единица для лесосплава. Патент № 2013147054/11(073109) от 31.03.2014.
- [10] Карпачев С.П. Транспорт технологической щепы по воде в мягких контейнерах. Дис. ... канд. техн. наук. М., 1985. С. 17.

Сведения об авторах

Карпачев Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: karpachev@mgul.ac.ru,

Запруднов Вячеслав Ильич — д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: zaprudnov@mgul.ac.ru,

Комяков Алексей Николаевич — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: komyakov@mgul.ac.ru,

Сорокин Михаил Александрович — старший преподаватель, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: sorokin@mgul.ac.ru,

Статья поступила в редакцию 23.11.2016 г.

THE INFLUENCE OF THE NUMBER OF TIMBER ASSORTMENTS ON THE TECHNOLOGY OF A BANKING GROUND

S.P. Karpachev, V.I. Zaprudnov, A.N. Komyakov, M.A. Sorokin

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

karpachev@mgul.ac.ru

The effect of reducing timber assortments on the technological performance of the banking ground has been considered. The elimination of a part of the timber assortments to reduce the number of timber storage decks can result in the storage overflow with a massive assortment of logs, which will cause an emergency stop of the sorting system. Too many reserve timber storage decks bring about large capital costs. Two strategies of turning the reduced timber assortments into mass ones have been regarded here where the length of logs can be as follows:

— the length is equal to the length of the reduced timber assortments (strategy 1),

— the length of the reduced timber assortments is the same and equal to 6.5 m (strategy 2).

After reducing the number of assortments in strategy 1 the performance of the banking ground failed to rise and even fell slightly. This can be explained by the fact that at a constant volume, the number of logs in the reduced amount of timber assortments increased from 457 426 logs to 543 670 ones. Increasing the number of logs results

in a decrease in the intensity of their receipt into a storage which explains the lack of productivity growth. After reducing the number of assortments on the strategy 2 the performance of the banking ground grew. This can be explained by the fact that at a constant volume the number of logs with fewer timber assortments according to strategy 2 decreased from 457 426 logs to 415 177 logs. Decreasing the number of logs leads to an increase in the intensity of their receipt into a storage that caused the productivity growth.

Keywords: timber assortments, a banking ground, timber storage decks

Suggested citation: Karpachev S.P., Zaprudnov V.I., Komyakov A.N., Sorokin M.A. *Vliyanie chisla sortimentov na transportno-tekhnologicheskie pokazateli raboty beregovogo sklada* [The influence of the number of timber assortments on the technology of a banking ground]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 101-107. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-101-107

References

- [1] Karpachev S.P., Kuprin B.V. *Modelirovanie na EVM sokrashcheniya chisla sortimentov na tekhnologiyu beregovogo sklada* [Modeling on a computer reducing the number of timber assortments on the technology of banking ground.]. Moscow: MSFU Publ., № 212, 1989, pp. 47-53. (in Russian)
- [2] Karpachev S.P., Shmyrev V.I., Shmyrev D.V. *Modelirovanie dostavki kruglykh lesomaterialov potrebitelyam avtopoezdami* [Simulation of delivery roundwood customers autotrains] *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Environmental systems and devices] 2016, № 2, pp. 18-22. (in Russian)
- [3] Karpachev S.P. *Logistika. Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov beregovykh skladov* [Modelling of processes of coastal warehouses]. Moscow: MSFU Publ., 2005, 132 p. (in Russian)
- [4] Karpachev S.P., Shmyrev V.I., Shmyrev D.V. *Modelirovanie raskryazhevki khlystov suchkorezno-raskryazhevochnoy ustanovkoy i shtabelevkoy sortimentov pogruchnikami raznogo tipa* [Simulation of bucking and piling of assortments of various types] *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management], VINITI RAS 2016, no. 3, pp. 58-61. (in Russian)
- [5] Karpachev S.P., Shmyrev V.I., Shmyrev D.V. *Modelirovanie razgruzki pachek khlystov i ukladki ikh v plot splotochno-transportno-shtabelevochnymi agregatami* [Simulation of the unloading of bundles of whips and stacking them in the raft by units] *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management], VINITI RAS, 2016, no. 1, pp. 57-59. (in Russian)
- [6] Karpachev S.P., Lozovetskiy V.V., Shcherbakov E.N. *Modelirovanie logisticheskikh sistem lesnykh materialopotokov* [Modeling the logistic systems of forest material flow] *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie* [Transport: science, technology, management]. VINITI RAS 2011, no. 8, pp. 16-20. (in Russian)
- [7] Komyakov A.N., Karpachev S.P. *Primenenie bol'shegruznykh plavuchikh konteynerov dlya nuzhd bio-energetiki* [The Use of heavy floating containers for bioenergy] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, no. 4 (73), 2010, pp. 104-107. (in Russian)
- [8] Karpachev S.P., Shcherbakov E.N., Soldatova E.V. *Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov osvoeniya drevesiny na lozhe vodokhranilishch* [Modeling of technological development of wood on the bed of the reservoir] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, no. 1, 2013, pp. 56-61. (in Russian)
- [9] Karpachev S.P., Shcherbakov E.N. *Transportnaya edinitsa dlya lesosplava* [Transport unit for rafting]. Patent no. 143038 from 09.06.2014 (in Russian).
- [10] Karpachev S.P. *Transport tekhnologicheskoy shchepy po vode v myagkikh konteynerakh*. Diss. cand. tech. nauk [Transport of wood chips on the water in soft containers. Cand. tech. sci. diss.] Moscow, 1985, pp. 17. (in Russian)

Author's information

Karpachev Sergey Petrovich — Dr. Sci. (Tech.), Prof. BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: karpachev@mgul.ac.ru

Zaprudnov Vyacheslav Il'ich — Dr. Sci. (Tech.), Prof. BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: zaprudnov@mgul.ac.ru

Komyakov Aleksey Nikolaevich — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: komyakov@mgul.ac.ru

Sorokin Mikhail Aleksandrovich — Senior Lecturer BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: sorokin@mgul.ac.ru

Received 23.11.2016

ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ПРОЦЕССОВ ЛЕСОСЕЧНЫХ РАБОТ

В.И. Запруднов, С.П. Карпачев, М.А. Быковский

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

Приведены современные технологические процессы лесосечных работ, которые должны разрабатываться с таким расчетом, чтобы при выполнении каждой рабочей операции и всего их комплекса в нормальном производственном режиме при соответствующих видах рубок исключалось недопустимое отрицательное воздействие на все элементы биогеоценозов. Установлено, что на выбор парка машин для проведения лесосечных работ влияет широкий комплекс природно-производственных условий, характерных для данного предприятия (таксационная характеристика, параметры среды, виды и способы рубок, объемы лесозаготовок по каждому из видов и способов рубок и т. д.). В основу классификации условий применения парка машин положена возможность высококачественного выполнения всего комплекса основных лесосечных работ с учетом влияния условий эксплуатации на работу машин. Определено влияние лесорастительных условий на технологические процессы лесосечных работ и выбор системы машин, которая определяется вероятностью их реализации с минимальным повреждением элементов леса в процессе рубок. Предложено при выборе лесной техники принимать во внимание способ заготовки древесины (хлыстовой или сортиментной) и природно-производственные условия. Выбор оптимальных параметров оборудования определяется прежде всего производительностью лесозаготовительной техники, которая оправдывала бы затраты на ее приобретение. Однако не стоит пренебрегать и показателями экологических требований — воздействие техники на лес должно быть минимальным. В работе рассмотрены три группы методов выбора машин для проведения лесосечных работ. Главным отличительным признаком для отнесения метода к определенной группе является его точность. Приведено процентное соотношение различных технологий заготовки и вывозки древесины из лесосек в общем объеме лесозаготовок в Российской Федерации с указанием основных технологических операций и основного лесозаготовительного оборудования.

Ключевые слова: лесосечная работа, парк лесосечных машин, лесовозобновление, лесозаготовительная техника, технологии заготовки древесины

Ссылка для цитирования: Запруднов В.И., Карпачев С.П., Быковский М.А. Технологии и технические средства процессов лесосечных работ // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 108–117. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-108-117

Современные технологические процессы лесосечных работ следует планировать с таким расчетом, чтобы при выполнении каждой рабочей операции и всего их комплекса в нормальном производственном режиме при соответствующих видах рубок исключалось недопустимое отрицательное воздействие на все элементы биогеоценозов [1].

Рубки главного пользования (по типам и видам), установленные для конкретных участков, должны осуществляться с применением соответствующих технологий и технических средств для лесосечных работ, прошедших в установленном порядке государственную экологическую экспертизу и обеспечивающих эффективное восстановление леса, сохранение экологических условий, исключение или соответствующее ограничение отрицательных последствий рубок. Лесоводственные требования к организации и технологии лесосечных работ указываются в организационно-технологическом проекте рубок главного пользования — лесовозобновления, содержащем технологическую карту разработки лесосеки.

Организационно-технологический проект рубок лесовозобновления составляется лесополь-

зователем на каждую лесосеку до начала проведения подготовительных работ и ее разработки. В организационно-технологическом проекте для каждой лесосеки указываются: вид рубки, способ очистки лесосек, оставление семенников и семенных групп, куртин и полос, площадь и количество на 1 га подлежащего сохранению подраста ценных целевых пород.

Проект включает также схематический чертеж лесосеки, на который наносят семенные группы, куртины, полосы, подлежащие оставлению (сохранению), участки неспелых древостоев, не подлежащих рубке, а также участки, на которых должен быть сохранен подрост.

В технологической карте проекта указывают: принятую технологию и сроки проведения лесосечных работ; способы уборки порубочных остатков; схемы размещения лесовозных дорог, усов, волоков, погрузочных пунктов, складов, стоянок машин и механизмов и объектов обслуживания, а также других объектов; площадь, на которой должен быть сохранен подрост, процент его сохранности и встречаемость; мероприятия по предотвращению эрозионных процессов.

До начала лесосечных работ должна быть проведена разметка в натуре границ погрузоч-

ных пунктов, трасс канатных установок, магистральных и пасечных волоков, дорог, производственных и бытовых площадок.

Для размещения погрузочных пунктов, других производственных и бытовых площадок, а также технологической сети волоков в первую очередь должны использоваться места с минимальным количеством подроста и деревьев других ярусов, подлежащих сохранению при рубке. Прокладка волоков по руслам постоянных и временных водотоков не допускается.

Выбора парка машин для проведения лесосечных работ. Парком лесосечных машин (ПЛМ) лесозаготовительного предприятия (ЛЗП) считают набор лесосечных машин для выполнения основных операций на рубках главного и промежуточного пользования с максимальной эффективностью. На выбор машин, составляющих парк, влияет широкий комплекс природно-производственных условий, характерных для данного предприятия (таксационная характеристика, параметры среды, виды и способы рубок, объемы лесозаготовок по каждому из видов и способов рубок и т. д.). Оценка работы машин, входящих в парк, выполняется с учетом объединения их в системы, оптимальные по численности и структуре, как в реальных условиях, характерных для конкретного ЛЗП. Объединение машин в системы при определении ПЛМ необходимо для реализации наиболее эффективных технологий лесосечных работ. Входящие в набор единицы оборудования, предназначенного для выполнения лесосечных работ, должны согласовываться друг с другом по своим техническими и технологическим характеристикам. Для этого необходим учет некоторых главных природных и производственных факторов. Природно-производственные факторы существенно влияют на условия перемещения лесозаготовительных машин по лесосеке и на условия выполнения операций, связанных с валкой деревьев, трелевкой, обрезкой сучьев, раскряжевкой хлыстов. Значение природно-производственных факторов может значительно колебаться даже в пределах одного лесозаготовительного предприятия.

Природно-производственные факторы подразделяют на:

— климатические (температура окружающего воздуха, количество и сроки выпадения осадков, преобладающее направление и сила ветра, высота снежного покрова в лесу и др.);

— почвенно-грунтовые (тип и свойства почв, влажность, плотность, механический состав почв, макро-, мезо- и микрорельеф, несущая способность грунта);

— лесорастительные (средний объем деревьев в насаждении, породный состав насаждений,

средняя длина деревьев, средний диаметр деревьев на высоте груди, средний запас на 1 га, наличие на лесосеке подроста, степень захламленности лесосеки, характер размещения древостоя по площади);

— технологические (расстояние трелевки, технология работы машин, состав и сочетание операций, выполняемых машиной, площадь лесосеки);

— производственные (сменность, плановый объем работ, степень механизации процессов, виды и способы рубок, сроки работ, тип машин, эксплуатационные показатели машин, квалификация операторов).

Возможно включение в эту группу и лесохозяйственных условий с требованиями лесовосстановления и лесовыращивания (ориентация лесосек относительно сторон света, ширина лесосеки, срок и способ примыкания, способы очистки лесосек). В зависимости от условий применения систем лесосечных машин и видов рубок одни факторы будут важными, а другие — второстепенными. Поэтому параметры, приведенные ниже, приняты нами за основные. Менее значимые факторы рассмотрены при исследовании особых условий функционирования машин.

Все большее внимание привлекает экологическая проблема — взаимосвязь лесозаготовительной техники и лесной среды [2].

В основу классификации условий применения машин положена возможность высококачественного выполнения всего комплекса основных лесосечных работ с учетом влияния условий эксплуатации на работу машин.

Учет влияния всех факторов на работу лесозаготовительной техники затруднителен и в ряде случаев нецелесообразен по следующим причинам: количество факторов очень велико (около пятидесяти); влияние не всех факторов является существенным; количественную оценку влияния некоторых факторов, например климатических, трудно спрогнозировать и можно реализовать только при оперативном управлении; многие факторы являются неустойчивыми во времени или по территории.

Анализ природных факторов, оказывающих основное влияние на эффективность работы парка лесосечных машин, позволил выделить среди них следующие (в порядке значимости): средний объем хлыста; ликвидный запас деревьев на 1 га; рельеф; почвенно-грунтовые условия; породный состав насаждений.

Средний объем хлыста как нормообразующий фактор оказывает главное влияние на эффективность работы парка лесосечных машин, что признается всеми производителями и научными работниками.

Ликвидный запас деревьев на 1 га влияет на объем подготовительных работ, производительность труда на валке деревьев и трелевке.

Рельеф является одним из важных факторов, определяющих принципы организации и технологию лесосечных работ. От несущей способности грунтов зависит проходимость трелевочных машин.

Породный состав насаждений наиболее существенно влияет на трудоемкость обрезки сучьев и раскряжевки хлыстов.

Выделение этих факторов как наиболее значимых позволило определить структуру математических моделей взаимодействия машин с лесной средой.

Поиском эффективных решений при проектировании технологических процессов лесосечных работ и выборе машин для лесосечных работ достаточно широко стали заниматься в начале 70-х гг. XX в. С этого времени ведутся интенсивная разработка и внедрение в производство новой лесозаготовительной техники, исключаяющей ручной труд и повышающей ее производительность. Однако новая техника дорога, тяжела, а ее применение часто усиливает негативное воздействие рубок на формирование лесных биогеоценозов [3, 5].

Возникла проблема выбора машин по операциям и определения потребности в них с учетом эффективного использования. Было решено: для каждой машины и механизма определить наиболее выгодные природные и производственные условия их применения, а также разместить оборудование по леспромхозам определенными комплексами. Результатом работы ученых и научно-производственных коллективов явилось создание новой техники и научных основ выбора технологии и организации лесосечных работ.

Как показывает практика эксплуатации лесосечных машин и систем машин, функционирование их в разнообразных природных условиях с резко и значительно меняющимися характеристиками, разная степень надежности машин, практические стратегии управления производственными системами и техническая политика предприятия требуют исследования вопросов рационального выбора технологических процессов и систем машин для предприятия.

Понятия «система машин» и «парк лесосечных машин» рассматриваются в работе [4], где под системой машин понимают совокупность машин и оборудования различного функционального назначения, взаимосвязанных по техническим и технологическим параметрам и предназначенных для последовательного выполнения операций технологического процесса лесосечных работ; «система машин характери-

зуется количеством машин каждого типа, последовательностью их расстановки и наличием технологических связей между ними». О парке машин сказано, что «парк следует комплектовать путем поставки не отдельных машин, а комплексно», «необходимо учитывать, что из состава парка машин будут формироваться комплексы (системы) машин, структура и состав которых рекомендованы для конкретного лесозаготовительного района» [4].

Первые опыты внедрения перспективных машин и систем машин показали, что в силу большого разнообразия природно-производственных условий во многих случаях освоить весь запас древесины на лесосеке системой машин в «чистом виде» не удастся. Кроме того, директивно установленное число машин в системе часто не соответствует требованиям обеспечения максимальной производительности труда при работе на годичной лесосеке предприятия. Однако имеется методика по расчету оптимального числа машин в системе для работы на конкретной лесосеке.

В настоящее время формирование парков лесосечных машин предприятий выполняют не системами, а отдельными машинами, необходимое число которых определяют по усредненным показателям среды и сырья на основе нормативного расчета годовой производительности отдельных машин.

В работах [6, 7] предложен подход регионального уровня, когда определяют объемы поставок техники в лесной регион по средневзвешенной выработке машин с учетом ограничений применения лесосечных машин по их техническим возможностям: объему хлыста, рельефу, несущей способности грунтов. Однако при таком подходе не учитываются:

- характеристики лесосечного фонда и лесосырьевой базы предприятия, которые могут резко отличаться от средних характеристик по региону (характеристики среды и сырья даже внутри предприятия часто бывают крайне разнообразными);

- оценка объемов применения отдельных лесосечных машин без учета объединения их в системы;

- изменчивость параметров древостоя, характеристик грунтов и рельефа, которые требуют иногда включения в систему дополнительных машин, не имеющих ограничений по своим техническим возможностям;

- особенности применения машин и систем машин в зависимости от древостоев и грунтов отдельных лесосек;

- экологические ограничения на применение систем машин.

Существующий подход к оценке эффективности отдельно взятой лесозаготовительной машины для выполнения отдельной операции не всегда объективен, так как использование каждой машины для одной из операций в значительной мере определяет показатели использования других средств механизации и показатели выполнения многих других операций.

Основными факторами, определяющими выбор технологических процессов лесосечных работ, типов машин и механизмов, являются таксационные и лесотипологические характеристики лесосечного фонда. Исследования процесса лесосечных работ отечественными учеными [1–11] на разных этапах определяли направления конструкционного совершенствования машин и оборудования, в том числе оптимизацию их параметров. Используемые при этом критерии отражали уровень механизации работ в отрасли и обществе, а также социальные отношения и взгляды на лесопользование. В настоящее время большинство технологических схем разработки лесосек основаны на применении систем машин.

Влияние лесорастительных условий на технологические процессы лесосечных работ и выбор системы машин определяется возможностью их реализации с минимальным повреждением элементов леса в процессе рубок.

При выборе лесной техники чаще всего принимают во внимание способ заготовки древесины (хлыстовой или сортиментной) и природно-производственные условия. В зависимости от вида заготавливаемой древесины выбирают технику в зависимости от ее технических параметров и эксплуатационных показателей, типа технологического оборудования.

Многообразие зарубежной лесозаготовительной техники по классам типоразмерного ряда приведено в табл. 1 и 2 [8].

Чтобы правильно подобрать машину (трактор) по массомощностным характеристикам, необходимо определиться прежде всего с параметрами дерева (диаметром и средним объемом). Древостой при среднем объеме ствола до $0,39 \text{ м}^3$ считается мелким, от $0,4$ до $0,6 \text{ м}^3$ — средним, более $0,65 \text{ м}^3$ — крупным.

Для оценки рельефа местности определяют распределение лесопокрытых площадей в зависимости от крутизны склонов. Площади делятся на три группы: с уклонами до 15° (тракторы могут работать в течение всего года), от 16 до 25° (тракторы используют только в сухую погоду летом), 26° и более (тракторная трелевка запрещена, требуется применение других трелевочных средств).

Почвенно-грунтовые условия для лесозаготовительных работ по эксплуатационным показателям делятся на четыре категории:

— первая категория (сухие пески, каменистая почва) — допускается многократный проход лесозаготовительных машин по следу (волоку), в периоды весенней и осенней распутицы несущая способность их снижается, но летние осадки на проходимость машин влияют мало;

— вторая категория (супесчаные почвы, мелкие суглинки) — допускается многократный проход машин по одному следу (волоку), в период весенней и осенней распутицы несущая способность их снижается, летние осадки на проходимость влияют мало;

— третья категория (глинистые почвы, супеси с глинистыми прослойками) — грунты имеют повышенную влажность в течение всего теплого периода года, тракторы быстро разрушают растительный слой и образуют глубокую колею на волоках;

— четвертая категория (торфяно-болотные, перегнойно-глеевые почвы) — наиболее неблагоприятные для лесозаготовки грунты, в периоды затяжных дождей волоки становятся непроезжими.

Выбор оптимальных параметров оборудования определяется прежде всего производительностью лесозаготовительной техники, которая оправдывала бы затраты на ее приобретение. Однако не стоит пренебрегать и показателями экологических требований — воздействие техники на лес должно быть минимальным.

Анализ изложенных в работе методов выбора машин для проведения лесосечных работ позволил разделить их на три группы. Главным отличительным признаком для отнесения метода к определенной группе является его точность.

1. Нормативные методы, для которых потребность в технике определяет нормативная нагрузка машин и оборудования. Эти методы являются приближенными. Могут применяться при расчете потребности в технике и определении перспективной структуры парка машин для региона и страны в целом, а также при текущем оперативном планировании базы лесозаготовительного производства.

2. Графические методы, для которых потребность в технике и структура систем машин определяются по графикам, номограммам. Им присущи простота использования, наглядность и быстрота получения информации. Хотя они и приближают парк машин к оптимальной структуре, однако не дают экономически оптимального решения. Применение графических методов возможно при оперативном управлении лесосечными работами, когда возникает задача определения оптимальной

Т а б л и ц а 1

Лесозаготовительная техника для сортиментной технологии заготовки древесины
Forestry equipment for timber assortment technology

Параметр	Класс		
	Легкий (масса 5–10 т)	Средний (масса 10–15 т)	Тяжелый (масса свыше 15 т)
Машины харвестерного типа (валочно-пакетирующие, валочно-трелевочные, сучкорезные)			
Число моделей	6	19	72
Мощность двигателя, кВт	73,5–104,0	74,0–164,0	96,0–243,0
Масса, т	8,5–9,1	10,8–15,0	15,1–39,9
Диаметр среза дерева, см	37,0–46,0	45,0–68,0	46,0–110,0
Форвардеры			
Число моделей	3	34	29
Мощность двигателя	77,0	86,0–176,0	126,5–222,0
Масса, т	9,5	10,5–15,0	15,1–24,8
Грузоподъемность, т	7,5	9,0–14,0	12,0–20,5
Всего моделей обоих типов	9	53	101
Общее количество моделей — 164, из них на колесном шасси — 114, на гусеничном шасси — 50			

Т а б л и ц а 2

Лесозаготовительная техника для хлыстовой технологии заготовки древесины
Forestry equipment for tree-length timber logging technology

Параметр	Класс		
	Легкий (масса 5–10 т)	Средний (масса 10–15 т)	Тяжелый (масса свыше 15 т)
Машины харвестерного типа (валочно-пакетирующие; валочно-трелевочные; сучкорезные)			
Число моделей	6	19	72
Мощность двигателя, кВт	73,5–104,0	74,0–164,0	96,0–243,0
Масса, т	8,5–9,1	10,8–15,0	15,1–39,9
Диаметр среза дерева, см	37,0–46,0	45,0–68,0	46,0–110,0
Скидеры			
Число моделей	3	26	19
Мощность двигателя, кВт	52,0–93,0	87,0–176,0	89,5–222,0
Масса, т	4,6–7,3	10,3–13,65	15,6–27,3
Объем пачки деревьев, м ³	4,0–6,0	4,5–7,0	4,5–18,5
Всего моделей обоих типов	9	45	91
Общее количество моделей — 145, из них на колесном шасси — 102, на гусеничном шасси — 43			

структуры системы лесосечных машин (типов и численности машин на каждой операции) в природно-производственных условиях конкретной разрабатываемой лесосеки.

3. Точные расчетные методы с применением ЭВМ, появление которых связано с проведением многовариантного расчета, анализом вариантов и выбором оптимального решения. Большая размерность задачи выбора оптимальной структуры и состава парка лесосечных машин для предприятия обуславливает необходимость задействовать современные ЭВМ. Несмотря на очевидную сложность задачи, использование ЭВМ позволяет решать ее в приемлемые сроки, тем более что задачу решают, как правило, не чаще одного раза в год.

Анализ методик показал, что они позволяют решить лишь ряд частных вопросов проектиро-

вания технологических процессов лесосечных работ.

Технологические процессы заготовки древесного сырья классифицируют по виду продукта, вывозимого с лесосеки. Это заготовка: хлыстов; сортиментов; деревьев; щепы.

При заготовке хлыстов и деревьев их дальнейшая первичная обработка (обрезка сучьев, раскряжевка на сортименты) осуществляется на нижнем складе лесозаготовительного предприятия, располагаемого в местах постоянного проживания работающих.

До перестройки экономики в России практически весь объем заготавливаемой древесины получали в хлыстах (более 90%). Заготовка сортиментов осуществлялась преимущественно при рубках ухода с применением бензомоторного инструмента. Заготовка

Т а б л и ц а 3

**Технологии заготовки и вывозки древесины, их доля
в общем объеме лесозаготовок в Российской Федерации**
Harvesting technology and timber transportation ratio in the total harvesting volume in the Russian Federation

Технологические операции	Лесозаготовительное оборудование	Вывозка из лесосеки	Доля в общем объеме, %
Валка + обрезка сучьев + трелевка	Бензопила + машина трелевочная чокерная	Хлысты	8,5
Валка, пакетирование деревьев + трелевка + обрезка сучьев	ВПМ + машина трелевочная бесчокерная + сучкорезная машина		17,2
И т о г о в ы в о з к а х л ы с т о в			25,7
Валка + обрезка сучьев + трелевка + раскряжевка хлыстов на верхнем складе	Бензопила + машина трелевочная чокерная + бензопила	Сортименты	44,9
Валка + трелевка + раскряжевка хлыстов на верхнем складе	Бензопила + машина трелевочная чокерная + сучкорезно-раскряжевочная машина (процессор)		3,3
Валка, обрезка сучьев и раскряжевка хлыстов + подвозка сортиментов	Харвестер + форвардер		19,2
Валка, обрезка сучьев и раскряжевка хлыстов + подвозка сортиментов	Бензопила + форвардер		6,5
Валка, пакетирование деревьев + трелевка + обрезка сучьев и раскряжевка хлыстов	ВПМ + машина трелевочная бесчокерная + процессор		0,4
И т о г о в ы в о з к а с о р т и м е н т о в			74,3
В с е г о			100

деревьев и щепы была весьма незначительной (менее 1 %).

С началом перестройки экономики в России отмечается повышение спроса на технологии заготовки древесного сырья в сортиментах, в том числе с использованием специализированных колесных машин — харвестеров и форвардеров (скандинавская технология). При этой технологии заготовка сортиментов осуществляется на месте повала деревьев с использованием бензомоторных пил или машинным способом (с помощью харвестера), а сбор и перевозка сортиментов к месту погрузки в автолесовозный транспорт осуществляется колесной погрузочно-транспортной машиной (форвардером). Значительная доля сортиментов заготавливается путем раскряжки хлыстов с применением бензопил на верхнем складе лесосеки. Заготовка древесины по скандинавской технологии распространена в европейской части России, на Дальнем Востоке и, в меньшем объеме, в Сибири.

За последнее десятилетие резко увеличилась доля заготовки и вывозки древесины по сортиментной технологии (74,3 % от общего объема лесозаготовок). В перспективе, по данным регионов, доля лесозаготовок по сортиментной технологии и уровень ее механизации возрастут.

Данные о различных технологиях заготовки и вывозки древесины из лесосек с указанием основных технологических операций и основного

лесозаготовительного оборудования приведены в табл. 3.

Машины для хлыстовой технологии заготовки древесины производятся в России, но используется и импортная техника: валочно-пакетирующие машины (ВПМ) фирм JohnDeere, Tigercat, Caterpillar, а также колесные трелевочные машины этих же производителей.

Внутренние потребности в специализированных машинах для сортиментной технологии заготовки древесины (харвестерах и форвардерах) удовлетворяются практически полностью за счет импорта. Преимущественно ввозится продукция трех фирм: JohnDeere, KomatsuForest (ранее Valmet) и Ponsse. JohnDeere и Ponsse имеют производственные мощности в Финляндии. Среди других фирм, поставляющих в Россию харвестеры и форвардеры, можно выделить финские фирмы Logset, Pinox, Logman.

В табл. 4. приведены перечень и характеристики машин, применяемых в России на лесозаготовках.

Изучение состояния лесозаготовительного производства в России методом анкетного опроса администрации лесных регионов (27 регионов с общим объемом заготовки древесины 109,8 млн м³), а также на основании информации отраслевых печатных изданий показало, что отечественные лесозаготовители в настоящее время используют две основные технологии лесозаготовок — заготовку и вывозку древесины в хлыстах и в сортиментах.

Т а б л и ц а 4

**Основные технологические процессы и системы машин, применяемые
в Российской Федерации для лесозаготовок [9]**
The main technological processes and machine systems used in the logging operations in the Russian Federation [9]

№ п/п	Технические средства (наименование, марка)	Техническая характеристика	Выполняемые операции	Изготовитель	Районы применения
1. Заготовка хлыстов					
1.1	Бензопилы Хускварна 365Н и 357ХР	Длина шины 45 см Шаг цепи 3/8 Объем бака для смазки цепи 0,42 л Мощность 3,9 (5,3) кВт (л. с.) Объем двигателя 65,1 см ³ Объем бака 0,77 л	Валка, обрезка сучьев	Швеция	Европейская часть: подзона тайги и хвойно-широколиственных лесов; Уральский таежный район; Сибирь: северо-таежный и южнотаежный районы
	Трелевочная машина чокерная типа ТЛТ-100А	Мощность двигателя 88,8 кВт Объем трелеваемого пакета 8 м ³ Тип коробки передач — механическая Масса эксплуатационная 12,6 т	Трелевка хлыстов	ОГЗ, г. Петро-заводск	
	Или: трелевочная машина чокерная «Онежец-300»	Макс. объем трелеваемой пачки 10 м ³ Макс. тяговое усилие лебедки 105 кН Тип ходовой системы — рычажно-балансирная, подрессоренная Тип коробки передач — гидромеханическая Мощность двигателя 89 кВт Дорожный просвет 55 см Масса машины 12,8 т			
1.2	Бензопилы Хускварна 365Н и 357ХР	Длина шины 45 см Шаг цепи 3/8 Объем бака для смазки цепи 0,42 л Мощность 3,9 (5,3) кВт (л. с.) Объем двигателя 65,1 см ³ Объем бака 0,77 л	Валка, обрезка сучьев	Швеция	Европейская часть: группа средне- и южнотаежных лесов; Сибирь: подзона тайги и хвойно-широколиственных лесов; Дальний Восток: подзона тайги, хвойно-широколиственных и широколиственных лесов
	Трелевочная машина чокерная типа ТТ-4М	Макс. объем трелеваемой пачки 15 000 м ³ Макс. тяговое усилие лебедки 122,3 кН Тип ходовой системы — рычажно-балансирная, передняя каретка подрессоренная Тип коробки передач — механическая Мощность двигателя 95,5 кВт Дорожный просвет 53,7 см Масса машины 14,4 т	Трелевка хлыстов	«Краслесмаш», г. Красноярск; Абаканский опытно-механический завод	
1.3	ВПМ ЛП-19А	Макс. диаметр спиливаемого дерева 90 см Макс. вылет манипулятора 8,2 м Тип срезающего органа — пильная шина (по заказу может быть установлено захватно-срезающее устройство Quadro с дисковой пилой) Мощность двигателя 96 кВт Тип ходовой системы — рычажно-балансирная Дорожный просвет 50 см Масса машины 24,0 т	Валка-пакетирование	«Лестехком», г. Йошкар-Ола	То же
	Трелевочная гусеничная машина с пачковым захватом ЛТ-187	Базовый трактор ТТ-4М Макс. объем трелеваемой пачки 10 м ³ Мощность двигателя 96 кВт Дорожный просвет 53,7 см Масса машины 16,3 т	Трелевка деревьев	«Краслесмаш», г. Красноярск; Абаканский опытно-механический завод	
	Сучкорезная машина ЛП-33А	Базовый трактор ТТ-4М Макс. диаметр обрабатываемого дерева 75 см Макс. кривизна обрабатываемого дерева 15 % Тяговое усилие механизма подачи обрабатываемого дерева 50,0 кН Мощность двигателя 95,5 кВт Масса машины 29,9 т	Обрезка сучьев	«Екатеринбургские лесные машины»	

Продолжение таблицы 4

№ п/п	Технические средства (наименование, марка)	Техническая характеристика	Выполняемые операции	Изготовитель	Районы применения
1.4	ВГМ типа John Deere 753J	Макс. диаметр спиливаемого дерева 56 см Макс. вылет манипулятора 8,4 м Тип срезающего органа — дисковый Мощность двигателя 180 кВт Тип ходовой системы — жесткий тракторный Дорожный просвет 74 см Масса машины 29,9 т	Валка-пакетирование	США, Канада	»
	Или: ВГМ типа John Deere 903J	Макс. диаметр спиливаемого дерева 61 см Макс. вылет манипулятора 6,7 / 8,15 м Тип срезающего органа — дисковый Мощность двигателя 224 кВт Тип ходовой системы — жесткий тракторный Дорожный просвет 73,5 см Масса машины 32,9 т		То же	
	Трелевочная колесная машина с пачковым захватом типа JohnDeere 648H (средний класс)	Макс. объем трелеваемой пачки 7,4 м ³ Мощность двигателя 138 кВт Дорожный просвет 60 см Масса машины 14,8 т	Трелевка деревьев	»	
	Или: Трелевочная колесная машина с пачковым захватом типа JohnDeere 748H (тяжелый класс)	Макс. объем трелеваемой пачки 8,2 м ³ Дорожный просвет 60 см Масса машины 17 т	То же	»	
	Сучкорезная машина ЛП-33А	Базовый трактор ТТ-4М Макс. диаметр обрабатываемого дерева 75 см Макс. кривизна обрабатываемого дерева 15 % Тяговое усилие механизма подачи обрабатываемого дерева 50,0 кН Мощность двигателя 95,5 кВт Масса машины 29,9 т	Обрезка сучьев	«Екатеринбургские лесные машины»	
2. Заготовка сортиментов					
2.1	Бензопилы Хускварна 365H и 357XP	Длина шины 45 см Шаг цепи 3/8 Объем бака для смазки цепи 0,42 л Мощность 3,9 (5,3) кВт (л. с.) Объем двигателя 65,1 см ³ Объем бака 0,77 л	Валка, обрезка сучьев.	Швеция	Европейская часть: подзона тайги, хвойно-широколиственных лесов; Уральский таежный район;
	Трелевочная машина чокерная ТЛТ-100А (или ТТ-4М, см. п. 1.2)	Мощность двигателя 88,8 кВт Объем трелеваемого пакета 8 м ³ Тип коробки передач — механическая Масса эксплуатационная 12,6 т	Трелевка деревьев	ОТЗ, г. Петрозаводск	Сибирь: подзона тайги и хвойно-широколиственных лесов;
	Бензопилы Хускварна 365H и 357XP	Длина шины 45 см Шаг цепи 3/8 Объем бака для смазки цепи 0,42 л Мощность 3,9 (5,3) кВт (л. с.) Объем двигателя 65,1 см ³ Объем бака 0,77 л	Раскряжевка	Швеция	Дальний Восток: подзона тайги, хвойно-широколиственных и широколиственных лесов

№ п/п	Технические средства (наименование, марка)	Техническая характеристика	Выполняемые операции	Изготовитель	Районы применения
2.2	Бензопилы Хускварна 365Н и 357ХР	Длина шины 45 см Шаг цепи 3/8 Объем бака для смазки цепи 0,42 л Мощность 3,9 (5,3) кВт (л. с.) Объем двигателя 65,1 см ³ Объем бака 0,77 л	Валка, обрезка сучьев, раскряжевка	Швеция	То же
	Форвардер типа John Deere 1210E	Колесная формула 6×6 / 8×8 Грузоподъемность 14,3 т Макс. вылет манипулятора 10 м Наибольшая длина транспортируемых сортиментов 6,5 м Мощность двигателя 136 кВт Дорожный просвет 60,5 см Масса машины 16,2/18,1 т	Трелевка (перевозка) сортиментов	Финляндия, Швеция	
2.3	Харвестер типа John Deere 1270E	Масса — 19,0 т Макс. вылет манипулятора 10 м Подъемный момент (брутто) 197 кНм Тяговое усилие механизма подачи обрабатываемого дерева 33,8 кН Скорость обработки механизмом подачи 0–4,5 м/с; Наибольший диаметр в зоне спиливания 650 мм; Габаритные размеры (длина, ширина; высота): 7550×2750×3875 мм	Валка, обрезка сучьев, раскряжевка	То же	»
	Форвардер типа John Deere 1210E	Колесная формула 6×6 / 8×8 Грузоподъемность 14,3 т Макс. вылет манипулятора 10 м Наибольшая длина транспортируемых сортиментов 6,5 м Мощность двигателя 136 кВт Дорожный просвет 60,5 см Масса машины 16,2/18,1 т	Трелевка (перевозка) сортиментов	»	

Список литературы

- [1] Григорьев И.В., Жукова А.И., Григорьева О.И., Иванов А.В. Средоадаптированные технологии разработки лесосек в условиях северо-западного региона Российской Федерации: учебно-научное издание. СПб.: ЛТА, 2008. 174 с.
- [2] Лесной кодекс Российской Федерации: от 4 декабря 2006 г. № 200 ФЗ. 41 с.
- [3] Редькин А.К. Технология и оборудование лесозаготовок: учеб. пособие для вузов, направление бакалавриата «Лесное дело», специальность «Лесное хозяйство». М.: МГУЛ, 2010. 178 с.
- [4] Игнатов В.И., Макуев В.А., Сиротов А.В. Техническая эксплуатация и технология ремонта машин и оборудования лесного комплекса. М.: МГУЛ, 2006. 337 с.
- [5] Обыденников В.И. Лесовозобновление после сплошных рубок с применением агрегатной техники. М.: ВНИПИЭЛеспрот, 1988. Вып. 7. 28 с.
- [6] Мясичев Д.Г. Малая механизация для трелевки при рубках ухода. Архангельск: Гос. техн. ун-т, 2008. 120 с.
- [7] Григорьев И.В., Каляшов В.А. Современные тенденции развития техники и технологии лесосечных работ // Леспроминновации, 2005. № 1. С. 6–8.
- [8] Макуев В.А. Критерии формирования парка лесосечных машин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2010. № 1 (70). С. 82–84.
- [9] Быков В.В., Тесовский А.Ю. Справочник по технологическим и транспортным машинам лесопромышленных предприятий и техническому сервису. М.: МГУЛ, 2000. 532 с.
- [10] Прохоров Л.Н., Зинин В.Ф., Желдак В.И. Система технологий и машин (СТМ) для рубок ухода за лесом // Лесная информация, 2004. № 5. С. 25–36.
- [11] Черноиванов В.И., Бледных В.В., Северный А.Э. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: учебное пособие. Москва–Челябинск, 2005. 992 с.

Сведения об авторах

Запруднов Вячеслав Ильич — д-р техн. наук, профессор кафедры ЛТ-8, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: zaprudnov@mgul.ac.ru

Карпачев Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор кафедры ЛТ-8, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: karpachev@mgul.ac.ru

Быковский Максим Анатольевич — канд. техн. наук, доцент кафедры ЛТ-8, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: bykovskiy@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 15.08.2016 г.

TECHNOLOGIES AND TECHNICAL EQUIPMENT USED IN LOGGING OPERATIONS

V.I. Zaprudnov, S.P. Karpachev, M.A. Bykovskiy

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

zaprudnov@mgul.ac.ru

There have been considered some modern technological processes of logging operations which should be developed in such a way that when performing both each operation and a complex of operations as a whole in a normal production mode, with appropriate types of felling, any unacceptable negative impacts on all ecosystem elements could be eliminated. It has been found that the choice of a load and haul fleet needed to carry out logging operations depends on a wide range of environmental and production conditions peculiar to an enterprise (stand conditions, environmental settings, types and methods of logging, the harvesting volume for each type and method of logging, etc.). The classification of the load and haul fleet exploitation conditions was based on the possibility to successfully perform the full range of major logging operations, taking into account the influence of operating conditions on the machine operation. The influence of forest conditions on the technological process of logging operations and on the choice of a machine type was determined, the above choice resulting from by the possibility to carry on logging operations with a minimal damage to the elements of the forest during the felling process. It has been proposed to choose forestry equipment taking into account the method of timber harvesting (tree-length or cut-to-length methods) and both environmental and production conditions. The choice of equipment with optimal parameters is determined primarily by its performance which would warrant its acquisition costs. However, the environmental requirements should not be neglected, i.e., the technology impact on the forest ecosystem should be minimal. The paper presents three groups of methods of choosing machines to carry out logging operations. The main reason for including a method into a particular group is its accuracy. The relationship of technologies used for harvesting timber and its transportation from felling areas in the total timber harvesting volume in the Russian Federation with the description of the main technological operations and main logging equipment has been presented.

Keywords: logging operations, a load and haul fleet, reforestation, logging technology, wood harvesting technology

Suggested citation: Zaprudnov V.I., Karpachev S.P., Bykovskiy M.A. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva protsessov lesosechnykh rabot* [Technologies and technical equipment used in logging operations]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 108–117. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-108-117

References

- [1] Grigoriev I.V., Zhukova A.I., Grigorieva O.I., Ivanov A.V. *Sredoshchadyashchie tekhnologii razrabotki lesosek v usloviyakh severo-zapadnogo regiona Rossiyskoy Federatsii* [Environmentally friendly technologies the development of cutting areas in the North-West region of the Russian Federation]. SPb.: LTA Publ., 2008, 174 p. (in Russian)
- [2] *Lesnoy kodeks Rossiyskoy Federatsii* [Forest codex of the Russian Federation] from 4 December 2006. 200 FZ, 41 p. (in Russian)
- [3] Redkin A.K. *Tekhnologiya i oborudovanie lesozagotovok* [Technology and equipment of logging]. Moscow: MSFU Publ., 2010, 178 p. (in Russian)
- [4] Ignatov V.I., Makeev V.A., Sirota A.V. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya i tekhnologiya remonta mashin i oborudovaniya lesnogo kompleksa* [Maintenance and repair of machines and equipment of forest complex]. Moscow: MSFU Publ., 2006, 337 p. (in Russian)
- [5] Obydennikov V.I. *Lesovozobnovlenie posle sploshnykh rubok s primeneniem agregatnoy tekhniki* [Reforestation after clear-cutting with the use of aggregate equipment] Environmental protection, v. 7, Moscow: NIPIEllesprom, 1988, 28 p. (in Russian)
- [6] Myasishchev D.G. *Malaya mekhanizatsiya dlya trelevki pri rubkakh ukhoda* [Small machines for skidding when thinning]. Arkhangelsk: Arkhangelsk state technical university, 2008, 120 p. (in Russian)
- [7] Grigoriev I.V., Kalyashov V.A. *Sovremennye tendentsii razvitiya tekhniki i tekhnologii lesosechnykh rabot* [Modern trends in technique and technology of logging operations] Lesprominform, no. 1, 2005, pp. 6-8. (in Russian)
- [8] Makuev V.A. *Kriterii formirovaniya parka lesosechnykh mashin* [Criteria for formation of the park logging machines] Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik, 2010, no. 1 (70), pp. 82-84. (in Russian)
- [9] Bykov V.V., Tesovskiy A.Yu. *Spravochnik po tekhnologicheskim i transportnym mashinam lesopromyshlennykh predpriyatiy i tekhnicheskomu servisu* [Handbook of technological and transport machines for timber companies and technical services], Moscow: MSFU Publ., 2000, 532 p. (in Russian)
- [10] Prokhorov L.N., Zinin V.F., Zheldak V.I. *Sistema tekhnologiy i mashin (STM) dlya rubok ukhoda za lesom* [The system of technologies and machines (STM) for thinning of the forest]. Forest information, no. 5, 2004, pp. 25-36. (in Russian)
- [11] Chernoiyanov V.I., Blednykh V.V., Severnyy A.E. *Tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont mashin v sel'skom khozyaystve* [Maintenance and repair of machinery in agriculture: a training manual] Moscow-Chelyabinsk, 2005. 992 p.

Author's information

Zaprudnov Vyacheslav Il'ich — Dr. Sci. (Tech.), Prof. BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: zaprudnov@mgul.ac.ru

Karpachev Sergey Petrovich — Dr. Sci. (Tech.), Prof. BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: karpachev@mgul.ac.ru

Bykovskiy Maksim Anatol'evich — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. BMSTU (Mytishchi branch), e-mail: bykovskiy@mgul.ac.ru

Received 15.08.2016

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПО УРОВНЯМ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

В.А. Дорошенко, Л.В. Друк, А.Э. Герасимов

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
gerasimov.anton.rus@gmail.com

При решении задач многокритериального выбора вариантов технических средств для структурного и параметрического синтеза распределенных по уровням систем управления применяется методы на основе: ориентированных графов с переходом к композиции гиперграфов и соответствующих им матриц; представления распределенных систем управления иерархическими структурами с последующим применением метода анализа иерархий. В реальных исходных условиях не всегда имеется возможность с помощью данных методов представить структуру распределенных систем управления в виде ориентированных графов или иерархической структуры, потому что в таких системах могут существовать обратные связи между уровнями. В настоящей работе предлагается математическое описание распределенных по уровням систем сборки изделий в приборостроении с различными зависимостями между уровнями. Уровням соответствуют подсистемы и связи между ними. В каждую подсистему входят компоненты (технические средства), включающие множества элементов. Исходная структура представлена в виде сетевой структуры компонентов с обратными связями. Для выявления влияния компонентов и элементов в сетевой структуре предложено математическое описание в виде квадратичной суперматрицы. Строки и столбцы этих матриц соответствуют элементам компонентов распределенной системы сборки изделий. Суперматрица компонентов является основой для выявления системы влияния технических средств соответствующих уровней и подсистем. Матрицы элементов суперматрицы позволяют определить системы влияния элементов технических средств на одном уровне и влияния на элементы других уровней структуры систем сборки изделий. Проведено сравнение взаимосвязанных компонентов, указанных в суперматрице. Сравнение влияния компонентов выполнено с помощью метода анализа иерархий, основой которого являются матрицы парных сравнений и шкала Саати. В результате вычислительных операций с матрицей парных сравнений выделен вектор приоритетов влияния компонентов. Значения вектора приоритетов являются весовыми коэффициентами, на которые умножаются матрицы элементов компонентов. В результате формируется взвешенная суперматрица. Обработка этой матрицы позволяет определить векторы приоритетов элементов, которые показывают взаимовлияние элементов технических средств в распределенной системе сборки изделий. Дан пример формирования исходной суперматрицы компонентов системы сборки изделий. Приведена вычислительная процедура матрицы парных сравнений компонентов и определения вектора влияния компонентов (технических средств) сетевой структуры сборки изделий в приборостроении. Оценка выделенных приоритетов выполнена с помощью определения индекса согласованности и коэффициента отношения согласованности исходной суперматрицы парных сравнений.

Ключевые слова: распределенные по уровням системы, сетевая структура, исходные суперматрицы, взвешенная суперматрица, предельная суперматрица, матрицы парных сравнений, векторы приоритетов, взаимовлияние компонентов, обратные связи компонентов, индекс согласованности, отношение согласованности

Ссылка для цитирования: Дорошенко В.А., Друк Л.В., Герасимов А.Э. Математическое описание взаимовлияния технических средств распределенных по уровням систем управления с обратными связями // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 118–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-118-124

При решении задачи многокритериально-го выбора вариантов технических средств для структурного и параметрического синтеза распределенных по уровням систем управления применяются методы на основе:

— ориентированных графов с переходом к композиции гиперграфов и соответствующих им матриц с последующей количественной оценкой структурной избыточности и сложности [1–3]. При этом существующие смежные (горизонтальные) по уровням связи между техническими средствами преобразуются в ориентированную вертикаль с помощью фиктивных вершин;

— представления распределенных систем управления иерархическими структурами с последующим применением метода анализа иерархий [4–7].

В реальных исходных условиях не всегда имеется возможность с помощью данных методов представить структуру распределенных систем в виде ориентированных графов или иерархической структуры, потому что в них существуют зависимости и взаимодействие между техническими средствами различных уровней. Существуют случаи, когда не только важность критериев влияет на приоритеты вариантов, но и важность вариантов влияет на приоритеты критериев. В настоящей работе предлагается математическое описание распределенной по уровням системы сборки изделий в приборостроении. Уровням соответствуют подсистемы и связи между ними. В каждую подсистему входят компоненты, включающие множество элементов (табл. 1). Исходная структура (рис. 1) представлена в виде сетевой струк-

Т а б л и ц а 1

Подсистемы, компоненты и элементы распределенной системы сборки изделий в приборостроении
Subsystems, components and elements of a distributed product assembly system in instrument engineering

Подсистема	Компонент	Элементы
1	C ₁	C ₁₁ — Метод полной взаимозаменяемости C ₁₂ — Метод неполной взаимозаменяемости C ₁₃ — Метод групповой взаимозаменяемости (селективная сборка) C ₁₄ — Метод адаптивно-селективной сборки C ₁₅ — Метод регулирования (использование компенсаторов) C ₁₆ — Метод пригонки
	C ₂	C ₂₁ — Сборка с разделением контроля и комплектования сборочных единиц C ₂₂ — Сборка с частично совмещенным контролем и комплектованием сборочных единиц C ₂₃ — Сборка с совмещением контроля и комплектования сборочных единиц C ₂₄ — Сборка с совмещением комплектования деталей сборочных единиц и размерной обработкой C ₂₅ — Сборка на основе роботизированных компонентов
2	C ₃	C ₃₁ — Структура процессорных измерительных средств (ПРИС) C ₃₂ — Первичные преобразователи C ₃₃ — Измерительные преобразователи C ₃₄ — АЦП C ₃₅ — Процессоры
3	C ₄	C ₄₁ — Процессоры C ₄₂ — Модули аналогового ввода C ₄₃ — Модули дискретного ввода C ₄₄ — Модули аналогового вывода C ₄₅ — Модули дискретного вывода C ₄₆ — Специальные модули C ₄₇ — Слоты C ₄₈ — Интерфейсы
	C ₅	C ₅₁ — Коммуникационные процессорные модули C ₅₂ — Ведомые устройства C ₅₃ — Модули аналогового ввода C ₅₄ — Модули дискретного ввода C ₅₅ — Модули аналогового вывода C ₅₆ — Модули дискретного вывода C ₅₇ — Специальные модули
4	C ₆	C ₆₁ — Процессоры C ₆₂ — Слоты расширения C ₆₃ — Слоты C ₆₄ — Шина процессора C ₆₅ — Дисплей C ₆₆ — Клавиатура C ₆₇ — Интерфейс внешних устройств
	C ₇	C ₇₁ — Процессоры C ₇₂ — Дисплей C ₇₃ — Модули расширения C ₇₄ — Клавиатура C ₇₅ — Интерфейс внешних устройств
5	C ₈	C ₈₁ — Серверы C ₈₂ — Компьютеры C ₈₃ — Повторители C ₈₄ — Концентраторы C ₈₅ — Мосты C ₈₆ — Коммутаторы C ₈₇ — Маршрутизаторы C ₈₈ — Шлюзы

туры компонентов с обратными связями (рис. 2). Для выявления влияния компонентов и элементов в сетевой структуре предложено математическое описание в виде квадратичной суперматрицы (рис. 3) [8–10]. Строки и столбцы матрицы

соответствуют компонентам сетевой структуры (см. рис. 2). Элементами суперматрицы являются квадратичные матрицы $M_{11}, M_{12}, \dots, M_{88}$. Строки и столбцы этих матриц соответствуют элементам компонентов распределенной системы сборки

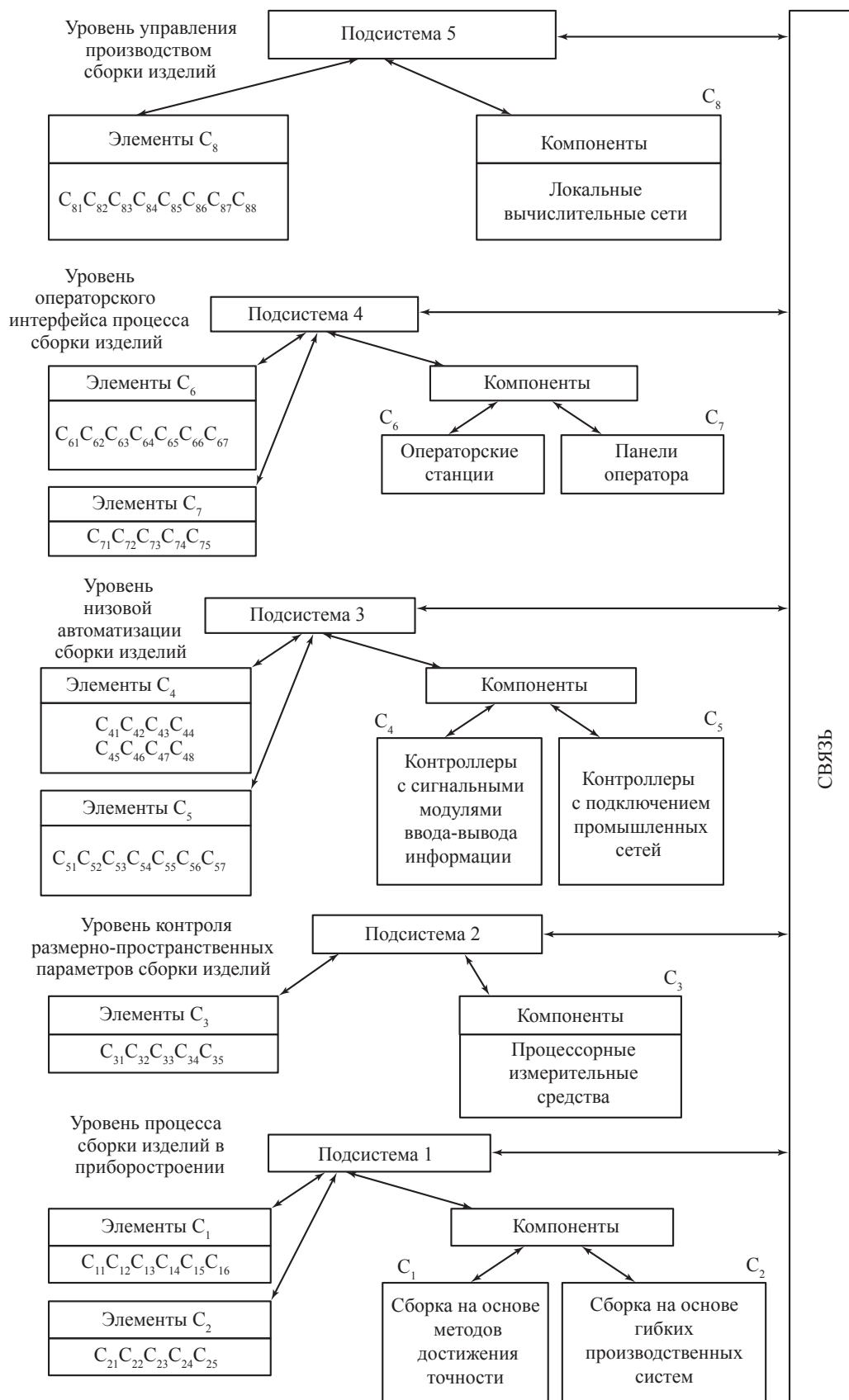


Рис. 1. Подсистемы, компоненты и элементы распределенной системы сборки изделий в приборостроении
 Fig. 1. Subsystems, components, and elements of a distributed build system products in instrument

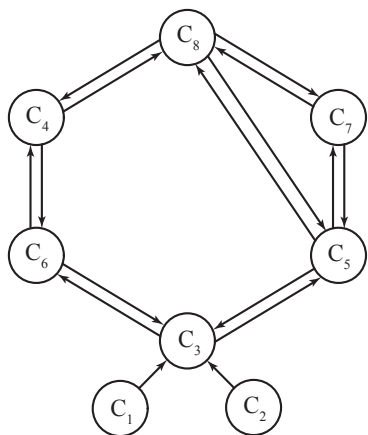


Рис. 2. Сетевая структура компонентов распределенной системы сборки изделий с обратными связями: C_1, C_2 — компоненты-источники; C_3-C_7 — промежуточные компоненты; C_8 — компоненты-стоки

Fig. 2. Network structure of components in a distributed product assembly system with feedback: C_1, C_2 — components of sources; C_3-C_7 — intermediate components; C_8 — sewage-components

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & & C_8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \vdots \\ C_8 \end{matrix} & \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \dots C_{16} & C_{21} C_{22} \dots C_{25} & C_{31} C_{32} \dots C_{35} & \dots & C_{81} C_{82} \dots C_{88} \\ \vdots & M_{11} & M_{12} & M_{13} & \dots & M_{18} \\ \vdots & & & & & \\ C_{21} & & & & & \\ C_{22} & M_{21} & M_{22} & M_{23} & \dots & M_{28} \\ \vdots & & & & & \\ C_{25} & & & & & \\ C_{31} & & & & & \\ C_{32} & M_{31} & M_{32} & M_{33} & \dots & M_{38} \\ \vdots & & & & & \\ C_{35} & & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ C_{81} & & & & & \\ C_{82} & M_{81} & M_{82} & M_{83} & \dots & M_{88} \\ \vdots & & & & & \\ C_{88} & & & & & \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Рис. 3. Суперматрица для распределенной системы сборки изделий с обратными связями

Fig. 3. Supermatrices for a distributed product assembly system with feedback

изделий (см. рис. 1, табл. 1). Суперматрица компонентов является основной для выявления степени влияния технических средств соответствующих уровней и подсистем. Матрицы $M_{11}, M_{12}, \dots, M_{88}$ позволяют определить степень влияния элементов технических средств на одном уровне и влияние на элементы технических средств других уровней структуры системы сборки изделий. На первом этапе работы проведено сравнение взаимосвязанных компонентов (см. рис. 2). Каждое сравнение дает вектор приоритетов влияния всех компонентов, указанных в суперматрице (строки матрицы), на каждый компонент, указанный сверху (столбцы матрицы).

Сравнение влияния компонентов выполнено с помощью метода анализа иерархий [4], основой которого являются матрицы парных сравнений и шкала Саати [4, 8]. Матрица размером $n \times n$ дает суждение о парных сравнениях компонентов. При этом матрица в общем случае имеет вид:

$$A_k = \begin{matrix} i/j & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ C_1 & 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ C_2 & \frac{1}{a_{12}} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \dots & 1 \end{matrix} \quad (1)$$

Элементы матрицы A_k показывают уровень преимущества компонента C_i над компонентом C_j по девятибалльной шкале Саати [4, 8]:

1 — отсутствует преимущество C_i над C_j ;
 3 — имеется слабое преимущество C_i над C_j ;
 5 — имеется существенное преимущество C_i над C_j ;
 7 — есть явное преимущество C_i над C_j ;
 9 — имеется абсолютное преимущество C_i над C_j ;
 2, 4, 6, 8 — промежуточные сравнительные оценки: 2 — почти слабое преимущество; 4 — почти существенное преимущество; 6 — почти явное преимущество; 8 — почти абсолютное преимущество. В результате в соответствии с матрицей (1) сформирована матрица парных сравнений системы сборки изделий в приборостроении:

$$M_C^1 = \begin{matrix} i/j & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 & C_8 \\ C_1 & 1 & 2 & 4 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ C_2 & 1/2 & 1 & 4 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ C_3 & 1/4 & 1/4 & 1 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ C_4 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 3 & 3 & 3 \\ C_5 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 3 & 3 & 3 \\ C_6 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 3 \\ C_7 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1 & 3 \\ C_8 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{matrix} \quad (2)$$

Анализ парных сравнений матрицы M_C^1 позволяет выделить вектор приоритетов влияния компонентов суперматрицы (см. рис. 3). Для

этого необходимо выполнить ряд операций над матрицей (2) [4–7]:

1. Нормализуются столбцы матрицы (2) путем суммирования значения элементов столбцов матрицы M_C^1

$$S_{j_{11}} = \sum_{i=1}^n a_{ij_{11}}, S_{j_{12}} = \sum_{i=1}^n a_{ij_{12}}, \dots, S_{j_{1n}} = \sum_{i=1}^n a_{ij_{1n}}. \quad (3)$$

В результате суммарные значения столбцов матрицы равны.

$$S_{M_C^1} = \begin{matrix} \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ 3,4167 & 4,9167 & 10,6667 & 12,0000 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_5 & C_6 & C_7 & C_8 \\ 12,0000 & 17,3333 & 17,3333 & 22,0000 \end{matrix} \end{matrix} \quad (4)$$

2. Необходимо разделить значения элементов столбцов матрицы (2) на суммарные значения столбцов (4):

$$\begin{aligned} d_{11}^1 &= \frac{a_{11}^1}{S_{j_{11}}^1}, d_{21}^1 = \frac{a_{21}^1}{S_{j_{12}}^1}, \dots, d_{n1}^1 = \frac{a_{n1}^1}{S_{j_{1n}}^1} \\ d_{12}^1 &= \frac{a_{12}^1}{S_{j_{12}}^1}, d_{22}^1 = \frac{a_{22}^1}{S_{j_{12}}^1}, \dots, d_{n2}^1 = \frac{a_{n2}^1}{S_{j_{12}}^1} \\ &\vdots \\ d_{1n}^1 &= \frac{a_{1n}^1}{S_{j_{1n}}^1}, d_{2n}^1 = \frac{a_{2n}^1}{S_{j_{1n}}^1}, \dots, d_{mn}^1 = \frac{a_{mn}^1}{S_{j_{1n}}^1}. \end{aligned} \quad (5)$$

3. На основе элементов (5) формируется матрица, строки и столбцы которой соответствуют анализируемым компонентам $C_1 \dots C_8$

$$M_C^2 = \begin{matrix} i \setminus j & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 & C_8 \\ C_1 & d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} & d_{17} & d_{18} \\ C_2 & d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} & d_{27} & d_{28} \\ C_3 & d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} & d_{37} & d_{38} \\ C_4 & d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} & d_{45} & d_{46} & d_{47} & d_{48} \\ C_5 & d_{51} & d_{52} & d_{53} & d_{54} & d_{55} & d_{56} & d_{57} & d_{58} \\ C_6 & d_{61} & d_{62} & d_{63} & d_{64} & d_{65} & d_{66} & d_{67} & d_{68} \\ C_7 & d_{71} & d_{72} & d_{73} & d_{74} & d_{75} & d_{76} & d_{77} & d_{78} \\ C_8 & d_{81} & d_{82} & d_{83} & d_{84} & d_{85} & d_{86} & d_{87} & d_{88} \end{matrix} \quad (6)$$

4. Суммы значений строк матрицы (6) являются вектором-столбцом данной матрицы

$$\begin{aligned} v_{ст} &= \{S_{i_1}^1, S_{i_2}^1, \dots, S_{i_n}^1\}, S_{i_1}^1 = \sum_{j=1}^n d_{ij_1}^1, \\ S_{i_2}^1 &= \sum_{j=1}^n d_{i_2j_1}^1, \dots, S_{i_n}^1 = \sum_{j=1}^n d_{i_nj_1}^1. \end{aligned} \quad (7)$$

Вектор-столбец матрицы (6) равен

$$v_{ст} = \begin{matrix} \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ 2,05698 & 1,70725 & 1,20029 & 0,84579 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_5 & C_6 & C_7 & C_8 \\ 0,84579 & 0,50391 & 0,50391 & 0,33608 \end{matrix} \end{matrix} \quad (8)$$

5. Вектор-столбец приоритетов компонентов (см. рис. 2) формируется путем деления вектора-столбца (8) на размерность столбцов матрицы M_C^2 (6)

$$v_{пр} = v_{ст} / n. \quad (9)$$

В результате вектор-столбец приоритетов равен

$$v_{пр} = \begin{matrix} \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ 0,25712 & 0,21341 & 0,15004 & 0,10572 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_5 & C_6 & C_7 & C_8 \\ 0,10572 & 0,06299 & 0,06299 & 0,04201 \end{matrix} \end{matrix}$$

Эффективность выведения вектора-приоритетов компонентов (технических средств) оценивается индексом согласованности матрицы M_C^1 (2) [4]

$$ИС = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (10)$$

где λ_{\max} — максимальные собственные числа матрицы (2).

Для определения максимального значения выражения (10) необходимо умножить матрицу парных сравнений (2) на вектор приоритетов (9). В результате формируется вектор-столбец матрицы (2)

$$v_{ст}^1 = M_C^1 v_{пр}. \quad (11)$$

$$v_{ст}^1 = \begin{matrix} \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ 2,42238 & 2,08042 & 1,40597 & 0,92227 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_5 & C_6 & C_7 & C_8 \\ 0,92227 & 0,52934 & 0,52934 & 0,36134 \end{matrix} \end{matrix}$$

После деления значений вектора-столбца $v_{ст}^1$ на соответствующие значения вектор-приоритетов (9) формируются вектор-столбец матрицы (2)

$$v_{ст}^{11} = v_{ст}^1 / v_{пр}. \quad (12)$$

$$v_{ст}^{11} = \begin{matrix} \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 \\ 9,42113 & 9,74863 & 9,37094 & 8,72334 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_5 & C_6 & C_7 & C_8 \\ 8,72334 & 8,40378 & 8,40378 & 8,60130 \end{matrix} \end{matrix}$$

Усредненные значения вектора-столбца (12) являются максимальным собственным числом матрицы парных сравнений компонентов (технических средств) (2)

$$\begin{aligned} ИС &= (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = \\ &= (8,9245 - 8) / (8 - 1) = 0,1320. \end{aligned}$$

Окончательная оценка эффективности выделения приоритетов влияния компонентов (см. рис. 2) определяется по отношению согласованности

$$ОС = \frac{ИС}{СИ} = \frac{0,1320}{1,41} = 0,0936. \quad (13)$$

Случайный индекс (СИ) определяется порядком матрицы (2) по таблице [4, 9]: СИ = 1,41. Приемлемым считается значение отношения согласованности, меньшее или равное 0,1 [4, 9]. В данном случае в соответствии с формулой (13) ОС = 0,0936.

Выделенные значения вектора-столбца приоритетов влияния компонентов (9) являются весовыми коэффициентами, на которые умножаются матрицы M_{11} , M_{12} , ..., M_{88} (см. рис. 3). В результате формируется взвешенная суперматрица. Дальнейшая обработка этой матрицы позволяет получить приоритеты элементов матрицы M_{11} , M_{12} , ..., M_{88} путем вычисления предельной суперматрицы.

Предлагаемое математическое описание может найти широкое применение при структурном и параметрическом синтезе автоматизированных систем сборки изделий в приборостроении и машиностроении, а также в других отраслях промышленности, в том числе при разработке систем управления производством и предприятиями.

Список литературы

- [1] Усачев М.С., Дорошенко В.А. Математическое описание компоновки распределенных систем управления с оценкой структурной избыточности и сложности // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2013. № 3 (95). С. 196–202.
- [2] Герасимов А.Э., Дорошенко В.А., Друк Л.В. Методы формирования и оценки множества исходных вариантов для синтеза распределенных систем управления // Технология и оборудование для переработки древесины: сб. науч. тр. М.: МГУЛ, 2014. Вып. 370. С. 153–161.
- [3] Семенов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В., Крынев А.В. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. М.: ЛЕНАНД, 2016. 520 с.
- [4] Саати Т. Принятие решений, методы анализа иерархий. М.: Радиосвязь, 1993. 278 с.
- [5] Дорошенко В.А., Друк Л.В., Герасимов А.Э. Формирование и многокритериальная оценка исходных вариантов технических средств для синтеза распределенных систем управления на основе анализа иерархий // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2015. № 6. С. 174–179.
- [6] Герасимов А.Э., Усачев М.С., Друк Л.В., Дорошенко В.А. Анализ вариантов технических средств распределенных систем управления с применением парных сравнений и нечетких множеств // Технология и оборудование для переработки древесины: сб. науч. тр. М.: МГУЛ, 2015. Вып. 377. С. 184–195.
- [7] Черноруцкий Н.Г. Методы принятия решений. СПб.: БХВ Петербург, 2005. 416 с.
- [8] Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети. М.: Изд-во ЛКН, 2008. 360 с.; М.: ЛЕНАНД, 2015. 360 с.
- [9] Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Системный анализ и синтез стратегических решений в инноватике: математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций: учеб. пособие. М.: ЛЕНАНД, 2015. 306 с.
- [10] Аверченков В.И., Подвесовский А.Г., Брундасов С.М. Автоматизация многокритериального выбора программно-технических решений на основе семантического расширения иерархических и сетевых моделей // Вестник Волгоградского государственного технического университета, 2004. № 5. С. 105–111.

Сведения об авторах

Дорошенко Виктор Андреевич — д-р техн. наук, профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: gerasimov.anton.rus@gmail.com

Друк Лариса Викторовна — канд. техн. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: gerasimov.anton.rus@gmail.com

Герасимов Антон Эдуардович — аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), e-mail: gerasimov.anton.rus@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23.05.2016 г.

THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE INTERACTION OF TECHNICAL MEANS DISTRIBUTED ACCORDING TO THE CONTROL SYSTEM LEVELS WITH FEEDBACK

V.A. Doroshenko, L.V. Druk, A.E. Gerasimov

BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia
gerasimov.anton.rus@gmail.com

When solving multi-criteria choice of hardware options for the problems of structural and parametric synthesis which are distributed according their control level, the following methods can be used: techniques based on directed graphs and hypergraphs transition to compositions and their respective matrices, methods based on the idea of distributed hierarchical structures of control systems and then applying the analytic hierarchy process. The actual baseline is not always possible using these methods to present the structure of distributed control systems in the form of directed graphs and hierarchical structure because feedbacks between the levels may exist in such systems. In this paper we have proposed a mathematical description of the product assembly systems distributed according their level, the above systems being used in instrument engineering with various dependencies between levels. The level of the respective sub-systems and the links between them are considered. Each subsystem includes some components (hardware) comprising a plurality of elements. The

original structure is a network structure of components with feedback. To determine the effect of the components and elements in the network structure, the mathematical description of quadratic supermatrices has been suggested. The rows and the columns of the matrix correspond to the elements of components of a distributed product assembly system. The component supermatrices are the basis for identifying the system of impact of technical means of the corresponding levels and subsystems. The matrices of the supermatrix elements allow the system to determine the impact of items of technical means on the same level and the impact on other elements of the structure of the above product assembly systems. The first stage of research was to carry out the comparison of related components indicated in supermatrices. The comparison of the component influence was made by using the analytic hierarchy process which is based on the matrix of pairwise comparisons and on the Saaty scale. As a result of computational operations with a matrix of pairwise comparisons, the vector of component influence priorities has been found. The influence priorities vector values are weighting coefficients by which the element component matrices are multiplied. The result is a weighted supermatrix. Processing of this matrix allows to determine the element priority vectors that show the interaction of hardware elements in the distributed product assembly system. This work gives an example of the formation of the original component supermatrices of a product assembly system. It also shows the computational procedure of the matrix of pairwise comparisons of components and that of determining the component (hardware) influence vector within the network product assembly structures in instrument engineering. In this paper the evaluation of the identified priorities has been carried out by determining the compatibility index and the coefficient of the ratio of compatibility of the original pairwise comparison supermatrices.

Keywords: a level-distributed system, a network structure, the original supermatrix, weighted supermatrices, limit supermatrices, a matrix of pairwise comparisons, priority vectors, component interaction, component feedback, the consistency index, the ratio of coherence

Suggested citation: Doroshenko V.A., Druk L.V., Gerasimov A.E. *Matematicheskoe opisaniye vzaimovliyaniya tekhnicheskikh sredstv raspredelennykh po urovnyam sistem upravleniya s obratnymi svyaziyami* [The mathematical description of the interaction of technical means distributed according the control system levels with feedback]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 118–124. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-118-124

References

- [1] Usachev M.S., Doroshenko V.A. *Matematicheskoe opisaniye komponovki raspredelennykh sistem upravleniya s otsenkoy strukturnoy izbytochnosti i slozhnosti* [The mathematical description of the layout of distributed systems, Power Management of the evaluation of the structural redundancy and complexity] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2013, № 3 (95), pp. 196-202. (in Russian)
- [2] Gerasimov A.E., Doroshenko V.A., Druk L.V. *Metody formirovaniya i otsenki mnozhestva iskhodnykh variantov dlya sinteza raspredelennykh sistem upravleniya* [Methods of forming and evaluating a variety of source options for the synthesis of distributed control systems]. *Technology and equipment for processing of wood*, v. 370, Moscow: MSFU Publ., 2014, p. 153-161. (in Russian)
- [3] Semenov S.S., Voronov E.M., Poltavskiy A.V., Kryanev A.V. *Metody prinyatiya resheniy v zadachakh otsenki kachestva i tekhnicheskogo urovnya slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Methods of decision making in the problems of assessing the quality and technical level of complex technical systems]. Moscow: LENAND, 2016, 520 p. (in Russian)
- [4] Saati T. *Prinyatie resheniy, metody analiza ierarkhiy* [Decision making, analytic hierarchy process]. Moscow: Radiosvyaz' Publ., 1993, 278 p. (in Russian)
- [5] Doroshenko V.A., Druk L.V., Gerasimov A.E. *Formirovaniye i mnogokriterial'naya otsenka iskhodnykh variantov tekhnicheskikh sredstv dlya sinteza raspredelennykh sistem upravleniya na osnove analiza ierarkhiy* [Formation and multi-criteria evaluation of the initial versions of the technical means for the synthesis of distributed control systems based on the analytic hierarchy] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2015, no. 6, pp. 174-179. (in Russian)
- [6] Gerasimov A.E., Usachev M.S., Druk L.V., Doroshenko V.A. *Analiz variantov tekhnicheskikh sredstv raspredelennykh sistem upravleniya s primeneniye parnykh sravneniy i nechetkikh mnozhestv* [Analysis of options for hardware distributed control systems with the use of paired comparisons and fuzzy sets] *Technology and equipment for wood processing: Sat. scientific. tr.*, v. 377, Moscow: MSFU Publ., 2015, p. 184-195. (in Russian)
- [7] Chemorutskiy N.G. *Metody prinyatiya resheniy* [Methods of decision-making]. SPb.: BHV Peterburg, 2005, 416 p. (in Russian)
- [8] Saati T. *Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh* [Decision-making at the dependencies and feedbacks]. *Analiticheskie seti*. Moscow: Publisher LCN, 2008, 360 p.; LENAND, 2015, 360 p. (in Russian)
- [9] Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. *Sistemnyy analiz i sintez strategicheskikh resheniy v innovatike* [System analysis and synthesis of strategic decisions in Innovation] *Mathematical, heuristic and intelligent methods of system analysis and synthesis of innovations*, Moscow: LENAND Publ., 2015, 306 p. (in Russian)
- [10] Averchenkov V.I., Podvesovskiy A.G., Brundasov S.M. *Avtomatizatsiya mnogokriterial'nogo vybora programmno-tekhnicheskikh resheniy na osnove semanticheskogo ierarkhicheskikh i setevykh modeley* [Automate multi-criteria selection of software and tech-technical solutions based on semantic hierarchical and network models] *Bulletin of the sovereign-governmental Volgograd Technical University*, 2004, v. 5, pp. 105-111. (in Russian)

Author's information

Doroshenko Viktor Andreevich — Dr. Sci. (Tech.), Prof. BMSTU (Mytishchi branch),
e-mail: gerasimov.anton.rus@gmail.com

Druk Larisa Viktorovna — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. BMSTU (Mytishchi branch),
e-mail: gerasimov.anton.rus@gmail.com

Gerasimov Anton Eduardovich — pg. BMSTU (Mytishchi branch),
e-mail: gerasimov.anton.rus@gmail.com

Received 23.05.2016

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МАРШРУТОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПРИ ОПЕРАТИВНОМ УПРАВЛЕНИИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

М.М. Матюшин, Д.А. Зеленов, Е.В. Бакланов

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш), 141070, Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, д. 4

baklanov@mcc.rsa.ru

В настоящее время при оперативном управлении космическими аппаратами (КА) существует возможность выбора маршрутов передачи данных с задействованием различных контуров, включающих наземные и орбитальные средства доставки информации. В то же время инструмент для определения оптимальных маршрутов, увязывающий возможности передачи данных через различные контуры, отсутствует и оптимальные маршруты выбираются в ручном режиме руководителем полета, с привлечением большого количества специалистов. Применение систем ретрансляции, установка на КА абонентской аппаратуры, унификация командной и телеметрических радиолиний, объединение объектов наземной и космической инфраструктуры в единую систему передачи информации будет способствовать увеличению количества возможных маршрутов доставки данных при оперативном управлении КА. При планируемом росте орбитальной группировки КА, развитии наземной и космической инфраструктуры актуальной задачей становится выбор оптимальных маршрутов передачи данных; ее решение повысит эффективность оперативного управления КА. Этот выбор основан на сводном критерии, определяющем оптимальность исходя из текущей ситуации. Предложены подходы к разработке инструмента для определения оптимальных маршрутов доставки данных с задействованием средств наземного и космического базирования. Выработаны критерии оптимальности, представлены графоаналитические модели системы выбора оптимальных маршрутов при оперативном управлении космическими аппаратами.

Ключевые слова: оперативное управление, космические аппараты, передача данных, критерии оптимальности, маршруты

Ссылка для цитирования: Матюшин М.М., Зеленов Д.А., Бакланов Е.В. Выбор оптимальных маршрутов передачи данных при оперативном управлении космическими аппаратами // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 125–130. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-125-130

В настоящее время при оперативном управлении космическими аппаратами (КА) существует возможность выбора маршрутов передачи данных с задействованием различных контуров, включающих наземные и орбитальные средства доставки информации. Оптимизация маршрутов передачи данных относится к динамической модели сложных технических систем и представляет собой большой массив особых теоретических и технических проблем. При этом для поиска и реализации оптимальных маршрутов требуется управление всеми компонентами системы, включающей технические средства наземного и космического базирования [1].

Решение данных задач по выбору маршрутов передачи информации заключается в нахождении массивов данных, компонентами которых являются последовательность технических средств приема-передачи данных и линии связи между ними.

Например, при управлении российским сегментом Международной космической станции (РС МКС) существует 4 основных контура (рис. 1), с помощью которых можно передать информацию на борт и обратно.

1. Передача данных через наземные средства МО РФ. Расчетом возможных маршрутов пе-

редачи данных занимаются специалисты Главной оперативной группы управления РС МКС, с Центром управления полетами (ЦУП) ЦНИИмаш, г. Королев) во взаимодействии с представителями МО РФ.

2. Маршруты передачи данных через средства Наземного автоматизированного комплекса управления (НАКУ) Роскосмос. Расчетом возможных вариантов передачи данных занимается Центр ситуационного анализа, координации и планирования (ЦСАКП) (ЦУП ЦНИИмаш, г. Королев).

3. Контур маршрутов передачи данных через средства ретрансляции Tracking and Data Relay Satellite System (TDRSS). Расчетом возможных маршрутов занимается NASA.

4. Контур маршрутов передачи данных через средства Многофункциональной космической системы ретрансляции (МКСП) «Луч». Выбором маршрутов передачи данных занимается Центр управления ретрансляцией связи (ЦУРС) (ЦУП ЦНИИмаш, г. Королев).

В то же время инструмент для определения оптимальных маршрутов, увязывающий возможности передачи данных через различные контуры, отсутствует и оптимальные маршруты выбираются в ручном режиме руководителем

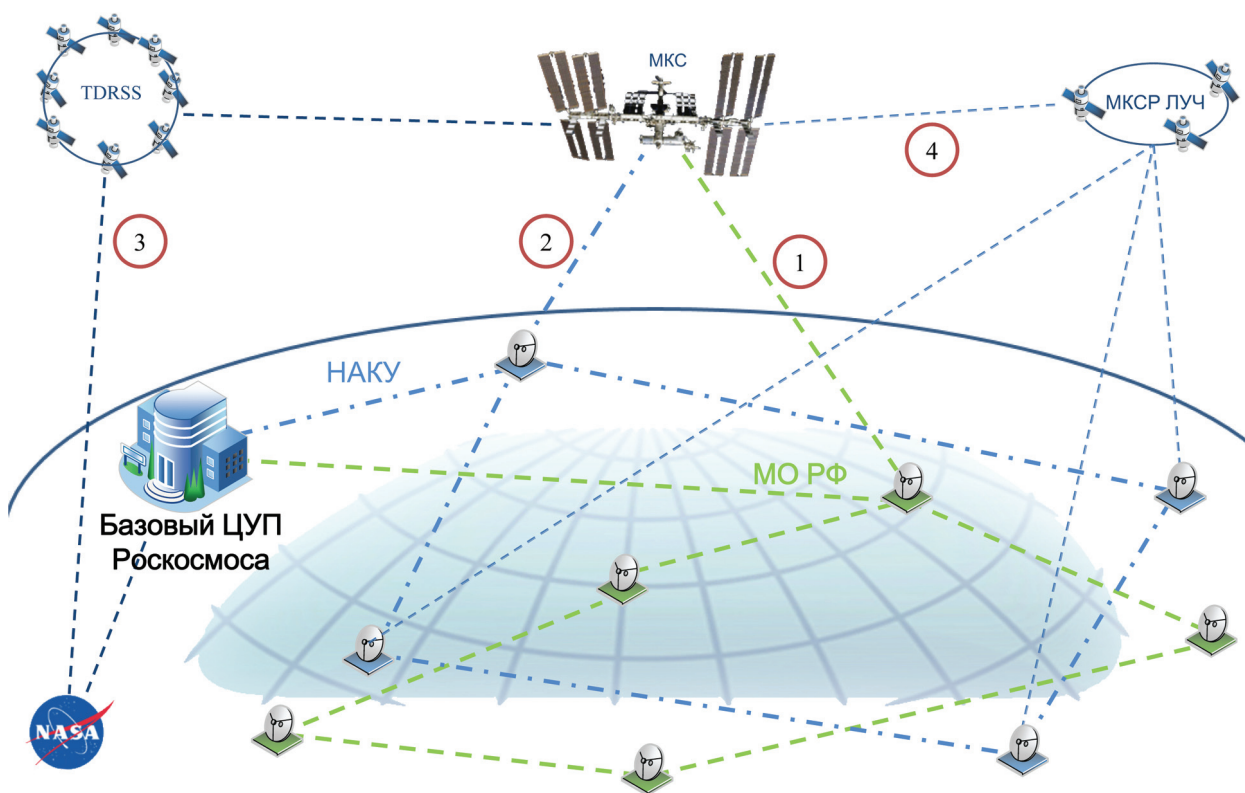


Рис. 1. Возможные маршруты передачи данных на примере управления РС МКС
 Fig. 1. Possible transmission routes on the ISS RS Control Example

полета, с привлечением большого количества специалистов.

Применение систем ретрансляции, установка на КА абонентской аппаратуры, унификация командной и телеметрических радиолиний, объединение объектов наземной и космической инфраструктуры в единую систему передачи информации будет способствовать увеличению количества возможных маршрутов доставки данных при оперативном управлении КА. Планируемый рост орбитальной группировки КА, развитие наземной и космической инфраструктуры приведет к тому, что актуальность решения задачи выбора оптимальных маршрутов передачи данных при оперативном управлении КА будет только расти [2].

Разработка инструмента для определения оптимальных маршрутов передачи данных с использованием средств наземного и космического базирования повысит эффективность оперативного управления КА. Выбор маршрута основан на сводном критерии, определяющем оптимальность исходя из текущей ситуации.

Создание такого инструмента включает комплекс следующих мероприятий:

- анализ известных научно-методических подходов, позволяющих решать задачи выбора

маршрутов доставки данных исходя из требуемых критериев оптимальности с учетом особенностей управления КА (зон радиовидимости, оперативности, характеристик каналов связи, уровней защиты информации и др.);

- моделирование системы передачи данных, включающей средства наземного и космического базирования;

- определение набора базовых требований к узлам системы передачи данных при оперативном управлении, учитывающих критерии оптимальности;

- разработку структуры базового элемента;

- определение параметров взаимодействия в модели, набора критериев оптимальности;

- обеспечение автоматизации процесса моделирования, отработку множества вариантов маршрутизации и сравнение с вариантами, выбранными руководителем полета.

Моделью системы передачи данных является граф (рис. 2) с постоянным числом вершин и изменяемыми количеством и весами ребер. Вершинами графа являются объекты наземной и космической инфраструктуры: Центр управления полетами, земные станции, космические аппараты и спутники-ретрансляторы. Ребрами графа являются каналы связи между взаимодействующими объектами. Маршрутом

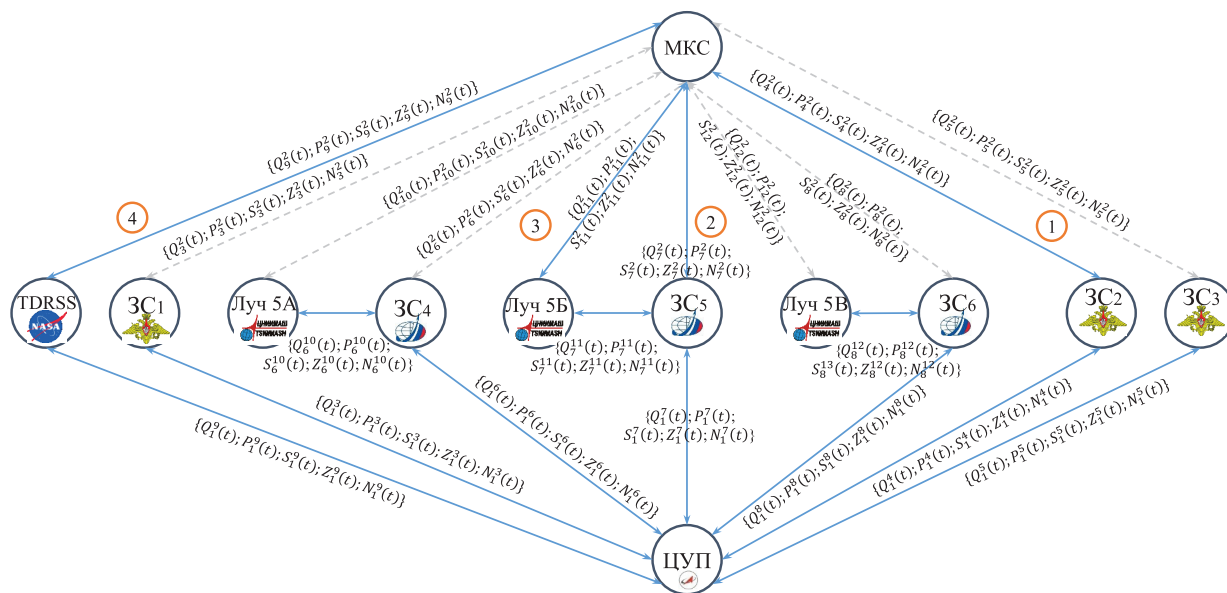


Рис. 2. Пример графовой модели системы передачи данных при оперативном управлении на примере МКС
 Fig. 2. An example of the graph model of data transmission system for the operational control of the ISS example

является кортеж $M[E_j^i, E_j^k, E_j^m, \dots, E_j^s]$ смежных вершин от вершины — источника данных (V_i) к вершине — стоку данных (V_s) [3–6].

При изменении состава наземного комплекса управления, систем ретрансляции, космических аппаратов и т. д. система передачи данных и ее топология также изменяются.

Для поддержания модели в актуальном состоянии предусмотрена возможность ввода новых вершин и связей через описание базового элемента.

В общем случае вес каждого ребра определяется выражением вида

$$C_i^j = f(Q_i^j, P_i^j, Z_i^j, S_i^j, N_i^j, k)$$

при ограничениях

$$\{Q_{ITP}^s \leq Q_i^s, P_{ITP}^s \leq P_i^s, N_{ITP}^s \leq N_i^s, Z_{ITP}^s \leq Z_i^s, S_{ITP}^s \leq S_i^s\},$$

где Q_i^j — скорости передачи данных на участке $i-j$;

P_i^j — пропускная способность канала связи на участке $i-j$;

Z_i^j — защищенность канала связи на участке $i-j$;

S_i^j — стоимость затрат на предоставление канала связи на участке $i-j$;

N_i^j — энергетические затраты на предоставление канала связи на участке $i-j$;

k — нормирующий коэффициент важности критериев (варьируется руководителем полетов в соответствии с текущей полетной ситуацией).

Соответственно, вес маршрута C_i^s от истока в вершине i до стока в вершине s , составленного

из дуг $[E_j^i, E_j^k, E_j^m, \dots, E_j^s]$, взятых из множества A дуг графа [3], задается формулой

$$C_i^s(A) = \sum_{(V_i, V_j) \in A} C_i^j.$$

Одним из способов формального задания системы выбора оптимальных маршрутов передачи данных при оперативном управлении является его представление через матрицу смежности (табл. 1) [7–11] $A(t)$ (где столбец матрицы — это исток (i) данных; строка — сток (j) данных) и таблицы маршрутов (табл. 2) [5].

Процесс выбора оптимальных маршрутов передачи данных при оперативном управлении космическими аппаратами по данному подходу сводится к 4 этапам.

Этап 1. Построение графа с меняющейся топологией $G(\Delta t)$.

Закон изменения состава и весов ребер определяется в зависимости от характеристик движения КА и задействования космической инфраструктуры. Изменения топологии и характеристик маршрутов приема-передачи данных проходят динамично, тем не менее в большинстве своем являются предсказуемыми.

Топология и зоны радиовидимости наземной и космической инфраструктуры детерминированы, так как КА движутся практически с неизменными баллистическими параметрами. Поэтому местоположение КА, зоны, время радиовидимости, характеристики задействования инфраструктуры могут быть рассчитаны заранее.

Изменение топологии системы во времени отображается в виде последовательности

Т а б л и ц а 1

Матрица нагрузки между элементами системы передачи данных при оперативном управлении КА на примере доставки данных на РС МКС
The matrix of the load between the elements of the data transmission system in the operational control of the spacecraft on the example of data delivery to the ISS

	ЦУП	МКС	ЗC ₁	ЗC ₂	...	ЗC ₆	TDRSS	Луч 5А	Луч 5Б	Луч 5В
1. ЦУП	0	0	C ₁ ³ (t)	C ₁ ⁴ (t)	...	C ₁ ⁸ (t)	C ₁ ⁹ (t)	C ₁ ¹⁰ (t)	C ₁ ¹¹ (t)	C ₁ ¹² (t)
2. МКС	0	0	C ₂ ³ (t)	C ₂ ⁴ (t)	...	C ₂ ⁸ (t)	C ₂ ⁹ (t)	C ₂ ¹⁰ (t)	C ₂ ¹¹ (t)	C ₂ ¹² (t)
3. ЗC ₁	C ₃ ¹ (t)	C ₃ ² (t)	0	C ₃ ⁴ (t)	...	C ₃ ⁸ (t)	0	0	0	0
4. ЗC ₂	C ₄ ¹ (t)	C ₄ ² (t)	C ₄ ³ (t)	0	...	C ₄ ⁸ (t)	0	0	0	0
...
8. ЗC ₆	C ₈ ¹ (t)	C ₈ ² (t)	C ₈ ³ (t)	C ₈ ⁴ (t)	...	0	0	C ₈ ¹⁰ (t)	C ₈ ¹¹ (t)	C ₈ ¹² (t)
9. TDRSS	C ₉ ¹ (t)	C ₉ ² (t)	0	0	...	0	0	0	0	0
10. Луч 5А	C ₁₀ ¹ (t)	C ₁₀ ² (t)	0	0	...	C ₁₀ ⁸	0	0	0	0
11. Луч 5Б	C ₁₁ ¹ (t)	C ₁₁ ² (t)	0	0	...	C ₁₁ ⁸ (t)	0	0	0	0
12. Луч 5В	C ₁₂ ¹ (t)	C ₁₂ ² (t)	0	0	...	C ₁₂ ⁸ (t)	0	0	0	0

Т а б л и ц а 2

Возможные маршруты передачи данных при оперативном управлении космическими аппаратами
An example of a table of possible data transmission routes at the operational control of space vehicles

Конфигурация графа G в момент времени Δt	Исток данных	Сток данных	Номер маршрута	Важность критериев					Кортеж маршрута	Вес маршрута
				Q	P	Z	S	N		
Δt ₁ 00:00:00 — 00:01:59 01.01.2016	V _i	V _s	1	U _Q	U _P	U _Z	U _S	U _N	E _i ^j , E _j ^k , E _k ^{...} , ..., E _s ^s	∑ _{i=1} ^s C _i ^s (Δt ₁) ⁻¹
			2						E _i ^j , E _j ^k , E _k ^{...} , ..., E _s ^s	∑ _{i=1} ^s C _i ^s (Δt ₁) ⁻¹
		
	V _i	V _s	1					
			2					
		
...		
Δt ₂ 00:02:00 — 00:03:45 01.01.2016	V _i	V _s	1	U _Q	U _P	U _Z	U _S	U _N	E _i ^j , E _j ^k , E _k ^{...} , ..., E _s ^s	∑ _{i=1} ^s C _i ^s (Δt ₂) ⁻¹
			2						E _i ^j , E _j ^k , E _k ^{...} , ..., E _s ^s	∑ _{i=1} ^s C _i ^s (Δt ₂) ⁻¹
		
	V _i	V _s	1					
			2					
		
...		

{G(Δt)} = G(Δt₀) → G(Δt₁) → ... → G(Δt_n) конфигураций графа продолжительностью Δt. Конфигурации представляются в виде статического графа с постоянным числом вершин, изменяемым количеством ребер и изменяемыми весами ребер.

Этап 2. Определение элементов матрицы смежности.

При изменении состава наземного комплекса управления, систем ретрансляции и т. д. систе-

ма передачи данных и ее топология также изменяются. Для поддержания модели в актуальном состоянии предусмотрена возможность ввода новых вершин и связей через описание базового элемента.

Этап 3. Расчет кратчайших путей между всеми парами вершин графа G(Δt_i) по сводному критерию.

Для каждой конфигурации G(Δt_i) между всеми вершинами — источниками космических

данных и всеми вершинами стоками данных рассчитывается число K кратчайших путей — основные и резервные маршруты

$$\sum_i^s C_i^s(\Delta t_i).$$

Полученные массивы данных вносятся в таблицу маршрутов (см. табл. 2.).

Этап 4. На основании сводного критерия оптимальности формальная постановка задачи принимает вид

$$C_i^s(t) = \sum_{t=t_0}^{t \rightarrow \infty} \sum_{(V_i, V_j) \in A} C_i^j(t) \rightarrow \min$$

при ограничениях:

$$\begin{cases} Q_i^s(t)_{TP} \leq Q_i^s(t) \rightarrow \max, \\ P_i^s(t)_{TP} \leq P_i^s(t) \rightarrow \max, \\ N_i^s(t)_{TP} \leq N_i^s(t) \rightarrow \min, \\ Z_i^s(t)_{TP} \leq Z_i^s(t) \rightarrow \min, \\ S_i^s(t)_{TP} \leq S_i^s(t) \rightarrow \max. \end{cases}$$

Этап 5. Выдача рекомендаций.

Варьируя показателями важности критериев, выбирают основные и резервные маршруты передачи данных по наилучшему совпадению для всей последовательности множеств конфигураций графа (см. табл. 2.).

Таким образом, в настоящее время и в будущем при увеличении количества маршрутов передачи данных определение оптимальных маршрутов данных с помощью автоматизированного научно обоснованного инструмента будет актуальным и эффективным.

Выбор заключается в определении структуры системы передачи космических данных как сложной технической системы и закона

ее функционирования, моделировании изменений конфигурации системы в течение данного периода времени, в расчете кратчайших путей для каждой конфигурации системы и минимизации сводного критерия доставки космических данных для повышения эффективности оперативного управления КА и задействования космической инфраструктуры, включающей средства наземного и орбитального базирования.

Список литературы

- [1] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. Управление космическими полетами: учеб. пособие: в 2 ч. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
- [2] Матюшин М.М., Зеленев Д.А., Соколов Н.Л., Бакланов Е.В. Базовый ЦУП Роскосмоса как высокотехнологичный инструмент управления сложными системами космического назначения // Тр. XVII Междунар. конф. «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара: Институт проблем управления сложными системами РАН, 2015.
- [3] Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.
- [4] Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 5-е изд. СПб.: Питер, 2012. 680 с.
- [5] Алиев Т.И. Сети ЭВМ и телекоммуникации, 2011.
- [6] Овчинников В.А. Графы в задачах анализа и синтеза структур сложных систем. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 423 с.
- [7] Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космических аппаратов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 245 с.
- [8] Ларичев О.И. Наука и искусство принятия решений. М.: Наука, 200 с.
- [9] Радиосистемы передачи информации: учеб. пособие для вузов / В.А. Васин, В.В. Калмыков, Ю.Н. Себекин, А.И. Сенин, И.Б. Федоров. М.: Горячая линия Телеком, 2005. 472 с.
- [10] Сомов А.М. Распространение радиоволн и антенны спутниковых систем связи: учеб. пособие для вузов. М.: Горячая линия Телеком, 2015. 456 с.
- [11] Sanjay K. Chaturvedi. Network Reliability: Measures and Evaluation. Scrivener Publishing LLC. Published 2016 by John Wiley & Sons, Inc.

Сведения об авторах

Матюшин Максим Михайлович — д-р техн. наук, зам. генерального директора по управлению полетами — начальник ЦУП, ФГУП ЦНИИмаш, область научных интересов: технологии системного анализа и моделирования управления космическими полетами, e-mail: baklanov@mcc.rsa.ru

Зеленев Денис Александрович — канд. техн. наук, зам. начальника ЦУП по науке, ФГУП ЦНИИмаш, область научных интересов: управление полетами космических аппаратов, инновационные технологии в космической деятельности, e-mail: baklanov@mcc.rsa.ru

Бакланов Евгений Владимирович — инженер 1 категории, ФГУП ЦНИИмаш, область научных интересов: оптимизация процесса передачи данных при управлении полетом космических аппаратов, инновационные технологии в космической деятельности, e-mail: baklanov@mcc.rsa.ru

Статья поступила в редакцию 01.11.2016 г.

THE CHOICE OF AN OPTIMAL DATA TRANSFER PATH AT THE OPERATIONAL SPACECRAFT CONTROL

M.M. Matyushin, D.A. Zelenov, Ye.V. Baklanov

Central Research Institute for Engineering Technology, 4, st. Pionerskaya, Korolev, Moscow region, 141070, Russia

baklanov@mcc.rsa.ru

Currently, with the operational control of a spacecraft (SC), there is a choice of various data transfer paths including ground-based and orbiting means of information delivery. At the same time, a tool for determining optimal routes which could link the transfer of data through the various contours is not available, and optimal routes are selected manually by a shift flight director, with the involvement of a large number of specialists. The activation of the data relay system, the installation of the subscriber equipment on board a SC, the unification of command and telemetry links, incorporating the objects of ground and space infrastructure into a single data transfer system will increase the number of possible paths of delivering data that are urgent for the operational control of a SC. The plan to increase the orbital group of a SC, the development of ground and space infrastructures results in the fact that the urgency of solving the problem of choosing the optimal data transfer path for the operational control of a spacecraft will only grow. The development of a tool determining the optimal data transfer paths using ground-based and orbiting means will enhance the effectiveness of operational control by determining optimal routes for data transfer based on the combined criteria, finding an optimal path depending on the situation. This article deals with the solution of actual problems and offers some approaches to the development of a tool determining the optimal data transfer paths by using ground-based and orbiting means. The article includes a set of optimality criteria which are presented by the graphical-analytical models to select the optimal paths at the operational control of a spacecraft.

Keywords: operational control, a spacecraft, data transfer, optimality criteria, paths, routes

Suggested citation: Matyushin M.M., Zelenov D.A., Baklanov Ye.V. *Vybor optimal'nykh marshrutov peredachi dannykh pri operativnom upravlenii kosmicheskimi apparatami* [The choice of an optimal data transfer path at the operational spacecraft control]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 125–130. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-125-130

References

- [1] Solov'ev V.A., Lysenko L.N., Lyubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Mission control]. Moscow: Bauman MSTU Publ., 2009, pp. 902. (in Russian)
- [2] Matyushin M.M., Zelenov D.A., Sokolov N.L., Baklanov E.V. *Bazovyy TsUP Roskosmosa kak vysokotekhnologichnyy instrument upravleniya slozhnymi sistemami kosmicheskogo naznacheniya* [Basic MCC of the Russian space Agency as a high-tech tool in the management of complex systems for space application] *Trudy XVII mezhdunarodnoy konferentsii «Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh* [Proceedings of the XVII international conference «Problems of control and modeling in complex systems»]. Samara: Institut problem upravleniya slozhnymi sistemami Rossiyskoy akademii nauk (RAN) Publ., 2015, 400 p. (in Russian)
- [3] Kristofides N. *Teoriya grafov. Algoritmicheskiy podkhod* [Graph theory. Algorithmic approach]. Moscow: Mir Publ., 1978, pp. 175-214. (in Russian)
- [4] Tanenbaum E., Uezeroll D. *Komp'yuternye seti* [Computer networks]. Saint Petersburg: Piter Press, pp. 43-186.
- [5] Aliev T.I. *Seti EVM i telekommunikatsii* [Computer networks and telecommunications]. Saint Petersburg: ITMO, 2011, pp. 54-61. (in Russian)
- [6] Ovchinnikov V.A. *Grafy v zadachakh analiza i sinteza struktur slozhnykh sistem* [Graphs in problems of analysis and synthesis of structures of difficult systems]. Moscow: Bauman MSTU, 2014, p. 423. (in Russian)
- [7] Mikrin E.A. *Bortovye kompleksy upravleniya kosmicheskikh apparatov* [Avionics spacecraft control]. Moscow: Bauman MSTU, 2014, p. 245. (in Russian)
- [8] Larichev O.I. *Nauka i iskusstvo prinyatiya resheniy* [The art and science of decision-making]. Moscow: Nauka Publ., 1979, pp. 28-88. (in Russian)
- [9] Vasin V.A., Kalmykov V.V., Sebekin Yu.N., Senin A.I., Fedorov I.B. *Radiosistemy peredachi informatsii* [Radio systems of information transmission]. Moscow: Goryachaya liniya Telekom Publ., 2005, pp. 291-377. (in Russian)
- [10] Somov A.M. *Rasprostranenie radiovoln i anteny sputnikovyykh sistem svyazi* [Radiowave propagation and antennas for satellite communication systems]. Moscow: Goryachaya liniya Telekom Publ., 2015, pp. 5-50. (in Russian)
- [11] *Sanjay K. Chaturvedi*. Network Reliability: Measures and Evaluation. Scrivener Publishing LLC. Published 2016 by John Wiley & Sons, Inc., 248 p.

Author's information

Matyushin Maksim Mikhaylovich — Dr. Sci. (Tech.), Deputy Director General for Mission Control — Head of PMU, TsNIImash, scientific interests — System Analysis and Mission Control Simulation Technology, e-mail: baklanov@mcc.rsa.ru

Zelenov Denis Aleksandrovich — Cand. Sci. (Tech.), Deputy Head of the PMU for Science, TsNIImash, scientific interests — Office space missions, innovative technologies in space activities, e-mail: baklanov@mcc.rsa.ru

Baklanov Evgeniy Vladimirovich — Engineer, TsNIImash, scientific interests — Optimizing data transfer process in the management of the spacecraft mission, innovative technologies in space activities, e-mail: baklanov@mcc.rsa.ru

Received 01.11.2016

УДК 536.248.2

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-131-136

СКАЧОК КОНДЕНСАЦИИ ПРИ ЗАПУСКЕ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ**А.Н. Шульц**МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
shultsalek@mail.ru

Запуск тепловой трубы (ТТ) из замороженного состояния теплоносителя (натрия) является самым опасным периодом ее работы. В этот момент может наступить прекращение замкнутой циркуляции теплоносителя, перегрев стенки испарителя и ее прожог. Главной причиной является наступление капиллярных ограничений. Из всех видов потерь давления основными считают потери: на прокачку жидкого теплоносителя; при фазовых переходах; на перенос паровой фазы; при этом структура парового потока не исследовалась. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования нестационарных температурных полей при запуске натриевой ТТ. Структуру парового потока изучали при запуске ацетоновой ТТ. Исследование структуры парового потока проводили оптическими методами контроля. Для этого использовали интерферометр Маха — Цендера, теневой прибор Теллера, метод «светового ножа». Обнаружены частицы жидкой фазы, вихревые структуры в испарителе и конденсаторе, конденсационный скачок на выходе из испарителя. Появление частиц жидкой фазы в паровом потоке объясняется гетерогенной объемной конденсацией, наступающей в результате как гетерофазных флуктуаций из самого пара, так и появления зародышей новой фазы в виде капель, выброшенных из фитиля. Скачок конденсации обнаружен на выходе из испарителя в виде каустической линии. Кратковременный перегрев стенки натриевой тепловых труб (ТТ) при запуске ее из замороженного состояния объясняется наступлением капиллярных ограничений в результате возможного появления конденсационного скачка и потерь на вращение вихревых структур в испарителе и конденсаторе.

Ключевые слова: гетерофазные, интерферометр, Теллер, вихревые структуры, замороженный**Ссылка для цитирования:** Шульц А.Н. Скачок конденсации при запуске тепловых труб // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 131–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-131-136

Запуск жидкометаллических ТТ из замороженного состояния теплоносителя представляет собой самый ответственный и опасный этап их работы. Вымораживание и прекращение циркуляции жидкого теплоносителя может привести к осушению фитиля испарителя и прожогу стенки. Потеря работоспособности ТТ в этот период может стать причиной выхода из строя всех объектов, обслуживаемых ТТ [1, 2]. В данной работе приводятся результаты теоретического и экспериментального исследований нестационарных температурных полей при запуске жидкометаллических ТТ из замороженного состояния теплоносителя (натрия). Для выяснения причин срыва запуска жидкометаллической ТТ структуру парового потока исследовали на ацетоновой плоской ТТ с помощью оптических средств контроля [3–5].

Экспериментальные стенды и средства контроля**Стенд для изучения пусковой динамики жидкометаллических ТТ**

Объектом исследования служили две натриевые тепловые трубы диаметром 48 мм: № 1 — длина 1800 мм с газовым наполнением, давление неконденсируемого газа (НКГ) (аргона) $P \approx 133$ Па, длина зоны испарения 250 мм; № 2 — вакуумная (без НКГ), длина 1825 мм, длина зоны испарения

278 мм [1–3]. Испытания тепловых труб проводили в вакуумной камере при горизонтальном расположении ТТ. Нагрев зоны испарения осуществляли электронагревателем радиационного типа, обеспечивающим выход ТТ на уровень температуры до 800 °С. Для исключения воздействия нагревателя на зону конденсации ТТ в конце зоны испарения была установлена экранно-вакуумная изоляция из трех слоев ниобиевой фольги.

Отвод тепла от зоны конденсации осуществляли излучением на охлаждаемые водой стенки вакуумной камеры. Обе трубы имели составной фитиль, образованный кольцевым зазором, для протока жидкого теплоносителя под экраном. Экран фитиля был выполнен из нержавеющей сетки саржевого плетения № 120/670 ГОСТ 3187–65. Общими для каждой из этих труб являются следующие параметры: диаметр пор экрана фитиля 120 мкм, кольцевой зазор под экраном для протока теплоносителя 0,5 мм. Материал корпуса — ниобий.

Система измерений

Температура стенки ТТ контролировалась вольфрам-рениевыми термомпарами, расположенными на наружной поверхности трубы. Корольки термопар приваривали к стенке трубы и закрывали экраном. Показания термопар автоматически регистрировались информационно-измерительной системой (ИИС) с шагом 1,56 с.

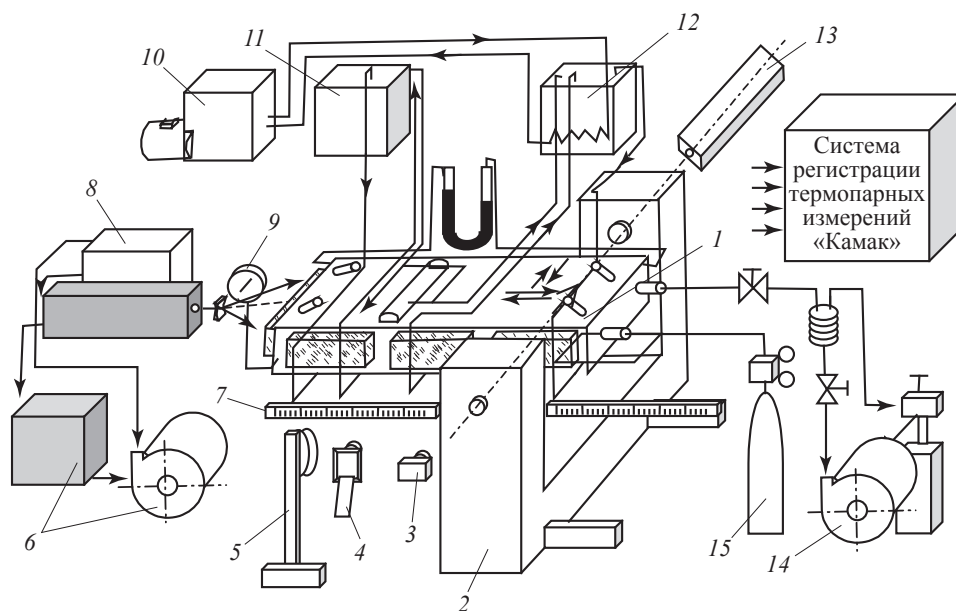


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки по визуализации оптических неоднородностей в паровом потоке тепловых труб: 1 — рабочий участок; 2 — Интерферометр Маха-Цендера; 3 — фотоаппарат; 4 — видеокамера; 5 — скоростной фоторегистратор; 6 — система охлаждения аргонового лазера; 7 — линейка; 8 — аргоновый лазер; 9 — манометр; 10 — насос термостатов; 11, 12 — термостаты; 13 — гелий — неоновый лазер; 14 — вакуумный насос; 15 — газ, аргон (подпитка НТТ неконденсируемым газом);

Fig. 1. The schematic diagram of experimental installation to visualize the optical non- uniformity in a steam flow of heat pipes: 1 — a working site; 2 — M-Z (Mach-Zender) Interferometer; 3 — a camera; 4 — a video camera; 5 — a high-speed photo recorder; 6 — a cooling system of the argon laser; 7 — a ruler; 8 — an argon laser; 9 — a manometer; 10 — a Pump of thermostats; 11, 12 — Thermostats; 13 — Helium–neon laser; 14 — a vacuum pump; 15 — gas, argon (feed of a LHP with non-condensed gas)

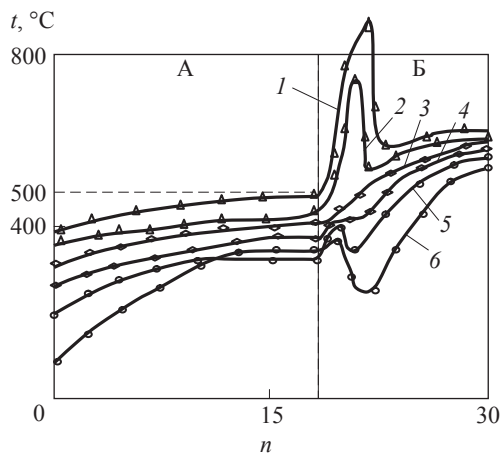


Рис. 2. Фрагмент нестационарного температурного поля при переходе натриевой ТТ из стационарного режима в режим большей мощности: 1–3 — номера термопар, расположенных в испарителе; 5, 6 — номера термопар в конденсаторе

Fig. 2. A fragment of a non-stationary temperature field upon transition of a sodium HP from the stationary mode: 1–3 — numbers of the thermocouples located in the evaporator; 5, 6 — numbers of thermocouples in the condenser

Стенд для исследования структуры парового потока

Изучение структуры парового потока в жидкометаллических ТТ сопряжено с непреодолимыми техническими трудностями. Поэтому для исследования оптических неоднородностей в парожидкостном тракте плоской модели ТТ был спроектирован и создан стенд [4] (рис. 1). Рабочий участок — низкотемпературная тепловая труба. Теплоноситель — ацетон. Основной прибор для регистрации оптических неоднородностей — интерферометр Маха — Цендера ИТ-244 производства ЛОМО. Рабочее поле прибора имеет диаметр 70 мм. Компенсационная камера позволит регулировать оптический ход опорного луча. Прибор перестраивали в теневой прибор Теплера: опорный пучок перекрывали, а в фокусе предметного светового пучка устанавливали «нож Фуко».

Подсветку интерферометра проводили источником света ЛГ-52 (0,6328 мкм). Визуализацию методом оптического «светового ножа» осуществляли с помощью источника интенсивного монохроматического света ЛГН 404А, длина волны которого $\lambda = 0,45 \pm 0,035$ мкм.

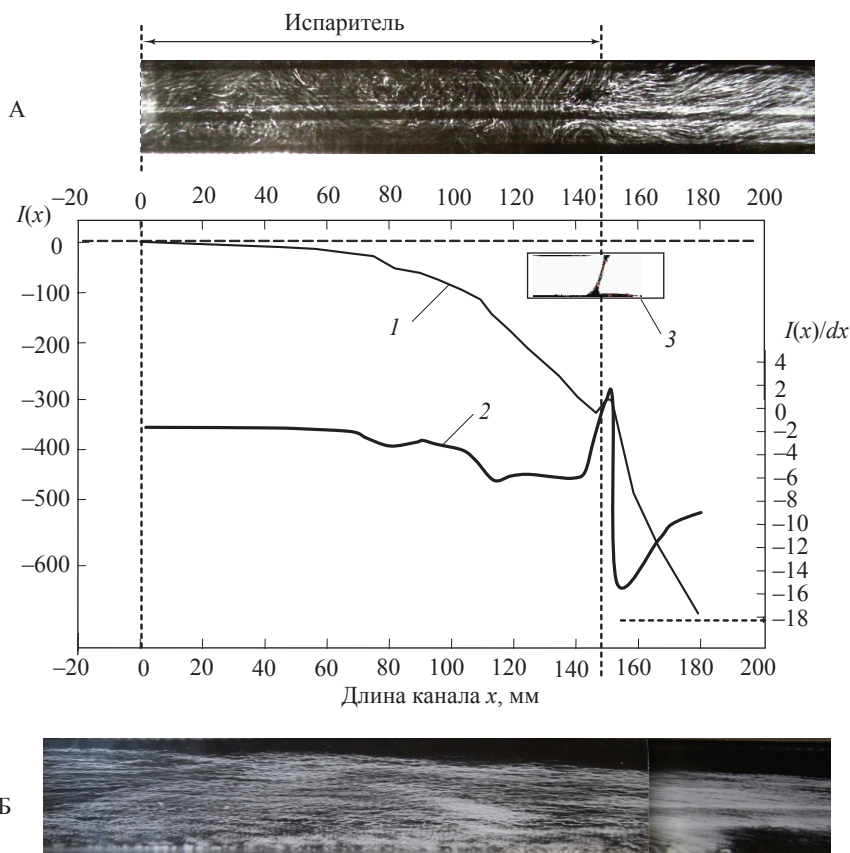


Рис. 3. Результаты расшифровки интерферограмм: 1 — планиметрическое определение энтальпии $I(x) = \int S(y)dy$ для различных поперечных плоскостей вдоль зоны испарения ТТ; 2 — градиент изменения энтальпии $d(I(x))/dx$; 3 — снимок скачка конденсации (Теплер); А — фотография потока в испарителе; Б — фотография потока в конденсаторе, второе окно

Fig. 3. The results of interferograms interpretation: 1 — planimetric definition of an enthalpy $I(x) = \int S(y)dy$ of various cross planes along a zone of evaporation of a HP; 2 — gradient of change of an enthalpy of $d(I(x))/dx$; 3 — the photo of a flow in the evaporator; Б — the photo of a flow in the condenser, the second window

Результаты исследования запуска жидкометаллической ТТ

В жидкометаллических ТТ границы, создаваемые вихрями, в пределах которых ускоряется сверхзвуковой поток, подобны соплу Лавалья. Ван-Андел [1–3] предположил возможное уменьшение критического сечения в круглой трубе и предложил ввести для расчета звукового предела переносимой мощности коэффициент 0,4. Вопрос о возможности запирания потока в критическом сечении вследствие образования скачка конденсации проанализировал Леви [3]. Из его анализа следует, что скачок конденсации происходит при достижении $M = 1,25$, то есть в зоне конденсации, в диапазоне температур 475...650 °С. На рис. 2 представлен срыв работы жидкометаллической ТТ при переходе из стационарного режима, соответствующего электрической мощности нагревателя $N_A = 840$ Вт, в режим, соответствующий мощности $N_B = 1700$ Вт; $P_{\text{нкг}} = 133,3$ Па. Число Маха на выходе из испарителя, оцененное по пе-

репаду давлений, составило 1,4. Нестационарное поле температуры свидетельствует об осушении стенки испарителя, временном прекращении его работы и о восстановлении работоспособности ТТ ($\tau = n \cdot 31,4$ с, где n — номер цикла измерений).

Исследование причины срыва проводили с использованием расчетных оценок по соотношениям из [3–6]. Жидкость, долго находившаяся в контакте с газом, насыщается им. Осушение фитиля происходит из-за вскипания теплоносителя, насыщенного газом в зазоре составного фитиля. Суммарный относительный перегрев жидкости $\Delta T_{\Sigma} / \Delta T_{\text{кр}} = (\Delta T_{\lambda} + \Delta T_{\Delta p} + \Delta T_{\phi} + \Delta T_{\Gamma}) / \Delta T_{\text{кр}} > 1$, где $\Delta T_{\text{кр}} = (dP/dT)^{-1} [(2\sigma / 0,5\delta_{\text{зав}}) - P_{\text{нкг}}]$. Пар прорывает жидкую пленку в экране фитиля с разбрызгиванием. Выброшенные в паровой поток капли являются зародышами новой фазы и могут способствовать развитию процесса гетерогенной объемной конденсации аналогично тому, как это происходит в низкотемпературной ТТ (рис. 3, А). На перенос капель затрачивается энергия парового потока, и потери давления в паре возрастают.

Следовательно, скачок конденсации является сопутствующим явлением и поддерживает развитие срывного процесса. Показания 5-й и 6-й термопар (см. рис. 2) подтверждают факт выброса капель и их переноса в конденсатор и косвенно дают основания полагать, что в паровом потоке состоялась гетерогенная объемная конденсация.

Результаты визуализации структуры парового потока

Первое значительное изменение градиентов оптической неоднородности наблюдалось на выходе из испарителя (см. рис. 3, А), [5, 6]. В начале конденсатора наблюдалось интенсивное развитие объемной конденсации (рост размера капель). В конце конденсатора — рост количества и размеров капель и выпадение их из потока на нижнюю плиту (рис. 3, Б).

Теневым методом [7] выявлены области наибольших градиентов оптических неоднородностей.

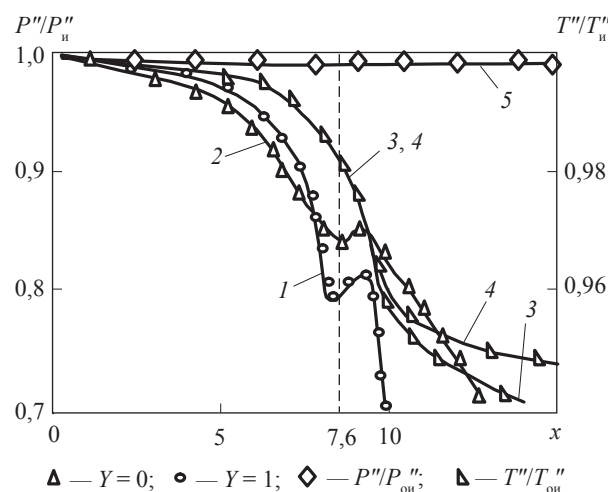


Рис. 4. Распределение параметров влажного пара вдоль нижней ($y = 0$) и верхней ($y = 1$) поверхностей фитиля НТТ: 1, 2 — распределение относительного давления $P''/P''_{0н}$ по результатам расшифровки интерферограмм (1 — $y = 1$, 2 — $y = 0$); 3, 4 — относительная температура $T''/T''_{0н}$ по результатам термопарных измерений (3 — $y = 1$, 4 — $y = 0$); 5 — относительное давление $P''/P''_{0н}$ расчет по модели идеального газа; пунктиром показан выход из испарителя ($x = 7,6$)

Fig. 4. The distribution of parameters of wet vapor along the lower ($y = 0$) and the top ($y = 1$) of surfaces of a LHP wick: 1, 2 — the distribution of relative pressure $P''/P''_{0н}$ by results of interpretation of interferograms (1 — $y = 1$, 2 — $y = 0$); 3, 4 — the relative temperature of $T''/T''_{0н}$ by results of thermopair measurements (3 — $y = 1$, 4 — $y = 0$); 5 — the relative pressure $P''/P''_{0н}$ calculation for an ideal gas model; the evaporator outlet is shown by a dotted line $x = 7,6$

При медленном пуске в ТТ формируется ядро потока на оси парожидкостного тракта, которое в процессе пуска движется из испарителя в конденсатор и достигает его торца. Области вдува-отсоса визуализируются в виде узких зон вдоль фитилей испарителя и конденсатора. При быстром запуске ТТ наблюдается скачок конденсации на выходе из испарителя (рис. 3 и 4). Следует заметить, что основание скачка сдвинуто в сторону испарителя, где интерферограмма показывает повышенную влажность.

Подобная картина наблюдается и в интерферометре. В этом же месте возникает яркая каустическая линия, из которой как из источника выходят интерференционные линии в сторону испарителя и конденсатора. В завершающей стадии пуска изображение интерферограммы стабилизируется и принимает такой же вид, как при стационарном режиме (см. рис. 3, Б).

На рис. 4. показано распределение параметров влажного пара; теплоноситель — ацетон; режим: $Q = 230$ Вт.

В энергетических силовых установках основной причиной возникновения скачков конденсации является переохлаждение сверхзвукового парового потока. Эти процессы достаточно хорошо изучены [8].

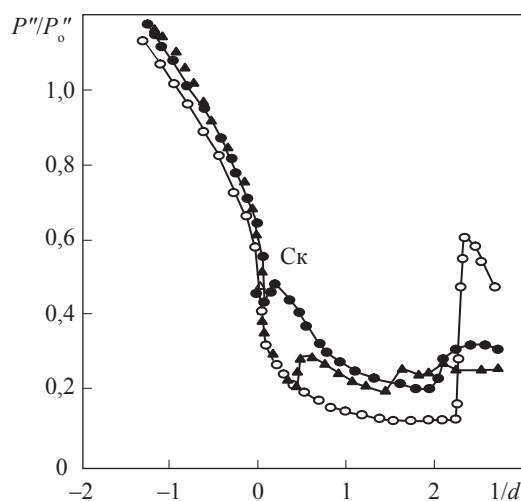


Рис. 5. Изменение относительного давления в сверхзвуковом потоке водяного пара [8]: $1/d = 0$ — срез сопла Лавала; Ск — скачки конденсации; \circ — перегретый пар на оси; \bullet — влажный пар на оси, $\epsilon = 3\%$ (ϵ — степень влажности); \blacktriangle — влажный пар на оси, $\epsilon = 14\%$

Fig. 5. The change of relative pressure in a supersonic flow of water vapor [8] $1/d = 0$ — The Laval nozzle cut; CSW — condensation shock waves; \circ — superheated steam on an axis; \bullet — wet vapor on an axis, $\epsilon = 3\%$; ϵ — humidity degree; \blacktriangle — wet vapor on an axis, $\epsilon = 14\%$

В ТТ предыстория возникновения скачка конденсации иная. В испарителе пар пересыщен процессом вдува и обогащен капельками жидкой фазы. Перед входом в зону конденсации паровой поток обжимается вихрями в виде поперечных валов.

Возникает конфузorno-диффузорное течение дозвукового потока в низкотемпературных ТТ. Такое воздействие увеличивает концентрацию капель, а значит, пересыщение и влажность возрастают по ходу потока. На выходе из испарителя изменяется знак расходного воздействия, что создает необходимую степень пересыщения для развития конденсационного скачка.

Внешнее сходство распределения давления в дозвуковом (см. рис. 4) и в сверхзвуковом (рис. 5) потоках обусловлено стоком вектора ρu в разреженную область гетерогенной объемной конденсации (см. рис. 3, Б). В данном случае объемная конденсация происходила без образования каустической линии. Это означает, что необходимая степень метастабильности для явления «тиндалевского рассеяния» в стационарном режиме не была достигнута.

Выводы

Скачок конденсации в ТТ происходит при высокой влажности парового потока и при низких числах Re . Вдув пара в испарителе создает вихревые структуры в виде поперечных валов, в конденсаторе — в виде продольных. Вращение таких структур создает дополнительное переохлаждение пара и вызывает пересыщение пара, достаточное для возникновения гетерогенной объемной конденсации как на зародышах, самообразовавшихся в результате гетерофазных флуктуаций, так и на каплях, выброшенных из фитиля. На границе смены воздействия (испаритель — конденсатор) обнаружена устойчивая вихревая структура в виде поперечных валов, вращающихся по направлению вдув — отсос. Наличие такой структуры на выходе из испарителя уменьшает проходное сечение и создает дополнительное гидравлическое сопротивление. Таким образом, предположение Леви нашло экспериментальное подтверждение в данной работе.

При этом сопротивление в паре растет и возможно наступление капиллярных ограничений [9, 10]. Изменение энтальпии по ходу парового

потока (кривая 1) и ее градиент (кривая 2) на рис. 3 подтверждают факт возникновения скачка конденсации. Известно сильное влияние электрических полей и радиации на процессы зародышеобразования из паров теплоносителя в результате гетерофазных флуктуаций. Однажды возникнув, эти зародыши будут длительное время поддерживать высокую влажность и создавать благоприятные условия для гомогенно-гетерогенной объемной конденсации. Однако этот сценарий маловероятен для данной установки, так как, приняты меры по экранизации и заземлению рабочего участка.

Список литературы

- [1] Шульц А.Н., Быстров П.И., Гончаров В.Ф., Харченко В.Н. Исследование нестационарного тепло- и массообмена в жидкометаллических тепловых трубах // Матер. VI Всесоюз. конф. по теплообмену. Минск: ИТМО АН БССР, 1980. Т. IV. С. 94–99.
- [2] Шульц А.Н. Восстановление работоспособности тепловой трубы // Электроника и счетно-решающая техника в лесной и деревообрабатывающей промышленности: науч. тр. МЛТИ. М.: МЛТИ, 1980. № 129. С. 173–176.
- [3] Шульц А.Н. Перенос тепла, массы и импульса в испарительно-конденсационных теплообменниках. Дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14: защищена 22.12.2006. М., 2006. С. 233–246.
- [4] Шульц А.Н. Выбор оптических методов исследования течений неравновесного парового потока // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2006. № 6 (48). С. 135–140.
- [5] Шульц А.Н. Оптические неоднородности в неравновесном потоке тепловых труб // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2006. № 6 (48). С. 140–149.
- [6] Шульц А.Н., Данилов С.А., Ивлотин А.И. Влияние объемной конденсации на теплообмен в низкотемпературной тепловой трубе при наличии неконденсируемого газа // Тр. Второй Всесоюз. конф. «Теплофизика и гидрогазодинамика процессов испарения и конденсации». Рига, 1988. Т. II. С. 10–11.
- [7] Шульц А.Н. Экспериментальный стенд для исследования оптических неоднородностей в неравновесном паровом потоке тепловых труб // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2006. № 3 (45). С. 203–206.
- [8] Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. 2-е изд. М.: Энергоиздат, 1981. 472 с.
- [9] Шульц А.Н. Определение энтальпии неравновесного парового потока // Тр. Рос. Нац. конф. по теплообмену (РНКТ-4); Москва. 23–27 октября 2006. М., 2006. Т.5. С. 329–332.
- [10] Шульц А.Н. Потери энергии в паровом потоке тепловых труб // Сб. науч. тр. докторантов и аспирантов. М.: МГУЛ, 2006. Вып. 334 (7). С. 24–26.

Сведения об авторах

Шульц Александр Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры физики МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: shultsalek@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.12.2016 г.

CONDENSATION SHOCK AT THE START-UP OF HEAT PIPES

A.N. Schults

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

shultsalek@mail.ru

The start-up of heat pipes (HP) after the frozen state of the heat carrier (sodium) is the most dangerous period of their operation. At this moment there can occur the heat carrier closed circulation cut-off, an overheat of the evaporator wall and its burn-through. The capillary restrictions are the main reason for the above facts. Among all types of pressure losses the main ones are considered to be as follows: losses caused by pumping the liquid heat carrier; losses upon phase transitions; pressure losses upon a steam phase transfer. At the same time the structure of a steam flow has not been investigated yet. In this paper the results of the pilot study of non-stationary temperature fields at a start-up of a sodium HP are presented. The structure of a steam flow has been studied at a start-up of an acetonic HP. The research of a steam flow structure was carried on by optical control methods. The M-Z (Mach-Zender) interferometer, the Toepler shadow ("schlieren") technique and a laser light sheet method were used to carry out the research. To the purpose, some particles of a liquid phase, vortex structures in the evaporator and the condenser, a condensation shock at the evaporator outlet have been found. Some liquid phase particles available in a steam flow can be explained by the heterogeneous volume condensation occurring as a result of both heterophase fluctuations from the steam and the birth of germs of a new phase in the form of drops which have been thrown out from a wick. The condensation shock in the form of a focal curve was found at the evaporator outlet. The short-term overheat of a sodium HP wall at its start-up after the frozen state is explained by certain capillary restrictions as a result of a possible condensation shock and that of some losses resulting from vortex structure rotation in the evaporator and the condenser.

Keywords: heterophase, the interferometer, Toepler, vortex structures frozen

Suggested citation: Schults A.N. *Skachok kondensatsii pri zapuske teplovykh trub* [Condensation shock at the start-up of heat pipes]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no. 1, pp. 131–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-131-136

References

- [1] Schults A.N., Bystrov P.I., Goncharov V.F., Harchenko V.N. *Issledovanie nestacionarnogo teplo- i massoobmena v zhidkometallicheskih teplovykh trubah* [Issledovaniye non-stationary warm and a mass exchange in the zhidkometallicheskih thermal pipes]. *Teplomassoobmen—VI: Materialy VI vsesoyuznoy konferencii po teplomasoobmenu*. Minsk: ITMO AN BSSR, 1980, T. IV, pp. 94-99. (in Russian)
- [2] Shults A.N. *Vosstanovlenie rabotosposobnosti teplovy truby* [Maintenance of a thermal pipe] *Elektronika i schetnoreshayushchaya tekhnika v lesnoy i derevoobrabatyvayushchey promyshlennosti*. Nauchnye trudy MLTI. Moscow: MLTI, 1980, vol. 129, pp. 173-176. (in Russian)
- [3] Shults A.N. *Perenos tepla, massy i impul'sa v isparitel'no-kondensacionnykh teploobmennikah* [Transfer of heat, weight and an impulse in vaporizing and condensation heat exchangers]. Dr. tech. sci. diss. 01.04.14. Moscow: 2006, 272 p, pp. 233-246. (in Russian)
- [4] Shults A.N. *Iybor opticheskikh metodov issledovaniya techeniy neravnovesnogo parovogo potoka* [Choice of optical methods of a research of currents of a nonequilibrium steam stream] *Moscow State Forest University Bulletin — Lesnoy Vestnik*, 2006, no. 6 (48), pp. 135-140. (in Russian)
- [5] Shults A.N. *Opticheskie neodnorodnosti v neravnovesnom potoke teplovykh trub* [Opticheskiye of heterogeneity in a nonequilibrium stream of thermal pipes] *Moscow State Forest University Bulletin — Lesnoy Vestnik*, 2006, no. 6 (48), pp. 140-149. (in Russian)
- [6] Shults A.N., Danilov S.A., Ivlyutin A.I. *Vliyanie ob'emnoy kondensatsii na teplomasoobmen v nizkotemperaturnoy teplovy trube pri nalichii nekondensiruемого газа* [Influence of volume condensation on teplomasoobmen in a low-temperature thermal pipe in the presence of not condensed gas]. *Trudy II vsesoyuznoy konferencii «Teplofizika i gidrogazodinamika processov ispareniiya i kondensatsii»*, Riga: 1988, T. II, pp. 10-11. (in Russian)
- [7] Shults A.N. *Yeksperimental'nyy stend dlya issledovaniya opticheskikh neodnorodnostey v neravnovesnom parovom potoke teplovykh trub* [The experimental stand for a research of optical not uniformity in a nonequilibrium steam stream of thermal pipes]. *Moscow State Forest University Bulletin — Lesnoy Vestnik*, 2006, no. 3 (45), pp. 203-206. (in Russian)
- [8] Deych M.E., Filippov G.A. *Gazodinamika dvufaznykh sred* [Gazodinamika two-phase sred]. Moscow: Yenergoizdat: 1981, 472 p. (in Russian)
- [9] Shults A.N. *Opreделение yental'pii neravnovesnogo parovogo potoka* [Definition of an enthalpy of a nonequilibrium steam stream] *Trudy RNKT-4; 23-27 oktyabrya 2006*. Moscow: 2006, t. 5, pp. 329-332. (in Russian)
- [10] Shults A.N. *Poteri yenerгии v parovom potoke teplovykh trub* [Losses of energy in a steam stream of thermal pipes]. *Sb. nauch. tr. doktorantov i aspirantov*. Moscow: MGUL, vol. 334 (7), 2006, pp. 24-26. (in Russian)

Author's information

Schulz Alexander Nikolaevich — Dr. Sci. (Tech.), Prof. of Department of physics of FN-4, BMSTU, e-mail: shultsalek@mail.ru

Received 13.12.2016

СХОДЯЩАЯСЯ И РАСХОДЯЩАЯСЯ ПЛОСКАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ВОЛНА В ИДЕАЛЬНОЙ СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

А.В. Шмаков, П.С. Серебренников, Н.В. Шипов, Т.В. Чернова

МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
ashmakov62@gmail.ru

Рассматривается задача распространения плоской цилиндрической волны в идеальной сжимаемой жидкости. Структура решения имеет вид интегрального уравнения с переменным верхним пределом. Существенной особенностью полученного решения является отсутствие разрыва параметров на фронте акустической волны. Решение волнового уравнения для сходящейся и расходящейся осесимметричной цилиндрической волны авторами статьи было распространено на случай неосесимметричной цилиндрической волны применительно к системе уравнений идеальной сжимаемой жидкости. Система уравнений идеальной сжимаемой жидкости в цилиндрической системе координат записана в безразмерном виде. Решение системы дифференциальных уравнений найдено в виде разложения в ряд Фурье по угловой координате. Введение автомодельной переменной позволило привести систему уравнений в частных производных к системе уравнений в обыкновенных производных. Решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений получено в явном виде, представляющем комбинацию полиномов Чебышева первого и второго рода для сходящейся и расходящейся волны соответственно. Параметры давления и скорости, характеризующие акустическую волну, распространяющуюся в жидкости, описаны в виде интегральных уравнений. Ядрами интегральных уравнений являются частные решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Переходные функции интегральных уравнений определяются из граничных условий. Условия на границе раздела могут быть заданы численно. Изложенная в статье методика может быть применена для решения плоской нестационарной задачи гидроупругости цилиндрической оболочки с жидкостью.

Ключевые слова: идеальная сжимаемая жидкость, волновое уравнение, интегральное уравнение

Ссылка для цитирования: Шмаков А.В., Серебренников П.С., Шипов Н.В., Чернова Т.В. Сходящаяся и расходящаяся плоская цилиндрическая волна в идеальной сжимаемой жидкости // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 137–140. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-137-140

В источниках [1–10] рассмотрена плоская нестационарная задача гидроупругости для цилиндрической оболочки с жидкостью.

Систему уравнений идеальной сжимаемой жидкости в цилиндрической системе координат запишем в безразмерном виде

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial r}; \\ \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi}; \\ \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{V}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \varphi} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где V , U — нормальная и тангенциальная скорость жидкости соответственно;

P — давление в жидкости;

t — время;

r — текущий радиус;

φ — полярный угол.

В качестве масштабов выбраны величины $[P] = \rho a^2$; $[V, U] = a$; $[t] = R/a$; $[r] = R$, где ρ — плотность жидкости; a — скорость звука в жидкости; R — радиус. Решение системы (1) ищем в виде разложения в ряд Фурье по угловой координате

$$V(r, \varphi, t) = \sum_{n=0}^{\infty} V_n \cos(n\varphi);$$

$$U(r, \varphi, t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\varphi);$$

$$P(r, \varphi, t) = \sum_{n=0}^{\infty} P_n \cos(n\varphi).$$

После исключения из третьего уравнения системы (1) скоростей V и U для n -й гармоники ряда получим

$$\begin{cases} \frac{\partial V_n}{\partial t} = -\frac{\partial P_n}{\partial r}; \\ \frac{\partial U_n}{\partial t} = \frac{n}{r} P_n; \\ \frac{\partial^2 P_n}{\partial t^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P_n}{\partial r} \right) - n^2 P_n = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Систему уравнений (2) относительно автомодельной переменной $z = (1 - t)/r$ перепишем в виде

$$\begin{cases} \frac{dV_n}{dz} = z \frac{dP_n}{dz}; \\ \frac{dU_n}{dz} = nP_n; \\ (z^2 - 1) \frac{d^2 P_n}{dz^2} + z \frac{dP_n}{dz} - n^2 P_n = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрим сходящуюся акустическую волну, распространяющуюся от границы $r = 1$. Уравнение фронта сходящейся волны определяется соотношением $r + t - 1 = 0$. Значениям $z > 1$ соответствуют точки перед фронтом, возмущения в которых равны нулю. Значение $z = 1$ соответствует фронту волны, значение давления и скорости на котором считается равным нулю. Для $|z| \leq 1$ и $n > 1$ решение системы уравнений (3) имеет вид

$$\begin{cases} P_n(z) = B_n T_n(z); \\ V_n(z) = \frac{B_n}{2} \left(\frac{n}{n+1} T_{n+1}(z) + \frac{n}{n-1} T_{n-1}(z) \right); \\ U_n(z) = \frac{B_n}{2} \left(\frac{n}{n+1} T_{n+1}(z) - \frac{n}{n-1} T_{n-1}(z) \right), \end{cases} \quad (4)$$

где B_n — коэффициенты интегрирования; $T_n(z) = \sin(n \arccos z)$ — полиномы Чебышева.

Следуя [8, 9], решение системы (2) для n -й гармоники разложения запишем в виде

$$\begin{cases} P_n(r, t) = \int_0^{r+t-1} \omega_{pn}(\tau) T_n(\xi_1) d\tau; \\ V_n(r, t) = \int_0^{r+t-1} \frac{\omega_{vn}(\tau)}{2} \left(\frac{n}{n+1} T_{n+1}(\xi_1) + \frac{n}{n-1} T_{n-1}(\xi_1) \right) d\tau; \\ U_n(r, t) = \int_0^{r+t-1} \frac{\omega_{un}(\tau)}{2} \left(\frac{n}{n+1} T_{n+1}(\xi_1) - \frac{n}{n-1} T_{n-1}(\xi_1) \right) d\tau, \end{cases} \quad (5)$$

где

$$\xi_1 = \frac{1-t+\tau}{r}, \quad n > 1.$$

Неизвестные переходные функции $\omega_{pn}(\tau)$, $\omega_{vn}(\tau)$, $\omega_{un}(\tau)$ связаны между собой зависимостями, которые получаются после подстановки уравнений (5) в систему (2) для n -й гармоники разложения

$$\omega_{vn}(\tau) = \omega_{un}(\tau) = -\omega_{pn}(\tau).$$

Для определения переходных функций используется граничное условие. В частности, если при $r = 1$ задан закон изменения нормальной составляющей скорости жидкости $W(\varphi, t)$, то переходная функция $\omega_{vn}(\tau)$ определяется из интегральных уравнений для n -й гармоники

$$\int_0^t \frac{\omega_{vn}(\tau)}{2} \left(\frac{n}{n+1} T_{n+1}(\xi) + \frac{n}{n-1} T_{n-1}(\xi) \right) d\tau = W_n(t), \quad (6)$$

где $\xi = 1 - t + \tau$, $W_n(t)$ — n -я гармоника $W(\varphi, t)$.

В случае, если правая часть в уравнениях (5) является заданной функцией времени, то интегральное уравнение (6) решается один раз для всего интервала

$$t \in I \leq 1.$$

Рассмотрим расходящуюся акустическую волну, распространяющуюся от границы $r = 1$. Уравнение фронта расходящейся волны определяется соотношением $t - r + 1 = 0$. Значениям $z < 1$ соответствуют точки перед фронтом, возмущения в которых равны нулю. Значение $z = 1$ соответствует фронту волны, значение давления и скорости на котором считается равным нулю. Для $z \geq 1$ и $n > 1$ решение системы уравнений (2) имеет вид

$$\begin{cases} P_n(z) = B_n U_n^*(z); \\ V_n(z) = \frac{B_n}{2} \left(\frac{n}{n+1} U_n^*(z) + \frac{n}{n-1} U_n^*(z) \right); \\ U_n(z) = \frac{B_n}{2} \left(\frac{n}{n+1} U_n^*(z) - \frac{n}{n-1} U_n^*(z) \right), \end{cases} \quad (7)$$

где

$$U_n^*(z) = \frac{1}{2} \left((z + \sqrt{z^2 - 1})^n - (z - \sqrt{z^2 - 1})^n \right) —$$

полиномы Чебышева второго рода для $z \geq 1$;

B_n — коэффициенты интегрирования.

Следуя [3, 4], решение системы (1) для n -й гармоники разложения запишем в виде

$$\begin{cases} P_n(r, t) = \int_0^{t-r+1} \omega_{pn}(\tau) U_n^*(\xi_1) d\tau; \\ V_n(r, t) = \int_0^{t-r+1} \frac{\omega_{vn}(\tau)}{2} \left(\frac{n}{n+1} U_{n+1}^*(\xi_1) + \frac{n}{n-1} U_{n-1}^*(\xi_1) \right) d\tau; \\ U_n(r, t) = \int_0^{t-r+1} \frac{\omega_{un}(\tau)}{2} \left(\frac{n}{n+1} U_{n+1}^*(\xi_1) - \frac{n}{n-1} U_{n-1}^*(\xi_1) \right) d\tau, \end{cases} \quad (8)$$

где

$$\xi_1 = \frac{t-\tau+1}{r}, \quad n > 1.$$

Неизвестные переходные функции $\omega_{pn}(\tau)$, $\omega_{vn}(\tau)$, $\omega_{un}(\tau)$ связаны между собой зависимостями, которые получаются после подстановки уравнений (4) в систему (1) для n -й гармоники разложения:

$$\omega_{vn}(\tau) = \omega_{un}(\tau) = -\omega_{pn}(\tau).$$

Для определения переходных функций используется граничное условие. В частности, если при $r = 1$ задан закон изменения нормальной составляющей скорости жидкости $W(\varphi, t)$, то переходная функция $\omega_{vn}(\tau)$ определяется из интегральных уравнений для n -й гармоники

$$\int_0^t \omega_{vn}(\tau) \left(\frac{n}{n+1} U_{n+1}^*(\xi) + \frac{n}{n-1} U_{n-1}^*(\xi) \right) d\tau = W_n(t), \quad (9)$$

где $\xi = t - \tau + 1$; $W_n(t)$ – n -я гармоника $W(\varphi, t)$.

Список литературы

- [1] Григолюк Э.И., Горшков А.Г. Нестационарная гидроупругость оболочек. Л.: Судостроение, 1974, 208 с.
- [2] Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. М.: Физматлит, 2004. 467 с.
- [3] Гузь А.Н., Кубенко В.Д. Теория нестационарной аэрогидроупругости оболочек. Киев: Наукова думка, 1982. 410 с.
- [4] Замышляев Б.В., Яковлев Ю.С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. Л.: Судостроение, 1967, 387 с.
- [5] Липницкий Ю.М., Ляхов В.Н., Фельдштейн В.А. Нестационарное взаимодействие ударной волны с упругой цилиндрической оболочкой // Ученые записки ЦАГИ, 1976. Т. 7. № 1. С. 80–88.
- [6] Мнев Е.Н., Перцев А.К. Гидроупругость оболочек. Л.: Судостроение, 1970. 286 с.
- [7] Слепян Л.И. Нестационарные упругие волны. Л.: Судостроение, 1972. 374 с.
- [8] Смирнов В.И. Решение предельной задачи для волнового уравнения в случае круга и сферы // ДАН СССР, 1937. Т. 14. № 1.
- [9] Шмаков А.В. Частные автомодельные решения волнового уравнения в задачах гидродинамики // Обзорение прикладной и промышленной математики, 2008. Т. 15. Вып. 4. С. 723–724.
- [10] Харкевич А.А. Неустановившиеся волновые явления. М.-Л.: Гостехиздат, 1950. 283 с.

Сведения об авторах

Шмаков Андрей Вячеславович — канд. физ.-мат. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: ashmakov62@gmail.ru

Серебренников Павел Семенович — канд. физ.-мат. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: caf-math@mgu.ac.ru

Шипов Николай Викторович — канд. физ.-мат. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: caf-math@mgu.ac.ru

Чернова Татьяна Владимировна — старший преподаватель, МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: caf-math@mgu.ac.ru

Статья поступила в редакцию 05.09.2016 г.

CONVERGENT AND DIVERGENT PLANE CYLINDRICAL WAVE IN AN IDEAL COMPRESSIBLE FLUID

A.V. Shmakov, P.S. Serebrennikov, N.V. Shipov, T.V. Chernova

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

ashmakov62@gmail.ru

The article deals with the problem of propagation of plane cylindrical waves in ideal compressible fluids. The structure of the solution has the form of integral equations with a variable upper limit. An essential feature of the obtained solution is the lack of a parameter gap at the front of the acoustic wave. In the work by Smirnov V. I., DAN SSSR, 1937, vol. 14, No. 1, there has been given the solution of the wave equation for an axisymmetric convergent and divergent cylindrical waves. The authors of the article have extended V.I. Smirnov's approach to cover the case of non-axisymmetric cylindrical waves with respect to the system of equations of ideal compressible liquid. The system of equations of ideal compressible fluid in cylindrical coordinate system is written in a dimensionless form. The solution of the differential equation system is sought in the form of decomposition into the Fourier series in the angular coordinate. Introducing the self-simulated variable resulted in a system of partial differential equations turned into a system of equations with ordinary derivatives. The solution of a system of ordinary differential equations is given explicitly, that is a combination of Chebyshev polynomials of the first and second kind for diverging and converging waves, respectively. The parameters of pressure and speed that characterize the acoustic wave propagation in fluids are described by integral equations. The kernels of integral equations are particular solutions of systems of ordinary differential equations. Transitional functions of the integral equations are determined from the boundary conditions. The conditions at the interface can be specified numerically. The technique described in the article can be applied to solve the plane time-dependent problem of hydroelasticity of a cylindrical shell containing liquid.

Keywords: ideal compressible liquid, an integrated equation, a wave equation

Suggested citation: Shmakov A.V., Serebrennikov P.S., Shipov N.V., Chernova T.V. *Skhodyashchayasya i raskhodyashchayasya ploskaya tsilindricheskaya volna v ideal'noy szhimaemoy zhidkosti* [Convergent and divergent plane cylindrical wave in an ideal compressible fluid]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 1, pp. 137–140. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-137-140

References

- [1] Grigolyuk E.I., Gorshkov A.G. *Nestacionarnaya gidrouprugost' obolochek* [Non-stationary hydroelasticity of covers]. Leningrad: Shipbuilding, 1974, 208 p. (in Russian)
- [2] Gorshkov A.G., Medvedsky A.L., Rabinsky L.N., Tarlakovsky D.V. *Volny v sploshnyh sredah* [Waves in continuous environments] Moscow: Fizmatlit, 2004, 467 p. (in Russian)
- [3] Guz A.N., Kubenko V.D. *Teoriya nestacionarnoy ayerogidrouprugosti obolochek* [Theory of non-stationary aero hydroelasticity of covers]. Kiev: Naukova a thought, 1982, 410 p. (in Russian)
- [4] Zamyshlyayev B.V., Yakovlev Yu.S. *Dinamicheskie nagruzki pri podvodnom vzryve* [Dynamic loadings at underwater explosion]. Leningrad: Shipbuilding, 1967, 387 p. (in Russian)
- [5] Lipnitsky Yu.M., Lyakhov V.N., Feldstein V.A. *Nestacionarnoe vzaimodeystvie udarnoy volny s uprugoy cilindricheskoy obolochkoy* [Non-stationary interaction of a shock wave with an elastic cylindrical cover]. *Scientific notes of TsAGI*, 1976, t. 7, no. 1, p. 80-88. (in Russian)
- [6] Mnev E.N., Pertsev A.K. *Gidrouprugost' obolochek* [Hydroelasticity of covers]. Leningrad: Sudostroyeny, 1970, 286 p. (in Russian)
- [7] Slepyan L.I. *Nestacionarnye uprugie volny* [Non-stationary elastic waves]. Leningrad: Sudostroyeny, 1972, 374 p. (in Russian)
- [8] Smirnov V.I. *Reshenie predel'noy zadachi dlya volnovogo uravneniya v sluchae kruga i sfery* [The solution of the limit problem for the wave equation in the case of the circle and the sphere]. *DAN SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1937, t. 14, no. 1. (in Russian)
- [9] Shmakov A.V., *Chastnye avtomodel'nye resheniya volnovogo uravneniya v zadachah gidrodinamiki* [Private automodel solutions of the wave equation in problems of hydrodynamics]. *The Review of applied and industrial mathematics*, 2008, t. 15, vol. 4, pp. 723-724. (in Russian)
- [10] Harkevich A.A. *Neustanovivshiesya volnovye yavleniya* [Unsteady wave phenomena]. Moscow-Leningrad: Gostexizdat, 1950, 283 p. (in Russian)

Author's information

Shmakov Andrey Vyacheslavovich — Cand. Sci. (Physico-Mathematical), Assoc. Prof., BMSTU, e-mail: ashmakov62@gmail.ru

Serebrennikov Pavel Semenovich — Cand. Sci. (Physico-Mathematical), Assoc. Prof., BMSTU, e-mail: caf-math@mgul.ac.ru

Shipov Nikolay Viktorovich — Cand. Sci. (Physico-Mathematical), Assoc. Prof., BMSTU, e-mail: caf-math@mgul.ac.ru

Chernova Tat'yana Vladimirovna — Senior Lecturer, BMSTU, e-mail: caf-math@mgul.ac.ru

Received 05.09.2016

ЧЕМУ МОЖНО И СЛЕДУЕТ УЧИТЬ СТУДЕНТОВ

А.И. Рубинштейн, О.М. Полещук, Т.В. Чернова

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

Студенты с трудом воспринимают математику. Скорее всего, это объясняется ощущением, что математика есть набор неясно откуда появившихся формальных задач, решение которых неясно что дает, но получение которого связано с «эквилибристикой», выдаваемой за «науку». Думается, что стоит предъявить учащимся ряд реальных технических устройств, математические модели функционирования, да и просто идеи их создания, описываемые простыми дифференциальными уравнениями, решение которых по силам аккуратным студентам первого или второго курса обычных технических вузов (или даже просто нахождение экстремума функции одного переменного). Все дело в использовании некоторых фактов, подмеченных внимательными наблюдателями — физиками. К числу таких фактов относится, например, принцип Ферма: свет (даже в неоднородной среде) распространяется по пути, проходимому за наименьшее время. Поэтому, например, в однородной среде свет распространяется по прямой. Это легко проверить с помощью «потайного» фонаря — коробки с узкой щелью, внутри которой находится источник света (лампа или свеча). Этот факт (принцип Ферма) позволяет получить закон отражения от прямого и изогнутого экрана. Все видели в солнечный день, как блестит, перемещаясь, яркая точка на фасаде многоэтажного здания (например, гостиницы «Космос» на ВДНХ) когда вы перемещаетесь вдоль него. Это светится стационарная точка. Закон преломления — закон Снеллиуса — получается, если применить принцип Ферма к границе раздела двух сред с различными плотностями (т. е. сред с различными скоростями распространения света). А отсюда и объяснения явления рефракции — мы видим солнечный диск еще около минуты после его ухода за горизонт. Полное внутреннее отражение (следствие закона Снеллиуса) ведет к созданию световода — очень важного изобретения. Прожектор, радиотелескоп, разные типы радиолокационных антенн — все это принцип Ферма. В статье обсуждаются эти и другие случаи изучения достаточно просто исследуемых математических моделей.

Ключевые слова: оптимальный контроль, ньютоновские лучи, кеплеровские лучи, радар

Ссылка для цитирования: Рубинштейн А.И., Полещук О.М., Чернова Т.В. Чему можно и следует учить студентов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 1. С. 141–144. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-141-144

К сожалению, курс математики воспринимается студентами как набор формул, позволяющих решать достаточно богатый объем задач, которые носят формальный характер и не слишком связаны с профессиональной деятельностью будущих инженеров. Вместе с тем, по словам Галилея, «великая книга природы написана на языке математики». Ниже приведены несколько физических задач, имеющих приложения в виде реализованных технических устройств или объяснений механизма их функционирования. Математические модели этих задач исследуются с использованием знаний не более чем двух лет втузовского курса. В основном, это умение находить экстремумы достаточно простых функций и решать дифференциальные уравнения первого или второго порядка. Укажем такие задачи: отражение и преломление световых лучей (и радиоволн) с использованием принципа Ферма. Они приводят к созданию прожектора, радиотелескопа, одноканального радара на базе диэлектрической линзы Люнеберга. Помимо этого, можно рассчитать форму трассы бобслея, найти оптимальное управление движением объекта, используя принцип максимума Понтрягина [1]. Наконец, можно определить положение планеты или искусственного спутника на орбите в любой момент времени, элементарно вывести закон всемирного тяготения [2].

Хотелось бы верить, что рассмотрение указанных задач в курсе (возможно, факультативном) математики разбудит интерес к математике как науке и поведет к более серьезному отношению к ее изучению.

Задача нахождения стационарной точки — точки отражения $(x; f(x))$ луча, исходящего из точки $A(p/2; 0)$ и осветившего точку $B(X; Y)$ (экран в плоскости xOy задан уравнением $y = f(x) \geq 0$ при $x \geq 0, f(0) = 0, f'(x)$ непрерывна при $x \geq 0$) по принципу Ферма (свет распространяется по пути, проходимому за кратчайшее время) ведет к решению уравнения

$$\frac{\left(x - \frac{p}{2}\right) + f(x)f'(x)}{\sqrt{\left(x - \frac{p}{2}\right)^2 + f^2(x)}} = \frac{(X - x) + (Y - f(x))f'(x)}{\sqrt{(X - x)^2 + (Y - f(x))^2}},$$

из которого следует, что криволинейный экран можно заменить касательной прямой в точке касания — стационарной точке, и в ней угол падения равен углу отражения.

На основании этого можно решить следующую задачу: найти форму плоского экрана $y = f(x), x \geq 0$ при условиях $f(0) = 0, f'(x) > 0$ для $x > 0; f''(x) > 0$ для $x > 0$, после отражения от которого любой луч точечного источника, распо-

ложенного в точке $F(p/2; 0)$, пойдет по прямой, параллельной оси Ox .

Эта задача сводится к решению задачи Коши

$$yy' = \left(\frac{p}{2} - x\right) + \sqrt{\left(\frac{p}{2} - x\right)^2 + y^2}, \quad y(0) = 0,$$

ответом которой является функция $y^2 = 2px$, то есть парабола с фокусом в точке $F(p/2; 0)$. При вращении этой параболы вокруг оси Ox получаем параболоид вращения, являющийся отражателем прожектора, зеркалом радиотелескопа и одноканального радара, а также «телевизионных тарелок». Решение близкой к приведенной выше задачи

$$2xyy' = c^2 + x^2 + y^2 - \sqrt{(c^2 - x^2 + y^2)^2 + (2xy)^2}, \quad y(-a) = 0$$

дает форму плоского экрана $y = f(x)$, после отражения от которого все лучи точечного источника $(-c; 0)$ попадают в точку $(c; 0)$. Этот экран описывается уравнением

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2 - c^2} = 1.$$

Это эллипс с фокусами $F_1(-c; 0)$, $F_2(c; 0)$ и полуосями a ,

$$b = \sqrt{a^2 - c^2}.$$

Вращение данного эллипса (естественно, его части) вокруг оси Ox дает отражатель (часть эллипсоида вращения) медицинского лазера.

Отражение от ветви гиперболы

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{c^2 - a^2} = 1, \quad x \geq a$$

переводит все лучи, исходящие из фокуса $F_1(-c; 0)$, в лучи, исходящие из «ложного» источника в точке $F_2(c; 0)$. Это свойство используется и для сокрытия истинного источника излучения, и в двухзеркальной антенной системе Кассегрена. Подобная система применена в антеннах (два ряда по четыре зеркала) системы дальней космической связи. Это сделано, чтобы избежать использования большого фокусного расстояния для приемного рупора антенны.

Определение минимума функции

$$T(x) = \frac{\sqrt{x^2 + y_1^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}}{v_2}, \quad 0 < x < x_2,$$

т. е. решение уравнения

$$T'(x) = \frac{x}{v_1\sqrt{x^2 + y_1^2}} - \frac{x_2 - x}{v_2\sqrt{(x_2 - x)^2 + y_2^2}} = 0,$$

позволяет найти точку $(x; 0)$, в которой луч из точки $(0; y_1 > 0)$, преломляясь, попадет в точку $(x_2; y_2 < 0)$, когда v_1 — скорость света в среде $y > 0$, а v_2 — скорость света в среде $y_2 < 0$. Условие $T'(x) = 0$, полученное на основании принци-

па Ферма, дает закон Снеллиуса преломления света (или радиоволны). Это позволяет исследовать эффект рефракции, когда скорость света (и коэффициент преломления) непрерывно меняется в неоднородной среде.

Для построения многоканального радара с одинаковыми в каждом канале диаграммами направленности используется диэлектрическая линза Лüneберга, переводящая излучение точечного источника, находящегося на ее поверхности, в параллельный пучок лучей подобно параболоиду вращения. Это было реализовано в действующей РЛС дальнего обнаружения.

Задача нахождения закона изменения коэффициента преломления $n = n(\vec{r})$ в линзе Лüneберга сводится к решению дифференциального уравнения

$$\frac{d^2\vec{r}}{dr^2} = n \frac{dn}{dr} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

при условии $n(a) = 1$, $0 \leq r \leq a$, которое после введения дополнительного условия

$$\frac{n}{r} \cdot \frac{dn}{dr} = -a^2$$

путем преобразований приводит к ответу

$$n = \sqrt{2 - (r/a)^2}, \quad 0 \leq x \leq a \text{ [3-5].}$$

Известная задача И. Бернулли о кривой наискорейшего спуска тяжелой точки в вертикальной плоскости под действием силы тяжести без учета трения — «задача о брахистохроне» — сводится (см., например, [4-8]) к поиску функции $y = y(x)$, минимизирующей интеграл

$$\int_0^{x_0} \sqrt{\frac{1 + (y')^2}{2gy}} dx$$

при условиях $y(0) = 0$, $y(x_0) = y_0$.

Этот интеграл можно рассматривать как время движения света с переменной скоростью $\sqrt{2gy}$ (g — постоянная силы тяжести на поверхности Земли), а его минимизацию — как реализацию принципа Ферма. Указанная задача — одна из первых задач вариационного исчисления. Она сводится к исследованию уравнения Эйлера-Лагранжа (по сути, аналога теоремы Ферма об условии экстремума функции) [5] при краевых условиях $y(0) = 0$, $y(x_0) = y_0$

$$\frac{1}{2y} \sqrt{\frac{1 + (y')^2}{y}} + \frac{d}{dx} \left(\frac{y'}{\sqrt{y} \sqrt{1 + (y')^2}} \right) = 0.$$

Путем введения параметра находим решение данного дифференциального уравнения

$$\begin{cases} x = \frac{c}{2}(t - \sin t); \\ y = \frac{c}{2}(t - \cos t), \end{cases}$$

являющееся циклоидой.

Значение c однозначно определяется из условия $y(x_0) = y_0$ (при $t = 0$ имеем $y(0) = 0$).

Используя второй закон Ньютона и три закона Кеплера, легко определить в любой момент времени t , $0 \leq t \leq T$, положение $(a \cos \varphi(t); a \sin \varphi(t))$ на орбите планеты или искусственного спутника, где

$$\varphi(t) - \varepsilon \sin \varphi(t) = \frac{2\pi}{T}t, \varphi(0) = 0;$$

ε — эксцентриситет,

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}, \text{ эллипса } \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1,$$

т. е. орбиты (первый закон Кеплера);

T — период обращения по орбите.

Предложение круговой орбиты позволяет с помощью второго закона Ньютона и законов Кеплера в одну строку вывести закон всемирного тяготения (см., например, [2]).

Важнейшая задача — задача оптимального управления — решается с помощью открытого Л.С. Понтрягиным принципа максимума [1]. Модельной является задача оптимального быстрого действия — найти управление $u(t)$, $|u(t)| \leq 1$, при котором точечная масса на прямой, находящаяся в начальный момент времени $t = 0$ в положении x_0 и имеющая скорость v_0 , за кратчайшее время T оказывается в точке $x = 0$ и имеет в момент $t = T$ нулевую скорость (то есть останавливается в момент $t = T$).

Математическая модель этой задачи — решение уравнения

$$\frac{d^2x}{dt^2} = u(t), |u(t)| \leq 1$$

с начальным условием

$$x(0) = x_0, \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = v_0$$

и нахождение такого управления $u(t)$, что

$$x(T) = 0, \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=T} = 0,$$

причем T — минимально возможное.

Для удобства вводим новые (фазовые) переменные

$$x_1 = x, x_2 = \frac{dx}{dt},$$

после чего получаем систему

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2, \frac{dx_2}{dt} = u(t)$$

при условиях $x_1(0) = x_0, x_2(0) = v_0, x_1(T) = 0, x_2(T) = 0$.

По принципу максимума получаем, что оптимальное управление релейно [9, 10]: $u(t) = \pm 1$ и имеет не более одного переключения, т. е.

$$u(t) = \text{sgn}(C_1 t + C_2).$$

При $u = +1$ движение происходит по части парабол

$$x_1 = \frac{1}{2}(t + A_1)^2 + A_2; x_2 = t + A_1,$$

а при $u = -1$ — по части парабол

$$x_1 = -\frac{1}{2}(-t + B_1)^2 + B_2; x_2 = -t + B_2.$$

Итак принцип Ферма позволяет получить закон отражения от прямого и изогнутого экрана. Закон преломления — закон Снеллиуса — получается, если применить принцип Ферма к границе раздела двух сред с различными плотностями. Отсюда вытекают объяснения явления рефракции. Полное внутреннее отражение (следствие закона Снеллиуса) ведет к созданию очень важного изобретения — световода. Проектор, радиотелескоп, разные типы радиолокационных антенн — все это принцип Ферма.

Список литературы

- [1] Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1976. 392 с.
- [2] Рубинштейн А.И. Математика на службе физики и техники. М.: МГУЛ, 2015. 238 с.
- [3] Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Антенны сантиметровых волн. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1958. 315 с.
- [4] Цлаф Л.Я. Вариационное исчисление и интегральные уравнения. М.: Наука, 1966. 192 с.
- [5] Филиппов А.Ф. Сборник задач по дифференциальным уравнениям. М.: Наука, 1979. 100 с.
- [6] Sea J., Optimisation theorie et algorithmes, Paris, 1971. 227 p.
- [7] Abadie J. Non linear programming, North Holland, Amsterdam, 1967. pp. 19-36.
- [8] Beltrami E.J. Methods of non linear analysis and optimisation, Academic Press, 1969. pp. 297-306.
- [9] Wilde D.J., Beightler C.J. Foundations of optimisation, Prentice Hall, 1967. 197 p.
- [10] Fletcher R. Optimization. Academic Press, 1969. 383 p.

Сведения об авторах

Рубинштейн Александр Иосифович — д-р физ.-мат. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: rubinshtein_aleksandr@mail.ru

Полещук Ольга Митрофановна — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: caf-math@mgul.ac.ru

Чернова Татьяна Владимировна — старший преподаватель МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: caf-math@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 05.09.2016 г.

WHAT YOU CAN AND SHOULD TEACH STUDENTS

A.I. Rubinshtein, O.M. Poleshchuk, T.V. Chernova

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

rubinshtein_aleksandr@mail.ru

Mathematics is perceived by students with a significant complexity. Most likely, this is due to the feeling that mathematics is a set of formal tasks of uncertain origin and it is unclear where their solutions can be applied and what they can result in, but the process of finding a solution is associated with the «balancing act» masquerading as «science.» I think that if you show the audience a number of real technical devices, the mathematical model of their functioning and just the idea of their creation can be described by simple differential equations which can be easily solved by some careful first-year or second-year students of technical universities. Or they can be engaged in finding the extremum of a function of one variable. A proper use of some facts noticed by some attentive observers in physics is of essence. Such factors include, for example, Fermat's principle, i.e., light (even in a heterogeneous environment) propagates along the path passable in the shortest time. So, for example, in a homogeneous medium light travels in a straight line. It is easy to check using a dark lantern which is a box with a narrow slot and with a source of light (lamp or candle) inside. This fact (Fermat's principle) allows to obtain the law of reflection from a straight screen and a curved one (on a sunny day one can see a shining bright dot which is moving along the multi-window façade of the building (for example, the «Cosmos» hotel) when one is walking along it). It is a stationary point shining. The law of refraction, i.e., Snell's law, is obtained if we apply Fermat's principle to the interface of two media with different densities (i.e. environments with different speeds of light propagation). Hence the phenomenon of refraction is explained: we see the solar disk for another minute after it went under. The total internal reflection (Shell's law consequence) has resulted in discovering optical fiber which is a very important invention. A searchlight, a radio telescope, different types of radar antennas are based on the Fermat's principle. This paper discusses these and other cases of studying simply investigated mathematical models.

Keywords: an optimal control, Newton's and Kepler's laws, a radar

Suggested citation: Rubinshtein A.I., Poleshchuk O.M., Chernova T.V. *Чему можно и следует учить студентов* [What you can and should teach students]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, v. 21, no 1, pp. 141–144. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-1-141-144

References

- [1] Pontraygin L.S. *Matematicheskaja teorija optimal'nyh processov* [The mathematical theory of the optimal processes], Moscow, Nauka, 1976, 392 p. (in Russian)
- [2] Rubinshtein A.I. *Matematika na sluzhbe fiziki i tehniki* [Mathematics on the service of Physics and engineering], MGUL, 2015, 238 p. (in Russian)
- [3] Field J.N., Benenson L.S. *Antenny santimetrovyh voln* [The acrials of the centimetrical waves, WAEA of name N.E.Zukovsky], Moscow, 1958, 315 p. (in Russian)
- [4] Tslaf L.J. *Variacionnoe ischislenie i integral'nye uravnenija* [The version calculation and integralic calculation], Moscow, Nauka, 1966, 192 p. (in Russian)
- [5] Filippov A. F., *Sbornik zadach po differencial'nym uravnenijam* [Collection of problems on differential equations], Moscow, Nauka, 1979, 100 p. (in Russian)
- [6] CEA J., *Optimisation theorie et alqorithmes*, Paris, 1971, 227 p.
- [7] Abadie J. *Non linear programming*, North Holland, Amsterdam, 1967, pp. 19-36.
- [8] Beltrami E.J. *Methods of non linear analysis and optimisation*, Academic Press, 1969, pp. 297-306.
- [9] Wilde D.J. Beightler C.J., *Foundations of optimisation*, Presetice Hall, 1967, 197 p.
- [10] Fletcher R. *Optimization*. Academic Press, 1969, 383 p.

Author's information

Rubinshteyn Aleksandr Iosifovich — Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Prof., BMSTU, e-mail: rubinshtein_aleksandr@mail.ru

Poleshchuk Ol'ga Mitrofanovna — Dr. Sci. (Tech.), Prof., BMSTU, e-mail: caf-math@mgul.ac.ru

Chernova Tat'yana Vladimirovna — Senior Lecturer, BMSTU, e-mail: caf-math@mgul.ac.ru

Received 05.09.2016