

ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК / FORESTRY BULLETIN

Научно-информационный журнал
№ 6' 2017 Том 21

Главный редактор

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

Редакционный совет журнала

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

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

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

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

Деглиз Ксавье, проф., Университет Лотарингии, LERMAV,
академик IAWS, академик Французской Академии сельского
хозяйства, Нанси, Франция

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Пастори Золтан, Ph.D., директор Инновационного центра
Шопронского университета, Hungary

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь Расева Елена Александровна

Редактор Л.В. Забродина

Перевод М.А. Карпухиной

Электронная версия Е.В. Жуковой

Учредитель МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-68118 от 21.12.2016

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

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

Выходит с 1997 года

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

Дата выхода в свет 25.12.2017.

Тираж 600 экз.

Заказ №

Объем 14,25 п. л.

Цена свободная

LESNOY VESTNIK / FORESTRY BULLETIN

Scientific Information journal
№ 6 ' 2017 Vol. 21

Editor-in-chief

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

Editorial council of the journal

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

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

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

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

Deglise Xavier, Prof. Universite de Lorraine, LERMaB, Academician IAWS, Academician of the French Academy of Agriculture, France

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

Evdokimov Yuriy Mikhaylovich, professor, Ph.D.(Chemical); academician of the New York Academy of Sciences, corr.

Academy of Natural Sciences, a member of the Central Board of Nanotechnology Society of Russia, Moscow

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Krott Maks, professor of Forest 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Assistant Editor Raseva Elena Aleksandrovna

Editor L.V. Zabrodina
Translation by M.A. Karpukhina
Electronic version E.V. Zhukova

Founder BMSTU

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media Certificate on registration ПИ № ФС 77-68118 of 21.12.2016

The journal is included in the list of approved VAK of the Russian Federation for editions for the publication of works of competitors of scientific degrees Materials of the present magazine can be reprinted and reproduced fully or partly with the written permission of publishing house It has been published since 1997

Editorial Board
141005, Mytishchi, Moscow Region, Russia
1st Institut'skaya street, 1
(498) 687-41-33
les-vest@mgul.ac.ru

Publication date 25.12.2017.
Circulation 600 copies
Order №
Volume 14,25 p.s.
Price free

СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Уткина И.А., Рубцов В.В. Современные представления о влиянии изменений климата на взаимодействие лесных деревьев и насекомых-фитофагов	5
Чевердин Ю.И., Вавин В.С., Ахтямов А.Г., Сауткина М.Ю. Влияние приемов мелиорации на рост древесных пород	13
Белов А.А. Дендрохронологический анализ изменений радиального прироста деревьев в сосняках Брянской области вследствие аварии на Чернобыльской АЭС	20
Мигунова Е.С. Первая экологическая классификация лесов (к 100-летию выхода в свет монографии А.А. Крюденера «Основы классификации типов насаждений»)	26

ЛЕСОИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

Борисов В.А., Акинин Д.В., Кирей В.В. Распределение нормальных реакций по длине опорной поверхности гусеничных движителей лесозаготовительных машин с полужесткой подвеской	31
Кожухов Н.И., Редькин А.К., Никитин В.В. Полномасштабное развитие транспортной инфраструктуры российских регионов – путь к решению основных социально-экономических проблем	38
Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Оценка влияния на скорость движения постоянных параметров плана и профиля при различных состояниях поверхности дороги	43

ДЕРЕВООБРАБОТКА И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Рыкунин С.Н., Кривощёков Н.В. Влияние изменения параметров сосновых пиломатериалов на формирование качества стенового клееного бруса	50
Запруднов В.И. Создание качественных древесно-цементных материалов	54
Олиференко Г.Л., Иванкин А.Н., Жилин Ю.Н., Прошина О.П., Зарубина А.Н., Вострикова Н.Л., Куликовский А.В., Бабурина М.И. Кинетика кислотной трансформации природных полисахаридов древесной биомассы в моносахара для получения кормовых добавок и микробиологических сред	61
Тарасов С.М., Лопатников М.В., Гранкин А.Ю., Леонтьев П.К., Грачева И.В. Состав для гидрофобизации целлюлозных материалов	68
Никольский С.Н., Ковалева К.И., Политенкова Г.Г., Михалева М.Г., Стовбун С.В. О неприменимости показателя «смачиваемость» по ГОСТ 595–79 при оценке качества древесной целлюлозы для нитрования	73
Горбачева Г.А. «Holzphysik: physik des holzes und der holzwerkstoffe» – новая книга Питера Нимца и Вальтера Сондерегера для науки и практики	77

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Шульц А.Н. Новые подходы к проектированию тепловых труб	80
Мышенков В.И., Савенко Н.О. Численное исследование обтекания плоского тела с истекающей из его кормы струей навстречу набегающему потоку	86
Пушкин Н.М., Лакшин К.В., Новичков А.С. Исследование динамических характеристик вибрационного модулятора датчика электростатического поля	94
Бурделёв А.В. О свойствах коэффициентов роста и коэффициентов возрастания	101
Рыбников К.К., Чернышова А.Г., Евсеев Н.В. Об одном классе математических методов анализа временных рядов. Возможности прогнозирования и апостериорных исследований особенностей социально-экономических процессов ..	109

CONTENTS

FORESTRY

Utkina I.A., Rubtsov V.V.

Modern ideas about the impact of climate change on interactions of forest trees and phytophagous insects 5

Cheverdin Yu.I., Vavin V.S., Ahtyamov A.G., Sautkina M.Yu.

The influence of melioration methods on wood growth in the genus 13

Belov A.A.

Dendrochronological analysis of the changes in annual radial increment of the scotch pine in Briansk region forests after Chernobyl accident 20

Migunova E.S.

First environmental classification of forests (to the 100th anniversary of the publication of the monograph by A.A. Krudener «Fundamentals of classification of types of plantings») 26

FOREST ENGINEERING

Borisov V.A., Akinin D.V., Kirey V.V.

Distribution of normal reactions along the length of the support surface of caterpillar propellers of forestry machines with semi-rigid suspension 31

Kozhukhov N.I., Red'kin A.K., Nikitin V.V.

Full-scale development of the transport infrastructure of the Russian regions is the way to solve the main social and economic problems 38

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

Assessment of the impact on the speed of the constant parameters of the plan and profile in the various states of the road surface 43

WOOD PROCESSING AND CHEMICAL TECHNOLOGY

Rykunin S.N., Krivoshchyokov N.V.

Influence of change of sawmilled pine parameters for quality wall glued laminated timber 50

Zaprudnov V.I.

Creation of quality wood-cement materials 54

Oliferenko G.L., Ivankin A.N., Zhilin Yu.N., Proshina O.P., Zarubina A.N., Vostrikova N.L., Kulikovskiy A.V., Baburina M.I.

Kinetics of acid transformation of natural polysaccharides of wood biomass to mono sugar for obtaining feed additives and microbiological media 61

Tarasov S.M., Lopatnikov M.V., Grankin A.Yu., Leontyev P.K., Gracheva I.V.

Composition for hydrophobization of cellulosic materials 68

Nikolskiy S.N., Kovaleva K.I., Politenkova G.G., Mikhaleva M.G., Stovbun S.V.

About the independence of the indicator «absorption capacity» by GOST 595–79 at the evaluation of the quality of wood chemical pulp for nitration 73

Gorbacheva G.A.

«Holzphysik: physik des holzes und der holzwerkstoffe» is a new book by Peter Niemz & Walter Sonderegger for science and practice 77

MATH MODELING

Shults A.N.

New approaches to design of heat pipes 80

Myshenkov V.I., Savenko N.O.

Numerical investigation of the flow past a plane body with a jet flowing out of its stern towards the supersonic flow 86

Pushkin N.M., Lakshin V.C., Novichkov A.S.

Investigation of the dynamic characteristics of the vibrating modulator sensor of the electrostatic field 94

Burdeliyov A.V.

About properties of expansion coefficients and increase coefficients 101

Rybnikov K.K., Chernyshova A.G., Evseev N.V.

One class of mathematical methods for time series analysis. The possibilities of prediction and a posteriori analysis of the peculiarities of the economic processes 109

УДК 630.181:595.78(470)

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-5-12

СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ВЛИЯНИИ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА НА ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛЕСНЫХ ДЕРЕВЬЕВ И НАСЕКОМЫХ-ФИТОФАГОВ

И.А. Уткина, В.В. Рубцов

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

utkinaia@yandex.ru

Многочисленные научные публикации, посвященные оценке влияния изменений климата на природные сообщества, показывают, что к настоящему времени накоплено немало данных о том, как реагируют на происходящие изменения растения и животные с различными характеристиками, как изменяются взаимосвязи между компонентами сообществ в разных природных зонах. Признается, что повышение температуры воздуха – фактор, оказывающий наибольшее влияние на живые организмы, а происходящее сейчас потепление происходит слишком быстро, чтобы они смогли адаптироваться к нему. Виды, занимающие разные трофические уровни, по-разному реагируют на происходящие изменения, что вызывает нарушение фенологической синхронности между кормом и его потребителем. Это относится и к кормовым растениям, и к насекомым, которые питаются ими, и к насекомоядным птицам. Как правило, реакция потребителя корма слабее, чем самого корма, отчего постепенно ухудшается кормовая база участников пищевой цепи, занимающих более высокие трофические уровни. Насекомые-ксилофаги в целом положительно отреагировали на повышение температуры и уменьшение количества осадков, судя по их расширившимся ареалам и увеличению интенсивности вспышек. Реакции насекомых-дефолиаторов и минёров менее однозначны, так как некоторые виды отрицательно отреагировали на увеличение температуры вследствие увеличения асинхронности между отрождением их личинок и раскрытием почек кормовых пород. Для галлообразователей и питающихся заболонью насекомых дефицит влаги вследствие засух, которыми сопровождается потепление, имеет отрицательное значение. До настоящего времени, несмотря на большое число наблюдений, остается много неясного в том, как функционируют отдельные виды растений и насекомых, их функциональные группы, лесные экосистемы в целом в меняющихся внешних условиях. Необходимы долгосрочные исследования в конкретных природных условиях, чтобы оценить реакцию участников взаимодействий на локальные изменения климата и определить стратегию лесного хозяйства в современной и прогнозируемой ситуации. **Ключевые слова:** изменения климата, лесные экосистемы, лесные деревья, насекомые-фитофаги, взаимодействие растения – насекомые

Ссылка для цитирования: Уткина И.А., Рубцов В.В. Современные представления о влиянии изменений климата на взаимодействие лесных деревьев и насекомых-фитофагов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 5–12. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-5-12

Наблюдаемые и прогнозируемые изменения климата и их влияние на самые разные стороны нашей жизни на протяжении нескольких десятилетий находятся в центре внимания специалистов разного профиля.

Цель работы

Воздействие климатических изменений на природные сообщества, их состав, функционирование, рост и развитие разнообразных компонентов, образующих эти сообщества, — основная часть исследований данного направления.

В работе G.-W. Walther et al. [1], являющейся обзором 97 источников, констатируется, что за прошедшие 100 лет (т. е. за весь XX в.) климат Земли стал теплее на 0,6°, с двумя отчетливыми периодами потепления — 1910–1945 гг. и с 1976 г. по настоящее время (2017 г.) Скорость повышения температуры во втором периоде потепления примерно в два раза выше, чем в первом. Более того, это самое интенсивное за последние 1000 лет потепление. Но, как справедливо пишут авторы

обзора, организмы, популяции и экологические сообщества реагируют не на осредненные в масштабах планеты показатели. Более уместно говорить, по их мнению, об экологических реакциях на региональные климатические изменения, неоднородные в пространственном отношении. Во многих регионах имеется асимметрия потепления, что, несомненно, уже внесло и еще внесет свой вклад в гетерогенность динамики экосистем.

Эти же авторы пишут также о том, что суточные амплитуды температур уменьшились, так как минимальные температуры выросли в два раза больше, чем максимальные. Вследствие этого в большинстве регионов северной и умеренной зоны удлинился безморозный период, а площадь снежного покрова и ледников, согласно спутниковым данным, с конца 1960-х гг. уменьшилась на 10 %. По их данным, примерно с 1960-х гг. весенние фенофазы и у растений, и у животных наступают все раньше, а осенние — все позже (хотя во втором случае не столь отчетливо), продолжительность

вегетационного периода в некоторых регионах с 70-х гг. XX в. увеличивалась со скоростью 3,6 сут за десятилетие [1].

О том, как повлияли произошедшие за последние десятилетия XX в. изменения климата на природные сообщества в разных зонах Земли, говорится в нескольких обзорных работах, вышедших в свет в самом начале XXI в. [2–5]. Во многих работах речь идет о влиянии изменений климата на бюджет углерода и о том, как изменение углеродных циклов, в свою очередь, повлияет на климатические характеристики [6–9].

По данным D. Lin et al. [10], в опытах с экспериментальным потеплением разной длительности (от 1 до 60 мес) произошло увеличение общей биомассы наземных растений на 12,3 %, причем у деревьев больше, чем у травянистых растений: 26,7 и 5,2 % соответственно. Авторы на основании проведенного ими метаанализа данных из 127 источников показывают, что на прирост растительной биомассы повлияли в первую очередь географическая широта и повышение температуры, а не прочие факторы (повышение концентрации CO₂, добавление азота, длительность вегетационного периода, изменение режима поступления осадков и др.). Реакция биомассы на климатические изменения варьируется в зависимости от географических параметров, видовых характеристик растений и их принадлежности к той или иной функциональной группе (семенные или споровые, деревья или кустарники, вечнозеленые или листопадные и т. д.).

Фенологические показатели как наиболее очевидный индикатор изменений климата

Особое внимание в этих и других работах уделяется фенологии — науке о сезонных изменениях в природе, так как изменение сроков наступления фенофаз у растений и животных — одно из наиболее очевидных и легко определяемых свидетельств происходящих климатических изменений.

Так, в упомянутой выше работе T.L. Root et al. [4] на примере 143 видов растений и животных из нескольких регионов показано, что в 80 % случаев видовые ареалы сдвигаются в направлении потепления климата. По мнению авторов [4], несмотря на то что все виды и природные сообщества непрерывно изменяются в процессе эволюции, происходящее сейчас потепление идет слишком быстро, чтобы они смогли адаптироваться к нему. Синергизм быстрого подъема температуры и других стрессовых факторов, в частности ухудшения местообитаний, вызванного деятельностью человека, могут легко нарушить

взаимосвязи между видами и привести к изменению состава сообществ вследствие различий в реакциях видов.

В одной из самых популярных и цитируемых работ [5], обобщающей 228 публикаций, говорится, что изменения фенологии и распределения растений и животных встречаются во всех типах морских, пресноводных и наземных природных сообществ и происходят так, как это и прогнозировалось в 2000–2002 гг.: в соответствии с глобальным потеплением ареалы сместились к северу и вверх по высоте. При этом виды, ареалы которых и ранее были ограничены, прежде всего полярные и высокогорные, станут еще более ограниченными в своем распространении и первыми подвергнутся угрозе исчезновения из-за изменений климата. Кроме того, зафиксированы уже происходящие нарушения взаимодействия в системах хищник — жертва и растение — насекомое, так как участники этих взаимодействий по-разному реагируют на потепление. В пределах расширяющихся видовых ареалов возникает эволюционная адаптация к более теплым условиям и используются новые ресурсы.

В то же время справедливо утверждение А.В. Кожаринова и А.А. Минина [11], что наблюдающееся потепление климата еще не стало фактором, который может спровоцировать изменения в структуре и функционировании экосистем умеренных широт, хотя зафиксированы направленные смещения в сроках наступления сезонных событий ранней и средней весны, осени, указывающие на потепление. Но они не носят повсеместного характера и свидетельствуют о присущей природным сообществам способности адаптироваться к внешним воздействиям без существенного ущерба для себя. Авторы [11] считают, что противоречивость фенологических тенденций при однонаправленных и очевидных, казалось бы, изменениях климата с начала XXI в. может свидетельствовать о весьма широком наборе адаптационных механизмов у биологических сообществ для переживания подобных периодов.

По мнению F.-W. Badeck et al. [12], именно температура — основной движитель многих процессов роста и развития растений, и в большинстве случаев более высокая температура ускоряет развитие растений и приводит к более раннему переходу их к следующей стадии онтогенеза. Растения чутко реагируют на сезонность внешней среды, в которой они находятся, и сдвиги в сроках деятельности растений (т. е. фенологии) дают наиболее очевидные свидетельства того, что виды и экосистемы испытывают влияние глобальных внешних изменений. Сдвиги фенологии наблюдаются в разных масштабах: от более раннего цветения отдельных видов до более раннего

позеленения земной поверхности, наблюдаемого из космоса.

Как считают E.E. Cleland et al. [13], необходимо объединить наземные и дистанционные методы фенологических исследований, подключив к ним математическое моделирование, чтобы лучше понять механизм происходящих изменений и обеспечить более точное прогнозирование будущих.

Однако, по мнению E.S. Post et al. [14], хотя потепление обычно ассоциируется с более ранним началом размножения (цветения растений, спаривания животных), реакция на потепление — более сложный процесс, чем просто сдвиг в сроках наступления тех или иных событий в жизни организмов, так как разные компоненты репродуктивной фенологии организмов реагируют с неодинаковой скоростью на потепление климата. Изменение фенологии видов происходит во всех природных зонах Земли, что неминуемо приводит к изменениям видовой демографии и популяционной динамики. По мнению авторов [14], несмотря на обилие уже накопленных данных, необходимы детальные долгосрочные наблюдения за организмами в одной и той же системе, причем следует оптимизировать протоколы наблюдений, чтобы адекватно охарактеризовать взаимодействие нескольких трофических уровней.

Важно отметить, что многие исследователи пишут о том, что сложность и неоднозначность наблюдаемых в природных сообществах процессов во многом определяется разной реакцией различных звеньев пищевых цепей на климатические изменения, о чем упоминалось выше [5]. Например, C. Both et al. [15] с 1988 по 2005 гг. наблюдали за фенологией четырех трофических уровней: датами раскрытия почек на кормовых деревьях, пиком кормления гусениц лиственной частью деревьев, фенологией размножения нескольких видов насекомоядных и хищных птиц. Показано, что во всех случаях реакция потребителя корма была слабее, чем самого корма, что в результате привело к постепенному ухудшению кормовой базы и насекомоядных, и хищных птиц, находящихся на более высоких трофических уровнях в рассматриваемой пищевой цепи.

A.S. Weed et al. [16] отмечают, что современные исследования подтвердили значение более мягких зим, более теплых периодов вегетации и изменений водного режима для частоты разнообразных лесных нарушений (в первую очередь вспышек массового размножения вредителей и заболеваний), так как климатические параметры влияют как на защитные характеристики и толерантность деревьев, так и на разнообразные взаимодействия внутри сообществ. Воздействие климата на частоту и интенсивность вспышек

размножения лесных насекомых и заболеваний леса может (по принципу положительной обратной связи) спровоцировать дальнейшие изменения климата, влияя на обмен углерода, воды и энергии между лесом и атмосферой. Изменения биотических нарушений имеют самые разные последствия для лесных экосистем и их способности приносить пользу человеку. По мнению авторов [16], необходимо лучшее понимание и прогнозирование взаимодействия между климатом, лесной продуктивностью, лесными нарушениями и социоэкономических связей между лесами и человеческим обществом.

Насекомые-фитофага в условиях меняющегося климата

Взаимодействие лесных насекомых-фитофагов и их кормовых древесных пород — важная тема работ, посвященных влиянию изменений климата на природные сообщества. Эта проблема выходит за рамки чисто научной, так как некоторые виды насекомых способны массово размножаться под действием тех или иных климатических факторов, нанося при этом существенный урон лесным насаждениям, что имеет большое экологическое и экономическое значение.

Еще в середине XX в. А.И. Воронцов отмечал [17], что при прямом воздействии сложившиеся погодные условия стимулируют или тормозят развитие, рост, питание насекомых и другие биологические процессы. Они же определяют уровень смертности от физических факторов среды (гибель от низкой температуры, ливней, засухи и т. д.). Очень часто в силу различных требований видов к физическим факторам наблюдается асинхронность в развитии вредителя и его энтомофагов.

Работы отечественных и зарубежных исследователей конца XX — начала XXI в. полностью это подтверждают и дают оценку влияния изменений климата на взаимодействие между растениями и насекомыми-фитофагами. На их основе сделаны аналитические обзоры, обобщающие в единое целое результаты разрозненных экспериментов и наблюдений, полученных с начала 80-х гг. XX в. Главные выводы содержатся в наших предыдущих обзорных работах [18–20].

J. Landsberg и M.S. Smith [21] еще в 1992 г. предположили, что изменения глобальной атмосферы повлияют на частоту и интенсивность вспышек размножения растительных насекомых, в первую очередь вследствие изменения температуры воздуха и суммы осадков, тогда как ожидаемое повышение содержания CO₂ в атмосфере не окажет большого влияния, кроме случаев, когда в ответ на нападение фитофагов растения образуют защитные соединения на основе азота.

Схожие выводы сделаны L. Huges в 2000 г. [2]. Проанализировав 49 литературных источников, он распределил ожидаемые последствия изменения климата на четыре группы: 1) изменение физиологии насекомых и растений вследствие изменения скорости развития и метаболизма тех и других; 2) перемещение ареалов видов как растений, так и насекомых вверх по высоте над уровнем моря или к полюсам в ответ на сдвиг климатических зон; 3) изменение фенологии видов, отчего могут нарушиться взаимосвязи между ними; 4) изменение адаптационных способностей, отчего у видов с короткими оборотами поколений и высокой интенсивностью роста численности произойдут микроэволюционные изменения. Такие изменения физиологии, фенологии и распространения конкретных видов неизбежно изменят конкурентные и прочие взаимодействия между ними.

В том же 2000 г. M.P. Ayres и M.J. Lombardero [22] в обзоре 311 публикаций предположили, что изменения климата приведут к изменению действия фитофагов (в первую очередь насекомых) и возбудителей болезней (патогенов) на лес и повлияют на развитие и выживаемость фитофагов и патогенов, как непосредственно, так и косвенно — изменяя защитные реакции деревьев и воздействуя на естественных врагов и конкурентов фитофагов. Даже умеренные климатические изменения окажут, по их мнению, быстрое влияние на распределение и обилие многих фитофагов и патогенов из-за их короткого жизненного цикла, мобильности, репродуктивного потенциала и чувствительности к температуре. Кроме того, изменение лесных нарушений, вызываемых насекомыми и возбудителями болезней, вызовет обратную связь с климатическими факторами через воздействие на водный режим и потоки углерода в лесных экосистемах.

Похожие выводы делают и авторы более поздних (2010–2016 гг.) работ. По данным E.E. Stande и M.P. Ayres [23], в целом более высокая температура влияет на популяционную динамику насекомых, их выживаемость, длительность поколения, плодовитость и распространение. Однако реакции конкретного вида насекомого зависят от его ареала, занимаемого трофического уровня и прочих характеристик, сложившихся в ходе эволюции. По-видимому, в средних и высоких широтах популяции насекомых больше других выиграют от изменений климата благодаря их ускорившемуся развитию и увеличению выживаемости, тогда как о влиянии потепления на насекомых тропиков известно гораздо меньше. Смертность насекомых может снизиться вследствие более теплых зим, что также обусловит сдвиг ареалов к северу. Физиологический эффект

потепления на насекомых может быть и косвенным в виде трофических взаимодействий (в частности, с кормовыми растениями и естественными врагами). Подобные характеристики насекомых наблюдаются во всех расширившихся ареалах, свидетельствуя о биологических реакциях на происходящие климатические изменения. Так как в основном насекомые имеют относительно короткие жизненные циклы, высокую репродуктивную способность и большую мобильность, их физиологические реакции на повышение температуры могут спровоцировать резкое изменение популяционной динамики многих видов.

В обзорной работе T. Cornelissen [24] также говорится, что насекомые-фитофаги подвергаются не только прямому действию климатических изменений, но и косвенному — в виде изменений, происходящих с их кормовыми растениями.

A. Marciniak [25] обобщает исследования воздействия климата на разные группы насекомых и утверждает, что хищники положительно отреагировали на повышение температуры и уменьшение количества осадков, судя по их расширившимся ареалам и увеличению интенсивности всплеск. Данные о дефолиаторах не столь однозначны, так как некоторые виды отреагировали негативно на увеличение температуры вследствие увеличения асинхронности между отрождением их личинок и раскрытием почек кормовых пород.

T. Jaworski и J. Hilschancky [26] сделали заключение, что глобальное потепление благоприятно для видов-полифагов и эвтрофных видов благодаря их более высокой экологической пластичности и адаптивным способностям. По их данным, заметно возрастает роль термофильных видов, что проявляется сдвигами ареалов к северу и вверх по высоте над уровнем моря. В результате этих изменений роль некоторых фитофагов может измениться: у одних увеличится, у других — уменьшится. Возрастает число видов, зимующих в фазе яйца, по сравнению с теми, у которых зимуют другие фазы. Влияние водного дефицита на динамику численности насекомых-фитофагов может варьироваться. Это связано не только с частотой и уровнем дефицита влаги, но и с трофической гильдией, к которой принадлежит тот или иной фитофаг.

В целом, по мнению авторов [26], виды, развивающиеся в древесине, положительно реагируют на небольшой водный дефицит. Галлообразователи и питающиеся заболонью насекомые на дефицит влаги реагируют отрицательно. Данные о листогрызущих насекомых и минёрах противоречивы. Изменения климата и все более расширяющаяся торговля весьма благоприятны для распространения инвазивных насекомых-фитофагов. Отсутствие естественных врагов и более

высокая экологическая пластичность вселенцев по сравнению с аборигенными видами способны привести к более высоким, чем сейчас, повреждениям лесных экосистем.

Т.Е. Kolb et al. [27] в вышедшем совсем недавно обзоре 237 источников показывают, что прогнозируемые изменения климата вследствие антропогенной деятельности подразумевают повышение температуры и изменение количества и распределения осадков, что приведет к частоте и интенсивности засух. Однако данных о том, как это повлияет на лесных насекомых и возбудителей болезней, пока недостаточно. В частности, не обнаружена устойчивая реакция на засуху листогрызущих насекомых. С помощью теоретических выкладок и пока что небольшого числа наблюдений выявлена нелинейная связь между интенсивностью засухи и вспышками размножения наиболее вредоносных ксилофагов: умеренные засухи уменьшают численность ксилофагов и отпад деревьев вследствие их деятельности, тогда как сильные засухи, наоборот, увеличивают. Виды, питающиеся заболонью, реагируют на умеренные засухи в тех случаях, когда они резко сменяются более влажными периодами. До сих пор, по мнению авторов [27], плохо понято влияние засух на возбудителей болезней лесных пород, однако имеются свидетельства о пониженной численности первичных патогенов и тех патогенов, у которых жизненный цикл зависит от влажности. В этих случаях скорость размножения, распространения и инфицирования будет больше в более влажных условиях. Напротив, вторичные патогены (поселяющиеся на деревьях в стрессовом состоянии), как ожидается, в условиях засухи будут многочисленнее и окажут более сильное воздействие на дерево-хозяина. Авторы пришли к заключению, что необходимы более развернутые и продолжительные исследования того, как повлияют прогнозируемые засухи на лесных насекомых и возбудителей заболеваний, а также того, какова роль лесохозяйственных мероприятий для ослабления негативных воздействий всех этих биотических и абиотических факторов на лес.

Еще одна обобщающая работа, T.D. Ramsfield et al. [28], затрагивает другой важный аспект – увеличение угрозы экосистемам инвазивных видов насекомых и патогенов вследствие происходящих и будущих изменений климата. Данных по этой проблеме, по мнению авторов, до сих пор недостаточно.

Заключение

Обзор работ, посвященных влиянию происходящих и прогнозируемых изменений климата на лесные сообщества, в том числе на взаимодей-

ствие между лесными деревьями и насекомыми, показывает, что на протяжении последних десятилетий происходит изменение климата, проявляющееся прежде всего в повышении температуры воздуха и изменении количества и распределения осадков. Зафиксированные изменения ареалов многих видов растений и животных в виде сдвига в северном направлении и вверх по высоте над уровнем моря свидетельствуют о происходящем потеплении. Более раннее наступление весенних фенофаз и более позднее — осенних приводит к удлинению вегетационного периода и повышению биомассы наземных растений. Все это, вместе с изменениями климатических параметров, оказывает влияние на растительных животных, включая насекомых с разной пищевой специализацией и различными жизненными циклами. До настоящего времени, несмотря на большое число наблюдений, остается много неясного в том, как функционируют отдельные виды растений и насекомых, их функциональные группы, лесные экосистемы в целом в меняющихся внешних условиях. Авторы рассмотренных работ обращают особое внимание на необходимость продолжения долгосрочных исследований в конкретных природных условиях, чтобы оценить реакцию участников взаимодействий на локальные изменения климата, а также определить, какова должна быть стратегия лесного хозяйства в современной и предполагаемой ситуации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 15–04–05592).

Список литературы

- [1] Walther G.-R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C., Fromentin J.-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F. Ecological responses to recent climate change // *Nature*, 2002, v. 416, pp. 389–395.
- [2] Huges L. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? // *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, v. 15, no. 2, pp. 56–61.
- [3] Shaver G.R., Canadell J., Chapin F.S. III, Gurevitch J., Harte J., Henry G., Ineson P., Jonasson S., Melillo J., Pitelka L. Global warming and terrestrial ecosystems: a conceptual framework for analysis // *BioScience*, 2000, v. 50, pp. 871–882.
- [4] Root T.L., Price J.T., Hall K.R., Schneider S.H., Rosenzweig C. J., Pounds A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants // *Nature*, 2003, v. 421, pp. 57–60.
- [5] Parmesan C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2006, v. 37, pp. 637–669.
- [6] Cao M., Woodward F.I. Dynamic response of terrestrial ecosystem carbon cycling to global change // *Nature*, 1998, v. 393, pp. 249–252.
- [7] Cox P.M., Betts R.A., Jones C.D., Spall S.A., Totterdell I.J. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model // *Nature*, 2000, v. 408, pp. 184–187.

- [8] Luo Y.Q. Terrestrial carbon-cycle feedback to climate warming // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2007, v. 38, pp. 683–712.
- [9] Saitoh T.M., Nagai S., Yoshino J., Kondo H., Tamagawa I., Muraoka H. Effects of canopy phenology on deciduous overstory and evergreen understory carbon budgets in a cool-temperate forest ecosystem under ongoing climate change // *Ecological Research*, 2015, v. 30, pp. 267–277.
- [10] Lin D., Xia J., Wan S. Climate warming and biomass accumulation of terrestrial plants: a meta-analysis // *New Phytologist*, 2010, v. 188, no. 1, pp. 187–198.
- [11] Кожаринов А.В., Минин А.А. Современные тенденции в состоянии природы Русской равнины // *Влияние изменения климата на экосистемы / под ред.: А.О. Кокорина, А.В. Кожаринова, А.А. Минина. М.: Русский университет, 2001. Ч. I. С. 17–23.*
- [12] Badeck F.-W., Bondeau A., Böttcher K., Doktor D., Lucht W., Schaber J., Sitch S. Responses of spring phenology to climate change // *New Phytologist*, 2004, v. 162, pp. 295–309.
- [13] Cleland E.E., Chuine I., Menzel A., Mooney H.A., Schwartz M.D. Shifting plant phenology in response to global change // *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, v. 22, no. 7, pp. 357–365.
- [14] Post E.S., Pedersen C., Wilmers C.C., Forchhammer M.C. Phenological sequences reveal aggregate life history response to climatic warming // *Ecology*, 2008, v. 89, no. 2, pp. 363–370.
- [15] Both C., van Asch M., Bijlsma R.G., van den Burg A.B., Visser M.E. Climate change and unequal phenological changes across four trophic levels: constraints or adaptations? // *Journal of Animal Ecology*, 2009, v. 78, pp. 73–83.
- [16] Weed A.S., Ayres M.P., Hicke J.A. Consequences of climate change for biotic disturbances in North American forests // *Ecological Monographs*, 2013, v. 83, no. 4, pp. 441–470.
- [17] Воронцов А.И. Патология леса. М.: Лесная пром-сть, 1978. 272 с.
- [18] Рубцов В.В., Уткина И.А. Адаптационные реакции дуба на дефолиацию. М.: Гриф и К, 2008. 302 с.
- [19] Рубцов В.В., Уткина И.А. Филлофаги лесных экосистем в условиях изменяющегося климата // *Вестник Поволжского государственного технологического ун-та. Сер. Лес, экология, природопользование*, 2010. № 3. С. 3–15.
- [20] Уткина И.А., Рубцов В.В. Изменение климата и его последствия для взаимоотношений фитофагов с растениями // *Вестник МГУЛ — Лесной вестник*, 2009. № 5. С. 165–175.
- [21] Landsberg J., Smith M.S. A functional scheme for predicting the outbreak potential of herbivorous insects under global atmospheric change // *Australian J. Botany*, 1992, v. 40, no. 4–5, pp. 565–577.
- [22] Ayres M.P., Lombardero M.J. Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens // *The Science of the Total Environment*, 2000, v. 262, no. 3, pp. 263–286.
- [23] Stange E.E., Ayres M.P. *Climate change impacts: insects* // eLS. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2010. URL: <http://www.els.net> doi: 10.1002/9780470015902.a0022555
- [24] Cornelissen T. Climate change and its effects on terrestrial insects and herbivory patterns // *Neotropical Entomology*, 2011, v. 40, no. 2. URL: <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-566X2011000200001>
- [25] Marciniak A. Climate change effects on eruptive forest insects : a review and synthesis of empirical evidence. URL: <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/undergraduateresearch/52966/items/1.0075624> 2012 doi: 10.14288/1.0075624
- [26] Jaworski T., Hilszczański J. The effect of temperature and humidity changes on insects development and their impact // *Leśne Prace Badawcze (Forest Research Papers)*, 2013, v. 74, no. 4, pp. 345–355.
- [27] Kolb T.E., Fettig C.J., Ayres M.P., Bentz B.J., Hicke J.A., Mathiasen R., Stewart J.E., Weed A.S. Observed and anticipated impacts of drought on forest insects and diseases in the United States // *Forest Ecology and Management*, 2016, v. 380, pp. 321–334.
- [28] Ramsfield T.D., Bentz B.J., Faccoli M., Jactel H., Brockerhoff E.G. Forest health in a changing world: effects of globalization and climate change on forest insect and pathogen impacts // *Forestry*, 2016, v. 89, no. 3, pp. 245–253.

Сведения об авторах

Уткина Ирина Анатольевна – канд. биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии широколиственных лесов Института лесоведения РАН, utkinaia@yandex.ru

Рубцов Василий Васильевич – д-р биол. наук, заведующий лабораторией экологии широколиственных лесов Института лесоведения РАН, vrubtsov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2017 г.

MODERN IDEAS ABOUT THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON INTERACTIONS OF FOREST TREES AND PHYTOPHAGOUS INSECTS

I.A. Utkina, V.V. Rubtsov

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

utkinaia@yandex.ru

Numerous scientific publications devoted to the assessment of the impact of climate change on natural communities show that up to now there has been accumulated a lot of data on how to react to changes in plants and animals with different characteristics, how the relationships between community components change in different natural zones. It is recognized that an increase in air temperature is the factor that has the greatest impact on living organisms, and the current warming is taking place too quickly for them to adapt to it. Species occupying different trophic levels react differently to the changes that occur, which causes a violation of the phenological synchrony between the feed and its consumer. This also applies to home plants and insects that feed on them, and to insectivorous birds. As a rule, the reaction of the feed consumer is weaker than the feed itself, which is why the food base of the food chain participants occupying higher trophic levels is gradually deteriorating. The xylophagous insects on the whole reacted positively to an increase in temperature and a decrease in the amount of precipitation, judging by their widened ranges and the increase in the intensity of outbreaks. The reactions of defoliating insects and miners are less straightforward, as some species react negatively to an elevated temperature due to an increase in asynchrony between the hatching of their larvae and the opening of buds of home trees. A moisture deficit due to droughts accompanied by warming has a negative value for gall producers and sap-eating insects. Until now, despite a large number of observations, an uncertainty remains concerning specific responses of plant and insects, their functional groups, forest ecosystems as a whole in a changing environment. Long-term studies in specific ecosystems are needed to assess the response of participants in interactions to local climate changes and to determine the strategy of forestry in the current and forecasted situation.

Keywords: climate change, forest ecosystems, forest trees, phytophagous insects, plant – insect interactions

Suggested citation: Utkina I.A., Rubtsov V.V. *Sovremennyye predstavleniya o vliyaniy izmeneniy klimata na vzaimodeystviye lesnykh derev' yev i nasekomykh-fitofagov* [Modern ideas about the impact of climate change on interactions of forest trees and phytophagous insects]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 5–12. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-5-12

References

- [1] Walther G.-R., Post E., Convey P., Menzel A., Parmesan C., Beebee T.J.C, Fromentin J.-M., Hoegh-Guldberg O., Bairlein F. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, v. 416, pp. 389–395.
- [2] Huges L. Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, v. 15, no. 2, pp. 56–61.
- [3] Shaver G.R., Canadell J., Chapin F.S. III, Gurevitch J., Harte J., Henry G., Ineson P., Jonasson S., Melillo J., Pitelka L. Global warming and terrestrial ecosystems: a conceptual framework for analysis. *BioScience*, 2000, v. 50, pp. 871–882.
- [4] Root T.L., Price J.T., Hall K.R., Schneider S.H., Rosenzweig C. J., Pounds A. Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, v. 421, pp. 57–60.
- [5] Parmesan C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2006, v. 37, pp. 637–669.
- [6] Cao M., Woodward F.I. Dynamic response of terrestrial ecosystem carbon cycling to global change. *Nature*, 1998, v. 393, pp. 249–252.
- [7] Cox P.M., Betts R.A., Jones C.D., Spall S.A., Totterdell I.J. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 2000, v. 408, pp. 184–187.
- [8] Luo Y.Q. Terrestrial carbon-cycle feedback to climate warming. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2007, v. 38, pp. 683–712.
- [9] Saitoh T.M., Nagai S., Yoshino J., Kondo H., Tamagawa I., Muraoka H. Effects of canopy phenology on deciduous overstorey and evergreen understorey carbon budgets in a cool-temperate forest ecosystem under ongoing climate change. *Ecological Research*, 2015, v. 30, pp. 267–277.
- [10] Lin D., Xia J., Wan S. Climate warming and biomass accumulation of terrestrial plants: a meta-analysis. *New Phytologist*, 2010, v. 188, no. 1, pp. 187–198.
- [11] Kozharinov A.V., Minin A.A. *Sovremennyye tendentsii v sostoyanii prirody Russkoy ravniny* [Current trends in the state of nature of the Russian Plain] *Vliyaniye izmeneniya klimata na ekosistemy* [The Impact of Climate Change on Ecosystem]. Moscow: Russkiy universitet Publ., 2001, v. 1, pp. 17–23. (in Russian)
- [12] Badeck F.-W., Bondeau A., Böttcher K., Doktor D., Lucht W., Schaber J., Sitch S. Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist*, 2004, v. 162, pp. 295–309.
- [13] Cleland E.E., Chuine I., Menzel A., Mooney H.A., Schwartz M.D. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology & Evolution*, 2007, v. 22, no. 7, pp. 357–365.
- [14] Post E.S., Pedersen C., Wilmers C.C., Forchhammer M.C. Phenological sequences reveal aggregate life history response to climatic warming. *Ecology*, 2008, v. 89, no. 2, pp. 363–370.
- [15] Both C., van Asch M., Bijlsma R.G., van den Burg A.B., Visser M.E. Climate change and unequal phenological changes across four trophic levels: constraints or adaptations? *Journal of Animal Ecology*, 2009, v. 78, pp. 73–83.
- [16] Weed A.S., Ayres M.P., Hicke J.A. Consequences of climate change for biotic disturbances in North American forests. *Ecological Monographs*, 2013, v. 83, no. 4, pp. 441–470.

- [17] Vorontsov A.I. *Patologiya lesa* [Pathology of the Forest]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ., 1978. 272 p. (in Russian)
- [18] Rubtsov V.V., Utkina I.A. *Adaptatsionnye reaktsii duba na defoliatsiyu* [Adaptive Responses of Oak to Defoliation]. Moscow: Grif i K Publ., 2008. 302 p. (in Russian)
- [19] Rubtsov V.V., Utkina I.A. *Fillofagi lesnykh ekosistem v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata* [Phyllophages of forest ecosystems in a changing climate] *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Ser.: Les, ekologiya, prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga state technological University. Series: Forest, Ecology, Nature Management], 2010, no. 3, pp. 3–15. (in Russian)
- [20] Utkina I.A., Rubtsov V.V. *Izmenenie klimata i ego posledstviya dlya vzaimootnosheniy fitofagov s rasteniyami* [Climate change and its consequences for the relationship between herbivores and plants] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2009, no. 5, pp. 165–175. (in Russian)
- [21] Landsberg J., Smith M.S. A functional scheme for predicting the outbreak potential of herbivorous insects under global atmospheric change. *Australian Journal of Botany*, 1992, v. 40, no. 4–5, pp. 565–577.
- [22] Ayres M.P., Lombardero M.J. Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *The Science of the Total Environment*, 2000, v. 262, no. 3, pp. 263–286.
- [23] Stange E.E., Ayres M.P. *Climate change impacts: insects*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, Available at: <http://www.elsevier.com/locate/S016953470015902> DOI: 10.1002/9780470015902.a0022555
- [24] Cornelissen T. Climate change and its effects on terrestrial insects and herbivory patterns. *Neotropical Entomology*, 2011, v. 40, no. 2. Available at: <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-566X2011000200001>
- [25] Marciniak A. Climate change effects on eruptive forest insects : a review and synthesis of empirical evidence. Available at: <https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/undergraduateresearch/52966/items/1.0075624> 2012 DOI: 10.14288/1.0075624
- [26] Jaworski T., Hilszczański J. The effect of temperature and humidity changes on insects development and their impact. *Leśne Prace Badawcze (Forest Research Papers)*, 2013, v. 74, no. 4, pp. 345–355.
- [27] Kolb T.E., Fettig C.J., Ayres M.P., Bentz B.J., Hicke J.A., Mathiasen R., Stewart J.E., Weed A.S. Observed and anticipated impacts of drought on forest insects and diseases in the United States. *Forest Ecology and Management*, 2016, v. 380, pp. 321–334.
- [28] Ramsfield T.D., Bentz B.J., Faccoli M., Jactel H., Brockerhoff E.G. Forest health in a changing world: effects of globalization and climate change on forest insect and pathogen impacts. *Forestry*, 2016, v. 89, no. 3, pp. 245–253.

Authors' information

Utkina Irina Anatolyevna – Cand. Sci. (Biol.), senior scientist of the Laboratory of broad-leaved forests, Institute of Forest Science RAS, utkinaia@yandex.ru

Rubtsov Vasilii Vasilyevich – Dr. Sci. (Biol.), Head of the Laboratory of broad-leaved forests, Institute of Forest Science RAS, vrubtsov@mail.ru

Received 16.06.2017

ВЛИЯНИЕ ПРИЕМОМ МЕЛИОРАЦИИ НА РОСТ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД**Ю.И. Чевердин¹, В.С. Вавин², А.Г. Ахтямов², М.Ю. Сауткина³**¹Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Центрально-Черноземной полосы им. В.В. Докучаева, п/о Институт им. Докучаева, уч. 2, 397463, Воронежская обл., Таловский р-н²Каменно-Степное опытное лесничество, п/о Институт им. Докучаева, уч. 2, 397463, Воронежская обл., Таловский р-н³Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии, 394087, г. Воронеж, ул. Ломоносова, д. 105

cheverdin62@mail.ru

Изучено состояние искусственного древесного насаждения через 54 года после проведения мелиоративных воздействий на солонцы (землевание, гипсование, внесение навоза) и прекращения ежегодных обработок почвы. Отмечено общее снижение древостоя и его качества на солонцовых клетках по сравнению с черноземом обыкновенным. Показано, что наиболее солеустойчивыми древесными культурами являются дуб, ясень и вяз. Груша, яблоня, тополь к настоящему времени практически отсутствуют в составе лесонасаждения. В южной части на солонцовой секции к возрасту 54 лет сформировалось ясеневое-дубовое насаждение с участием тополя и вяза (по совокупности двух первых ярусов), а на черноземной секции — дубово-ясеневое насаждение с участием вяза. По лесоустроительным нормативам, насаждения существенно различаются по составу I яруса, по полноте и совокупности крон и запасу стволовой древесины. В северной части опытного участка различие в составе первых двух ярусов более существенно, так как доля ясеня на черноземной секции на 20 % ниже, чем на солонцах, где древостой по густоте, полноте, запасу и бонитету уступает таксационным показателям древостоя на черноземах.

Ключевые слова: солонцы, мелиорация, лесные насаждения, состояние древостоя**Ссылка для цитирования:** Чевердин Ю.И., Вавин В.С., Ахтямов А.Г., Сауткина М.Ю. Влияние приемов мелиорации на рост древесных пород // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 13–19.

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-13-19

В структуре почвенного покрова степной части России значительное место принадлежит почвам солонцового ряда [1, 2]. Продуктивность таких угодий при сельскохозяйственном использовании находится на довольно низком уровне [3, 4]. Солонцы в разных климатических зонах и условиях почвообразования различаются в лесорастительном отношении. Рост лесных культур зависит от многих факторов, среди которых ведущими являются качественный состав почвенно-поглощающего комплекса солонцов, особенности засоления и их водный режим [5, 6].

Объект исследований

Лесная полоса № 147 (солонцовая клетка) является первым опытным мелиоративным участком, где с 1952 г. И.А. Юриным, И.Ф. Поротиковым совместно с сотрудниками Почвенного института им. В.В. Докучаева проводились опыты по мелиорации старых солонцов лесомелиоративным методом на основе нанесения на солонцовые пятна черноземной массы в сочетании с гипсом и навозом [7, 8]. По данным авторов [7, 8], почвенные разновидности были представлены таким образом: обыкновенный чернозем — 3,96 га; солонцеватый чернозем — 0,72 га; солонец корковый содово-сульфатный — 1,0 га. Общая площадь опытного мелиоративного участка составила 5,68 га.

Опытный участок, согласно программе и методике по закладке опытов, разбит на две части,

где в северной части мелиоративная подготовка почвы проведена осенью 1952 г. с посадкой лесных культур весной в 1953 г., на южном участке посадка сеянцев осуществлялась весной 1954 г. [7, 8]. Размещение сеянцев: 0,7 м в ряду и 1,5 м между рядами. Каждая делянка опыта состояла из 17 рядов, при стыковом междурядии (между двумя смежными делянками) расстояние около 3 м.

Насаждения на каждой делянке включают: три ряда дуба черешчатого (Д), два ряда вяза мелколистного (Вм), три ряда ясеня пушистого (Яп), два ряда тополя бальзамического, черного и китайского (Т), шесть рядов клена татарского (Кт) и один ряд яблони и груши (Яб, Гр). Схема размещения древесных пород по рядам (направление рядов с севера на юг) на каждой из делянок следующая: Вм – Кт – Яп – Кт – Д – Кт – Т – Яп – Т – Кт – Д – Кт – Яб, Гр – Кт – Вм.

Подбор пород определялся следующими требованиями [7, 8]:

1) с мелиоративной точки зрения состав пород должен удовлетворять задачам биологического дренажа почвенного профиля солонцов. Лучше всего для этого подходят смешанные насаждения с участием пород, имеющих различий габитус корневой системы. В данном случае дуб и вяз относятся к древесным породам, развивающим глубокую корневую систему, а тополь, ясень и клен — к развивающим комбинированно-поверхностную корневую систему. Схема размещения пород предусматривает равномерное распреде-

ление деревьев с разной корневой системой по площади насаждения;

2) в насаждения вводятся древесные породы, имеющие наибольшее распространение в защитном лесоразведении зоны черноземных почв. Из них отбирают породы, которые обладают относительной солонце- и солеустойчивостью и сравнительно менее требовательны к кальциевому питанию;

3) поскольку данные лесонасаждения, помимо опытного, имеют и производственное значение ввиду занимаемой ими площади, состав пород и схема их размещения должны обеспечивать создание долговечного, устойчивого и ценного в хозяйственном отношении лесонасаждения.

По данным И.Н. Антипова-Каратаева с соавт. [7, с. 213], на участках землевания солонцов древесные породы в период индивидуального роста по показателям роста и развития не уступали культурам, произрастающим на контрольных участках (чернозем обыкновенный). На участках с унавоживанием и гипсованием солонцов разные породы вели себя по-разному. Наиболее солевыносливыми оказались вяз мелколистный и ясень пушистый, которые сравнительно успешно развивались на площади корково-глыбистого солонца с одной глубокой вспашкой. Несколько менее солевыносливым показал себя тополь черный, но он также резко выделился среди остальных пород. Клен татарский в этом варианте опыта, как и на унавоженном солонце (вар. ШБ), полностью выпал, как и дуб черешчатый. Яблоня, груша, тополь бальзамический и тополь китайский занимали промежуточное положение (отпад семян свыше 50 % при очень слабом развитии древесных растений).

В работе [7] отмечается, что при лесоводственном освоении солонцов в условиях юго-востока Центрально-Черноземной полосы в состав пород на солонцах, мелиорируемых способом землевания, можно включать все породы, используемые в полезащитном лесоразведении в этой зоне. На солонцах, мелиорируемых способом гипсования, основу насаждения должны составлять ясень пушистый, вяз мелколистный и дуб черешчатый, а также тополь черный. При простейших способах мелиорации солонцов следует ориентироваться лишь на две породы (из испытанных авторами) — ясень пушистый и вяз мелколистный, которые отличаются чрезвычайно высокой солонцеустойчивостью.

Цель работы — исходя из данных, полученных исследователями в первые четыре года роста культур при разных вариантах опыта, проанализировать рост древесных пород и развития древостоя насаждений на мелиорированных солонцах, путем лесосчетных работ на разных вариантах

бывших солонцов через 54 года после проведения мелиорации.

На опытной территории (лесная полоса № 147) выделено 4 участка. Участок I — солонцовая площадь (немелиорированный солонец — С), расположенная в южной части территории (бывший № 147б), шириной 20 м, протяженностью 100 м в направлении с запада на восток; участок II располагается параллельно участку I, таких же размеров (землевание в сочетании с навозом и гипсом — 3); участок III — бывший солонец (без мелиорации — С) в северной части опытной территории (длина 100 м, ширина 20 м); участок IV расположен рядом с участком III и имеет такие же размеры (землевание в сочетании с навозом и гипсом — 3). Сравнительный анализ роста древесных пород и насаждений в целом проводился путем сопоставления данных, полученных для I и II участков, с данными, полученными для III и IV участков.

Методика проведения исследований

В полевых условиях на каждой пробной площади проводили сплошной перебор деревьев по диаметру на высоте 1,3 м по ступеням толщины в 1 см. Одновременно с этим измеряли высоту деревьев (не менее 20–25 деревьев каждой породы) по трем ярусам (мерной вилкой и высотомером ЭВ-1). В некоторых случаях использовали обмеры поваленных (ветроломных) и сухих деревьев (клена татарского, ясеня и тополя).

При переборе деревьев на пробной площади у каждой породы измеряли диаметр проекции, высоту прикрепления и состояние кроны деревьев. Кроме того, визуально описывали подрост, подлесок, почвенный покров, определяли сомкнутость крон насаждения.

Камеральную обработку полевых материалов проводили после статистической обработки рядов на ЭВМ, где рассчитывали среднюю величину (диаметр и высоту), ошибку средней, среднее квадратическое отклонение, коэффициент вариации признака и точность опыта. После этого полученные данные вносили в таблицы, которые обрабатывались обычным методом таксации с использованием «Лесной вспомогательной книжки» А.В. Тюрина, И.М. Науменко и В.П. Воронова [9], а также таблиц хода роста семенных дубовых насаждений Ф.П. Моисеенко [10], опубликованных в журнале «Лесное хозяйство» № 4 за 1964 г.

В формуле состава насаждений каждая порода обозначается условным знаком, чаще всего начальной буквой породы. В данной статье приняты обозначения из перечня полных и сокращенных названий древесных и кустарниковых пород [11]. Состав насаждений в таблицах дается по ярусам

и выражается формулами, где степень участия каждой породы указана в долях десятка. Состав определяют через площади сечения стволов на высоте 1,3 м, что соответствует выражению через объем стволовой древесины каждой древесной породы. Таким образом, формула состава «4Д 4Яп 1В 1Т ед. Яо» показывает, что насаждение по запасу на 40 % состоит из дуба, на 40 % из ясеня обыкновенного, на 10 % из вяза и на 10 % из тополя. Обозначение «ед.» указывает на то, что эта порода на выделе встречается единично и ее участие в запасе менее 1 %; знак «+», стоящий перед породой, обозначает, говорит о том, что ее участие в данном древостое менее 5 %.

Против формулы состава каждого яруса во всех остальных графах приводятся показатели, характеризующие каждый ярус, а в третьей строчке таблицы дается сумма показателей первых двух ярусов диаметр и высота среднего дерева.

Густоту насаждений по ярусам определяют четыре характеристики: 1) число стволов на гектаре; 2) глазомерная сомкнутость крон, выраженная в долях единицы; 3) абсолютная полнота древостоя, или сумма площадей сечений стволов деревьев на высоте 1,3 м, выраженная в квадратных метрах на гектар; 4) относительная полнота насаждения как отношение суммы площадей сечений таксируемого древостоя к сумме площадей сечений нормального древостоя, взятого из таблиц «Лесной вспомогательной книжки» [9].

Диаметр среднего дерева яруса рассчитывали через площади сечений каждой породы, участвующей в насаждении, как средневзвешенное этих показателей. Среднюю высоту яруса определяли как средневзвешенное высот каждой составляющей породы. Среднюю высоту последних определяли по материалам статистической обработки и по графикам высот через средний диаметр.

Запас стволовой древесины определяли через диаметр на высоте 1,3 м и высоту деревьев для каждой породы. Вычисляли общий запас для одного гектара насаждений, через который согласно возрасту древостоя определяли средний ежегодный прирост по запасу, являющийся относительным показателем энергии его роста. Бонитет древостоя определяли по возрасту и высоте деревьев 1-го яруса.

Результаты исследований

Участки изучаемых древостоев находятся на черноземах и солонцах, которые мелиорировались землеванием с унавоживанием и гипсованием. Согласно данным 1959–1960 гг., сохранность основных древесных пород (дуба, ясеня и вяза) зависит от расположения участка в пространстве, а в пределах участка — от почвенных условий произрастания. К настоящему времени насаждения относятся к шестому классу возраста (средневозрастная группа), в котором продолжается процесс формирования древостоя, что отражается на сохранности древесных пород. Так, на южном участке количество дуба в черноземной секции на 67,2 % больше, чем в солонцовой секции, при почти равной густоте ясеня и вяза (табл. 1).

В северной части в солонцовой секции число деревьев ясеня на 52,1 % выше, чем на черноземе, где больше деревьев дуба и вяза. Сохранность тополя на южном участке больше относится к черноземной секции лесной полосы (юго-западный угол л.п. № Б 147), тогда как в северной части участка он сохранился только в черноземной секции. Клен татарский и плодовые виды были сильно изрежены при проведении рубок ухода за дубом (прочистка) в 1972 г. Большая часть клена татарского отмирает, и в настоящее время сохранилась только в виде сухостоя. На обоих участ-

Т а б л и ц а 1

Густота и сохранность древесных пород по участкам опыта
Density and preservation of tree species in the experimental areas

Порода	Посажено, шт./га	Сохранность древесных пород							
		I участок (С)		II участок (З)		III участок (С)		IV участок (З)	
		шт./га	%	шт./га	%	шт./га	%	шт./га	%
Дуб ч.	1560	183	11,7	306	19,6	239	15,3	284	18,2
Ясень п.	1560	551	35,3	523	33,5	712	45,6	467	29,9
Вяз м.	1040	55	5,3	50	4,8	61	5,9	145	13,9
Тополь б.	1040	6	0,6	—	—	—	—	17	1,6
Клен т.	3120	111	3,6	150	4,8	95	3,0	56	1,8
Яб, Гр	520	6	1,2	—	—	—	—	12	2,3
Итого	9520	912	9,6	1029	10,8	1107	11,6	981	10,3
Клен остр.	—	39	—	139	—	28	—	145	—
Свидина	—	—	—	—	—	22	—	—	—
Ясень об.	—	6	—	—	—	—	—	—	—
Всего	9520	957	—	1168	—	1157	—	1126	—

Примечание: С — солонец немелиорированный; З — землевание в сочетании с навозом и гипсом (чернозем).

ках отмечено произрастание самосева свидины (кустарник) и клена остролистного, вышедшего в состав второго яруса древостоя. Его густота в черноземной секции в 4,4 раза превышает количество деревьев на солонцах. Отмеченный нами ясень обыкновенный на I участке (солонец немелиорированный) по параметрам роста превосходит деревья ясеня пушистого, но является единичным в древостое.

Анализ густоты сохранившихся древесных пород показывает, что на южном участке опытной территории количество деревьев в черноземной секции на 1,2 % выше, чем на солонцах.

Сравнение параметров роста основных древесных пород произрастающих на солонцах и черноземах (соответственно, участки I и II по сравнению с участками III и IV) показывает, что на южной половине нет существенных различий в росте дуба первого яруса, тогда как в северной части дуб в черноземной секции достоверно превышает показатели роста деревьев на солонцах (табл. 2).

Рост ясеня пушистого в южной части опытного участка не зависит от почвенных разностей, а в северной части деревья, растущие в черноземной секции (вариант мелиорации), существенно превышают по высоте ясень солонцовой секции. И если число деревьев дуба на солонцовых почвах без мелиорации на 67 % меньше, то у ясеня на этих почвах густота на 38 % выше, чем в черноземных секциях.

Для вяза в южной половине участка в вариантах с мелиорацией возникли лучшие условия для роста, параметры деревьев существенно превышают таковые на солонцовых почвах. В северной

части, при небольших различиях по высоте, у вяза на солонцах диаметр деревьев больше, чем у вяза на почвах с коренной мелиорацией. Для обоих участков опытной территории характерным является то, что на солонцах число деревьев меньше, чем на участках, включающих землевание с внесением навоза и гипса.

Исходя из полученных данных по первому ярусу древостоя, который является основным пологом для дальнейшего развития насаждения, можно сделать вывод о лучшем росте дуба и вяза первого яруса на черноземных секциях и почти равном развитии ясеня на солонцовых разностях.

Для более объективного суждения о влиянии почвенных разностей на рост разных древесных пород проведен сравнительный анализ деревьев первого и второго ярусов, произрастающих в солонцовых и черноземных секциях (с коренной мелиорацией) (табл. 3).

Анализ роста древесных пород по почвенным разностям (солонцы немелиорированные и с коренной мелиорацией (черноземы)) показывает различие биометрических показателей между солонцовыми участками (I — южный, III — северный) и черноземами (II — южный, IV — северный), а также различие показателей средних деревьев, произрастающих в разных почвенных секциях. Так, у дуба и вяза в солонцовых секциях (I участок) высота и диаметр достоверно превышают высоту и диаметр деревьев на солонцах III участка. Для дуба и ясеня на солонцах с коренной мелиорацией (чернозем) условия роста по участкам имеют несущественное различие, тогда как вяз на южной половине опытного участка растет достоверно лучше, чем на северной половине

Т а б л и ц а 2

Влияние почвенных условий на параметры роста древесных пород в первом ярусе насаждений
Influence of soil conditions on parameters of growth of tree species in the first story of plantations

Участок	Число деревьев, шт./га	Высота дерева, м ($M \pm m$)	Диаметр ствола, см ($M \pm m$)	Различие между участками	
				по высоте, м	по диаметру, см
Дуб					
I (С)	122	20,6 ± 0,25	23,9 ± 1,05		
II (З)	239	21,6 ± 0,22	22,4 ± 0,41	0,7	2,4
III (С)	172	18,0 ± 0,25	19,0 ± 0,66		
IV (З)	239	21,8 ± 0,25	25,1 ± 0,80	0,8	2,2
Ясень					
I (С)	195	19,1 ± 0,37	21,4 ± 0,74		
II (З)	139	18,5 ± 0,19	21,3 ± 0,52	0,9	2,2
III (С)	178	16,9 ± 0,26	19,6 ± 0,76		
IV (З)	133	19,5 ± 0,27	20,1 ± 0,90	0,8	2,5
Вяз					
I (С)	22	17,6 ± 0,28	23,8 ± 0,95		
II (З)	28	20,9 ± 0,26	26,4 ± 0,55	0,8	2,5
III (С)	11	16,5 ± 0,26	24,0 ± 0,72		
IV (З)	39	17,7 ± 0,33	21,1 ± 0,39	0,9	1,7

Примечание: С — солонец немелиорированный; З — землевание в сочетании с навозом и гипсом (чернозем).

Т а б л и ц а 3

Влияние почвенных условий на биометрические показатели древесных пород в первых двух ярусах насаждений

Influence of soil conditions on biometric parameters of tree species in the first two stories of plantations

Номер участка	Число деревьев, шт./га	Высота, м ($M \pm m$)	Диаметр, см ($M \pm m$)	Различие между участками	
				по высоте	по диаметру
Дуб					
I (С)	166	18,68 ± 0,35	21,04 ± 0,98	2,11	3,83
III (С)	233	16,57 ± 0,30	17,21 ± 0,66	0,97	2,50
Среднее	200	17,45 ± 0,31	18,80 ± 0,74		
II (З)	306	20,03 ± 0,21	20,80 ± 0,39	0,63	2,58
IV (З)	284	20,66 ± 0,29	23,38 ± 0,85	0,75	1,96
Среднее	295	20,33 ± 0,22	22,04 ± 0,59		
Различие	95	287		0,76	1,90
Ясень					
I (С)	429	15,41 ± 0,29	17,27 ± 0,54	0,72	1,06
III (С)	367	14,69 ± 0,20	16,21 ± 0,67	0,74	1,74
Среднее	398	15,07 ± 0,23	16,78 ± 0,58		
II (З)	423	15,48 ± 0,27	16,00 ± 0,39	0,81	0,14
IV (З)	289	16,29 ± 0,27	16,14 ± 0,65	0,80	1,52
Среднее	356	15,81 ± 0,25	16,05 ± 0,45		
Различие	42	0,74	0,79	0,68	1,48
Вяз					
I (С)	33	17,47 ± 0,27	20,80 ± 0,73	3,99	5,80
III (С)	39	13,48 ± 0,35	15,00 ± 0,61	0,88	1,91
Среднее	36	15,31 ± 0,30	17,65 ± 0,65		
II (З)	50	18,16 ± 0,22	23,14 ± 0,51	3,11	6,74
IV (З)	100	15,05 ± 0,28	16,40 ± 0,53	0,72	1,47
Среднее	75	16,09 ± 0,24	18,64 ± 0,50		
Различие	39	0,75	0,99	0,77	1,6

Примечание: С — солонец немелиорированный; З — землевание в сочетании с навозом и гипсом (чернозем).

участка. Из всех древесных пород только дуб, произрастающий на черноземах, по сравнению с деревьями на солонцах растет лучше, ясень и вяз по показателям роста не имеют существенных различий.

Подводя итог результатам исследований роста древесных пород на почвенных разностях, можно отметить различие в развитии древесных пород 1-го яруса, тогда как показатели средних деревьев первых двух ярусов древостоя более сглажены.

Развитие древесных пород на разных почвах оказало влияние на таксационные показатели древостоев опытного участка. В южной части, в солонцовой секции, к возрасту 54 лет сформировалось ясенево-дубовое насаждение с участием тополя и вяза (по совокупности двух первых ярусов), а в черноземной секции (мелиорированный солонец) — дубово-ясеневое насаждение с участием вяза. Насаждения, по лесоустроительным нормативам, имеют существенное различие по составу 1-го яруса, по полноте и совокупности крон и запасу стволовой древесины.

В северной части опытного участка различие в составе первых двух ярусов более существенно, так как доля ясеня в черноземной секции (с ме-

лиорацией) на 20 % ниже, чем на солонцах (без мелиорации), где древостой по густоте, полноте, запасу и бонитету уступает таксационным показателям древостоя на черноземах.

Выводы

По совокупности основных таксационных показателей густоты, полноты и запаса стволовой древесины усредненная формула для солонцовых секций без мелиорации (участки I и III) такова: 5Яп 4Д 1В при густоте 654 дерева с полнотой 16,9 м²/га, запасом древесины 148 м³/га и сомкнутостью крон 0,65. В черноземных секциях (солонец с коренной мелиорацией) сформировался древостой с составом 5Д 2Яп 1В 1Ко с количеством деревьев 782 шт./га, полнотой 23,6 м²/га, запасом древесины 222 м³/га и сомкнутостью крон 0,90. В солонцовых секциях средний бонитет равен 7,5 с ежегодным приростом древесины 2,8 м³/га, в черноземных секциях соответственно 1 и 4,1 м³/га. В целом основные таксационные показатели насаждений древостоев на черноземных почвах на 36,9 % превышают показатели древостоев на солонцах.

Список литературы

- [1] Чевердин Ю.И. Изменения свойств почв юго-востока Центрального Черноземья под влиянием антропогенного воздействия. Воронеж: Истоки, 2013. 336 с.
- [2] Хитров Н.Б., Чевердин Ю.И., Поротиков И.Ф. Солонцовый процесс в постагрогенных и постмелиоративных условиях Каменной Степи // Почвоведение, 2009. № 11. С. 1383–1392.
- [3] Балябо Я.К., Гутина Б.С., Зверева Е.А. Освоение и повышение плодородия солонцовых почв. М.: Сельхозгиз, 1962. 214 с.
- [4] Красовский П.Я. Опыт культуры древесных пород и кустарников на солонцах Троицкого лесостепного заповедника // Тр. Института биологии Уральского филиала АН СССР. Свердловск: Уральский филиал АН СССР, 1960. Вып. 19. С. 137–145.
- [5] Фрейберг И.А. Лесопригодность и солеустойчивость сосны и березы в лесостепи Зауралья // Почвоведение, 1981. № 5. С. 74–82.
- [6] Мигунова Е.С. О токсичности легкорастворимых солей и реакции на них древесных пород // Почвоведение, 1985. № 1. С. 115–125.
- [7] Антипов-Каратаев И.Н., Юрин И.А., Кадер Г.М., Фролкина Л.А. Сравнительные испытания новых комплексных агролесомелиоративных и агротехнических методов освоения садовосульфатных солонцов Центрально-Черноземной полосы // Мелиорация солонцов в черноземной зоне европейской части СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 5–219.
- [8] Юрин И.А., Поротиков И.Ф. Мелиорация солонцов // Преобразование природы в Каменной Степи: Сб. ст. / под ред. П.Ф. Котова, И.К. Винокурова, Н.Г. Петрова. М.: Россельхозиздат, 1970. С. 184–197.
- [9] Тюрин А.В., Науменко И.М., Воропанов П.В. Лесная вспомогательная книжка. М.: Гослесбумиздат, 1945, 408 с.
- [10] Моисеенко Ф.П. Ход роста и товарность семенных дубовых насаждений // Лесное хоз-во, 1964. № 4. С. 34–38.
- [11] Общесоюзные нормативы для таксации лесов. Утверждены Приказом Госкомлеса СССР от 28 февраля 1989 г. № 38. М.: Колос, 1992. 495 с.

Сведения об авторах

Чевердин Юрий Иванович — д-р биол. наук, заведующий отделом Научно-исследовательского института сельского хозяйства Центрально-Черноземной полосы им. В.В. Докучаева, cheverdin62@mail.ru

Вавин Владимир Сергеевич — канд. с.-х. наук, директор Каменно-Степного опытного лесничества, ksolnauka@mail.ru

Ахтямов Александр Григорьевич — канд. с.-х. наук, старший научный сотрудник Каменно-Степного опытного лесничества

Сауткина Марина Юрьевна — канд. с.-х. наук, научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института лесной генетики, селекции и биотехнологии, sautmar@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.09.2017 г.

THE INFLUENCE OF MELIORATION METHODS ON WOOD GROWTH IN THE GENUS

Yu.I. Cheverdin¹, V.S. Vavin², A.G. Ahtyamov², M.Yu. Sautkina³¹ Scientific Research Institute of Agriculture of the Central Black Earth strip the V.V. Dokuchaeva, Russia, pos. 2 uchastka Institute after V.V. Dokuchaeva, Talovskiy r-n, Voronezhskaya obl., 397463, Russian Federation² «Stony Steppe experimental forestry», pos. 2 uchastka Institute after V.V. Dokuchaeva, Talovskiy r-n, Voronezhskaya obl., 397463, Russian Federation³ All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, 105, Lomonosova street, Voronezh, 394087 cheverdin62@mail.ru

The state of artificial tree plantation was studied 54 years after reclamation of mineral licks (landings, gypsuming, manure application) and termination of annual soil treatments. There was an overall decrease in the woodstand and quality in sodic cells compared to the ordinary chernozem. It is shown that the most salt-tolerant woody plants are oak, ash and ligulate the preservation of which in comparison with other species tested in the experiment above. Pear trees, apple trees, poplars are not presented in wood stands nowadays. In the southern part of the solonetz section, at an age of 54 years, an ash and oak plantation was formed with the participation of poplar and elm (on the totality of the first two stories), and on the chernozem section there was an oak-ash plantation with elm. According to forest management standards, the plantations differ significantly in composition of I story, in the completeness and totality of crowns and the stock of stemwood. In the northern part of the experimental plot, the difference in the composition of the first two stories is more significant, since the proportion of ash on the chernozem section is 20 % lower than in solonetz, where the tree stand is inferior in density, completeness, stock and growth class to taxation indicators of the stand on chernozems.

Keywords: wood composite material, sawdust, slag, sawdust concrete, disposal**Suggested citation:** solonetz, reclamation, forest plantations, forest conditionSuggested citation: Cheverdin Yu.I., Vavin V.S., Ahtyamov A.G., Sautkina M.Yu. *Vliyanie priemov melioratsii na rost drevesnykh porod* [The influence of melioration methods on woody growth in the genus]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 13–19. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-13-19

References

- [1] Cheverdin Yu.I. *Izmeneniya svoystv pochv yugo-vostoka Tsentral'nogo Chernozem'ya pod vliyaniem antropogennogo vozdeystviya* [Changes in soil properties of the southeast of the Central Chernozem region under the influence of anthropogenic impact]. Monograph. Voronezh: Istoki Publ., 2013, 336 p.
- [2] Khitrov N.B., Cheverdin Yu.I., Porotikov I.F. *Solontsovy protsess v postagrogennykh i postmeliorativnykh usloviyakh Kamennoy Stepi* [Solonchok processes in post-agrogenic and post-meliorative conditions of the Stone Steppe]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 2009, no. 11, pp. 1383–1392.
- [3] Balyabo Ya.K., Gutina B.S., Zvereva E.A. *Osvoenie i povyshenie plodorodiya solontsovykh pochv* [Development and improvement of fertility of solonchok soils]. M.: Sel'khozizd Publ., 1962, 214 p.
- [4] Krasovskiy P.Ya. *Opyt kul'tury drevesnykh porod i kustarnikov na solontsakh Troitskogo lesostepnogo zapovednika* [Experience of the culture of tree species and shrubs on the solonchoks of the Troitsk forest-steppe reserve]. Proceedings of the Institute of Biology of the Ufa, USSR. Sverdlovsk: UFAN USSR Publ., 1960, v. 19, pp. 137–145.
- [5] Freyberg I.A. *Lesoprigodnost' i soleustoychivost' sosny i berezy v lesostepi Zaural'ya* [Forest suitability and salt tolerance of pine and bears in the forest-steppe of the Trans-Urals]. *Pochvovedenie*, 1981, no. 5, pp. 74–82.
- [6] Migunova E.S. *O toksichnosti legkorastvorimyykh soley i reaksii na nikh drevesnykh porod* [On the toxicity of readily soluble salts and the reaction of woody species to them]. *Pochvovedenie*, 1985, no. 1, pp. 115–125.
- [7] Antipov-Karataev I.N., Yurin I.A., Kader G.M., Frolkina L.A. *Sravnitel'nye ispytaniya novykh kompleksnykh agrolesomeliorativnykh i agrotekhnicheskikh metodov osvoeniya sadovosul'fatnykh solontsov Tsentral'no-Chernozemnoy polosy (TsChP)* [Comparative tests of new complex agro-forest-meliorative and agrotechnical methods for the development of garden-sulphate solonchoks of the Central Chernozem zone (Central Chernozem zone)]. Melioration of solonchoks in the chernozem zone of the European part of the USSR. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences Publ., 1960, pp. 5–219.
- [8] Yurin I.A., Porotikov I.F. *Melioratsiya solontsov* [Melioration of Solonchoks]. *Preobrazovanie prirody v Kamennoy Stepi* [Transformation of Nature in the Stone Steppe: Sat. Art.] Moscow: Rosselkhozizdat Publ., 1970, pp. 184–197.
- [9] Tyurin A.V., Naumenko I.M., Voroponov P.V. *Lesnaya vspomogatel'naya knizhka* [Forest auxiliary book]. Moscow: Goslesbumizdat Publ., 1945, 408 p.
- [10] Moiseenko F.P. *Khod rosta i tovarnost' semennykh dubovykh nasazhdeniy* [The course of growth and marketability of seed oak stands] *Lesnoe khoz-vo* [Forestry], 1964, no. 4, pp. 34–38.
- [11] *Obshcheyuznyye normativy dlya taksatsii lesov. Utverzhdeny Prikazom Goskomlesa SSSR ot 28 fevralya 1989 g. № 38* [All-Union standards for forest valuation. Approved by the Order of the State Committee of the USSR of 28 February 1989 No. 38]. Moscow: Kolos Publ., 1992, 495 p.

Authors' information

Cheverdin Yuriy Ivanovich — D-r Sci. (Biol.), Head of Department of the Scientific Research Institute of Agriculture of the Central Black Soil named after V.V. Dokuchaeva, cheverdin62@mail.ru**Vavin Vladimir Sergeevich** — Cand. Sci. (Agriculture), Director of the Kamennno-Stepnoy Experimental Forestry, ksolnauka@mail.ru**Akhtyamov Aleksandr Grigoryevich** — Cand. Sci. (Agriculture), senior scientist of the Kamennno-Stepnoy Experimental Forestry, named after V.V. Dokuchaeva**Sautkina Marina Yuryevna** — Cand. Sci. (Agriculture), senior scientist of All-Russian Research Institute of Forest Genetics, Breeding and Biotechnology, sautmar@mail.ru

Received 06.09.2017

ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ РАДИАЛЬНОГО ПРИРОСТА ДЕРЕВЬЕВ В СОСНЯКАХ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ ВСЛЕДСТВИЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

А.А. Белов

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

belov@roslesrad.ru

Изложены результаты количественной оценки влияния выпадений радионуклидов на радиальный прирост ранней и поздней древесины деревьев сосны в год аварии на Чернобыльской АЭС. Алгоритм расчетов включает соотношение фактического прироста 1986 г. в опытном и контрольном насаждениях, а также соотношение теоретически ожидаемого прироста в этих же древостоях. Установлено, что в результате воздействия радионуклидов произошло уменьшение интенсивности роста ранней (весенней) древесины деревьев сосны. Достоверные потери прироста поздней (летней) древесины не выявлены. Воздействие радиационного фактора на рост деревьев адекватно уничтожению 10...12 % ассимиляционного аппарата насекомыми-фитофагами.

Ключевые слова: радиоэкология, радионуклиды, цезий-137, сосна обыкновенная, годичный прирост, ранняя древесина, поздняя древесина

Ссылка для цитирования: Белов А.А. Дендрохронологический анализ изменений радиального прироста деревьев в сосняках Брянской области вследствие аварии на Чернобыльской АЭС // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 20–25 DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-20-25

Изучение действия антропогенных и природных факторов на лесную растительность и получение данных о тенденциях и масштабах этих воздействий на состояние лесов России является одной из стратегических целей в области лесных отношений.

Авария на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) в 1986 г., сопровождавшаяся выбросом в окружающую среду большого количества радиоактивных веществ, расценивается как крупнейшая за всю историю атомной энергетики. В европейской части России общая площадь загрязнения почв радиоцезием (цезий-137) с уровнем плотности свыше 1 Ки/км² составила 56,5...59,6 тыс. км² [1].

Объект исследований

В год аварии, на ранней стадии ее развития (стадии острого облучения) отечественные и зарубежные исследователи в основном уделяли внимание изучению воздействия радиации на растительность в зоне, непосредственно прилегающей к ЧАЭС. Наибольшую устойчивость к острому гамма-облучению проявили деревья дуба, а также кустарники, травы, лишайники и мхи. Повреждения лиственных деревьев и кустарников выражались в усыхании вершин, для травяных ценозов и мохово-лишайникового покрова было характерно угнетение ростовых процессов и повреждение репродуктивных органов в течение первого сезона вегетации. Отмечено уменьшение флористического состава и обеднение структуры фитоценозов.

Хвойные породы, в том числе сосна, оказались заметно менее устойчивыми к радиоактивному

воздействию по сравнению с лиственными. Гибель деревьев сосны отмечена при поглощенной дозе облучения 50 Гр [2]. Наибольшую чувствительность к ионизирующему излучению проявили апикальные точки роста, более устойчивыми оказались камбиальные слои древесины, отмирание которых зафиксировано при дозе радиации в пределах 100...200 Гр [3].

Техногенная катастрофа стала причиной гибели около 800...1000 га лесов, что составило 0,8...1,0 % всей лесопокрытой площади 30-километровой зоны отчуждения [4]. Гибель древостоев не оказала существенного влияния на радиоэкологическую обстановку в целом, но заметно ухудшила ее в непосредственной близости от атомной станции.

В зоне с расчетной поглощенной дозой 10...20 Гр отмечена полная гибель молодых экземпляров сосны при частичном омертвлении молодых побегов взрослых деревьев.

Изучение лесных территорий, удаленных от ЧАЭС, как правило, проводили для определения степени радиационной опасности для населения; оценка состояния древесной растительности ограничивалась ее визуальным осмотром с целью фиксации аномалий ростовых процессов [5]. В ряде исследований воздействие радиации на ростовые процессы фиксировалось в качестве одного из дополнительных, сопутствующих параметров в ходе анализа изменчивости репродуктивных органов деревьев и кустарников. Так, в зоне слабого радиационного поражения растительности в радиационных пятнах за пределами 30-километровой зоны вокруг ЧАЭС в 1986 г. отмечено снижение

всхожести семян при отсутствии морфологических нарушений у хвойных деревьев [6].

Отсутствие материалов прямых наблюдений за динамикой роста деревьев в связи с загрязнением насаждений радионуклидами на ранней стадии развития радиационной аварии на ЧАЭС в определенной мере может быть восполнено с помощью ретроспективного дендрохронологического анализа. Годичные кольца стволов деревьев аккумулируют многообразную информацию о прошлых событиях и факторах, воздействовавших на интенсивность ростовых процессов, в том числе о радиационном факторе. Воздействие этого фактора на древесную растительность в зоне аварии на ЧАЭС, по мнению экологов, должно сказаться на размере и структуре годичных колец древесины [7].

Цель работы

Работа выполнена в рамках исследований ВНИИ лесоводства и механизации лесного хозяйства по изучению воздействия радиоактивного загрязнения на состояние лесных экосистем Брянской области. На территории Красногорского участкового лесничества Клинецовского лесничества в 75-летнем сосняке-черничнике II класса бонитета в 2010 г. для наблюдений выделена постоянная пробная площадь со средней плотностью загрязнения цезием-137, равной 156,0 Ки/км² (удельная активность проб почвы 22,1 кБк/кг). С учетом скорости естественного распада радионуклида плотность загрязнения почвы в мае 1986 г. могла составить в среднем более 270 Ки/км².

По данным радиологических обследований, вся территория лесничеств после аварии на ЧАЭС оказалась загрязненной радионуклидами. Ближайшие сосновые древостои, избежавшие загрязнения радионуклидами в 1986 г., расположены на большом расстоянии (до 200 километров), в местностях с несколько иными лесорастительными условиями. В связи с этим в качестве контрольной пробной площади выбран смежный с опытным древостоем с наименьшей выявленной плотностью загрязнения почвы радионуклидами – 2,6 Ки/км².

При сборе, транспортировке, первичной обработке кернов и датировке годичных колец древесины руководствовались общепринятыми методами [8]. Отбор образцов древесины проводили приростным буровом Пресслера на высоте 1,3 м с двух сторон ствола отдельно для каждой из четырех категорий состояния растущих деревьев (без ослабления, ослабленные, сильно ослабленные и усыхающие), по 10–15 деревьев каждой категории. Измерения радиального прироста (отдельно раннего и позднего) вели с помощью бинокулярного микроскопа МБС-1 с точностью до 0,05 мм.

Известно, что на ранней стадии развития радиационной ситуации большая часть радионуклидов после выпадения из атмосферы сосредоточена в кронах деревьев. Продолжительность этой стадии зависит от породного состава древостоев, сомкнутости крон, вертикальной структуры полога, погодных условий и т. п. В средневозрастных и приспевающих сосновых древостоях района исследований она равна одному году.

Прямой контакт радионуклидов со структурными элементами деревьев обусловил поверхностный характер облучения растений потоками электронов при бета-излучении, испускаемом короткоживущими изотопами типа йода-131, теллура-132, рутения-103, и жестким электромагнитным гамма-излучением от долгоживущего нуклида цезия-137. Непосредственно после аварии в вегетационном периоде 1986 г. удельная активность растительного яруса определялась только поверхностным загрязнением, а состав радионуклидов полностью соответствовал содержанию выпавшей радиоактивной смеси; при этом доля короткоживущих изотопов на удалении от ЧАЭС была существенно меньше, чем вблизи станции [9].

В начальный период после аварии связь радиоактивных частиц с поверхностью растений была слаба; под воздействием атмосферных дождевых осадков, ветра и гравитационных сил они весьма быстро перемещались под полог леса. В результате к августу 1986 г. радиационная активность в кронах деревьев снизилась до 10...20 % от первоначального уровня [9].

Таким образом, наиболее интенсивное облучение ассимиляционного аппарата деревьев сосны в мае 1986 г. совпало со временем формирования раннего годичного прироста древесины. К началу формирования прироста поздней древесины радиационная активность в пологе леса значительно снизилась и последовательно уменьшалась до конца вегетационного периода.

Результаты и обсуждение

Анализ результатов измерений прироста только за один вегетационный период (в нашем случае вегетационный период 1986 г.) представляет определенные трудности в методическом отношении. Достаточно надежный результат может быть получен только при использовании данных за 5–10 лет или за более короткий период в контролируемом эксперименте, т. е. в лабораторных или полуболевых условиях. В природных фитоценозах при наличии большого количества неконтролируемых факторов прямое сопоставление текущего прироста в опытном и контрольном древостоях может дать необходимый результат только в том случае, если исследуемый фактор внешней среды вызывает значительные — положительные

или отрицательные — изменения интенсивности ростовых процессов. Если такие изменения объективно существуют, но выражены умеренно или слабо, они могут оказаться замаскированными естественной вариабельностью выборочных данных даже при большом числе учетных деревьев. Кроме того, отрицательное влияние на точность анализа может оказать не в полной мере реализованный принцип «прочих равных условий».

По данным измерений приростных кернов, радиальный прирост в контрольном древостое в десятилетний период перед аварией на Чернобыльской АЭС (1976–1985 гг.) оказался в среднем на 10 % меньше, чем в опытном. Это означает, что прямое сопоставление размера годичных колец в опытном и контрольном древостоях в период после аварии является некорректным, так как полученные таким образом результаты будут содержать систематическую ошибку. Поэтому при обработке экспериментальных данных способ сравнения опыта с контролем модифицировали, совместив его со способом, который применялся в 60-х гг. XX в. на кафедре защиты леса Московского государственного лесотехнического института [10]. Этот метод заключается в сравнении прироста в одном и том же насаждении в период до и в период после появления изучаемого фактора.

Разработанный алгоритм расчетов основан на использовании соотношения фактического, измененного прироста 1986 г. в опытном и контрольном древостоях, с одной стороны, и соотношения

значений теоретически ожидаемого прироста этого года в этих же древостоях, с другой стороны.

Теоретически ожидаемые оценки прироста в опытном и контрольном насаждениях в 1986 г. рассчитаны с помощью уравнений регрессии фактического прироста в отдельные годы десятилетнего периода, предшествующего аварии, в зависимости от фактора времени. Следует отметить, что динамика радиального прироста деревьев сосны в период 1976–1985 гг. не имела однозначной направленности. У деревьев без признаков ослабления и ослабленных в целом проявлялась тенденция к некоторому увеличению размера и раннего и позднего слоев годичных колец от начала к концу периода. У сильно ослабленных и усыхающих деревьев более характерной была обратная тенденция. Кроме того, в отдельные годы наблюдались заметные отличия от указанных общих тенденций.

В связи со сложным характером колебаний текущего радиального прироста деревьев сосны в период с 1976 г. по 1985 г. применены два варианта расчетов. В первом из них для аппроксимации фактических значений радиального прироста использованы уравнения линейной регрессии (1), во втором — уравнения параболы 2-го порядка (2).

$$ZR_{dir} = a_0 + a_1F(t); \quad (1)$$

$$ZR_{par} = a_0 + a_1F(t) + a_2F(t)^2, \quad (2)$$

где ZR_{dir} — расчетные значения годичного раннего или позднего прироста по уравнению

Т а б л и ц а 1

Фактические и рассчитанные по уравнению линейной регрессии и уравнению параболы 2-го порядка значения текущего радиального прироста 1986 г. деревьев разных категорий состояния в опытном и контрольном древостоях

Actual and calculated from the equation of linear regression and the equation of the second-order parabolic value of the current radial growth in 1986 of trees of different categories of state in the experimental and control stands

Показатель, мм	Опытный древостой				Контрольный древостой			
	Категория состояния деревьев							
	1	2	3	4	1	2	3	4
Ранний прирост								
Z_n	0,900	0,913	0,540	0,500	0,910	0,800	0,450	0,450
ZR_{dir}	1,099	1,176	0,585	0,676	0,978	0,823	0,423	0,527
ZR_{par}	1,104	1,182	0,656	0,597	0,987	0,812	0,502	0,365
Поздний прирост								
Z_n	0,730	0,794	0,430	0,480	0,830	0,588	0,350	0,500
ZR_{dir}	0,840	0,894	0,504	0,385	0,992	0,649	0,427	0,412
ZR_{par}	0,711	0,805	0,559	0,437	0,781	0,610	0,434	0,462
Общий прирост								
Z_n	1,630	1,707	0,970	0,980	1,740	1,388	0,800	0,950
ZR_{dir}	1,939	2,070	1,089	1,061	1,970	1,472	0,850	0,939
ZR_{par}	1,815	1,987	1,215	1,034	1,768	1,422	0,936	0,827

Примечания: 1. Символами в таблице обозначены: Z_n — фактические значения текущего прироста 1986 г., ZR_{dir} и ZR_{par} — регрессионные оценки прироста соответственно по уравнениям прямой линии и параболы 2-го порядка. 2. Категории состояния деревьев: 1 — без признаков ослабления; 2 — ослабленные; 3 — сильно ослабленные; 4 — усыхающие (по данным учета 2010 г.).

линейной регрессии (отдельно для опытного и контрольного насаждений), мм;
 a_0, a_1, a_2 — эмпирические коэффициенты уравнений;
 $F(t)$ — фактор времени (значения колеблются от 6 для 1976 г. до 16 для 1986 г.);
 ZR_{par} — расчетные значения годового раннего или позднего прироста по уравнению параболы второго порядка.

Посредством суммирования расчетных значений раннего и позднего приростов получены оценки ожидаемой общей ширины годовых колец древесины 1986 г. Результаты статистического анализа приведены в табл. 1.

Частное от деления фактического текущего прироста 1986 г. на его ожидаемое значение позволяет получить одну из разновидностей коэффициента прироста — параметра, используемого в дендрохронологии для характеристики относительной интенсивности роста годовых колец в разные годы или в разных древостоях.

Оценки коэффициента раннего прироста в опытном древостое заметно меньше, чем в контрольном, тогда как значения этого параметра для позднего прироста в том и другом насаждениях близки между собой (табл. 2). Разность между значениями коэффициента раннего прироста в опыте и контроле по всем восьми вариантам наблюдений колеблется от $-7,2$ до $-39,4$ %, тогда как для позднего прироста — от $-3,7$ до $3,3$ %, причем во втором случае варианты расчетов с использованием разных регрессионных моделей дают противоположные результаты.

Приведенные данные означают, что в год выпадения радионуклидов рост внутренней части годового кольца в опытном древостое был определенно менее интенсивным, чем в контрольном насаждении, тогда как интенсивность роста внешнего, более позднего, слоя древесины была практически одинаковой в обоих насаждениях. Такая картина характерна для всех категорий состояния деревьев.

Количественная оценка влияния радиационного фактора на скорость роста древесины проводится по формуле (3) (см. ниже) с учетом как фактических, так и теоретически ожидаемых значений прироста одновременно в опытном и контрольном древостоях:

$$\Delta Wz = 100 - 100ZR_{test}Z_{contr}Z_{test}^{-1}ZR_{contr}^{-1}, \quad (3)$$

где ΔWz — показатель относительного эффекта воздействия радиационного фактора на текущий радиальный прирост, %;

Z_{test} и ZR_{test} — соответственно фактический и ожидаемый текущий прирост 1986 г. в опытном древостое, мм;

Z_{contr} и ZR_{contr} — соответственно фактический и ожидаемый текущий прирост 1986 г. в контрольном древостое.

Оценки параметра ΔWz_{rel} , близкие к нулю, указывают на отсутствие влияния радиационного фактора, положительные оценки параметра ΔWz_{rel} указывают на стимулирование интенсивности роста древесины, отрицательные оценки — на эффект супрессии, ведущий к потерям прироста.

Расчеты по уравнению (3) подтверждают предположение о том, что деревья сосны в насаждении, загрязненном радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС, в начале вегетационного периода 1986 г. подверглись воздействию негативного фактора. Результатом этого воздействия стало уменьшение интенсивности роста ранней древесины живых деревьев всех категорий состояния. Оценки потерь прироста деревьев всех категорий состояния по обоим вариантам вычислений, приведенные в табл. 3, достоверны с вероятностью более 95 %.

Достоверные потери прироста поздней (летней) древесины не выявлены, что, по-видимому, обусловлено достаточно быстрым уменьшением плотности поверхностного загрязнения зеленой кроновой фитомассы во второй половине вегетационного

Т а б л и ц а 2

Значения коэффициента прироста 1986 г. (%) для деревьев разных категорий состояния в опытном и контрольном древостоях
The values of the growth rate in 1986 (%) for trees of different categories of the state in the experimental and control stands

Прирост	Древостой	Коэффициент прироста в соответствии с регрессионной моделью по категориям состояния деревьев							
		Уравнение прямой линии				Парабола 2-го порядка			
		1	2	3	4	1	2	3	4
Ранний	Опытный	81,9	77,7	92,3	74,0	81,5	77,3	82,4	83,8
	Контрольный	93,0	97,3	106,3	85,4	92,2	98,5	89,6	123,2
Поздний	Опытный	86,9	88,8	85,3	124,7	102,7	98,6	76,9	109,8
	Контрольный	83,7	90,6	82,0	121,4	106,2	96,4	80,6	108,2
Общий	Опытный	84,1	82,5	89,1	92,4	89,8	85,9	79,8	94,8
	Контрольный	88,3	94,3	94,1	101,2	98,4	97,6	85,5	114,9

Примечание: Категории состояния деревьев: 1 — без признаков ослабления; 2 — ослабленные; 3 — сильно ослабленные; 4 — усыхающие.

Показатель ΔWz относительного эффекта воздействия радиации на прирост деревьев сосны в год аварии на Чернобыльской АЭСIndicators ΔWz of the effect of radiation on the growth of pine trees in the year of Chernobyl accident

Радиальный прирост	Значения показателя ΔWz , %, по категориям состояния деревьев			
	Деревья без признаков ослабления	Ослабленные деревья	Сильно ослабленные деревья	Усыхающие деревья
Ранний	$-13,1 \pm 2,75$	$-25,2 \pm 5,2$	$-8,9 \pm 2,5$	$-15,4 \pm 3,8$
	$-13,6 \pm 2,9$	$-27,6 \pm 5,7$	$-15,2 \pm 4,2$	$-47,2 \pm 10,9$
Поздний	$-3,5 \pm 2,9$	$-2,0 \pm 2,4$	$-4,7 \pm 3,8$	$+1,5 \pm 2,8$
	$+3,6 \pm 3,2$	$+2,2 \pm 2,6$	$+3,9 \pm 4,4$	$+2,6 \pm 3,0$
Общий	$-5,1 \pm 4,0$	$-13,6 \pm 5,7$	$-5,7 \pm 4,5$	$-9,6 \pm 4,7$
	$-9,6 \pm 4,3$	$-14,3 \pm 6,3$	$-7,1 \pm 6,1$	$-21,2 \pm 11,3$

Примечания: 1. В числителе приведены значения показателей по варианту с аппроксимацией динамики прироста за 1976–1985 гг. по линейному уравнению, в знаменателе — по уравнению параболы 2-го порядка. 2. Для раннего прироста все оценки достоверны с вероятностью более 95 %, для позднего прироста — вероятность менее 80 %, для общего прироста деревьев без признаков ослабления, ослабленных и усыхающих вероятность колеблется от 80 до 95 %, для сильно ослабленных деревьев — вероятность менее 80 %.

периода в результате перемещения большей части выпавших радионуклидов под полог леса.

Уменьшение раннего прироста деревьев сосны в насаждении, загрязненном радионуклидами, при незначительном изменении размеров позднего слоя древесины определили в 1986 г. как меньший против ожидаемого размер общего годового прироста деревьев всех категорий состояния. Оценки потерь общего прироста по двум вариантам расчета составили соответственно $5,1 \pm 4,0$ и $9,6 \pm 4,3$ % при вероятности $P > 80$ % у деревьев без признаков ослабления, $13,6 \pm 5,7$ и $14,3 \pm 6,3$ % при $P > 95$ % у ослабленных деревьев, $5,7 \pm 4,5$ и $7,1 \pm 6,1$ % при $P < 80$ % у сильно ослабленных деревьев и $9,5 \pm 4,7$ и $21,2 \pm 11,3$ % при $P > 95$ % у усыхающих деревьев.

Выводы

В результате проведенного дендрохронологического анализа выявлено статистически достоверное уменьшение ширины годовых колец деревьев сосны всех категорий состояния (за исключением сильно ослабленных) в год аварии на Чернобыльской АЭС в древостоях Клиновского лесничества Брянской области с плотностью загрязнения насаждений радионуклидами, равной 270 Ки/км^2 (по цезию-137). Рассчитанные оценки потерь прироста в результате воздействия радиационного фактора адекватны уничтожению 10...12 % ассимиляционного аппарата деревьев насекомыми-фитофагами, что позволяет квалифицировать воздействие радиационного фактора на интенсивность роста годовых колец в 1986 г. как слабое.

Сведения об авторе

Белов Артём Анатольевич — научный сотрудник лаборатории радиационного контроля отдела радиационной экологии и пирологии леса Федерального бюджетного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства» (ФБУ ВНИИЛМ), belov@roslesrad.ru

Список литературы

- [1] Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ // сост. Л.А. Абагян, В.Г. Асмолов, А.К. Гуськов, В.Ф. Демин. М.: Атомная энергия, 1986. Т. 61. Вып. 5. 320 с.
- [2] Тихомиров Ф.А. Действие ионизирующих излучений на экологические системы. М.: Атомиздат, 1972. 176 с.
- [3] Радиационное воздействие на хвойные леса в районе аварии на Чернобыльской АЭС // отв. ред. Г.М. Козубов, А.И. Таскаев. Сыктывкар: Коми НЦ РАН, 1990. 136 с.
- [4] Груммо Д.Г., Сак М.М. Динамика растительности в районе аварии на Чернобыльской АЭС // Проблемы лесоведения и лесоводства. Труды ИЛ НАН Беларуси. Вып. 73. Гомель: Институт леса НАН Беларуси, 2013. С. 416–432.
- [5] Скок А.В. Изменчивость репродуктивных и ростовых процессов сосны обыкновенной в различных зонах хронического радиоактивного загрязнения ЧАЭС Южного Нечерноземья РФ: Автореф. дис. ... канд. биол. наук (03.00.16). Брянск, 2005. 24 с.
- [6] Чернобыльская катастрофа. Историография событий, социально-экономические, геохимические и медико-биологические последствия // гл. ред. В.Г. Барьяхтар. Киев: Наукова думка, 1995. 558 с.
- [7] Мусаев Е.К. Дендрохронологический анализ годового прироста сосны *Pinus sylvestris* L. в районе Чернобыльской АЭС // II радиобиологический съезд, Киев, 20–25 октября 1993 г. Тез. докл. Киев: Ротапринт, 1993. С. 699–700.
- [8] Битвинкас Т.Т. Дендроклиматические исследования. Л.: Гидрометеониздат, 1974. 172 с.
- [9] Щеглов А.И., Цветнова О.Б. Роль лесных экосистем при радиоактивном загрязнении // Природа, 2001. № 4. С. 22–32.
- [10] Голосова М.А. Влияние объедания пяденицами листвы деревьев на их прирост и состояние // Вопросы лесозащиты. Матер. II межвузовской конф. по защите леса. Т. 1. М.: МЛТИ, 1963. С. 39–43.

Статья поступила в редакцию 16.10.2017 г.

DENDROCHRONOLOGICAL ANALYSIS OF THE CHANGES IN ANNUAL RADIAL INCREMENT OF THE SCOTCH PINE IN BRIANSK REGION FORESTS AFTER CHERNOBYL ACCIDENT

A.A. Belov

ALL-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (VNIILM)

belov@roslesrad.ru

The results of the numerical estimating influence of the fallout radionuclide upon the radial increment of pine springwood and summerwood in the year of Chernobyl radiation accident are given. The calculation algorithm includes the ratio of real annual radial increment in 1986 in test and control stands as well as the ratio of expected annual radial increment in these stands. It was found that in result of radionuclide impact there had been a reduction of the growth rate of springwood of pine trees. Reliable losses of growth of summerwood are not identified. The effect of radioactive factor on tree growth was as strong as destructing 10...12 % assimilation apparatus by leaf-eating insects.

Keywords: radioecology, radionuclide, caesium-137, Scotch pine, annual increment, springwood, summerwood

Suggested citation: Belov A.A. *Dendrokronologicheskiy analiz izmeneniy radial'nogo prirosta derev'ev v sosnyakh Bryanskoy oblasti vsledstvie avarii na Chernobyl'skoy AES* [Dendrochronological analysis of the changes in annual radial increment of the Scotch pine in Briansk region forests after Chernobyl accident]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 20–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-20-25

References

- [1] *Informatsiya ob avarii na Chernobyl'skoy AES i ee posledstviyakh, podgotovlennaya dlya MAGATE* [Information on the Chernobyl accident and its consequences, prepared for the IAEA: compiled by: L.A. Abagyan, V.G. Asmolov, A.K. Guskov, V.F. Demin] Moscow: Atomic Energy Publ., 1986, t. 61, v. 5, 320 p.
- [2] Tikhomirov F.A. *Deystvie ioniziruyushchikh izlucheniye na ekologicheskie sistemy* [The effect of ionizing radiation on ecological systems]. Moscow: Atomizdat Publ., 1972, 176 p.
- [3] *Radiatsionnoe vozdeystvie na khvoynye lesa v rayone avarii na Chernobyl'skoy AES* [Radiation impact on coniferous forests in the area of the Chernobyl disaster: responsible. Ed. G.M. Kozubov, A.I. Taskaev]. Syktyvkar: Komi Science Center RAS Publ., 1990, 136 p.
- [4] Grummo D.G., Sak M.M. *Dinamika rastitel'nosti v rayone avarii na Chernobyl'skoy AES* [Dynamics of Vegetation in the Area of the Chernobyl Accident] *Problemy lesovedeniya i lesovodstva. Trudy IL NAN Belarusi* [Problems of Forest Science and Forestry. Proceedings of the IL of the National Academy of Sciences of Belarus, iss. 73]. Gomel: Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus Publ., 2013, pp. 416–432.
- [5] Skok A.V. *Izmenchivost' reproduktivnykh i rostovykh protsessov sosny obyknovennoy v razlichnykh zonakh khronicheskogo radioaktivnogo zagryazneniya ChAES Yuzhnogo Nechernozem'ya RF: Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk. (03.00.16)* [Variability of reproductive and growth processes of Scots pine in various zones of chronic radioactive contamination of the ChNPP of the Southern Non-Black Earth Region of the Russian Federation: diss. ... Cand. Sci. (Biol.). (03.00.16)]. Bryansk, 2005, 24 p.
- [6] *Chernobyl'skaya katastrofa. Istoriografiya sobytiy, sotsial'no-ekonomicheskie, geokhimicheskie i mediko-biologicheskie posledstviya* [Chernobyl catastrophe. Historiography of events, socio-economic, geochemical and biomedical consequences: Ch. rep. V.G. Baryakhtar]. Kiev: Naukova dumka Publ. 1995, 558 p.
- [7] Musaev E.K. *Dendrokronologicheskiy analiz godichnogo prirosta sosny Pinus sylvestris L. v rayone Chernobyl'skoy AES* [Dendrochronological analysis of the annual growth of pine *Pinus sylvestris* L. in the area of the Chernobyl NPP]. II radiobiological congress (20–25 Oct. 1993). Tez. doc. Kiev: Rotaprint Publ., 1993, pp. 699–700.
- [8] Bitvinskas T.T. *Dendroklimaticheskie issledovaniya* [Dendroclimatic research]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974, 172 p.
- [9] Shcheglov A.I., Tsvetnova O.B. *Rol' lesnykh ekosistem pri radioaktivnom zagryaznenii* [The role of forest ecosystems in radioactive contamination] *Priroda [Nature] Publ.*, 2001, no. 4, pp. 22–32.
- [10] Golosova M.A. *Vliyaniye ob'edaniya pyadenitsami listvy derev'ev na ikh prirost i sostoyaniye* [Influence of fungus moth eating on their growth and state] *Voprosy lesozashchity. Materialy k II mezhvuzovskoy konferentsii po zashchite lesa. T.1* [Forest protection questions. Materials for the II Interuniversity Conference on Forest Protection. T.1]. Moscow: MLTI Publ., 1963, pp. 39–43.

Author's information

Belov Artem Anatolyevich — scientist of the Laboratory of Radiation Control Department of Radiation Ecology and Forestry Pyrology of All-Russian Research Institute for Silviculture and Mechanization of Forestry (VNIILM), belov@roslesrad.ru

Received 16.10.2017

УДК 630.187

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-26-30

ПЕРВАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕСОВ (к 100-летию выхода в свет монографии А.А. Крюденера «Основы классификации типов насаждений»)

Е.С. Мигунова

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

migunova-l-s@yandex.ua

В 2016–2017 годах были опубликованы два тома монографии А.А. Крюденера «Основы классификации типов насаждений». Разработанное Крюденером классификационное построение представляет первый опыт со-пряженной классификации лесов и их местообитаний, лесов и лесообразователей – климата (таблице почвогрунтов предпослано лесорастительное районирование) и почвогрунтов, – создающих в природе сложные единства, получившие позже названия экосистем. Это совершенно новый тип классификации, основной принцип которого – классификация лесов по факторам среды, их формирующих.

Ключевые слова: лесная типология, климатическая и эдафическая сетки, классификация, плодородие, лимитированные экологические ресурсы

Ссылка для цитирования: Мигунова Е.С. Первая экологическая классификация лесов (к 100-летию выхода в свет монографии А.А. Крюденера «Основы классификации типов насаждений») // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 26–30. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-26-30

В 2016 и 2017 гг. были опубликованы два тома малоизвестной, но представляющей исключительный интерес для лесной типологии и для лесоводства в целом монографии А.А. Крюденера «Основы классификации типов насаждений». Последователь Г.Ф. Морозова, он создал первую в истории сопряженную классификацию лесов и почвогрунтов, классификацию лесных экосистем. Крупный деятель в области лесного хозяйства России начала XX в. Артур Артурович Крюденер, на протяжении многих лет организовывавший и руководивший широкомасштабными работами по устройству лесов разных регионов России, начал разрабатывать типологическую классификацию лесов по иным, нежели Морозов, принципам. Крюденер увязывал типы насаждений с генетическими типами почв, нарушая при этом уже сложившиеся каноны.

В свое время, в естественных науках утвердился выдвинутый И. Кантом и поддержанный другими философами принцип, по которому классификация объектов разных наук должна основываться на свойствах самих этих объектов — так называемых внутренних свойствах. Данный прием, вполне законный при систематизации автономных объектов, настолько прочно укоренился, что трудно представить, какие причины могли бы побудить профессионального ученого его нарушить. Однако в естественных науках этот прием практически полностью лишает возможности или, во всяком случае, крайне затрудняет выявление существующих между разными объектами природы многообразных взаимосвязей, закрывает пути к познанию единства природы.



В противоположность давно существующим и все усиливающимся процессам дифференциации, дробления и специализации естественных наук, в народном сознании сформировалось и утвердилось синтетическое восприятие природы в единстве и тесной соподчиненности всех ее компонентов. Эти народные представления (а Крюденер на протяжении многих лет собирал их, как собирают сказания и былины) явились фундаментом, на основе которого он создал в 1916 г.

свою классификацию. Как и Морозов, Крюденер отводит определяющую роль в формировании типов леса внутри однородных в климатическом отношении территорий почвенно-грунтовым условиям. Характеристику почвогрунтов и почвенно-грунтовых условий (Крюденер разделял эти два понятия: последнее шире, включает особенности рельефа и условия увлажнения) он дает с учетом последних достижений молодой тогда науки — генетического почвоведения. В то же время описание Крюденера очень самобытно, поскольку во главу угла он ставит не почву как таковую, а почву как субстрат, как среду произрастания растений.

В процессе массового исследования почв разных типов леса, которое он вел на протяжении многих лет, в том числе при сборе данных для первых российских таксационных таблиц (свыше 6 тыс. пробных площадей с почвенными разрезами), была выявлена тесная связь характера лесной растительности не с генетическими типами почв, а с их плодородием, лесорастительным потенциалом. Уже в своей первой публикации [1] Крюденер очень убедительно показал влияние условий увлажнения на рост сосновых насаждений, определяющее их бонитет, продуктивность. При этом он выделил ряд видов растений, с помощью которых можно определить уровень обеспеченности почв влагой (от сухих до заболоченных). Так появился новый метод оценки качества почв — метод фитоиндикации. Позже Крюденером была установлена связь характера лесов с обеспеченностью почвогрунтов питательными веществами, обуславливающая, вследствие разной требовательности к ним древесных пород, разный состав насаждений.

Рассматривая почву в качестве поставщика элементов питания, ученый, как издревле земледельцы, ставит на первое место механический, точнее петрографический (породный) состав грунтов, поскольку существует тесная связь между механическим и минералогическим составом пород, а следовательно, и их химическим составом: с утяжелением механического состава в них возрастает содержание всех элементов питания растений. Эта связь прослеживается повсеместно, в разных регионах. Среди потенциально наиболее плодородных Крюденер выделил породы разного механического состава, богатые фосфором и калием, — силурийские известняки, юрские глауконитовые пески, девонские глины.

Характеризуя условия водообеспеченности, которым Крюденер отводил определяющую роль в жизни леса, он прежде всего учитывал положение в рельефе и степень дренированности территорий, глубину залегания и режим подвижности (проточности) грунтовых вод. Хорошим показате-

лем условий увлажнения и питания насаждений на разных почвогрунтах ученый считал характер верхнего гумусового горизонта почв — мощность лесной подстилки, степень разложения органического вещества, тип гумуса (кислый, нейтральный, сладкий) или торфа. Петрографический состав почвогрунтов, определяющий содержание в них элементов питания и соотносящийся с механическим составом, положение в рельефе, степень дренированности (глубины залегания и режима грунтовых вод) и характер верхнего гумусового горизонта Крюденер положил в основу своей классификации почвогрунтов. Он подразделял почвогрунты на типы не по строению профиля (по нему выявляют их генетические типы), а по различиям состава и продуктивности произрастающих на них насаждений. Растительность принята критерием качества почв.

Для типов почвогрунтов и лесов на них ученый сохранил народные названия (бор, суборь, рамень, согра и др.), которыми широко пользовались типологи морозовского периода. Но в классификации Крюденера эти типы размещены в строгой системе — по нарастанию богатства и увлажнения субстрата. Так появился координатный принцип оценки качества почвогрунтов по двум главным составляющим их плодородия — обеспеченности элементами питания и влагой, — ставший основой характеристики местообитаний во всех последующих классификационных построениях лесных типологов морозовской школы. Отметим, что принцип обязательного одновременного учета этих двух факторов плодородия настойчиво пропагандировали П.А. Костычев и В.Р. Вильямс.

Классификационная таблица Крюденера состоит из двух частей. В верхней части (А) выделены три большие группы земель, существенно различающиеся по степени и режиму увлажнения, а именно: суходолы, поймы и заболоченные земли. В этой же части, в зависимости от условий увлажнения и дренажа, указаны типы почв по характеру их гумусированности (нейтральный, кислый перегной, торф). В нижней части (В) дано деление почвогрунтов (субстратов) по петрографическому составу и степени увлажнения.

Признавая определяющую роль влаги, Крюденер выделил 15 групп почвогрунтов по их влажности (степени увлажнения и характеру дренажа): 5 суходольных, 3 пойменных, 7 разной степени заболоченности. По петрографическому составу субстратов выделено 7 групп: 3 одноярусных (пески, супеси и суглинки) и 4 двухъярусных, двучленных (пески, подстилаемые суглинками, и др.). Фрагмент этой классификации приведен в таблице. Данный фрагмент прекрасно иллюстрирует главный ее принцип: рассматривая расти-

тельность как «отражение» субстрата, Крюденер разделяет почвогрунты на типы не по их особенностям, не по их «внутренним» свойствам, а по приуроченности к ним разных типов леса, состав и продуктивность которых обусловлены тем или иным уровнем их плодородия.

Разработанная Крюденером система представляет собой первый опыт сопряженной классификации лесов и их местообитаний, лесов и лесообразователей — климата (таблице почвогрунтов предпослано лесорастительное районирование) и почвогрунтов, создающих в природе сложные единства, которые позже получили название экосистем. Это совершенно новый тип классификации, основной принцип которого — классификация лесов по факторам среды, их формирующих, — почерпнут в народной среде («Каков грунт земли, таков и лес»). Выделение ведущих признаков почвогрунтов, положенных в основу классификации (состав субстрата и уровень увлажнения), и принцип ее построения (система координат) позволили привести в строгую систему все разнообразие насаждений лесной зоны — от чисто сосновых древостоев на бедных песчаных землях (боры) до раменей и дубрав (грудов) на богатых суглинках. Эти крупные обобщения явились результатом того, что Крюденеру удалось умело объединить многовековой народный опыт с новейшими достижениями лесоводства и почвоведения.

Работа Крюденера — прекрасный пример, подтверждающий справедливость положений

известного почвоведца Н.М. Сибирцева о близости генетического почвоведения с учением о почве как среде обитания. Даже их классификационные таблицы сходны — в обеих использован координатный принцип, причем одна из координат в обеих таблицах отражает изменения механического состава почв (оба автора называют его петрографическим).

Особенно глубоко Крюденер охарактеризовал почвогрунты. Ни до Крюденера, ни после него никто не давала им такой всеобъемлющей характеристики. Здесь и значение почвенного климата, и закон минимума питательных солей и допустимого максимума вредных, и характер круговорота веществ в процессе жизнедеятельности растительности и с токами влаги, и роль тления, гниения и других микробиологических процессов в «кипучей» жизни почв. В данном случае безусловно имел значение тот факт, что в Лесном институте Крюденер слушал лекции П.А. Костычева, рассматривавшего почвы прежде всего как среду обитания растений. Очень оригинально данное Крюденером определение производительности почв — *потенциальной* (почвы богаты элементами питания, но недостаточно обеспечены водой и воздухом) и *актуальной* (при наиболее гармоничном сочетании воды и воздуха). Серьезное внимание уделено вопросам бережного отношения к природе («Лесовод не хищник, девиз которого «после меня хоть потоп» [2]), в том числе: необходимость учета разной устойчивости почвогрунтов, в частности, хруп-

Т а б л и ц а

Главные типы почвогрунтов и типичные почвенно-грунтовые условия в зависимости от увлажнения, доступа воздуха и характера верхнего слоя растительной почвы, дающие при наличии известного древостоя определенные типы насаждений (центральный фрагмент) [2]
The main soil types and typical soil and soil conditions, depending on humidification, air access and the nature of the upper layer of plant soil, giving in the presence of the stand, certain types of plantations (central fragment) [2]

Петрографическая группа (субстрат)	Гидрометрическая группа					
	I					II
	Суходольные типы надлуговых террас					Припойменный тип
	По минеральному субстрату разных степеней опозоленности					
	1	2	3	4	5	6
Одноярусные: <i>Песчаные</i> Боры	Сухой бор	Свежий наземистый бор	Свежий бор кислорегнойный	Влажный бор кислорегнойный	Влажный наземистый бор	Илистый бор
<i>Супесчаные</i> Субори	—	Свежая наземистая суборь (грудовая)	Свежая суборь	Влажная суборь	Влажная наземистая суборь (грудовая)	Илистая суборь
<i>Суглинистые</i> Рамени	—	Свежая наземистая рамень (груд)	Свежая рамень	Влажная рамень	Влажная наземистая рамень (низкий груд)	Илистая рамень (грудовый олес)
Двухъярусные: Сурамени	—	Свежая наземистая сурамень	Свежая сурамень	Влажная сурамень	Влажная наземистая сурамень	Илистая сурамень

кости песчаных массивов; понимание значения болот как накопителей влаги и нецелесообразности в связи с этим их широкого осушения.

Огромную ценность представляет лесохозяйственный аспект монографии, второй ее книги, изданной в 1917 г. Автор детально охарактеризовал в ней древостои разных типов и их вариации в зависимости от рубок, пожаров, выпаса скота, нападения вредителей. Даны подробные таксационные описания типичных насаждений в разных зонах и областях. Практическая направленность работы проявляется при анализе смены пород под влиянием рубок и стихийных факторов. Даются дифференцированные рекомендации по проведению рубок в разных типах леса с тем, чтобы повысить надежность естественного возобновления. Для каждого типа леса указаны его примерная стоимость для налогового обложения и пути наиболее рационального использования, в том числе в плане сельскохозяйственного освоения — под пашни, сенокосы, выпасы.

Заканчивая анализ исследовательской деятельности Крюденера, подчеркнем, что он предложил первую типологическую классификацию лесов Европейской России по принципу районирования ее территории по основным климатическим показателям, с последующим разделением лесов в пределах климатических зон и областей на типы насаждений по особенностям петрографического состава и водного режима почвогрунтов. Леса на породах одного минерального состава (например, боры на кварцевых песках) в разных зонах выделены им как географические формы одного типа. Это одно из наиболее крупных научных достижений Крюденера, который первым показал, что в разных природных зонах на близких по потенциальному плодородию поверхностных отложениях формируются *аналогичные* местообитания (почвогрунты) и *аналогичные* типы растительных сообществ. На этом основании он отнес зональные типы тайги и лесостепи — рамени (сложные ельники) и дубравы — к одному типу, чего в свое время не смог воспринять даже Морозов. Будучи руководителем Лесного отдела Управления уделов, в ведении которого находилось более 7 млн гектаров лучших лесных массивов России, принадлежавших царской семье, и проводя большие работы по их лесоустройству, Крюденер способствовал тому, что его классификация начала быстро внедряться в производство.

Однако бурный морозовский этап развития лесной типологии, во время которого работал Крюденер, был остановлен Первой мировой войной и революционными событиями. Когда в середине 1920-х гг. начали разворачиваться широкомасштабные работы по инвентаризации лесов СССР и лесоустройству, положение в лесной нау-

ке было совсем другим. Морозов умер, Крюденер, имевший титул барона и чин действительного тайного советника, эмигрировал. Его классификация была изъята из употребления, в 1920-е гг. она была заменена ботанической, точнее, фитоценотической (от «фитоценоз» — растительное сообщество) классификацией Каяндера — Сукачева, не опирающейся на среду, почвогрунты. Ряд крупных лесничих в знак протеста подали тогда прошения об отставке.

Благодаря усилиям Г.Н. Высоцкого классификация Крюденера сохранилась на Украине как классификация Е.В. Алексеева, который использовал разработки Крюденера после переезда из Петербурга в Киев и создал на их основе сокращенный вариант его классификации применительно к украинским лесам. Имя же Крюденера со временем забылось, и нам потребовалось приложить немало усилий, чтобы вернуть его из забвения. Ученик Высоцкого П.С. Погребняк, развивая подходы Алексеева, преобразовал центральный фрагмент таблицы Крюденера в очень удобную, компактную классификационную модель в координатах богатства (трофности) и увлажнения земель, получившую название эдафической сетки (от греч. «эдафос» — почва, земля) и ставшую основой украинской школы лесной типологии.

Идеи Крюденера оказали несомненное влияние на воззрения известного эколога Л.Г. Раменского. Нами предпринята попытка с применением его принципов количественно решить уравнение связи растительности с лимитирующими параметрами факторов среды. Однако в целом научное наследие Крюденера не получило того широкого признания и применения, которого оно заслуживает. Крюденер создал классификацию типов насаждений, положив в ее основу плодородие почвогрунтов. Плодородие — способность воспроизводить растения — является главным качеством, отличающим почвы от всех других природных тел, их ни с чем не сопоставимой функцией, миссией на Земле, поскольку без растений, осуществляющих процесс фотосинтеза, который переводит неорганические соединения в органические, жизнь невозможна. Когда типологи вслед за Крюденером стали подразделять леса по плодородию их местообитаний, природа из живописного хаоса превратилась в строгую и стройную систему, в которой все можно предвидеть, пролонгировать, рассчитать. Полагаем, что со временем этот предложенный Крюденером метод будет принят во многих естественных науках.

Благодаря поддержке профессоров В.Д. Никишова и М.Д. Мерзленко в 2003 г. главный труд А.А. Крюденера — его монография «Основы классификации типов насаждений» — была переиздана в МГУЛ [3].

Список литературы

- [1] Крюденер А.А. Опыт группировки почвенного покрова в связи с местоположением, почвой, инсоляцией и возобновлением под пологом и на лесосеках // Лесн. журнал, 1903. Вып. 6. С. 1430–1468.
- [2] Крюденер А.А. Основы классификации типов насаждений и их народнохозяйственное значение в обиходе страны. Пгт.: 1916–1917. Ч. I–I. 318 с.
- [3] Крюденер А.А. Основы классификации типов насаждений. 2-е изд. М.: МГУЛ, 2003. 335 с.

Сведения об авторе

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

Статья поступила в редакцию 25.01.2017 г.

FIRST ENVIRONMENTAL CLASSIFICATION OF FORESTS (to the 100th anniversary of the publication of the monograph by A.A. Krudener «Fundamentals of classification of types of plantings»)

E.S. Migunova

Ukrainian Scientific Research Institute of Forestry and Agroforestry named after G.M. Vysotsky, 61024, Kharkiv, st. Pushkinskaya, 86

migunova-l-s@yandex.ua

In 2016–2017, two volumes of A.A. Krudener «Fundamentals of Classification of Plant Types» monograph were published. The classification structure developed by Krudener represents the first experience of the conjugate classification of forests and their habitats, forests and forest forming agents -the climate (the table of soils is presumed to be forest-planting zoning) and soil-forming complexes that create complex ecosystems in nature, later named as ecosystems. This is a completely new type of classification, the main principle of which is the classification of forests by the factors of the environment that form them.

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

Suggested citation: Migunova E.S. *Pervaya ekologicheskaya klassifikatsiya lesov (k 100-letiyu vykhoda v svet monografii A.A. Kryudenera «Osnovy klassifikatsii tipov nasazhdeniy») lesovodstva* [First environmental classification of forests (to the 100th anniversary of the publication of the monograph by A.A. Krudener «Fundamentals of classification of types of plantings»)] *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 26–30. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-26-30

References

- [1] Kryudener A.A. *Opyt gruppirovki pochvennogo pokrova v svyazi s me-stopolzheniem, pochvoyu, insolyatsiey i vozobnovleniem pod pologom i na lesno-sekakh* [Experience in the grouping of soil cover in connection with the location, soil, insolation and renewal under the canopy and on the forest-trees] *Lesnoy Journal*, 1903, iss. 6, pp. 1430–1468.
- [2] Kryudener A.A. *Osnovy klassifikatsii tipov nasazhdeniy i ikh na-rodnokhozyaystvennoe znachenie v obikhode strany* [The basis for the classification of plantation types and their national economic importance in the country's everyday life]. Pgt.: 1916–1917, p. I-I, 318 p.
- [3] Kryudener A.A. *Osnovy klassifikatsii tipov nasazhdeniy* [Basics of classification of types of plantings]. 2nd ed. Moscow: MGUL, 2003, 335 p.

Author's information

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

Received 25.01.2017

УДК 630.37

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-31-37

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ ПО ДЛИНЕ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ГУСЕНИЧНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ЛЕСОЗАГОТОВИТЕЛЬНЫХ МАШИН С ПОЛУЖЕСТКОЙ ПОДВЕСКОЙ

В.А. Борисов, Д.В. Акинин, В.В. Кирей

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

Исследования лесозаготовительной практики в России показывают, что лесной фонд невозможно разрабатывать машинами с колесным движителем из-за их низкой проходимости на слабых почвах в условиях пересеченной местности. В связи с этим с 2005 по 2017 г. наблюдается активный поиск путей улучшения работы лесозаготовительных машин на базе гусеничных тракторов. Рассмотрены основные режимы работы и нормальные реакции грунта вдоль опорной поверхности гусеничного движителя на примере трактора с полужесткой подвеской «Онежец-420». Получены уравнения, позволяющие определять глубину колеи и скорость движения трактора в зависимости от физическо-механических свойств почвы.

Ключевые слова: лесные грузы, транспортировка, гусеничный трактор, глубина колеи, эксплуатационные факторы, скорость движения

Ссылка для цитирования: Борисов В.А., Акинин Д.В., Кирей В.В. Распределение нормальных реакций по длине опорной поверхности гусеничных движителей лесозаготовительных машин с полужесткой подвеской // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 31–37. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-31-37

При эксплуатации лесозаготовительных машин на базе тракторов с полужесткой подвеской («Онежец-420») наибольший износ наблюдается у первого и четвертого опорных катков. Малый износ остальных катков свидетельствует о меньшем участии их в работе. На рис. 1. представлены эпюры распределения нормальных реакций по длине опорной поверхности гусеничного движителя чокерного трелевочного трактора «Онежец-420».

Объект исследования

Анализ эпюр холостого и груженого хода свидетельствует о том, что почва под первым катком из-за небольшой нагрузки уплотняется не полностью, уплотнение происходит в основном под четвертым опорным катком. Это приводит к увеличению дифферента трактора. При таком дифференте участие второго катка в передаче нагрузки на почву незначительно и практически

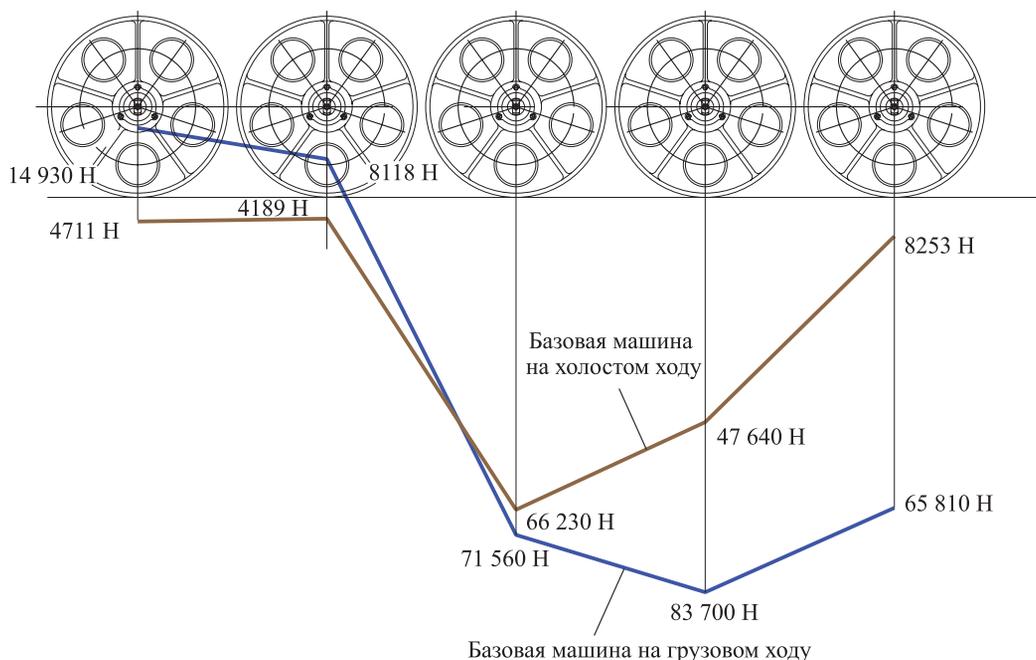


Рис. 1. Эпюры распределения нормальных реакций по длине опорной поверхности гусеничного движителя
Fig. 1. Diagrams of the distribution of normal reactions along the length of the support surface of the caterpillar drive

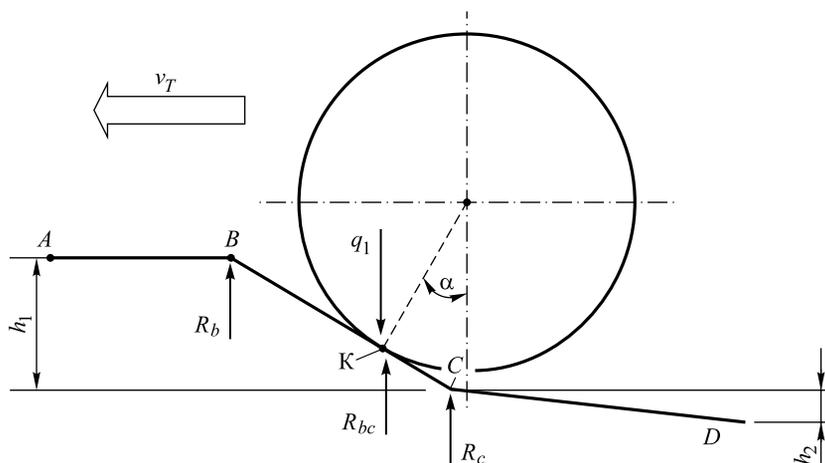


Рис. 2. Взаимодействие первого опорного катка со звеньями гусеницы
Fig. 2. The interaction of the first skidding rink with the links of the caterpillar

вся нагрузка приходится на среднюю и заднюю каретки трактора. Такое распределение нагрузки вызывает не только переуплотнение почвы, но и увеличение глубины колеи.

От величины и характера распределения нормальных реакций почвы по длине опорной поверхности гусеничного движителя зависят многие показатели трелевочной машины, в том числе и такие важные, как сцепление и тяговые качества, а также равномерность нагруженности деталей и узлов его ходовой части.

Наиболее динамичным процессом укладки гусеничных звеньев в почву является укладка их под первым опорным катком. На рис. 2. рассмотрена схема всплывания катка при образовании колеи.

Гусеничная цепь принимается звенчатой. Звенья, встречающиеся с первым опорным катком, идут под углом к поверхности почвы, вследствие чего при движении трактора первый опорный каток постоянно стремится подняться вверх по наклонной поверхности встреченного звена. В то же время под действием нагрузки со стороны опорного катка встречные звенья вдавливаются в почву. Нагрузка q_1 от опорного катка трактора передается через точку К касания звену BC. Но так как звено BC шарнирами B и C связано со смежными звеньями AB и CD, смежные звенья также участвуют в передаче нагрузки q_1 почвы. Поэтому реакция почвы воспринимается тремя зонами — AB, BC и CD.

Во время движения трактора звеном BC совершается сложное движение. При подходе опорного катка к звену BC звено CD не полностью уложено в почву. Шарнир C находится выше уложенного в почве шарнира D. В момент касания опорного катка звена BC расстояние СК минимальное. Поэтому сопротивление деформации почвы на участке ABK больше сопротивления почвы на

участке KCD и шарнир C звеньев вынужден, деформируя почву, опускаться вниз. По мере увеличения СК (расстояние между шарниром C и точкой К касания катка к звену BC) наступает момент, когда шарниры B и C движутся вертикально с одинаковой скоростью. Ввиду того что звено BC находится под углом к поверхности движения, опорный каток, касаясь звена в точке К, находится выше дна колеи под ним. Будем считать, что высота всплывания первого катка — величина постоянная. В таком случае сумма действующих на звено BC сил от вертикальных реакций почвы на участке ABCD будет равна вертикальной нагрузке на звено BC от опорного катка в точке К.

Результаты и обсуждение

Вертикальная сила R_b от звена AB приложена к шарниру B, а вертикальная сила R_c от звена CDR_c приложена в шарнире C. Кроме R_b и R_c , на звено BC действуют вертикальные реакции почвы. Динамическое уравнивание рассматриваемой системы наступит, когда сумма сил R_b , R_c и вертикальных реакций почвы R_{bc} на звено BC будет равна вертикальной нагрузке q_1 , приложенной в точке касания К опорного катка к звену BC. Тогда

$$R_b + R_c + R_{bc} = q_1, \text{ или } R_b + R_c + R_{bc} - q_1 = 0.$$

Поскольку глубина колеи под первым опорным катком незначительна, для определения сил R_{bc} , R_b , R_c согласно гипотезе Винклера — Бернштейна, можно воспользоваться прямолинейной зависимостью сопротивления почвы смятию от глубины погружения звена в почву [1, 2]:

$$q = ch,$$

где c — коэффициент объемного сжатия почвы;
 h — глубина погружения штампа.

Тогда общее сопротивление почвы на звено в зависимости от глубины погружения в почву

в случае погружения звена, расположенного параллельно поверхности движения, при $v \approx 0$ будет выражаться следующим образом:

$$q_c = cbl_0h, \tag{1}$$

где b — ширина гусеничного трака;
 l_0 — длина гусеничного звена.

Однако при движении трактора звенья погружаются в почву под углом к поверхности движения, следовательно, будем рассматривать сопротивление почвы смятию на единицу длины гусеничного звена. Это значение получим, разделив левую и правую часть уравнения (1) на l_0 :

$$q_l = cbh_l,$$

где h_l — глубина погружения единицы длины гусеничного звена.

С увеличением скорости погружения штампа в почву сопротивление почвы при одной и той же глубине увеличивается [3–7]. Погружение гусеничного звена под влиянием скорости выразим с помощью критерия Фруда как

$$\Delta h = \frac{v^2}{g},$$

где Δh — изменение глубины погружения штампа под влиянием скорости движения его в почву;

v — скорость погружения звена в почву;

g — ускорение свободного падения.

Глубина погружения h под действием нагрузки q_c со стороны опорного катка при $v \approx 0$ с учетом влияния скорости можно определить следующим образом:

$$h = h_l + \Delta h.$$

Тогда

$$q_c = cbl_0(h_l + \Delta h)$$

и

$$q_l = cb(h_l + \Delta h). \tag{2}$$

Для определения динамической глубины колеи под первым опорным катком и высоты всплывания катка относительно дна колеи рассмотрим силы R_{bc} , R_b , R_c . Силу R_b находим из уравнения моментов от реакции почвы на звено AB и силы R_b относительно точки A :

$$\sum M_A = \int_0^{l_0} q_l x dx - R_b l_0 = 0, \tag{3}$$

где x — расстояние от точки A до рассматриваемой единичной длины на гусеничное звено.

Подставив значение q_l из уравнения (2) в уравнение (3), получим:

$$R_b = \frac{cbl_0v_b^2}{4g}, \tag{4}$$

где v_b — вертикальная скорость шарнира B .

Из уравнения моментов относительно точки D определим R_c :

$$\sum M_D = \int_0^{l_0} q_l x dx - R_c l_0 = 0, \tag{5}$$

$$R_c = \frac{cbl_0}{2} \left(h_l - \frac{v_c^2}{2g} \right),$$

где v_c — вертикальная скорость шарнира C .

Заметим, что

$$v_c = v_b - v_m \operatorname{tg} \alpha,$$

где v_m — скорость поступательного движения трактора;

α — угол наклона звена к поверхности движения.

Вертикальная реакция почвы на звено BC определяется как

$$R_{bc} = \int_0^{l_0} cb \left(h_l + \frac{v^2}{g} \right) dl = \int_0^{l_0 \cos \alpha} cb \left(x \operatorname{tg} \alpha + \frac{v_{c(b)}^2}{g} \right) \frac{dx}{\cos \alpha},$$

откуда

$$R_{bc} = \frac{l_0 c b \sin \alpha}{2} + \frac{c b v_c^2 l_0}{g}. \tag{6}$$

С учетом уравнений (4)–(6)

$$q_1 = \frac{cbl_0v_b^2}{4g} + \frac{cbl_0}{2} \left(h_l + \frac{v_c^2}{2g} \right) + \frac{cbl_0^2 \sin \alpha}{2} + \frac{cbl_0v_c^2}{g}. \tag{7}$$

После преобразования и решения уравнения (7) относительно h_l и учитывая $v_b = v_c = v_T \operatorname{tg} \alpha$, получим:

$$h_l = \frac{q_1}{cbl_0} - \frac{3v_{c(b)}^2}{2g},$$

или

$$h_l = \frac{q_1}{cbl_0} - \frac{3v_T^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{2g},$$

где v_T — скорость движения трактора;

α — угол наклона звена BC к поверхности

$$\text{движения, } \alpha = \arcsin \frac{h_i}{l_0}.$$

Следует учесть, что угол α с повышением скорости движения трактора уменьшается из-за уменьшения глубины колеи. Этот фактор приводит к тому, что с повышением скорости трактора темп погружения гусеничных звеньев в поверх-

ность движения увеличивается до определенного предела, а не до бесконечности [8–12].

Для определения высоты всплывания h_2 первого опорного катка относительно дна колеи под ним составим уравнение моментов сил, действующих на звено BC относительно точки K касания катка к звену:

$$\begin{aligned} \Sigma M_K = R_c (l_0 - l_1) \cos \alpha + \int_0^{(l_0 - l_1) \cos \alpha} qx \frac{dx}{\cos \alpha} - \\ - R_b l_1 \cos \alpha - \int_0^{l_1 \cos \alpha} qx \frac{dx}{\cos \alpha} = 0, \end{aligned}$$

где R_c — сила от реакции почвы на звено CD , действующая в шарнире C ;

l_0 — длина гусеничного звена;

l_1 — длина отрезка BK ;

α — угол наклона звена к поверхности почвы в момент уравнивания сил относительно точки K ;

x — расстояние по горизонтали от точки до единичной длины звена;

R_b — сила от реакции почвы на звено AB , действующая в шарнире B .

Так как система координат принимается с началом в точке K , для

$$\int_0^{(l_0 - l_1) \cos \alpha} qx \frac{dx}{\cos \alpha} \quad (8)$$

имеем

$$h = l_1 \sin \alpha + x \operatorname{tg} \alpha, \quad (9)$$

а для

$$\int_0^{l_1 \cos \alpha} qx \frac{dx}{\cos \alpha} \quad (10)$$

имеем

$$h = l_1 \sin \alpha - x \operatorname{tg} \alpha.$$

При вычислении (8) находим

$$q = cb \left(h + \frac{v_c^2}{g} \right),$$

где h — динамическая глубина погружения единицы длины гусеничного звена на расстояние x от точки K по горизонтали.

Подставив найденное q и значение h из уравнений (2) и (9) в выражение (8), получим:

$$\begin{aligned} \int_0^{(l_0 - l_1) \cos \alpha} qx \frac{dx}{\cos \alpha} = \\ = \frac{cb}{\cos \alpha} \int_0^{(l_0 - l_1) \cos \alpha} x \left(l_1 \sin \alpha + x \operatorname{tg} \alpha + \frac{v_c^2}{g} \right) dx \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \times \frac{cbl_1 \sin \alpha (l_0 - l_1)^2 \cos^2 \alpha}{\cos \alpha \cdot 2} + \\ + \frac{cbl_1 \operatorname{tg} \alpha (l_0 - l_1)^3 \cos^3 \alpha}{\cos \alpha \cdot 3} + \\ + \frac{cbv_c^2 (l_0 - l_1)^2 \cos^2 \alpha}{g \cos \alpha \cdot 2}. \end{aligned}$$

Для вычисления (10) подставим значения q и h в уравнение (2), тогда:

$$\int_0^{l_1 \cos \alpha} qx \frac{dx}{\cos \alpha} = \int_0^{l_1 \cos \alpha} cbx \left(l_1 \sin \alpha - x \operatorname{tg} \alpha + \frac{v_c^2}{g} \right) \frac{dx}{\cos \alpha} \times$$

$$\times \frac{cbl_1 \sin \alpha l_1^2 \cos^2 \alpha}{\cos \alpha \cdot 2} - \frac{cb \operatorname{tg} \alpha l_1^3 \cos^3 \alpha}{\cos \alpha \cdot 3} + \frac{cbv_c^2 l_1^2 \cos^2 \alpha}{g \cos \alpha \cdot 2}.$$

Таким образом,

$$\frac{cbl_0}{2} \left(h + \frac{v_c^2}{2g} \right) (l_0 - l_1) \cos \alpha + \frac{cbl_1 (l_0 - l_1)^2 \cos^2 \alpha}{2 \cos \alpha} +$$

$$+ \frac{cb \operatorname{tg} \alpha (l_0 - l_1)^3 \cos^3 \alpha}{3 \cos \alpha} + \frac{cbv_c^2 (l_0 - l_1)^2 \cos^2 \alpha}{2g \cos \alpha} -$$

$$- \frac{cbl_0 v_b^2 l_1 \cos \alpha}{4g} - \frac{cbl_1^3 \sin \alpha \cos^2 \alpha}{2 \cos \alpha} +$$

$$+ \frac{cb \operatorname{tg} \alpha l_1^3 \cos^3 \alpha}{3 \cos \alpha} - \frac{cbv_c^2 l_1^2 \cos^2 \alpha}{2g \cos \alpha} = 0. \quad (11)$$

Введем следующие обозначения:

$$\frac{cbl_0 \cos \alpha}{2} \left(h + \frac{v_c^2}{2g} \right) = A;$$

$$\frac{cb \sin \alpha \cos^2 \alpha}{2 \cos \alpha} = B;$$

$$\frac{cb \operatorname{tg} \alpha \cos^3 \alpha}{3 \cos \alpha} = C;$$

$$\frac{cbv_c^2 \cos^2 \alpha}{2g \cos \alpha} = D;$$

$$\frac{cbv_b^2 \cos \alpha}{4g} = E.$$

Тогда уравнение (11) можно записать в таком виде:

$$\begin{aligned} A(l_0 - l_1) + Bl_1(l_0 - l_1)^2 + C(l_0 - l_1)^3 + \\ + D(l_0 - l_1)^2 - El_1 + Bl_1^3 + Cl_1^3 - Dl_1^2 = 0 \end{aligned}$$

или

$$l_1^2 (3Cl_0 - 2Bl_0) + l_1 (Bl_0^2 - A - 2Dl_0 - E) + Al_0 + Cl_0^3 + Dl_0^2 = 0. \quad (12)$$

Подставив в уравнение (12) значения A, B, C, D, E , после соответствующих преобразований получим:

$$-l_1 cbl_0 \left(h_i + \frac{3v_c^2}{g} \right) + cbl_0^2 \cos \alpha \left(\frac{5h_i}{6} + \frac{v_c^2}{2g} \right) = 0. \quad (13)$$

Отсюда

$$l_1 = \frac{l_0 \left(\frac{5h_i}{6} + \frac{v_c^2}{2g} \right)}{h_i + \frac{3v_c^2}{2g}}. \quad (14)$$

Высота n всплывания катка может быть определена по формуле

$$h_n = h_i - l_1 \sin \alpha - r(1 - \cos \alpha),$$

где r — радиус опорного катка.

Подставляя значение l_1 из уравнения (14), находим

$$h_n = h_i - \frac{l_0 \sin \alpha \left(\frac{5h_i}{6} + \frac{v_c^2}{2g} \right)}{h_i + \frac{3v_c^2}{g}} - r(1 - \cos \alpha). \quad (15)$$

С учетом того, что $\sin \alpha = \frac{h_i}{l_0}$, а $V_c = v_T \operatorname{tg} \alpha$,

уравнение (15) примет следующий вид:

$$h_n = h_i - \frac{h_i \left(\frac{5h_i}{6} + \frac{v_T^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{2g} \right)}{h_i + \frac{3v_T^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}{2g}} - r(1 - \cos \alpha).$$

Выводы

Таким образом, полученные уравнения позволяют определить глубину колеи под первым катком и высоту его всплывания в зависимости от физико-механических свойств почвы, нагрузки на первом опорном катке, скорости движения трактора, конструктивных параметров гусеничного звена и радиуса опорного катка.

Сведения об авторах

Борисов Вячеслав Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры промышленного транспорта и строительства (ЛТ-8) МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), vborisov@rambler.ru

Акинин Дмитрий Вячеславович — канд. техн. наук, доцент, доцент секции колесных машин МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), akinin@mgul.ac.ru

Кирей Владимир Владимирович — канд. экон. наук, доцент секции кафедры «Предпринимательство и внешнеэкономическая деятельность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kirey-v@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.10.2017 г.

Список литературы

- [1] Акинин Д.В., Борисов В.А., Казначеева Н.И., Жиганов Н.Н., Авшарян Т.М. Анализ сцепления шин и гусениц лесозаготовительных машин с поверхностью качения // Наука сегодня: задачи и пути их решения: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. Вологда, 25 мая 2016 г. Вологда: Маркер, 2016. С. 11–13.
- [2] Акинин Д.В., Казначеева Н.И., Борисов В.А. Определение вертикальных деформаций сжатия, возникающих при повторных проходах лесовозного автотранспорта по дороге с переходным типом покрытия // Новейшие достижения в науке и образовании: отечественный и зарубежный опыт: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. Смоленск, 31 октября 2015 г. Смоленск: Новаленко, 2015. С. 19–22.
- [3] Акинин Д.В., Казначеева Н.И., Борисов В.А. Лесные машины и почвенная часть лесной экосистемы // Наука третьего тысячелетия: Сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Самара, 3 ноября 2015 г. Уфа: Омега сайнс, 2015. С. 23–31.
- [4] Акинин Д.В., Казначеева Н.И., Борисов В.А. Способы снижения динамических нагрузок, действующих на гусеничную лесозаготовительную машину // Проблемы и перспективы технических наук: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 8 мая 2015 г. Уфа: Аэтерна, 2015. С. 3–12.
- [5] Акинин Д.В., Борисов В.А., Казначеева Н.И. Глубина колеи и число опорных катков гусеничной лесозаготовительной машины // Наука сегодня: проблемы и перспективы развития: Матер. Междунар. науч.-практ. конф. Вологда, 25 ноября 2015 г. Вологда: Маркер, 2015. С. 5–8.
- [6] Акинин Д.В., Казначеева Н.И., Борисов В.А. Анализ взаимодействия лесных машин с почвенной экосистемой // Сборники конф. НИЦ «Социосфера». Praha: Vědecko uydavatel'ské centrum «Sociosféra-CZ», 2015. № 48. С. 66–70.
- [7] Борисов В.А., Казначеева Н.И., Акинин Д.В. Глубина колеи и потеря подвижности в результате буксования гусеничной лесозаготовительной машины // Национальная ассоциация ученых, 2015. № 10–1 (16). С. 11–14.
- [8] Камусин А.А., Казначеева Н.И., Борисов В.А., Акинин Д.В. Исследование гидропривода технологического оборудования лесозаготовительных машин // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2014. № 2-S. С. 119–121.
- [9] Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е., Наказной О.А., Наумов В.Н., Котиев Г.О., Беляков В.В., Зезюлин Д.В. Влияние распределения давлений движителей гусеничных лесозаготовительных машин ЛЗ-4 и ЛЗ-5 на колееобразование // Лесотехнический журнал, 2016. Т. 6. № 3 (23). С. 167–176.
- [10] Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е., Котиев Г.О., Наказной О.А. К определению буксования гусеничной лесозаготовительной машины // Лесотехнический журнал, 2016. Т. 6. № 4 (24). С. 201–207.
- [11] Клубничкин Е.Е., Клубничкин В.Е., Крылов В.М., Кондратюк Д.В. К обоснованию удельного давления гусеничного лесопромышленного трактора // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2012. № 8 (91). С. 48–50.
- [12] Клубничкин В.Е., Клубничкин Е.Е., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Редкозубов А.В., Беляков В.В. Моделирование движения гусеничных машин по лесным дорогам // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2016. № 1. С. 171–176.

DISTRIBUTION OF NORMAL REACTIONS ALONG THE LENGTH OF THE SUPPORT SURFACE OF CATERPILLAR PROPELLERS OF FORESTRY MACHINES WITH SEMI-RIGID SUSPENSION

V.A. Borisov, D.V. Akinin, V.V. Kirey

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

vborisov@rambler.ru

Studies of logging practices in Russia show that with the forest fund applying machines with wheeled drive makes it impossible to use them due to low passability on weak soils in conditions of rough terrain. In this regard, in recent years there has been an active search for ways to improve the operation of logging machines based on caterpillar tractors. The main operation modes are presented and the normal soil reactions along reference surface of the caterpillar drive are received, which are considered using the example of the tractor with semi-rigid suspension Onezhets-420. Based on the results of the study, equations are obtained that allow to determine the depth of the ruts and the speed of the tractor depending on the physical and mechanical properties of the soil.

Keywords: forestry, transportation, caterpillar tractor, gauge depth, operational factors, speed of movement

Suggested citation: Borisov V.A., Akinin D.V., Kirey V.V. *Raspredelenie normal'nykh reaktsiy po dline opornoj poverkhnosti gusenichnykh dvizhiteley lesozagotovitel'nykh mashin s poluzhestkoy podveskoy* [Distribution of normal reactions along the length of the support surface of caterpillar propellers of forestry machines with semi-rigid suspension]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 31–37.
DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-31-37

References

- [1] Akinin D.V., Borisov V.A., Kaznacheeva N.I., Zhiganov N.N., Avsharyan T.M. *Analiz stsepleniya shin i gusenits lesozagotovitel'nykh mashin s poverkhnost'yu kacheniya* [Analysis of the adhesion of tires and caterpillars of logging machines to the rolling surface] *Nauka segodnya: zadachi i puti ikh resheniya. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Vologda, 25 maya 2016 g. [Science today: problems and ways to solve them. Materials of the international scientific-practical conference. Vologda, May 25, 2016]. Vologda: Marker, 2016, pp. 11–13.
- [2] Akinin D.V., Kaznacheeva N.I., Borisov V.A. *Opreделение вертикаль'nykh deformatsiy szhatiya voznikayushchikh pri povtornykh prokhodakh lesovoznogo avtotransporta po doroge s perekhodnym tipom pokrytiya* [Determination of vertical compression deformations arising from repeated passes of timber transport vehicles along the road with a transitional type of coverage] *Noveyshie dostizheniya v nauke i obrazovanii: otechestvennyy i zarubezhnyy opyt. Sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Smolensk, 31 oktyabrya 2015 g. [The latest achievements in science and education: domestic and foreign experience. Collection of proceedings on the materials of the International Scientific and Practical Conference. Smolensk, October 31, 2015]. Smolensk: Novalenso, 2015, pp. 19–22.
- [3] Akinin D.V., Kaznacheeva N.I., Borisov V.A. *Lesnye mashiny i pochvennaya chast' lesnoy ekosistemy* [Forest machines and the soil part of the forest ecosystem] *Nauka tret'ego tysyacheletiya. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Samara, 03 noyabrya 2015 g. [Science of the third millennium. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. Samara, November 3, 2015]. Ufa: OMEGA SAINS, 2015, pp. 23–31.
- [4] Akinin D.V., Kaznacheeva N.I., Borisov V.A. *Sposoby snizheniya dinamicheskikh nagruzok, deystvuyushchikh na gusenichnyuyu lesozagotovitel'nyuyu mashinu* [Methods of reducing dynamic loads acting on a caterpillar logging machine] *Problemy i perspektivy tekhnicheskikh nauk. Sbornik statey Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Ufa, 08 maya 2015 g. [Problems and prospects of technical sciences. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. Ufa, May 8, 2015]. Ufa: Aethera, 2015, pp. 3–12.
- [5] Akinin D.V., Borisov V.A., Kaznacheeva N.I. *Glubina kolei i chislo opornykh katkov gusenichnoy lesozagotovitel'noy mashiny* [Depth of track and the number of track rollers of a tracked forest machine] *Nauka segodnya: problemy i perspektivy razvitiya. Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Vologda, 25 noyabrya 2015 g. [Science today: problems and development prospects. Collection of scientific papers on the materials of the international scientific and practical conference. Vologda, November 25, 2015]. Vologda: Marker, 2015, pp. 5–8.
- [6] Akinin D.V., Kaznacheeva N.I., Borisov V.A. *Analiz vzaimodeystviya lesnykh mashin s pochvennoy ekosistemoy* [Analysis of the interaction of forest machines with the soil ecosystem] *Sborniki konferentsiy NITs Sotsiosfera. Vedecko vydavatel'skoe centrum «Sociosfera-CZ» Praha, 2015* [Proceedings of the SIC Sotsiosfera. Vedecko vydavatel'skoe centrum «Sociosfera-CZ» Praha, 2015]. Prague: Vedecko vydavatel'skoe centrum Sociosfera-CZ s.r.o., 2015, no. 48, pp. 66–70.
- [7] Borisov V.A., Kaznacheeva N.I., Akinin D.V. *Glubina kolei i poterya podvishnosti v rezul'tate buksovaniya gusenichnoy lesozagotovitel'noy mashiny* [Depth of track and loss of mobility as a result of skidding of the caterpillar forest machine] *Natsional'naya Assotsiatsiya Uchenykh [National Association of Scientists]*, 2015, no. 10–1 (16), pp. 11–14.
- [8] Kamusin A.A., Kaznacheeva N.I., Borisov V.A., Akinin D.V. *Issledovanie gidroprivoda tekhnologicheskogo oborudovaniya lesozagotovitel'nykh mashin* [Research of hydraulic drive of technological equipment of forest machines] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2014, no. 2-S, pp. 119–121.
- [9] Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Nakaznoy O.A., Naumov V.N., Kotiev G.O., Belyakov V.V., Zezyulin D.V. *Vliyaniye raspredeleniya davleniy dvizhiteley gusenichnykh lesozagotovitel'nykh mashin LZ-4 i LZ-5 na koleeobrazovaniya* [Influence of the distribution of pressures of caterpillar forestry machines LZ-4 and LZ-5 for track formation] *Lesotekhnicheskyy zhurnal*, 2016, v. 6, no. 3 (23), pp. 167–176.

- [10] Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Kotiev G.O., Nakaznoy O.A. *K opredeleniyu buksovaniya gusenichnoy lesozagotovitel'noy mashiny* [To the definition of skidding of a caterpillar forest machine] *Lesotekhnichesky zhurnal*, 2016, v. 6, no. 4 (24), pp. 201–207.
- [11] Klubnichkin E.E., Klubnichkin V.E., Krylov V.M., Kondratyuk D.V. *K obosnovaniyu udel'nogo davleniya gusenichnogo lesopromyshlennogo traktora* [To substantiate the specific pressure of a caterpillar forestry tractor] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2012, no. 8 (91), pp. 48–50.
- [12] Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Makarov V.S., Zezyulin D.V., Redkozubov A.V., Belyakov V.V. *Modelirovanie dvizheniya gusenichnykh mashin po lesnym dorogam* [Modeling the movement of caterpillar machines along forest roads] *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of the NSTU. R.E. Alekseeva], 2016, no. 1, pp. 171–176.

Authors' information

Borisov Vyacheslav Alekseevich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Industrial Transport and Construction of BMSTU (Mytishchi branch), vborisov@rambler.ru

Akinin Dmitriy Vyacheslavovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Industrial Transport and Construction of BMSTU (Mytishchi branch), akinin@mail.ru

Kirey Vladimir Vladimirovich — Cand. Sci. (Economic), Associate Professor of the Department of Entrepreneurship and Foreign Economic Activity of BMSTU (Mytishchi branch), kirey-v@mail.ru

Received 02.10.2017

ПОЛНОМАСШТАБНОЕ РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РОССИЙСКИХ РЕГИОНОВ – ПУТЬ К РЕШЕНИЮ ОСНОВНЫХ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Н.И. Кожухов, А.К. Редькин, В.В. Никитин

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

kozuhov@mgtu.ac.ru

Социально-экономическое развитие российских регионов и субъектов Российской Федерации, отдаленных от федерального центра, сдерживается низким уровнем услуг, обеспечиваемых отраслями инфраструктуры. Среди множества инфраструктурных объектов ключевая роль принадлежит транспортной инфраструктуре. Совмещение различных видов наземного транспорта в единую многофункциональную магистраль, особенно в малонаселенных регионах многолесной зоны России, позволит повысить эффективность инвестиций в развитие дорожно-транспортной инфраструктуры и комфортность дорог для проживающего в регионе населения.

Ключевые слова: инфрасистема, отрасли инфраструктуры, дорожно-транспортная инфраструктура, многофункциональная дорога, шестой технологический уклад, синергетика

Ссылка для цитирования: Кожухов Н.И., Редькин А.К., Никитин В.В. Полномасштабное развитие транспортной инфраструктуры российских регионов – путь к решению основных социально-экономических проблем // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 38–42. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-38-42

Россия имеет самую большую в мире территорию и протяженность транспортных путей. Однако ни протяженность путей сообщения, ни, тем более, качество большинства транспортных магистралей не отвечают современным требованиям.

Особенно остро эта проблема проявляется в отдаленных от центра регионах. Незрелость целого ряда инфраструктурных отраслей, в особенности транспортной инфраструктуры, в так называемой сельской глубинке ведет ко все большему отставанию таких территорий по уровню социально-экономического развития от средних по стране показателей [1–3].

Учитывая, что около 69% территории России — земли лесного фонда и леса, не входящие в лесной фонд, легко представить, что именно здесь и находится проблемная зона, в которой расположены лесные поселения.

На интенсивно осваиваемых территориях (например, Ямало-Ненецкий и Ханты-Мансийский автономные округа) создаются крупные населенные пункты и центры по переработке добываемых полезных ископаемых. Однако и здесь значительную долю занимает территория, на которой размещены села и лесные поселки [4].

Таким образом, для большинства российских регионов остается актуальной проблема интенсивного развития транспортной инфраструктуры, которая является частью единой инфрасистемы как в национальном, так и в региональном масштабе (рис. 1).

В условиях реального функционирования евразийского экономического пространства формирование и ускоренное развитие национальной

инфрасистемы инновационного типа — приоритетные задачи [5–8].

Как ни парадоксально это выглядит, но до сих пор можно видеть, как неэффективно, в том числе и за счет устаревшего ведомственного подхода, строятся и затем содержатся и сезонные (например, в зимний период — «снежные») дороги, и дороги постоянного действия (лесохозяйственного или лесопромышленного назначения, для обслуживания нефтегазовых промыслов и других целей). Нередко такие дороги расположены практически параллельно, на небольшом расстоянии друг от друга. Движение транспортных средств по этим дорогам, как правило, не интенсивное, поэтому средства на их содержание расходуются неэффективно.

Так как дорожно-транспортная инфраструктура является принципиально важным связующим звеном всех отраслей единой инфрасистемы (см. рис. 1), очевидно, что она является ключевой частью данной системы, обладающей синергетическим эффектом [4].

Предложения по проектированию и строительству автомобильных дорог, учитывающие интересы всех потенциальных пользователей и прежде всего — населения, проживающего на конкретной территории, высказывались неоднократно [2–8]. В работе [7] представлена конструкция верхнего строения дороги, при котором возможно использование железнодорожного, автомобильного и гусеничного транспорта. На рис. 2 приводится строение предлагаемого для такой дороги покрытия. При этом комфортность передвижения обеспечивается не только для пешехода, но и для тех, кто передвигается на велосипеде или мотоцикле. Для жителей многих субъектов Российской

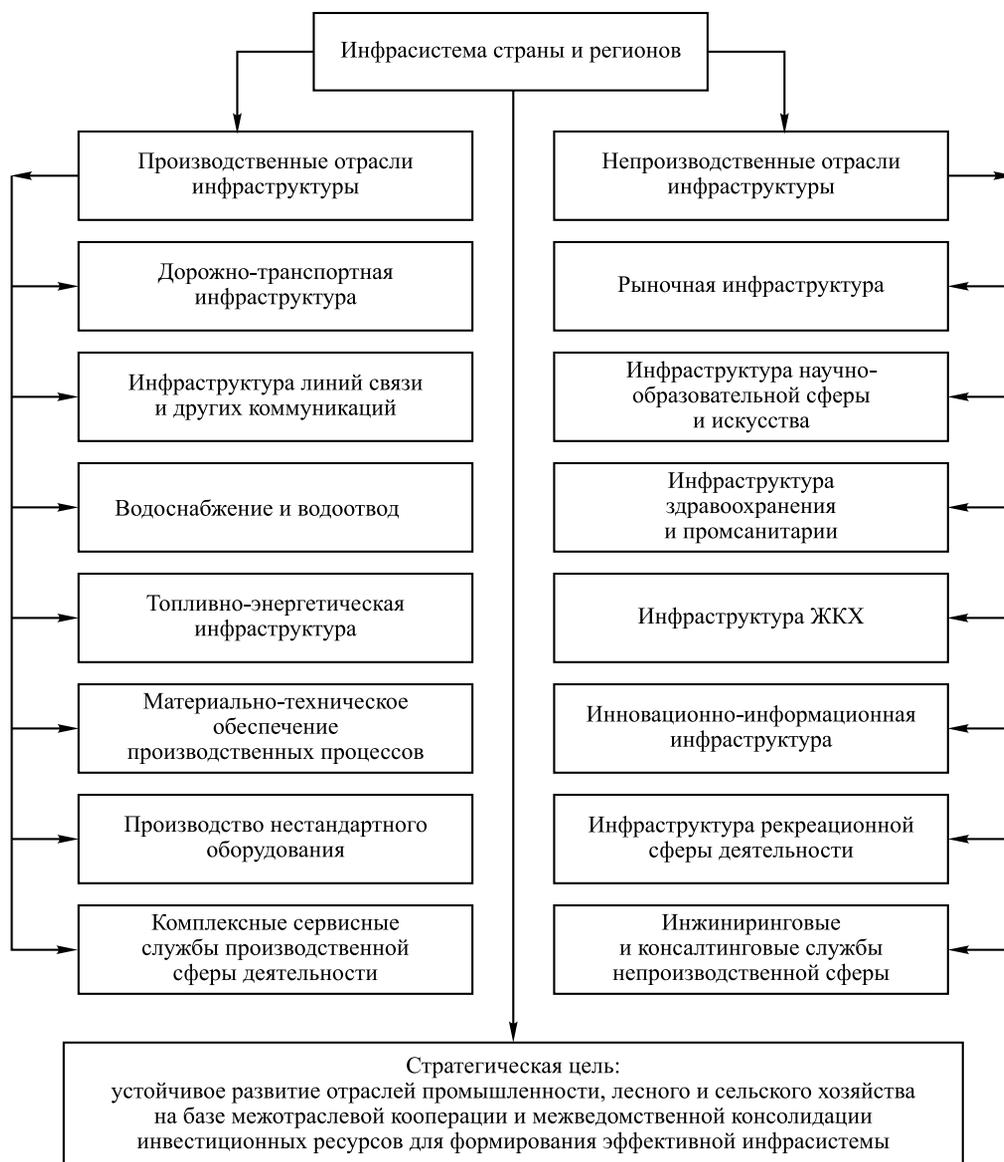


Рис. 1. Инфрасистема инновационного типа
Fig. 1. Innovative type infrastructure

Федерации, расположенных на севере европейской части России, в Уральском, Сибирском и Дальневосточном федеральных округах, такие способы передвижения (по шпалам и обочинам железнодорожных путей) не редкость [7].

Подобного рода многофункциональная дорога наиболее эффективно может быть использована в многолесной зоне России, где плотность населения невелика, интенсивность движения транспорта низкая, но ведутся геологоразведочные работы, планируется освоение открываемых месторождений полезных ископаемых [8–10]. На упомянутый выше вариант многофункциональной дороги (верхнее строение) получен патент на полезную модель [8].

Экономический и социальный эффект данного строения дороги достигается за счет следующих факторов [7]:

- прокладывается только одно земляное полотно;
- более рационально расходуется щебень (гравий): не только для передачи нагрузки на полотно, но и для выравнивания покрытия;
- сокращаются расходы на строительство мостов, так как для железной дороги и автодороги используется один и тот же мост;
- местные жители (особенно в малонаселенных районах и при отсутствии автодорог) могут использовать данное покрытие для поездок и хождения, что улучшает условия жизни и увеличивает потребность в транспортных средствах;
- в случае возникновения чрезвычайной ситуации появляется возможность оперативной переброски специальной техники и людей в обе стороны;
- создаются условия для закрытого размещения линий связи, электроэнергетики и теплоснабжения;

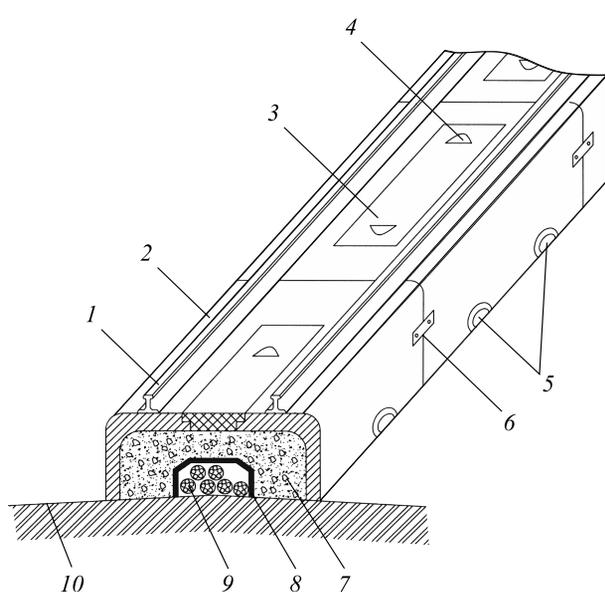


Рис. 2. Предлагаемое дорожное покрытие (толщина дорожного полотна не превышает действующий размер): 1 — рельс; 2 — короб; 3 — крышка; 4 — скоба на шарнирах; 5 — дренажные отверстия; 6 — соединительное звено для коробов; 7 — щебень или гравий (обеспечивает ровность поверхности за счет регулярной подготовки); 8 — кожух для линий связи и энергетики; 9 — кабель (провод); 10 — земляное полотно

Fig. 2. The suggested road surface (the thickness of the roadway does not exceed the actual size): 1 — rail; 2 — box; 3 — cover; 4 — the bracket on the hinges; 5 — drainage holes; 6 — connecting link for boxes; 7 — crushed stone or gravel (ensures smoothness of the surface due to regular preparation); 8 — casing for communication and power lines; 9 — cable (wire); 10 — earthwork

– строительство многофункциональных дорог при освоении месторождений полезных ископаемых, а также для аграрных и лесных поселков сближает город с деревней и селом;

– отсутствие сезонных ограничений, в частности ограничений нагрузки на ось автомобилей в период весенней и осенней распутицы, увеличивает интенсивность транспортного потока;

– при необходимости предлагаемая дорога может использоваться и как шоссе (без рельсов), и как рельсовая.

В документе [11] достаточно четко выделена роль интенсивного развития дорожно-транспортной инфраструктуры. Очевидно, что в условиях перехода России к шестому технологическому укладу ускоренное решение этой общенациональной проблемы, которая обусловлена не только огромной протяженностью территории, но и суровым природно-климатическими факторами, является приоритетной и жизненно важной задачей [4].

С помощью междисциплинарных научных подходов и, в частности, теории самоорганизации, или синергетики, как основы шестого техно-

логического уклада, определившего главный вектор инновационного развития через когнитивные и социальные технологии, биотехнологии, новое природопользование, нанотехнологии и т. д., выявлена необходимость формирования комфортной среды в любом регионе страны как для проживающего там населения, так и для бизнес-структур. Очевидно, что базовой инфраструктурной отраслью единой инфрасистемы является дорожно-транспортная составляющая.

Без этой ключевой системы, созданной и функционирующей в соответствии с требованиями XXI в., невозможно решить главные социально-экономические проблемы российских регионов, как невозможно и добиться повышения уровня конкурентоспособности страны по основным показателям мирового хозяйства.

Социально-экономический эффект проекта многофункциональной дороги [7, 8] будет обеспечиваться по многим направлениям. Среди них:

– инвестиционный синергизм как результат аккумулирования инвестиционных ресурсов нескольких ведомств, отраслей, фирм;

– финансово-оперативный синергизм, возникающий за счет перераспределения финансовых потоков, возможностей более эффективного распределения накладных расходов, а также использования основных средств, совместного проведения проектно-изыскательских работ;

– синергизм кооперации при создании альянсов с разными компаниями различных ведомств;

– синергизм управления при использовании знаний и опыта руководителей различных отраслей и ведомств, совместного обучения персонала;

– общелогистический синергизм за счет координации снабженческо-сбытовой, информационно-коммуникационной, диспетчерской и других логистических подсистем.

При современном уровне оснащения транспортных средств навигационным оборудованием системы глобального позиционирования управление транспортным потоком на многофункциональных транспортных магистралях не представляет особых трудностей. Даже по ориентировочным подсчетам, экономия от внедрения многофункциональных дорог, полученная как за счет строительства и содержания таких путей транспорта, так и за счет синергетического эффекта при их использовании, составит 2,3... 2,5 млн рублей в год на один километр дороги.

Список литературы

- [1] Кожухов Н.И. Формирование инфраструктурных кластеров в многолесной зоне РФ в интересах освоения регионального экономического пространства // Лесотехнический журнал, 2014. № 4 (16). С. 301–309.

- [2] Кожухов Н.И. Рациональная организация регионального экономического пространства — путь повышения эффективности освоения агролесного потенциала и устойчивого развития территорий // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2015. № 6. С. 82–86.
- [3] Кожухов Н.И., Кожухова Л.И. Организация экономического пространства региона для сбалансированного развития и размещения бизнес-структур лесного сектора и смежных отраслей // Сб. тр. РАЕН. М.: РАЕН, 2016. С. 103–107.
- [4] Кожухов Н.И., Бемманн А., Беспаленко Р.О. Инновационное развитие российских регионов на этапе перехода к шестому технологическому укладу // Сб. тр. РАЕН. М.: РАЕН, 2017. С. 14–19.
- [5] Проблемы использования лесов Московского региона в начале XXI столетия / С.А. Коротков, В.А. Макуев, М.В. Лопатников, В.В. Никитин, А.В. Сиротов, Л.В. Стоноженко // Бюллетень Университета Трансильвании в Брашове. Сер. II: Лесное и сельское хозяйство, лесная промышленность, 2016. Т. 9 (58). № 2. С. 17–24.
- [6] Лесные дороги: Справочник // под ред. Э.О. Салминена. СПб.: Лань, 2012. 494 с.
- [7] Запруднов В.И., Редькин А.К., Найман В.С., Ширнин Ю.А. Многофункциональная дорога // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2014. Т. 18. № 2. С. 116–119.
- [8] Верхнее строение дороги. Пат. на полезную модель 113271 Российская Федерация. 2012, бюл. № 4.
- [9] Кожухов Н.И., Савицкий А.А. Моделирование процессов межотраслевой кооперации в ЛПК и смежных отраслях в сфере инновационной деятельности // Экономика и предпринимательство, 2016. № 3. Ч. 2. С. 137–143.
- [10] Программа определения прочности дорожных покрытий лесовозных дорог / Д.М. Левушкин. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 201261903; правообладатель ФГБОУ ВПО «МГУЛ»; зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 27.06.2012.
- [11] Стратегия 2020. Новая модель роста — новая социальная политика. URL: <http://www.2020.strategy.ru/>

Сведения об авторах

Кожухов Николай Иванович — д-р экон. наук, академик РАН, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), kozuhov@mgu.ac.ru

Редькин Анатолий Константинович — д-р техн. наук, академик РАЕН, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), redkin@mgu.ac.ru

Никитин Владимир Валентинович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), nick@mgu.ac.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2017 г.

FULL-SCALE DEVELOPMENT OF THE TRANSPORT INFRASTRUCTURE OF THE RUSSIAN REGIONS IS THE WAY TO SOLVE THE MAIN SOCIAL AND ECONOMIC PROBLEMS

N.I. Kozhukhov, A.K. Red'kin, V.V. Nikitin

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

kozhukov@mgul.ac.ru

Socio-economic development of Russian subjects and regions situated far from the federal center is reduced by the low level of services offered by infrastructure industry branches. Among the variety of infrastructure objects the key part belongs to transport infrastructure. The combination of different types of land transport into the united multifunctional arterial roads provides the effective rising of investments to the transport infrastructure, especially in sparsely populated areas of heavily forested areas of the country. At the same time, this gives the possibility of social standard of living and comfort uprising for the regional population.

Keywords: infrasystem, infrastructure branches, transport infrastructure, multifunctional road, sixth technological mode, synergy

Suggested citation: Kozhukhov N.I., Red'kin A.K., Nikitin V.V. *Polnomasshtabnoe razvitiye transportnoy infrastruktury rossiyskikh regionov – put' k resheniyu osnovnykh sotsial'no-ekonomicheskikh problem* [Full-scale development of the transport infrastructure of the Russian regions is the way to solve the main social and economic problems] *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 38–42. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-38-42

References

- [1] Kozhukhov N.I. *Formirovaniye infrastrukturnykh klasterov v mnogolesnoy zone RF v interesakh osvoeniya regional'nogo ekonomicheskogo prostranstva* [Infrastructure clusters formation at richly wooded area of the Russian Federation for regional economic area effective development]. *Voronezh, Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forest Technical Journal], 2014, v. 4, no. 4 (16), pp. 301–309.
- [2] Kozhukhov N.I. *Ratsional'naya organizatsiya regional'nogo ekonomicheskogo prostranstva – put' povysheniya effektivnosti osvoeniya agro lesnogo potentsiala i ustoychivogo razvitiya territoriy* [Rational organization of regional economic area as a way to enhance the effectiveness of agro-forest territory potential use] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2015, no. 6, pp. 82–86.
- [3] Kozhukhov N.I., Kozhukhova L.I. *Organizatsiya ekonomicheskogo prostranstva regiona dlya sbalansirovannogo razvitiya i razmeshcheniya biznes-struktur lesnogo sektora i smezhnykh otrasley* [Regional economic space organization for balanced development and forest connected business entities location] *Russian Natural Sciences Academy*. Moscow: MSFU, 2016, pp. 103–107.
- [4] Kozhukhov N.I., Bemmann A., Bepalenko R.O. *Innovatsionnoye razvitiye rossiyskikh regionov na etape perekhoda k shestomu tekhnologicheskomu ukkladu* [Russian regions innovative development on the way towards sixth technological mode] *Russian Natural Sciences Academy*. Moscow: MSFU, 2017, pp. 14–19.
- [5] Korotkov S.A., Makuev V.A., Lopatnikov M.V., Nikitin V.V., Sirotov A.V., Stonozhenko L.V. *Problemy ispol'zovaniya lesov Moskovskogo regiona v nachale XXI stoletiya* [Forest-Use Issues in Moscow Region at the Beginning of 21st Century] *Bulletin of the Transilvania University of Braşov, ser. II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2016, v. 9 (58), no. 2, pp. 17–24.
- [6] *Lesnye dorogi* [Forest roads. Edited by Salminen E.O.] Saint Petersburg: Fallow Deer publishing house, 2012, 494 p.
- [7] Zaprudnov V.I., Red'kin A.K., Nayman V.S., Shirin Yu.A. *Mnogofunktional'naya doroga* [Multifunctional Road] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, no. 2, 2014, pp. 116–119.
- [8] Patent RF na poleznuyu model' № 113271. *Verkhnee stroeniye dorogi* [Russian Federation Utility Model Patent № 113271. Road superstructure]. *Bull.* no. 4, 10.02.2012.
- [9] Kozhukhov N.I., Savitskiy A.A. *Modelirovaniye protsessov mezhotraslevoy kooperatsii v LPK i smezhnykh otraslyakh v sfere innovatsionnoy deyatel'nosti* [Inter-industry processes of forest sector and aligned branches simulation in innovative activity sphere] *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economy and Entrepreneurship Journal], 2016, no. 3, pp. 137–143.
- [10] Levushkin D.M. *Programma opredeleniya prochnosti dorozhnykh pokrytiy lesovoznykh dorog* [Computer software State registration certificate № 2012615903. Program for forest motor road wearing course strength calculation. Copyright Levushkin D.M.] *Moscow State Forest University*. Registered on 27.06.2012.
- [11] *Strategiya 2020. Novaya model' rosta – novaya sotsial'naya politika* [Strategy 2020. New social policy for the new model of growth]. Available at: <http://www.2020.strategy.ru/>

Authors' information

Kozhukhov Nikolay Ivanovich — Dr. Sci. (Econ.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor of BMSTU (Mytishchi branch), kozhukov@mgul.ac.ru

Red'kin Anatoliy Konstantinovich — Dr. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor of BMSTU (Mytishchi branch), redkin@mgul.ac.ru

Nikitin Vladimir Valentinovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of BMSTU (Mytishchi branch), nick@mgul.ac.ru

Received 27.06.2017

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НА СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПОСТОЯННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАНА И ПРОФИЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СОСТОЯНИЯХ ПОВЕРХНОСТИ ДОРОГИ

А.В. Скрыпников¹, В.Г. Козлов², Д.В. Ломакин³, Е.Ю. Микова⁴

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», 394036, Россия, г. Воронеж, пр-т Революции, д. 19

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», 394087, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1

³ФГКОУ ВО «Воронежский институт Министерства внутренних дел Российской Федерации», 394065, г. Воронеж, пр-т Патриотов, д. 53

⁴Сыктывкарский лесной институт (филиал ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»), 167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Ленина, д. 39

skrypnikovvsafe@mail.ru

При проектировании трассы лесных автомобильных дорог необходимо принимать во внимание постоянные параметры плана и профиля с учетом различного состояния поверхности дороги для определения оптимальной скорости движения. При наличии на покрытии трассы лесных автомобильных дорог снега следует учитывать характеристики изменения коэффициента сцепления и сопротивления качению в зависимости от высоты снежного покрова и его плотности. Анализ выполненных расчетов показывает, что действующие нормы проектирования дорог обеспечивают расчетную скорость движения на кривых только при мокром и чистом покрытии. На мокром загрязненном покрытии, при наличии гололеда, рыхлого снега или снежного наката расчетные скорости обеспечены не будут. Эти обстоятельства необходимо прогнозировать и учитывать при проектировании трассы лесных автомобильных дорог в районах с длительными переходными и зимними периодами, где для обеспечения расчетной скорости движения необходимо предусматривать увеличение радиусов кривых, а также меры по защите покрытия от попадания грязи, снега и гололеда и по немедленному их удалению с покрытия. Применение современной вычислительной техники при проектировании трассы лесных автомобильных дорог позволяет разработать методы оптимизации трассы с учетом постоянных параметров плана и профиля для различных состояний поверхности дороги.

Ключевые слова: дорога, трасса, методы, оптимизация, профиль, скорость движения

Ссылка для цитирования: Скрыпников А.В., Козлов В.Г., Ломакин Д.В., Микова Е.Ю. Оценка влияния на скорость движения постоянных параметров плана и профиля при различных состояниях поверхности дороги // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 43–49. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-43-49

К постоянным параметрам плана и профиля дорог, оказывающим влияние на максимальную допустимую или возможную скорость движения, относятся продольные уклоны и радиусы кривых в плане.

При проектировании дорог максимальные продольные уклоны назначаются исходя из расчетной скорости движения лесовозного автопоезда на подъеме, когда двигатель работает на полную мощность [1, 2]. При этом не учитывается состояние лесовозных автомобильных дорог в период снегопада, метели и гололеда, когда происходит увеличение сопротивления движению и снижение сцепных качеств покрытия [3, 4].

Наличие снежных отложений на поверхности дорожного покрытия приводит к изменению взаимодействия в зоне контакта колеса автомобиля с дорогой: одновременно снижается сцепление с покрытием и повышается сопротивление качению.

Цель работы

Целью работы является анализ изменения коэффициента сцепления и сопротивления качению

в зависимости от высоты снежного покрова и его плотности для выявления обеспечения расчетной скорости движения при проектировании трассы лесных автомобильных дорог в районах с длительными переходными и зимними периодами.

Результаты и обсуждение

Для определения возможной скорости движения при наличии снега на покрытии необходимо иметь характеристики изменения коэффициента сцепления и сопротивления качению в зависимости от высоты снежного покрова и его плотности.

Одним из первых в нашей стране исследованиями изменения сцепных качеств покрытий в зимнее время занимался М.С. Замахаяев [2, 5]. Им в последующем был выполнен целый ряд работ по изучению сцепных качеств и сопротивления качению в заснеженном состоянии [6]. На основании обобщения выполненных исследований определены зоны изменений коэффициентов сцепления ϕ и коэффициентов сопротивления качению f в зависимости от толщины слоя неуплотненного снега на покрытии (рис. 1).

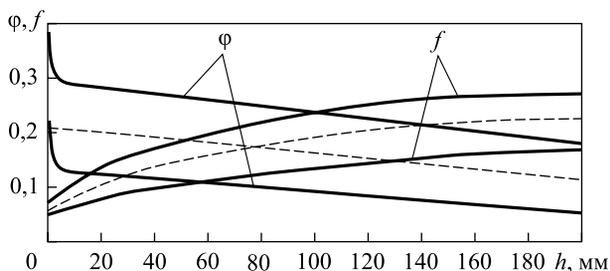


Рис. 1. Зависимость коэффициента сцепления φ и коэффициента сопротивления качению f от толщины слоя неуплотненного снега на покрытии

Fig. 1. The dependence of the adhesion coefficient φ and the rolling resistance coefficient f on the thickness of unconsolidated snow layer on the coating

Анализ кривых показывает, что величина коэффициента сцепления φ на заснеженном покрытии колеблется от 0,06 до 0,3, а величина коэффициента сопротивления качению f — от 0,02 до 0,3 в пределах изменения толщины рыхлого слоя снега на покрытии от 0 до 200 мм.

Из теории автомобиля [7, 8] известно, что предельно возможным случаем движения автомобиля является неравенство

$$T_{\text{сц}} \geq \Sigma P \Psi,$$

т. е. сцепная сила должна быть больше суммы дорожных сопротивлений

$$T_{\text{сц}} = mQ\varphi,$$

где m — коэффициент сцепного веса (для легковых автомобилей 0,5–0,05, для грузовых с полной нагрузкой 0,65–0,75);

Q — общая масса автомобиля, кг;

φ — коэффициент сцепления.

Для случая равномерного движения без учета сопротивления воздуха на малых скоростях сумма дорожных сопротивлений

$$\Sigma P \Psi = Q(f \pm i),$$

где $\Psi = f \pm i$, тогда граничным условием движения будет

$$Q(f \pm i) \leq mQ\varphi,$$

или

$$\Psi = m\varphi, \quad \varphi = \frac{1}{m} \Psi.$$

Подставив значения m для легкового автомобиля на горизонтальном участке дороги $i = 0$, получим $\Psi = f = (0,6 + 0,55)\varphi$.

Это означает, что существует такая толщина снежного слоя (ее величина зависит от типа автомобиля и характеристики снега), при которой вся сцепная сила расходуется на преодоление сопротивления снега качению и движение автомобиля становится невозможным, какими бы ди-

намическими качествами автомобиль не обладал. Еще раньше эти условия наступают на подъемах и кривых в плане, где возникает дополнительное сопротивление движению. Для определения возможных скоростей движения рассмотрим уравнение мощности баланса автомобиля [9, 10] и решим его относительно скорости:

$$N_e = \Psi \frac{QV}{270\eta_m} + \frac{kFV^3}{3500\eta_m} \pm \frac{\delta Q}{270\eta_m} jv,$$

где N_e — мощность двигателя, л. с.;

Ψ — коэффициент суммарного сопротивления дороги;

Q — вес автомобиля с нагрузкой, кгс;

V — скорость движения, км/ч;

η_m — механический КПД трансмиссии ($\eta_m = 0,85-0,9$);

k — коэффициент обтекаемости;

F — площадь лобовой поверхности автомобиля, м²;

δ — коэффициент инерции вращающихся масс;

j — ускорение автомобиля, м/с².

Для практических расчетов преобразуем управление мощностного баланса:

$$\Psi \frac{QV}{270\eta_m} = N_e - \frac{kFV^3}{3500\eta_m}.$$

В этом случае в правой части уравнения остается избыточная мощность двигателя, которая может расходоваться на преодоление дорожного сопротивления и разгон автомобиля. Тогда скорость движения может быть определена из следующего уравнения:

$$V = \frac{N_e - \frac{kFV^3}{3500\eta_m}}{\Psi \frac{Q}{210\eta_m}},$$

а коэффициент обеспеченности расчетной скорости

$$K_{\text{pc}} = \frac{\Psi_{\text{э}} \left(N_e - \frac{kFV_{\text{ф max}}^3}{3500\eta_m} \right)}{\Psi_{\text{ф}} \left(N_e - \frac{kFV_{\text{ф max}}^3}{3500\eta_m} \right)}.$$

Подставив характеристики эталонных условий и параметры расчетного легкового автомобиля ВАЗ-2110, получим

$$K_{\text{pc}} = \frac{\Psi_{\text{э}} \left(N_e - \frac{0,072v_{\text{max}}^3}{3150} \right)}{\Psi_{\text{ф}} (N_e - 40)}.$$

В расчетах необходимо учесть также снижение коэффициента сцепления и повышение коэффи-

циента сопротивления качению при увеличении скорости движения [9]. Значение коэффициента сопротивления качению определяем из следующего уравнения:

$$f = f_{20} + \frac{\tau}{2} \Delta v,$$

где f_{20} — сопротивление качению при скорости до 20 км/ч;

τ — коэффициент нарастания сопротивления качению;

Δv — прирост скорости движения свыше 20 км/ч.

По данным [2, 5], величина коэффициента τ определена в среднем для ведущих и ведомых полос. Тогда $f_{л} = f_{20} + 0,00025\Delta v$ для легковых автомобилей, $f_{л} = f_{20} + 0,00020\Delta v$ для грузовых автомобилей.

Зависимость коэффициента сцепления от скорости на заснеженном покрытии и при гололеде получена в процессе натуральных измерений [2] и может быть в общем виде аппроксимирована уравнением

$$\varphi_y = \varphi_0 - xv,$$

где φ_0 — условный коэффициент сцепления при $v = 0$.

Средние величины φ_0 и x могут быть приняты равными: для снежного покрова — $\varphi_0 = 0,38$; $x = 0,0033$; для гололеда — $\varphi_0 = 0,20$; $x_1 = 0,0323$.

Для легкового автомобиля движение возможно при $\Psi = 0,5\varphi$. Из этого условия можно определить максимально возможную скорость по величине сцепления:

$$v = \frac{\varphi_0 - 2\Psi}{x} \text{ км/ч для снежного наката;}$$

$$v = \frac{\varphi'_0 - 2\Psi}{x} \text{ км/ч для гололеда.}$$

Для грузового автомобиля «Урал-4320», у которого распределение веса по осям характеризуется

$$\text{коэффициентом } m = 0,73, \text{ получаем: } v = \frac{\varphi_0 - 1,37\Psi}{x}$$

$$\text{для снежного наката; } v = \frac{\varphi'_0 - 1,37\Psi}{x} \text{ для гололеда.}$$

Результаты расчетов представлены на рис. 2 и 3 ($\Psi = f + i$).

Анализ расчетов дает основание сделать вывод, что при толщине слоя снега на покрытии от 2 до 20 мм в зависимости от температуры и влажности, которые определяют φ и f , условия движения на дороге становятся трудными, а коэффициент обеспеченности расчетной скорости снижается до 0,75. Более того, уже при толщине слоя снега более 30 мм могут наблюдаться остановки легковых автомобилей на горизонтальных участках дорог из-за буксования, а при толщине

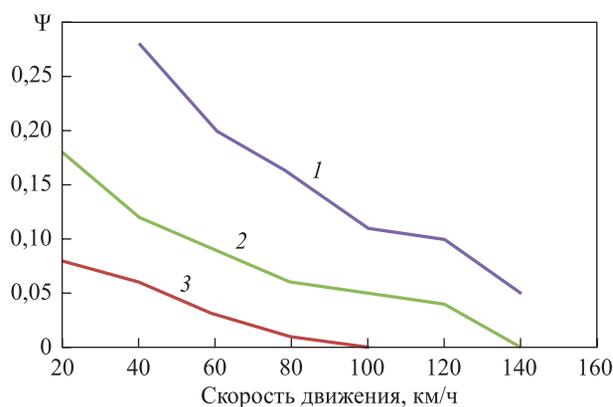


Рис. 2. Зависимость скорости V_a автомобиля VAZ-2110 от суммы дорожных сопротивлений Ψ : 1 — по динамическим характеристикам автомобиля, $V_a = \frac{N_e - \frac{m^5 v^2}{3500\eta_m}}{\Psi \frac{Q_a}{210\eta_m}}$;

2 — по сцепным качествам и сопротивлению наличия снега на покрытии, $V_a = \frac{0,38 - 2\Psi}{0,0033}$; 3 — при гололеде, $V_a = \frac{0,20 - 2\Psi}{0,0023}$

Fig. 2. Dependence of the speed V_a of the car VAZ-2110 on the sum of the road resistance Ψ : 1 — according to the dynamic characteristics of the car, $V_a = \frac{N_e - \frac{m^5 v^2}{3500\eta_m}}{\Psi \frac{Q_a}{210\eta_m}}$;

2 — on the coupling properties and the presence resistance snow on the surface, $V_a = \frac{0,38 - 2\Psi}{0,0033}$; 3 — for icy roads, $V_a = \frac{0,20 - 2\Psi}{0,0023}$

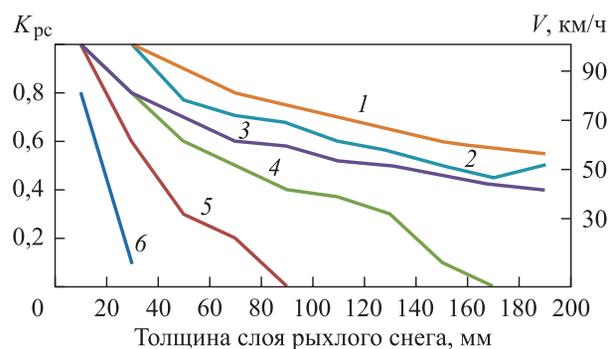


Рис. 3. Зависимость скорости V движения легкового автомобиля от толщины слоя рыхлого снега на покрытии: 1, 2, 3 — скорости, возможные по динамическим качествам автомобиля при $f_{\min}, f_{cp}, f_{\max}$; 4, 5, 6 — скорости, возможные по соотношению φ_{\min} и f_{\max}, φ_{cp} и f_{cp}, φ_{\max} и f_{\min} соответственно

Fig. 3. Dependence of the speed V of the car's movement on the thickness of the layer of loose snow on the cover: 1, 2, 3 — the speeds possible for the dynamic qualities of the car at $f_{\min}, f_{cp}, f_{\max}$; 4, 5, 6 — the speeds possible with respect to the ratio φ_{\min} and f_{\max}, φ_{cp} and f_{cp}, φ_{\max} and f_{\min} respectively

более 80 мм такие остановки приобретут массовый характер. Современные лесовозные автопоезда могут двигаться при толщине слоя рыхлого снега от 80 до 120 мм, но скорость движения при этом будет очень низкой. Если исходить из допустимой скорости грузовых автомобилей 60 км/ч, толщина слоя рыхлого снега на покрытии не должна превышать 8...20 мм. Следовательно, при проектировании элементов плана, поперечного и продольного профиля дорог, а также снегозащитных сооружений надо исходить из того, что допустимый слой рыхлого снега на горизонтальных участках дорог не должен превышать 20 мм.

На рис. 4 приведена зависимость скорости расчетного грузового автомобиля от величины продольного уклона и состояния покрытия (сумма дорожных сопротивлений $\Psi = f + i$).

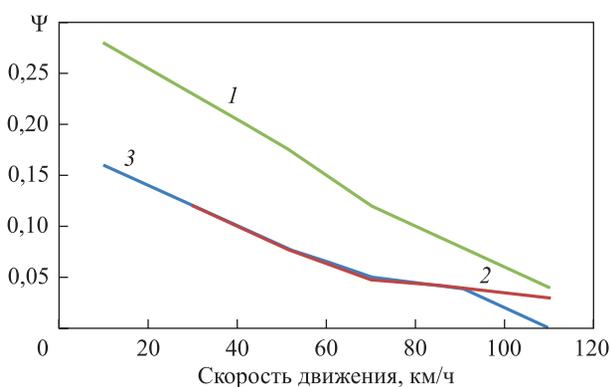


Рис. 4. Зависимость скорости V_a грузового автомобиля от суммы дорожных сопротивлений: 1 — по динамическим характеристикам автомобиля, $V_a = \frac{N_e - \frac{m^5 v^2}{3500 \eta_m}}{\Psi \frac{Q_a}{210 \eta_m}}$; 2 — по сцепным качествам и сопротивлению наличия снега на покрытии, $V_a = \frac{0,38 - 1,37 \Psi}{0,0033}$; 3 — при гололеде, $V_a = \frac{0,20 - 1,37 \Psi}{0,0023}$

$$V_a = \frac{N_e - \frac{m^5 v^2}{3500 \eta_m}}{\Psi \frac{Q_a}{210 \eta_m}}$$

$$V_a = \frac{0,38 - 1,37 \Psi}{0,0033}$$

$$V_a = \frac{0,20 - 1,37 \Psi}{0,0023}$$

Fig. 4. Dependence of the vehicle speed V_a on the sum of the road resistance: 1 — according to the dynamic characteristics of the car, $V_a = \frac{N_e - \frac{m^5 v^2}{3500 \eta_m}}{\Psi \frac{Q_a}{210 \eta_m}}$; 2 — on coupling properties and resistance to snow on the cover, $V_a = \frac{0,38 - 1,37 \Psi}{0,0033}$; 3 — for icy roads, $V_a = \frac{0,20 - 1,37 \Psi}{0,0023}$

$$V_a = \frac{N_e - \frac{m^5 v^2}{3500 \eta_m}}{\Psi \frac{Q_a}{210 \eta_m}}$$

$$V_a = \frac{0,38 - 1,37 \Psi}{0,0033}$$

$$V_a = \frac{0,20 - 1,37 \Psi}{0,0023}$$

Анализ графиков показывает, что при толщине слоя рыхлого снега 2...5 мм или при наличии уплотненного слоя снега на покрытии нормальные условия движения обеспечиваются только на подъемах с уклоном 1...3°. На всех остальных

участках расчетная скорость движения не обеспечивается. Это значит, что максимальные продольные уклоны, предусмотренные СНиП [11], не рассчитаны на условия движения в зимнее время. При минимальных значениях f или максимальных значениях f остановки движения легковых автомобилей на подъемах с уклонами в 3 % будут наблюдаться при толщине слоя снега 40...50 мм, а с уклонами 5 % — при 20...30 мм [8-11].

Анализ полученных результатов (рис. 5) показывает, что расчетная скорость движения даже в эталонных условиях погоды обеспечивается только на спусках не круче 30 %. При всех других состояниях покрытия и погоды расчетная скорость движения на спусках без специальных мероприятий по повышению сцепных качеств или увеличения расчетной видимости не может быть обеспечена.

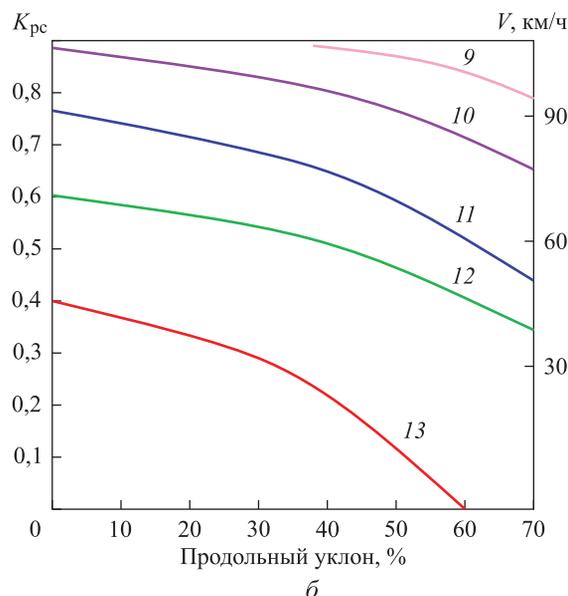
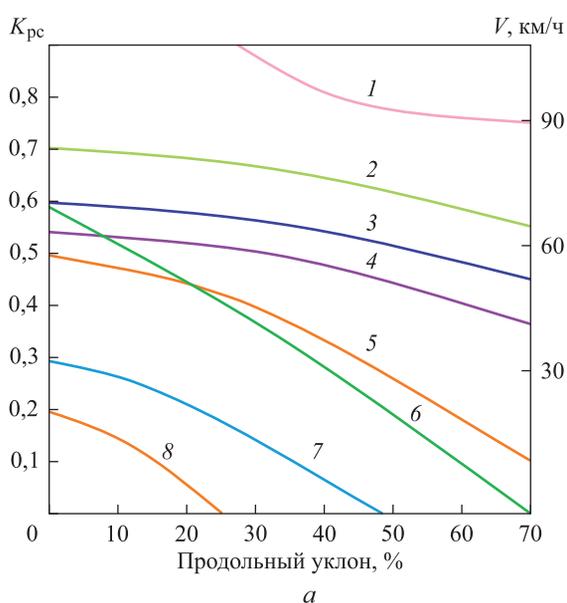


Рис. 5. (начало).

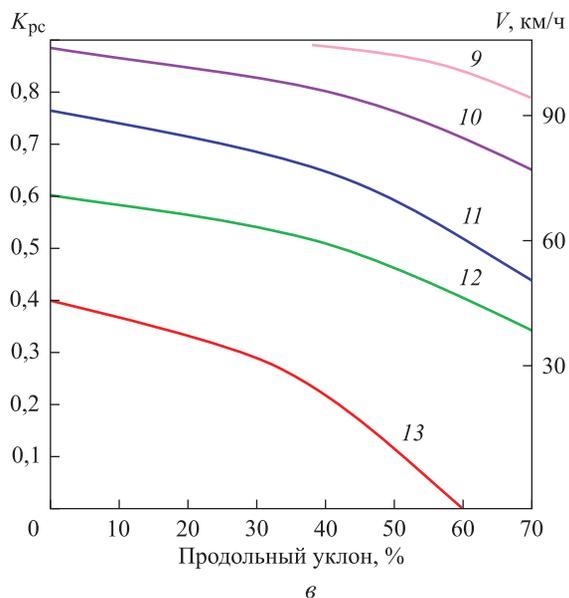


Рис. 5 (окончание). Влияние продольного уклона и состояния покрытия на расчетную скорость движения: *a* — легкового автомобиля ВАЗ-2110 на подъеме; *б* — лесовозного автопоезда «Урал-4320»; *в* — легкового автомобиля ВАЗ-2110 на спуске; 1 — $f=0,03$; 2 — $h=2...5$ мм, $f=0,02$; 3 — $f=0,04$; 4 — $h=20$ мм, $f=0,05$; 5 — $h=40$ мм, $f=0,12$; 6 — $h=30$ мм, $f=0,15$; 7 — $h=100$ мм, $f=0,17$; 8 — $f=0,09$; 9 — $\varphi=0,5$; 10 — $\varphi=0,4$; 11 — $\varphi=0,3$; 12 — $\varphi=0,2$; 13 — $\varphi=0,1$ (1, 9, 10 — сухое чистое покрытие; 2, 4–7 — слой рыхлого снега; 3 — уплотненный снег; 8, 13 — гололед; 11 — мокрое покрытие; 12 — снежный накат)

Fig. 5. Influence of the longitudinal slope and the state of the coating on the calculated speed of movement: *a* — car VAZ-2110 on the rise; *б* — logging trailer Ural-4320; *в* — the VAZ-2110 passenger car on the descent; 1 — $f=0.03$; 2 — $h=2...5$ mm, $f=0.02$; 3 — $f=0.04$; 4 — $h=20$ mm, $f=0.05$; 5 — $h=40$ mm, $f=0.12$; 6 — $h=30$ mm, $f=0.15$; 7 — $h=100$ mm, $f=0.17$; 8 — $f=0.09$; 9 — $\varphi=0.5$; 10 — $\varphi=0.4$; 11 — $\varphi=0.3$; 12 — $\varphi=0.2$; 13 — $\varphi=0.1$ (1, 9, 10 — dry pure coating, 2, 4–7 — layer of loose snow, 3 — compacted snow, 8, 13 — ice, 11 — wet coating, 12 — snow rolling)

На участках кривых в плане расчетная скорость движения при проектировании дорог обеспечивается выбором значения радиуса закругления и поперечного уклона выража с учетом коэффициента поперечного сцепления покрытия, а при выборе радиусов кривых расчет ведется на устойчивость автомобиля против заносов.

Существенным недостатком расчетов является то, что в них принимается во внимание только снижение коэффициента сцепления при увлажнении покрытия, но не учитывается изменение сцепных качеств при загрязненном покрытии, снежном накате и гололеде. Влияние этих факторов представлено на рис. 6, где величины поперечных уклонов выража приняты в соответствии со СНиП [11].

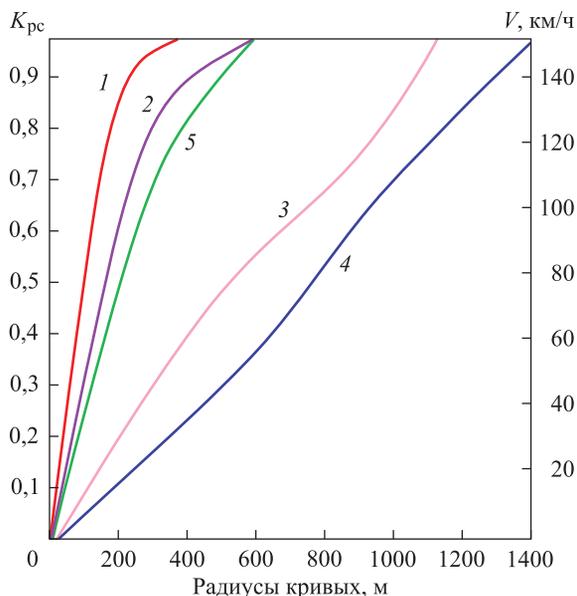


Рис. 6. Снижение расчетных скоростей на кривых в зависимости от состояния проезжей части

Fig. 6. Reduction speed standard on curves depending on the condition of the carriageway

Выводы

Анализ выполненных расчетов показывает, что действующие нормы проектирования дорог обеспечивают расчетную скорость движения на кривых только при мокром чистом покрытии. На мокром загрязненном покрытии, при наличии гололеда, рыхлого снега или снежного наката расчетные скорости обеспечены не будут. Эти обстоятельства необходимо учитывать при проектировании дорог в районах с длительными переходными и зимними периодами, где для обеспечения расчетной скорости движения необходимо предусматривать увеличение радиусов кривых, а также меры по защите покрытия от попадания грязи, снега и гололеда и по немедленному удалению их с покрытия.

Список литературы

- [1] Афоничев Д.Н., Сушков С.И., Бурмистров Д.В. Анализ прочностных характеристик дорожных конструкций в лесозаготовительных предприятиях // Успехи современной науки и образования, 2017. Т. 1. № 1. С. 77–81. URL: http://modernsciencejournal.org/release/2017/USNO_2017_1_tom.pdf
- [2] Козлов В.Г., Кондрашова Е.В., Скрыпников А.В., Скворцова Т.В. Моделирование транспортного потока на лесовозных автомобильных дорогах // Современные проблемы науки и образования, 2015. № 1–1. С. 432.
- [3] Афоничев Д.Н., Любавский Д.С. Моделирование движения автопоезда с управляемой пневматической подвеской // Техника в сельском хозяйстве, 2012. № 4. С. 23–25.
- [4] Руководство по оценке пропускной способности автомобильных дорог. Минавтодор РСФСР. М.: Транспорт, 1982. 88 с.

- [5] Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Ломакин Д.В., Логойда В.С. Методологическое обоснование особенностей проектирования трассы по методу опорных элементов // *Фундаментальные исследования*, 2016. № 12–1. С. 62–68.
- [6] Козлов В.Г., Кондрашова Е.В., Заболотная А.А., Скворцова Т.В. Модернизация имитационной системы процесса функционирования автомобильных дорог с использованием информационных технологий // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. № 1–1. С. 433.
- [7] Афоничев Д.Н. Математическая модель торможения автопоезда, учитывающая влияние воздушной среды // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*, 2012. № 2. С. 113–115.
- [8] Козлов В.Г., Журавлев И.Н., Кондрашова Е.В., Умаров М.М. Математическая модель статистической идентификации информационного обеспечения автомобильного транспорта // *Вестник Воронежского гос. ун-та инженерных технологий*, 2016. № 1 (67). С. 45–51.
- [9] Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. Mathematical Model of Statistical Identification of Car Transport Informational Provision // *J. Engineering and Applied Sciences*, 2017, v. 12, no. 2.
- [10] Афоничев Д.Н., Любавский Д.С. Допустимые скорости движения лесовозных автопоездов на кривых в плане // *Ресурсосберегающие и экологически перспективные технологии и машины лесного комплекса будущего: Матер. междунар. научн.-практ. конф., посв. 55-летию лесоинженерного факультета ВГЛТА. Воронеж: ВГЛТА, 2009. С. 237–241.*
- [11] СНиП 2-05-02–85. Автомобильные дороги. М.: Госстрой СССР, 1986. 56 с.

Сведения об авторах

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

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

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

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

Статья поступила в редакцию 22.08.2017 г.

ASSESSMENT OF THE IMPACT ON THE SPEED OF THE CONSTANT PARAMETERS OF THE PLAN AND PROFILE IN THE VARIOUS STATES OF THE ROAD SURFACE

A.V. Skrypnikov¹, V.G. Kozlov², D.V. Lomakin³, E.Yu. Mikova⁴

¹Voronezh state University of engineering technologies, Voronezh, st. Revolution, 19, Voronezh, 394036, Russia

²Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, st. Michurina, 1, Voronezh, 394087, Russia

³Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Prospect Patriotov, 53, Voronezh, 394065, Russia

⁴Syktvykar Forest Institute (branch) of the federal state budget education institution of higher education «St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov», st. Lenin, 39, Syktvykar, Republic of Komi, 167982, Russia

skrypnikovvsafe@mail.ru

In the alignment design of forest roads it is necessary to consider the influence of constant parameters of the plan and profile taking into account the different condition of the road surface, in order to define the optimum speed. In the presence of snow on the road, the characteristics of the change in the coefficient of adhesion and rolling resistance, depending on the height of the snow cover and its density, should be taken into account. Analysis of the calculations shows that the present design standards of roads provide the estimated speed for curves only when the coating is wet and clean. On a wet dirty surface, in the presence of ice, loose snow or snow setup design speed will not be secured. These circumstances must be predicted and considered when designing the route of forest roads in areas with a long winter and transitional periods, where to provide the estimated speed of movement it is necessary to provide the increase of the radii of curves, as well as measures to protect the cover from dirt, snow and ice, as well as measures for their immediate removal from the coating. The use of modern computer technology in the design of the forest road route allows us to develop methods for optimizing the route, taking into account the constant parameters of the plan and profile for different conditions of the road surface.

Keywords: road, route, methods, optimization, profile, speed

Suggested citation: Skrypnikov A.V., Kozlov V.G., Lomakin D.V., Mikova E.Yu. *Otsenka vliyaniya na skorost' dvizheniya postoyannykh parametrov plana i profilya pri razlichnykh sostoyaniyakh poverkhnosti dorogi* [Assessment of the impact on the speed of the constant parameters of the plan and profile in the various states of the road surface] *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 43–49.
DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-43-49

References

- [1] Afonichev D.N., Sushkov S.I., Burmistrov D.V. *Analiz prochnostnykh kharakteristik dorozhnykh konstruktсий v lesozagotovitel'nykh predpriyatiyakh* [Analysis of strength characteristics of road construction in forestry operations] Successes of modern science and education, 2017, v. 1, no. 1, pp. 77–81. Available at: http://modernsciencejournal.org/release/2017/USNO_2017_1_tom.pdf
- [2] Kozlov V.G., Kondrashova E.V., Skrypnikov A.V., Skvortsova T.V. *Modelirovanie transportnogo potoka na lesovoznykh avtomobil'nykh dorogakh* [Modeling of the traffic flow on logging highways] Modern problems of science and education, 2015, no. 1–1, p. 432.
- [3] Afonichev D.N., Lyubavskiy D.S. *Modelirovanie dvizheniya avtopoezda s upravlyaemoy pnevmaticheskoy podveskoy* [Modeling the movement of a road train with a controlled air suspension] *Tekhnika v sel'skom khozyaystve* [Engineering in Agriculture], 2012, no. 4, pp. 23–25.
- [4] *Rukovodstvo po otsenke propusknoy sposobnosti avtomobil'nykh dorog* [Guidelines for assessing the carrying capacity of highways]. Minavtodor RSFSR. Moscow: Transport Publ., 1982, 88 p.
- [5] Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Lomakin D.V., Logoyda V.S. *Metodologicheskoe obosnovanie osobennostey proektirovaniya trassy po metodu opornykh elementov* [Methodological substantiation of the features of the design of the route using the method of support elements] *Fundamental Research*, 2016, no. 12–1, pp. 62–68.
- [6] Kozlov V.G., Kondrashova E.V., Zabolotnaya A.A., Skvortsova T.V. *Modernizatsiya imitatsionnoy sistemy protsessa funktsionirovaniya avtomobil'nykh dorog s ispol'zovaniem informatsionnykh tekhnologiy* [Modernization of the simulation system of the process of functioning of motor roads using information technologies] *Modern problems of science and education*, 2015, no. 1–1, p. 433.
- [7] Afonichev D.N. *Matematicheskaya model' tormozheniya avtopoezda, uchityvayushchaya vliyaniye vozduшной sredy* [Mathematical model of braking of the road train, taking into account the influence of the air environment] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2012, no. 2, pp. 113–115.
- [8] Kozlov V.G., Zhuravlev I.N., Kondrashova E.V., Umarov M.M. *Matematicheskaya model' statisticheskoy identifikatsii informatsionnogo obespecheniya avtomobil'nogo transporta* [Mathematical model of statistical identification of information support of motor transport] *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2016, no. 1 (67), pp. 45–51.
- [9] Skrypnikov A.V., Dorokhin S.V., Kozlov V.G., Chernyshova E.V. *Mathematical Model of Statistical Identification of Car transport Informational Provision*. *J. Engineering and Applied Sciences*, 2017, v. 12, no. 2.
- [10] Afonichev D.N., Lyubavskiy D.S. *Dopustimye skorosti dvizheniya lesovoznykh avtopoezdov na krivykh v plane* [Admissible speeds of timber transport road trains on the curves in the plan] *Resursosberegayushchie i ekologicheski perspektivnye tekhnologii i mashiny lesnogo kompleksa budushchego: Mater. mezhdunar. nauchn.-prakt. konf., posv. 55-let. lesoinzhenernogo fakul'teta VGLTA*. [Resource-saving and ecologically perspective technologies and machines of the future forest complex: Mater. Intern. scientific-practical. conf., dedicated. 55 years. forestry faculty of VGLTA]. Voronezh: VGLTA Publ., 2009, pp. 237–241.
- [11] SNiP 2-05-02–85. *Avtomobil'nye dorogi*. [SNiP 2-05-02–85. Road.] Moscow: Gosstroy SSSR Publ., 1986, 56 p.

Authors' information

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

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

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

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

Received 22.08.2017

УДК 674.09

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-50-53

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОСНОВЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА СТЕНОВОГО КЛЕЕНОГО БРУСА

С.Н. Рыкунин, Н.В. Кривощёков

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

Приведен анализ технических условий предприятий по производству стенового клееного бруса из древесины хвойных пород. Дано предложение по использованию для производства стенового профилированного клееного бруса пиломатериалов двух групп качества с двумя вариантами их применения в изготовлении внешних (лицевых) и внутренних ламелей бруса. Приведен расчет затрат на пиломатериалы при производстве 1 м³ клееного стенового бруса. Показано, что для производства ламелей стенового клееного бруса следует не брать пиломатериалы определенного сорта или групп сортов по ГОСТ 8486–86, а заказывать у лесопильно-деревообрабатывающих предприятий пиломатериалы в соответствии с группой качества по техническим условиям на стеновой клееный брус. Результаты исследования доказывают, что использование пиломатериалов требуемого качества существенно уменьшает затраты на производство стенового клееного бруса.

Ключевые слова: пиломатериалы, стеновой клееный брус, технические условия, группы качества, коэффициент объемного выхода, затраты

Ссылка для цитирования: Рыкунин С.Н., Кривощёков Н.В. Влияние изменения параметров сосновых пиломатериалов на формирование качества стенового клееного бруса // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 50–53. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-50-53

Сравнением науки и технологий область применения пиломатериалов постоянно расширяется, но эффективность их использования может оказаться сниженной из-за наличия специфических особенностей. Чем однороднее характеристики качества пиломатериалов, тем рациональнее их употребление для производства заготовок. Чем разнообразнее сферы применения пиломатериалов, тем больше предъявляется новых требований к ним. Поэтому производителям важно адаптироваться к данным требованиям, сохраняя при этом рынок потребителей.

Цель работы

В настоящее время наиболее исследованы процессы, в которых качество древесины пиломатериалов ниже качества древесины заготовок [1, 2]. Значительно меньше уделяется внимание обоснованию параметров пиломатериалов с позиций недопущения избытка качества. Особенно это проявляется в таких видах продукции, как стеновой клееный брус и панели, используемые для возведения ограждающих конструкций деревянных домов [3, 4].

Результаты исследования

Для производства стенового клееного бруса предприятия используют свои внутренние заводские технические условия. Анализ технических условий некоторых предприятий по производству стенового клееного бруса из древесины хвойных пород [5–8] показал следующее.

1. Технические условия регламентируют требования к эксплуатационным характеристикам

клееного бруса только по показателям прочности и стойкости клеевых соединений. Это связано с тем, что стеновой клееный брус относится к ограждающим конструкциям, поэтому дополнительные требования по прочности к нему не предъявляются, если брус изготавливается из пиломатериалов хвойных пород, соответствующих требованиям ГОСТ 8486–86 «Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия» [9].

2. В представленных требованиях технических условий в части нормирования ограничения пороков древесины с разным качеством ламелей бруса изготовители подразделяют по-разному: на группы, сорта и нормирование пороков в зависимости от слоя бруса (внешние и внутренние ламели). В случае подразделения качества древесины ламелей на группы изготовитель выделяет три группы (I, II, III), указывая при этом возможные варианты применения групп качества для внешних (лицевых) и внутренних ламелей (I–I, I–II, I–III, II–II, II–III), где первая цифра обозначает группу качества внешних ламелей, вторая — внутренних. В случае подразделения качества древесины бруса на сорта изготовитель выделяет три сорта (A, B, C) для наружных слоев бруса, указывая при этом, что качество древесины внутренних слоев может быть на один-два сорта ниже.

3. В большинстве технических условий требования по качеству древесины ламелей в части нормирования ограничения основного сортобразующего порока (здоровых и частично сросшихся сучков) соответствуют требованиям к качеству древесины пиломатериалов 3-го и 4-го сортов по ГОСТ 8486–86. Требования, предъявляемые

к ограничению остальных пороков в древесине ламелей рассматриваемых технических условий, как правило, выше требований по качеству древесины пиломатериалов 3-го и 4-го сортов по ГОСТ 8486–86, особенно это касается пороков, нарушающих геометрию (форму) бруса, таких как обзол и трещины.

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

– использование системы набора ламелей в клееном бруске одной группы качества (например, I–I, II–II) создает избыток качества и приводит к увеличению себестоимости продукции;

– в случае подразделения изготовителем качества древесины бруса на сорта параметры качества древесины внутренних слоев требуют более конкретного нормирования.

Для исследования выбран пятислойный профилированный стеновой клееный брус размером 140×160 мм (рис. 1).

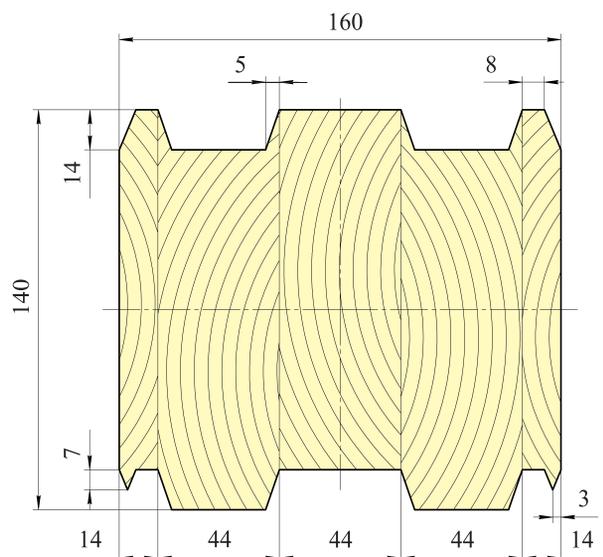


Рис. 1. Сечение пятислойного профилированного стенового клееного бруса

Fig. 1. Section of a five-layer profiled wall laminated timber

В конструкции стенового клееного бруса для внутренних слоев используются сосновые пиломатериалы толщиной 50 мм, а для внешних (лицевых) слоев — толщиной 22 мм.

Для производства стенового профилированного клееного бруса предлагается использовать пиломатериалы двух групп качества (второй и третьей) со следующими возможными вариантами их применения при изготовлении внешних (лицевых) и внутренних ламелей бруса (рис. 2):

1) вариант с избытком качества, где для внешних (лицевых) и внутренних ламелей бруса предусматривается использование второй группы качества пиломатериалов (рис. 2, а);

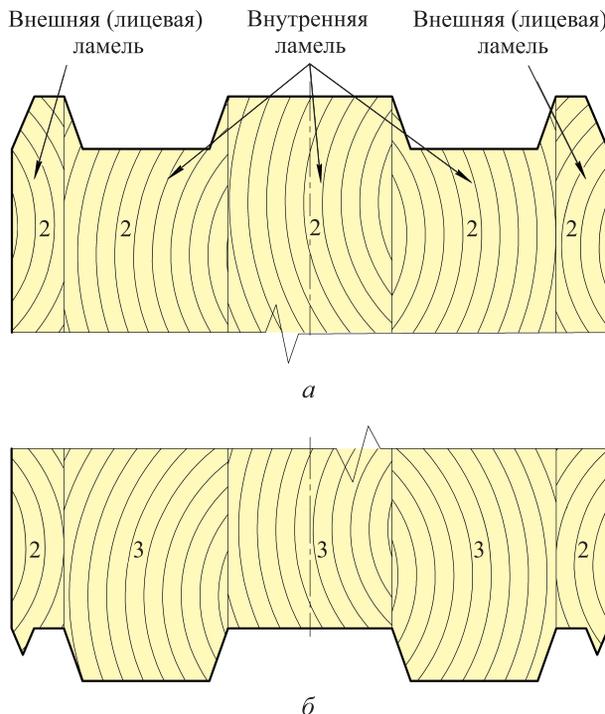


Рис. 2. Варианты применения групп качества пиломатериалов при изготовлении внешних (лицевых) и внутренних ламелей бруса: а — с избытком качества; б — с недопущением избытка качества

Fig. 2. Variants of application of quality groups of sawn timber at manufacturing external (facing) and internal lamellas of a bar: а — with exuberancy of quality; б — with the avoidance of exuberant quality

2) вариант с недопущением избытка качества, где для внешних (лицевых) ламелей предусматривается использование второй группы качества пиломатериалов, а для внутренних ламелей — третьей группы качества (рис. 2, б).

При формировании представленных двух групп качества пиломатериалов учитывали, что во второй группе качества пиломатериалов здоровые и частично сросшиеся сучки нормируются по 3-му сорту ГОСТ 8486–86, а в третьей группе качества — по 4-му сорту. Требования к продольной покоробленности пиломатериалов во второй и третьей группах качества соответствуют требованиям ко второму сорту ГОСТ 8486–86. Обзол допускается только таких размеров, которые позволяют удалить его при дальнейшем фрезеровании пиломатериалов.

Коэффициент объемного выхода клееного бруса K определяется по формуле

$$K = \frac{V_{\text{кл.бруса}}}{V_{\text{пилом}}} \quad (1)$$

где $V_{\text{кл.бруса}}$ — объем клееного бруса с учетом припусков на обработку, м;

$V_{\text{пилом}}$ — объем пиломатериалов, м.

Для бруса размером 140×160×6000 мм (см. рис. 1)

$$K = \frac{0,14 \cdot 0,16 \cdot 6}{0,15 \cdot 0,194 \cdot 6} = 0,769.$$

С учетом брака (в среднем 3 % от партии пиломатериалов) коэффициент объемного выхода клееного бруса составит 0,746.

Для оценки качественного состава сосновых пиломатериалов введем ценностные коэффициенты сортности. Вторая группа качества пиломатериалов в брус соответствует цене 2-го сорта пиломатериалов по ГОСТ 8486–86, а третья группа — цене 3-го сорта [10]:

Ценностные коэффициенты сортности обрезных пиломатериалов хвойных пород (сосна, ель, пихта, кедр) длиной 2...6,5 м:

Сорт	Отб. 1	2	3	4	Бессортные
Коэффициент	2,0	1,6	1,3	1,0	0,7 1,5

Ценностный коэффициент сортности 2-го сорта пиломатериалов составляет 1,3, а 3-го сорта — 1,0. В варианте с избытком качества (см. рис. 2, а) используются пиломатериалы только 2-й группы качества, поэтому ценностный коэффициент сортности составляет 1,3. Так как в варианте с недопущением избытка качества (см. рис. 2, б) используются пиломатериалы 2-й группы качества (22,8 % общего объема бруса) и 3-й группы (77,2 %), ценностный коэффициент сортности составляет 1,07.

Затраты Z на пиломатериалы при производстве 1 м³ клееного стенового бруса, руб., определяются по формуле

$$Z = ЦКС, \tag{2}$$

где Ц — цена сухих обрезных пиломатериалов, руб.;

K — коэффициент объемного выхода клееного бруса;

C — ценностный коэффициент сортности пиломатериалов.

При цене сухих обрезных пиломатериалов 6000 рублей за 1 м³, коэффициенте объемного выхода клееного бруса 0,746 и ценностном коэффициенте сортности пиломатериалов 1,3 затраты на пиломатериалы при производстве 1 м³ клееного стенового бруса варианта с избытком качества

$$Z = 6000 \cdot 0,746 \cdot 1,3 = 5818,8 \text{ руб.}$$

При цене сухих обрезных пиломатериалов 6000 рублей за 1 м³, коэффициенте объемного выхода клееного бруса 0,746 и ценностном коэффициенте сортности пиломатериалов 1,07 затраты на пиломатериалы при производстве 1 м³ клееного стенового бруса варианта с недопущением избытка качества

$$Z = 6000 \cdot 0,746 \cdot 1,07 = 4789,32 \text{ руб.}$$

В расчетах предполагалось, что пиломатериалы с соответствующими припусками по длине соответствуют длине бруса.

Выводы

1. Для производства ламелей стенового клееного бруса следует не брать пиломатериалы определенного сорта или групп сортов по ГОСТ 8486–86, а заказывать у лесопильно-деревообрабатывающих предприятий пиломатериалы в соответствии с группой качества по техническим условиям на стеновой клееный брус.

2. Использование пиломатериалов требуемого качества существенно снижает затраты на пиломатериалы для производства стенового клееного бруса. Затраты на пиломатериалы при производстве 1 м³ клееного стенового бруса варианта с недопущением избытка качества на 1029,48 руб. меньше по сравнению с затратами на пиломатериалы при производстве 1 м³ клееного стенового бруса варианта с избытком качества.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 37.8809.2017/БЧ.

Список литературы

- [1] Владимирова Е.Г., Рыкунин С.Н. Сортирование пиломатериалов на группы качества // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2012. № 3. С. 89–92.
- [2] Куликова Н.В. Требования к размерам и качеству современных покрытий пола из древесины березы // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2008. № 2. С. 88–95.
- [3] Рыкунин С.Н., Шалаев В.С., Кривощёков Н.В. К обоснованию параметров пиломатериалов, используемых в ограждающих конструкциях деревянных домов // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Матер. науч.-техн. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2016. Т. 2. С. 103–104.
- [4] Суров В.П., Рыкунина И.С. Управление качеством продукции деревообрабатывающих производств. М.: МГУЛ, 2010. 191 с.
- [5] Технические условия на брус деревянный клееный стеновой. СТО 77511573-01-2006 предприятия ООО «Элеон». URL: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293824/4293824406.pdf> (дата обращения: 06.02.2017).
- [6] Технические условия на изготовление стенового клееного бруса. ТУ WOODENCITY 001/2007. URL: http://woodencity.ru/d/177044/d/tu_brus_kleeny_stenovoy_-251207.doc (дата обращения: 06.02.2017).
- [7] Технические условия на клееный стеновой брус и клееные балки. ТУ «Брусберг» 001/2011. URL: <http://x1-----6kcgbuatamdjhg0aagedpveru3cf2rh.xn--plai> (дата обращения: 06.02.2017).
- [8] Технические условия на брус стеновой клееный профилированный группы компаний URALBRUS. URL: <http://ural-brus.ru/files/misc/tu.pdf> (дата обращения: 06.02.2017).
- [9] ГОСТ 8486–86. Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2007. 9 с.
- [10] Варфоломеев Ю.А., Дружин И.С., Дьячков Ю.А. Справочник по лесопилению. М.: Экология, 1991. С. 52–57.

Сведения об авторах

Рыкунин Станислав Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры древесиноведения и технологии деревообработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), rykunin@mgul.ac.ru

Кривощёков Никита Владимирович — аспирант кафедры древесиноведения и технологии деревообработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), krivoshekov-n@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 25.10.2017 г.

INFLUENCE OF CHANGE OF SAWMILLED PINE PARAMETERS FOR QUALITY WALL GLUED LAMINATED TIMBER

S.N. Rykunin, N.V. Krivoshechikov

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

krivoshekov-n@yandex.ru

The analysis of technical conditions for the production of glued laminated timber from coniferous wood is given. It is offered to use for the production of a wall glued laminated timber sawn timber of two quality groups with two variants of their application in the manufacture of external (facing) and internal layers. The calculation of costs of sawn timber for the production of 1 m³ glued wall timber is given. It is not necessary to provide sawn timber of a certain grade or groups of varieties according to GOST 8486–86 for the production of lamellas of a wall glued laminated timber, but to order quality timber groups from sawmills and woodworking companies formed according to specifications on a wall glued timber. The results of the research prove that the use of sawn timber of the required quality significantly reduces the costs of lumber for the production of glued laminated timber.

Keywords: lumber, wall glued laminated timber, technical conditions, quality groups, volume output ratio, glued laminated timber, costs

Suggested citation: Rykunin S.N., Krivoshechikov N.V. *Vliyaniye izmeneniya parametrov sosnovykh pilomaterialov na formirovaniye kachestva stenovogo kleenogo brusa* [Influence of change of sawmilled pine parameters for quality wall glued laminated timber]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 50–53.

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-50-53

References

- [1] Vladimirova E.G., Rykunin S.N. *Sortirovaniye pilomaterialov na gruppy kachestva* [Sorting of sawn timber into quality groups] Moscow state forest university bulletin – *Lesnoy vestnik*, 2012, no. 3, pp. 89–92.
- [2] Kulikova N.V. *Trebovaniya k razmeram i kachestvu sovremennykh pokrytiy pola iz drevesiny berezy* [Requirements for the size and quality of modern floor coverings from birch wood] Moscow state forest university bulletin – *Lesnoy vestnik*, 2008, no. 2, pp. 88–95.
- [3] Rykunin S.N., Shalaev V.S., Krivoshechikov N.V. *K obosnovaniyu parametrov pilomaterialov, ispol'zuemykh v ograzhdayushchikh konstruktivnykh derevyannykh domov* [To the justification of the parameters of sawn timber used in the enclosing structures of wooden houses]. *Les Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie: materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Forests of Russia: politics, industry, science, education: materials of the scientific and technical conference]. SPb.: SPbGLTU Publ., 2016, v. 2, pp. 103–104.
- [4] Surov V.P., Rykunina I.S. *Upravleniye kachestvom produktsii derevoobrabaty-vayushchikh proizvodstv* [Quality management of wood-working productions]. Moscow: MGUL Publ., 2010, 191 p.
- [5] *Tekhnicheskie usloviya na brus derevyanny kleenyy stenovoy* [Technical specifications for timber glued timber], STO 77511573-01-2006 predpriyatiya OOO «Eleon» [STO 77511573-01-2006 of the enterprise LLC «Eleon»]. Available at: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293824/4293824406.pdf> (06.02.2017).
- [6] *Tekhnicheskie usloviya na izgotovleniye stenovogo kleenogo brusa* [Technical conditions for manufacturing of wall glued beams], TU WOODENCITY 001/2007. Available at: http://woodencity.ru/d/177044/d/tu_brus_kleenyy_stenovoy_-_251207.doc (06.02.2017).
- [7] *Tekhnicheskie usloviya na kleenyy stenovoy brus i kleenyye balki* [Technical conditions for glued wall beam and glued beams], TU Brusberg 001/2011. Available at: xn----6kcgbuatamdjhg0aagedpvepy3cf2rh.xn--p1ai (06.02.2017).
- [8] *Tekhnicheskie usloviya na brus stenovoy kleenyy profilirovannyi gruppy kompaniy URALBRUS* [Technical specifications for a glulam wall beam profiled group of companies URALBRUS]. Available at: <http://ural-brus.ru/files/misc/tu.pdf> (date of circulation: 06.02.2017).
- [9] GOST 8486–86. *Pilomaterialy khvoynykh porod. Tekhnicheskie usloviya* [Sawn softwood. Technical conditions]. Moscow: Standardinform Publ., 2007, 9 p.
- [10] Varfolomeev Yu.A., Druzhin I.S., Diachkov Yu.A. *Spravochnik po lesopileniyu* [Reference book on sawing]. Moscow: Ecology Publ., 1991, pp. 52–57.

Authors' information

Rykunin Stanislav Nikolaevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of Department of Wood Science and Technology of BMSTU (Mytishchi branch), rykunin@mgul.ac.ru

Krivoshechikov Nikita Vladimirovich — post-graduate student of Department of Wood Science and Technology of BMSTU (Mytishchi branch), krivoshekov-n@yandex.ru

Received 25.10.2017

УДК 674.8

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-54-60

СОЗДАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ДРЕВЕСНО-ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**В.И. Запруднов**

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

zaprudnov@mgul.ac.ru

Рассмотрены основные факторы, определяющие качество древесно-цементных материалов — свойства исходных компонентов (качество органического заполнителя, вид минерализатора, вид и активность цемента), состав исходных компонентов, технологические факторы (условия приготовления древесно-цементной смеси, метод формования, способ уплотнения и твердения), конструктивные особенности и вид отделки. Среди древесно-цементных материалов, применяемых при производстве древесно-цементных композиций, лучшими качественными показателями обладают быстротвердеющие и быстрохватывающиеся портландцементы марки не ниже 400, позволяющие сокращать время взаимодействия водорастворимых веществ древесины с цементом в ранние сроки твердения древесно-цементного материала. Однако вопросы использования и выбора минеральных вяжущих для приготовления древесно-цементного материала еще недостаточно изучены. Существенное влияние на качество древесно-цементного материала оказывают водо-цементное и древесно-цементное отношения в смеси. Уменьшение водо-цементного отношения или увеличение прочности цемента позволяет повысить прочность древесно-цементного материала. Свойства древесно-цементного материала во многом зависят от метода формования и особенно от степени уплотнения древесно-цементной смеси при изготовлении изделий. С ростом удельного давления прессования прочность древесно-цементного материала резко возрастает. Представляется наиболее целесообразным работающие на сжатие и изгиб несущие и ограждающие конструкции из древесно-цементных материалов проектировать комплексными, например трехслойными. В таких конструкциях хорошо сочетались бы теплофизические, прочностные и деформационные свойства.

Ключевые слова: древесно-цементные композиты, качество древесины, структура композитов, прочность

Ссылка для цитирования: Запруднов В.И. Создание качественных древесно-цементных материалов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 54–60. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-54-60

Основной областью рационального применения древесно-цементных материалов, в которой наиболее эффективно используются их прочностные и деформационные свойства, является прежде всего малоэтажное строительство, где изделия из этих материалов используются во всех конструкциях за исключением фундаментов.

Важнейший фактор, определяющий высокую технико-экономическую эффективность их применения, — наличие в стране богатой сырьевой базы самовозобновляющихся материалов: древесины, отходов сельскохозяйственного производства (костра конопли, льна, стебли хлопчатника,

рисовая солома, сечка камыша, тростника и др.), позволяющее организовать массовое производство строительных изделий из данных видов сырья (таблица и рис. 1) [1].

Большое многообразие факторов, влияющих на качество древесно-цементных материалов, обуславливает широкий спектр их физико-механических свойств. Наиболее полное и реальное отражение термина «качество» представлено в формулировке международного стандарта ISO 8402:1994, согласно которой качество древесно-цементного материала — это совокупность характеристик, относящихся к его способности

Т а б л и ц а

Характеристики древесно-минеральных материалов
Characteristics of wood-mineral materials

Материал	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · град)
Опилкобетон	950–1250	1,0–2,5	0,24–0,43
Ксилолит	1000–1100	20,0–30,0	0,16–0,40
Фибролит	300–500	–	0,07–0,10
Арболит	400–850	1,2–3,5	0,07–0,17
Цементно-стружечные плиты	1100–1400	15	0,25
Гипсоволокнистые плиты	900–1200	22–28	–
Гипсоопилочные блоки	650–850	2,0–3,5	0,233–0,279
Термиз	550–650	0,4–1,0	0,174
Королит	500–700	до 1,7	0,14–0,16
Дуризол (дюрисол)	500–600	1,5–3,0	0,12
Велокс	550–600	5,0	–

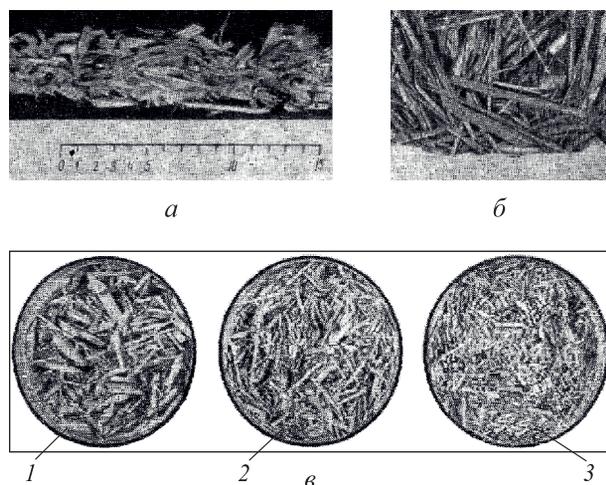


Рис. 1. Органические заполнители для древесно-цементного материала: *a* — древесная дробленка; *б* — сечка камыша; *в* — костра конопли (1 — недробленая; 2 — подвергшаяся дроблению без сеток; 3 — подвергшаяся дроблению с сеткой 5×5 мм)

Fig. 1. Organic aggregates for wood-cement material: *a* — wood crushed stone; *б* — chaff of reeds; *в* — sliver of hemp (1 — uncrushed, 2 — crushed without grids, 3 — crushed with a grid 5×5 mm)

удовлетворять установленным и предполагаемым потребностям в соответствии с назначением.

Существующие стандарты на древесно-цементные материалы (ГОСТ 26816–86, 54854–2011) предусматривают весьма ограниченное количество характеристик их физико-механических свойств, которые связаны в основном с контролем качества технологического процесса изготовления материалов и отражают лишь достигнутые на современном техническом уровне производства средние показатели древесно-цементных материалов, а не предельные возможности материалов целевого назначения.

К основным факторам, определяющим качество древесно-цементных материалов, можно отнести: свойства исходных компонентов (качество органического заполнителя, вид минерализатора, вид и активность цемента); состав исходных компонентов; технологические факторы (условия приготовления древесно-цементной смеси, метод формования, способ уплотнения и твердения); конструктивные особенности и вид отделки (рис. 2 и 3).

Свойства исходных компонентов. Органическое вещество (древесина) и неорганическое гидравлическое вяжущее (цемент) антагонистичны по своей природе. Древесина состоит в основном из органических веществ, на долю которых приходится не менее 99 % общей массы. Элементный химический состав древесины всех пород практически один и тот же [2]. Количество в растворе древесно-цементной смеси гемицеллюлозы и экстрактивных веществ, которые при смешивании

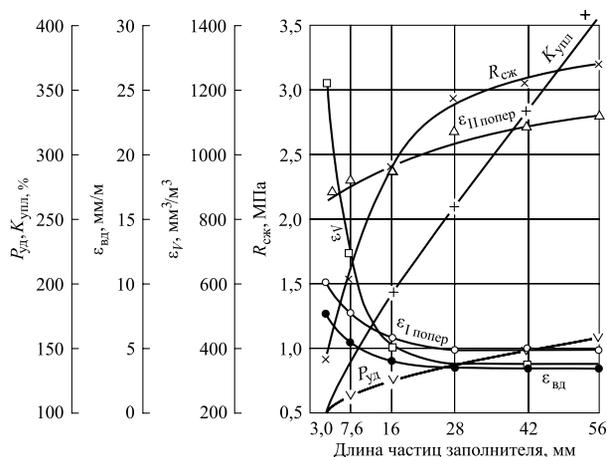


Рис. 2. Зависимость физических свойств арболита и арболитовой смеси от длины частиц заполнителя: ϵ_V — объемная усадка; $\epsilon_{вд}$ — усадка вдоль призмы; $\epsilon_{\perp попер}$ — усадка перпендикулярно направлению прессования; $\epsilon_{\parallel попер}$ — усадка параллельно направлению прессования; $R_{сж}$ — прочность при сжатии; $K_{упл}$ — коэффициент уплотнения; $P_{уд}$ — удельное давление прессования [1, 6]

Fig. 2. Dependence of the physical properties of the arbolite and arbolite mixture on the length of the aggregate particles: ϵ_V — volumetric shrinkage; $\epsilon_{вд}$ — shrinkage along the prism; $\epsilon_{\perp попер}$ — shrinkage perpendicular to the direction of compression; $\epsilon_{\parallel попер}$ — shrinkage parallel to the direction of pressing; $R_{сж}$ — compressive strength; $K_{упл}$ — coefficient of compaction; $P_{уд}$ — specific moulding pressure [1, 6]

древесного заполнителя с цементом вступают с ним в химическое взаимодействие, и предопределяет качество древесно-цементного материала.

Вопросы физико-химического взаимодействия в системе древесина — цемент в настоящее время достаточно полно исследованы [1, 3–6]. При оценке пригодности той или иной породы древесины для изготовления древесно-цементных материалов механические и физические свойства породы древесины часто стоят на втором плане. В первую очередь учитывают вредное действие водорастворимых веществ древесины на цемент.

Для изготовления наиболее качественных древесно-цементных изделий рекомендуется использовать заполнители, получаемые из отходов древесины с наименьшим количеством водорастворимых веществ, такие как ель, пихта, кедр, сосна. Более богаты водорастворимыми веществами осина, береза, тополь, бук и другие лиственные породы.

Неодинаковое содержание водорастворимых веществ приводит к большому различию в сроках схватывания древесно-цементной смеси и влияет на прочность адгезионных связей. В результате различные породы древесины, имеющие различные физико-механические свойства.

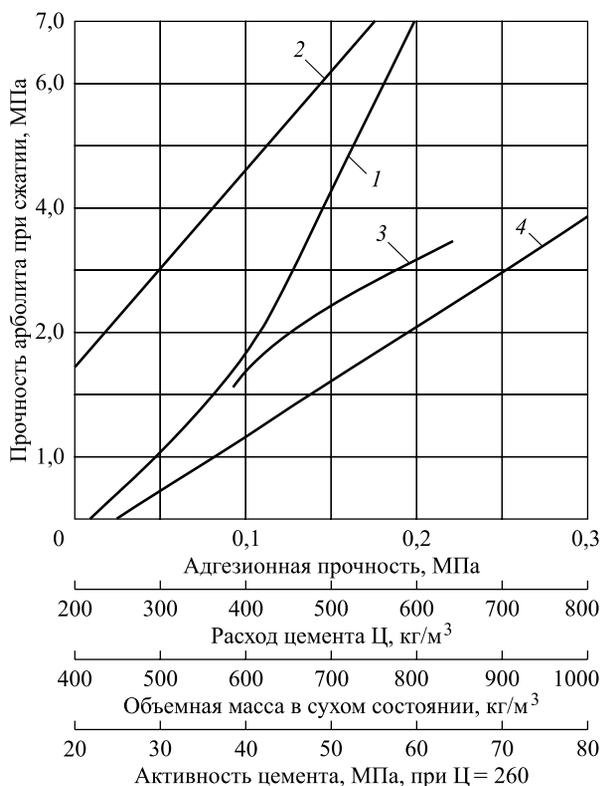


Рис. 3. Зависимость прочности арболита от свойств цемента: 1 — объемная масса; 2 — расход цемента; 3 — активность; 4 — адгезионная прочность [1, 6]
Fig. 3. Dependence of the strength of the arbolite on cement qualities: 1 — bulk mass; 2 — cement consumption; 3 — activity; 4 — adhesion strength [1, 6]

Показатель пригодности измельченной древесины для изготовления древесно-цементного материала определяют испытанием по ГОСТ 54854–2011. Коэффициент пригодности древесины может быть определен по формуле

$$k_{пр} = \frac{ЦA_{ц}}{10R_{сж}R_{ц}} \quad (1)$$

Здесь Ц — расход цемента, кг/м³; A_ц — активность цемента, МПа; R_{сж} — прочность древесно-цементного материала при сжатии, МПа; R_ц — прочность эталонной марки цемента, равная 40 МПа.

Значительное влияние на свойства древесно-цементного материала оказывает фракционный состав органического заполнителя. Среднее значение коэффициента формы частиц (отношение наибольшего размера к наименьшему) должно быть не более 8. Количество частиц с коэффициентом формы более 8 не должно превышать 2 % для остатка на сите с отверстиями диаметром 20 мм и 10 % — для остатков на ситах с отверстиями диаметром 10 и 5 мм. Размеры древесных частиц измельченной древесины должны быть не более, мм: длина 40, ширина 10, толщина 5. Содержание коры в измельченной древесине не

более 10 %, хвои и листьев не более 5 % по массе сухой смеси заполнителей. Содержание водорастворимых редуцирующих веществ не более 2 %.

Одним из заполнителей для производства древесно-цементных материалов служит костра конопли, которая является отходом первичной переработки стеблей конопли и представляет собой мелкие части стебля неправильной формы длиной от 0,1 до 7 см с поперечным сечением до 25 мм².

Для изготовления фибролита используют специальную стружку (древесную шерсть). Древесную шерсть в виде узких лент получают на древесно-чесальных станках. Требуемые размеры ленты: длина не менее 350 мм, ширина 5...10 мм, толщина 0,2...1,0 мм.

Среди отходов лесопиления и деревообработки, используемых в качестве заполнителя в производстве древесно-цементного материала, всегда возможно наличие смеси различных пород древесины. Не всегда можно организовать тщательный отбор отходов и контроль их состава по виду исходного сырья. Для проверки влияния на прочность древесно-цементного материала различных смесей заполнителей из хвойных и лиственных пород проведены исследования. Результаты исследований, представленные на рис. 4, свидетельствуют о том, что при введении в заполнитель из хвойных пород 20 и 40 % березовой дробленки прочность древесно-цементного материала уменьшается соответственно на 17 и 21 %.

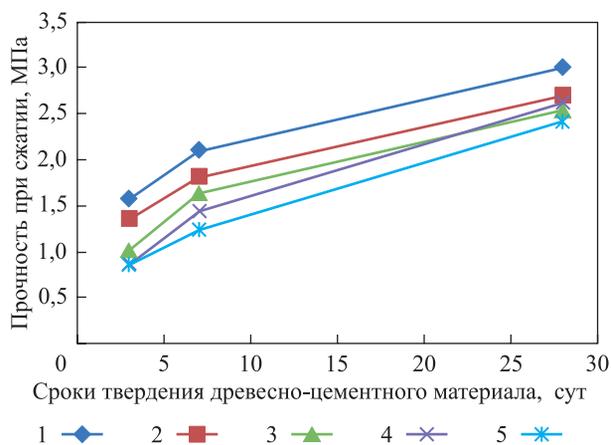


Рис. 4. Зависимость прочности древесно-цементного материала при разных сроках твердения от состава древесной дробленки: 1 — 100 % хвойных пород; 2 — 80 % хвойных пород и 20 % осины; 3 — 60 % хвойных пород и 40 % осины; 4 — 80 % хвойных пород и 20 % березы; 5 — 60 % хвойных пород и 40 % березы
Fig. 4. Dependence of the strength of wood-cement material at different periods of hardening on the composition of hogged chips: 1 — 100 % of coniferous species; 2 — 80 % of coniferous species and 20 % of aspen; 3 — 60 % of coniferous species and 40 % of aspen; 4 — 80 % of coniferous species and 20 % of birch; 5 — 60 % of coniferous species and 40 % of birch

Автор работы [7] предлагает качество бетона характеризовать отношением его прочности R_6 к прочности наиболее слабого элемента R_1 , доказывая, что

$$A = R_6 / R_1. \quad (2)$$

Анализ показывает: поскольку действительная структура древесно-цементного композита имеет сложное строение (рис. 5), коэффициент структуры A может изменяться в пределах

$$A_{\min} \leq A \leq A_{\max} = f(R_6 / R_1; k), \quad (3)$$

где k — коэффициент, учитывающий концентрацию напряжений и прочие факторы.

При A_{\min} или A_{\max} прочность бетона зависит от свойств заполнителя незначительно и определяется в основном прочностью раствора.

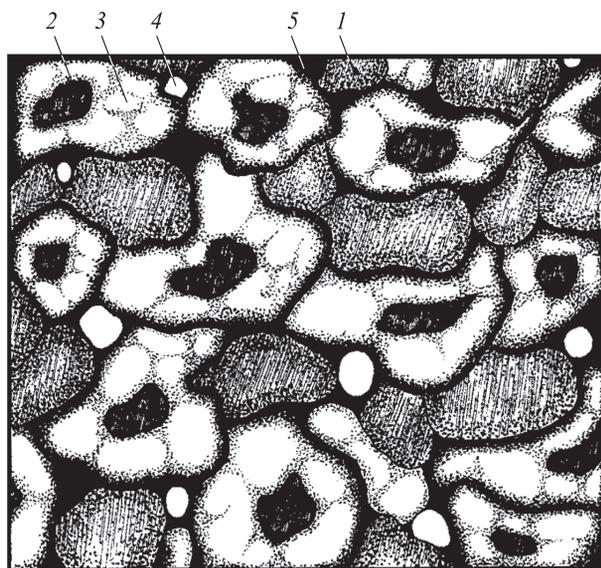


Рис. 5. Микроструктура системы «древесный заполнитель — цементное вяжущее — вода»: 1 — древесный заполнитель; 2 — частицы цемента; 3 — оболочка геля, образованная из растворенных частиц цемента; 4 — воздушные поры; 5 — свободная вода

Fig. 5. Microstructure of the system «wood filler — cement binder — water»: 1 — wood filler; 2 — cement particles; 3 — shell of the gel, formed from dissolved cement particles; 4 — air pores; 5 — free water

Качество древесно-цементных материалов зависит от прочности не только структурных элементов, но и связи между ними. Исследования адгезионных явлений в древесно-цементных композициях позволили выявить слабую адгезию древесины с цементом и установить, что это обстоятельство является одной из главных причин низкой прочности и высокой деформации древесно-цементных материалов. Кроме того, необходимо учитывать и когезионные свойства склеиваемых тел и клеящих веществ, так как явления адгезии и когезии взаимосвязаны.

Глубокое проникновение в природу явлений прилипания требует учета достижений современной науки — физики и химии поверхностей, твердого тела, полимеров и поверхностных явлений. Несмотря на большое количество работ по данной тематике, адгезия продолжает оставаться проблемой, для решения которой надо еще много сделать.

При производстве древесно-цементных материалов широко применяются химические добавки (жидкое стекло, хлорид кальция, нитрат кальция, сернокислый глинозем и др.). В древесно-цементную смесь их вводят для повышения марочной прочности, ускорения процесса твердения, улучшения технологических и деформационных свойств древесно-цементной смеси. Химические добавки локализуют и замедляют действие водорастворимых веществ или покрывают частицы заполнителя водонепроницаемой пленкой, препятствующей соприкосновению вредных веществ заполнителя с цементным тестом. Выбор химических добавок зависит от вида, качества заполнителя, содержания сахаров в водорастворимых веществах древесного заполнителя.

Исследования, проведенные в Мытищинском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана, показали, что обработка поверхностей древесного заполнителя гелем, составленным из жидкого стекла и хлорида кальция, повышает адгезионную прочность соединения для заполнителя из осины в 8,4 раза, березы — в 4,3 раза, сосны — в 2,3 раза. Особенно эффективен гель при изготовлении древесно-цементных материалов из свежесрубленной древесины.

Многие химические добавки, в том числе сернокислый глинозем и хлорид кальция, агрессивны по отношению к стальной арматуре, поэтому вводить их в количестве свыше 2 % от массы цемента не рекомендуется. В настоящее время в качестве минерализаторов древесного заполнителя при производстве древесно-цементных материалов чаще всего применяют растворы хлористого кальция и жидкого стекла.

Среди древесно-цементных материалов, применяемых при производстве древесно-цементных композиций, лучшими качественными показателями обладают быстротвердеющие и быстрострхвывающиеся портландцементы марки не ниже 400, позволяющие сокращать время взаимодействия водорастворимых веществ древесины с цементом в ранние сроки твердения древесно-цементного материала. Следует отметить, что вопросы использования и выбора минеральных вяжущих для приготовления древесно-цементного материала еще недостаточно изучены.

Состав исходных компонентов. Состав древесно-цементной смеси оказывает очень большое влияние на многие свойства древесно-цементного

материала [1, 3–6, 8, 9]. Установлено, что с увеличением класса (марки) древесно-цементного материала модуль упругости, призмная прочность, прочность при растяжении возрастают, а ползучесть, усадка, коэффициент Пуассона снижаются.

У материалов с конгломератным строением (к которым относятся и древесно-цементные материалы) наилучшие показатели свойств достигаются при оптимальной структуре. Оптимальная структура материала характеризуется равномерным распределением твердой фазы в дисперсной среде, предельно возможной плотностью упаковки макрочастиц в конгломерате и его вяжущей части, наличием непрерывной прослойки вяжущего вещества с образованием прочного структурного каркаса из затвердевшего вяжущего.

Подбор состава древесно-цементного материала проводят обычно в заводской лаборатории. При этом основным требованием является получение заданной средней плотности и предела прочности при сжатии при минимально возможном расходе цемента. Иногда выдвигаются новые задачи, связанные с приданием древесно-цементному материалу дополнительных свойств (повышение морозостойкости и т. д.). Расход компонентов для производства 1 м³ древесно-цементного материала зависит от вида заполнителя и его класса.

Существует несколько способов определения состава древесно-цементного материала. Строительные нормы рекомендуют расчетно-экспериментальный способ. При этом необходимо изготовление контрольных образцов (кубов) с последующим их испытанием.

Способ подбора состава древесно-цементного материала с помощью номограмм, разработанный в Мытищинском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана [4], дает возможность определить требуемый состав в сжатые сроки. В основу метода подбора состава древесно-цементного материала положены треугольные диаграммы состав — свойство, для построения которых используется симплексная система координат. Эти диаграммы легко изобразить графически; они позволяют наглядно представить и оценить свойства трехкомпонентной системы, каковой является древесно-цементный материал, и в области оптимума, и во всей исследуемой зоне. Симплексная система координат обладает свойством постоянства суммы независимых переменных и для древесно-цементного материала выглядит так:

$$x_1 + x_2 + x_3 + \Sigma_k = \text{const}, \quad (4)$$

где x_1, x_2, x_3 — масса соответственно вяжущего, заполнителя и воды в 1 м³ древесно-цементного материала;

Σ_k — суммарная масса всех компонентов в 1 м³ древесно-цементного материала.

Существенное влияние на качество древесно-цементного материала оказывает водоцементное В/Ц и древесно-цементное Д/Ц отношения в смеси. Уменьшение водоцементного отношения или увеличение прочности цемента позволяет повысить прочность древесно-цементного материала. Эта зависимость может быть выражена формулой [7]

$$R_6 = \frac{R_{ц}}{A(B/Ц)^{1/2}}. \quad (5)$$

Здесь R_6 — прочность бетона после 28 сут нормального твердения; $R_{ц}$ — активность цемента; A — коэффициент, учитывающий влияние других факторов; В/Ц — водоцементное отношение.

Для определения состава бетона более удобна зависимость его прочности не от водоцементного, а от цементно-водного отношения. При увеличении цементно-водных отношения с 1,3 до 2,5 эта зависимость является прямолинейной и может быть выражена формулой (5).

Технологические факторы оказывают существенное влияние на повышение качества и изменение свойств древесно-цементного материала [4, 6]. Например, очень важен способ уплотнения древесно-цементной смеси при формовании изделий [4, 6]. Свойства древесно-цементного материала во многом зависят от метода формования и особенно от степени уплотнения древесно-цементной смеси при изготовлении изделий (рис. 6, 7). С ростом удельного давления прессования прочность древесно-цементного материала резко возрастает [1, 6].

Исследования влияния давления прессования на получение составов древесно-цементного материала повышенного качества показали, что давление прессования зависит от количества цемента в смеси. С увеличением расхода цемента в пределах 200...450 кг/м³ давление прессования должно возрасти с 0,3...0,4 МПа до 1,1...1,6 МПа.

Сведения о режимах твердения древесно-цементного материала относятся в основном к тепловлажностной обработке изделий. Так, в работе [5] твердение изделий рекомендуется проводить при относительной влажности воздуха 60...80 %.

Конструктивные особенности и вид отделки древесно-цементных материалов существенно влияют на их качество. Древесно-цементный материал обладает высокой теплоизоляционной способностью, но относительно низкой прочностью и выраженной склонностью к деформациям. Такие свойства древесно-цементного материала, как усадка и набухание, ползучесть и предельная сжимаемость характеризуют этот материал с отрицательной стороны. Натурные обследования зданий различного назначения, проведенные ав-

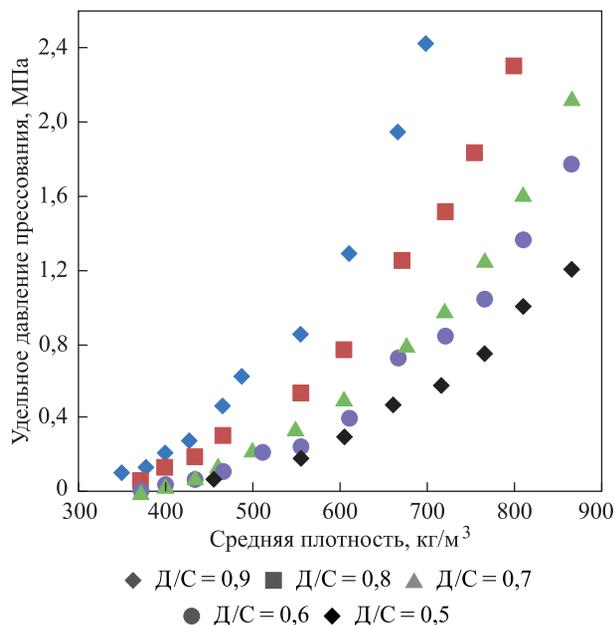


Рис. 6. Влияние удельного давления при прессовании древесно-цементной смеси на среднюю плотность материала при различных соотношениях Д/С [5]

Fig. 6. Influence of the specific pressure on the average density of the material during pressing wood cement mixture at different D/C ratios [5]

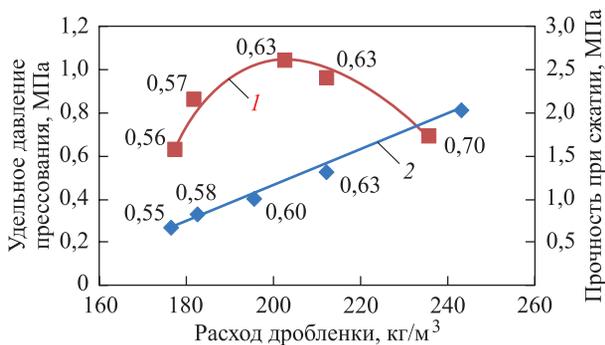


Рис. 7. Влияние удельного давления, расхода дробленки и значения Д/С (значение Д/С дано цифрами) на прочность арболита при расходе цемента 330 кг/м³ [6]: 1 — прочность на сжатие; 2 — удельное давление прессования

Fig. 7. The influence of the specific pressure, the consumption of the hogged chips and the value of D/C (the value of D/C is given in figures) on the strength of the arbolite at a cement consumption of 330 kg/m³ [6]: 1 — compressive strength; 2 — specific pressing pressure

тором в различных климатических зонах страны, показали, что под действием длительной постоянной нагрузки деформации в конструкциях из древесно-цементных материалов возрастают.

Деформации приводят к образованию трещин как в вертикальных, так и в горизонтальных стыках, а также в углах зданий и плоскостях стен. Фактурные слои из цементно-песчаного раствора, нанесенные после формования изделий, как правило, отслаиваются. В результате конструкции из древесно-цементного материала увлажняются,

поражаются дереворазрушающими грибами в летнее время и разрушаются зимой.

Во многих зданиях наблюдаются прогибы стеновых панелей. Сильные деформации и низкая несущая способность конструкций из древесно-цементного материала, в частности изгибаемость, обусловлены еще и тем, что сцепление древесно-цементного материала с арматурой очень низкое (0,1...0,2 МПа). Кроме того, анкеровка арматуры в древесно-цементном материале обычными способами не выполняет своей роли в связи с малым сопротивлением древесно-цементного материала местному сжатию. Большое несоответствие в модулях упругости металла и древесно-цементного материала исключает возможность экономично использовать стальную арматуру в изгибаемых элементах. Следует отметить, что арматура в древесно-цементном материале подвергается коррозии [10].

Вывод

Работающие на сжатие и изгиб несущие и ограждающие конструкции из древесно-цементных материалов наиболее целесообразно проектировать комплексными, например трехслойными. В таких конструкциях будут хорошо сочетаться теплофизические, прочностные и деформационные свойства.

Список литературы

- [1] Запруднов В.И. Трехслойные конструкции с древесно-цементными теплоизоляционными слоями. М.: МГУЛ, 2006. 322 с.
- [2] Уголев Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения. М.: Лесная пром-сть, 1986. 266 с.
- [3] Запруднов В.И., Подчуфаров В.С. Деформативность ковра из фиброцементной массы при изготовлении трехслойных стеновых панелей для малоэтажного домостроения // Науч. тр. МЛТИ, 1988. Вып. 203. С. 167–171.
- [4] Подчуфаров В.С., Чемлева Т.А., Щербаков А.С. Об оптимальном составе арболита повышенного качества // Науч. тр. МЛТИ, 1976. Вып. 93. С. 68–88.
- [5] Рыбьев И.А. Две важнейшие закономерности в свойствах материалов с конгломератным типом структуры // Строительные материалы, 1965. № 1. С. 17–20.
- [6] Щербаков А.С., Хорошун Л.П., Подчуфаров В.С. Арболит. Повышение качества и долговечности. М.: Лесная пром-сть, 1979. 160 с.
- [7] Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Высш. шк., 1987. 415 с.
- [8] Запруднов В.И. Исследование процесса влияния технологических факторов на свойства древесно-цементного утеплителя // Науч. тр. МГУЛ, 1996. Вып. 285. С. 12–17.
- [9] Sanaev V.G., Zaprudnov V.I., Gorbaheva G.A., Oblivin A.N. Factors affecting the quality of wood-cement composites // Bulletin of the Transilvania University of Braşov Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engng. 2016, v. 9 (58), no. 2, pp. 63–71.
- [10] Егорова Е.М. Защита стальной арматуры в арболите // Расчет, конструирование и технология изготовления бетонных и железобетонных изделий. М.: НИИЖБ, 1985. С. 29–31.

Сведения об авторе

Запруднов Вячеслав Ильич — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zaprudnov@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 26.06.2017 г.

CREATION OF QUALITY WOOD-CEMENT MATERIALS

V.I. Zaprudnov

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

The aims of this research are the creation of wood-cement composites with predetermined properties and prediction of physical-mechanical characteristics of the composites. The main factors that determine the quality of wood-cement composites are the properties of the original components (quality of organic filler, the kind of mineraliser, the type and activity of cement), composition of initial components, technological factors (conditions for preparing the wood-cement mixture, moulding method, method of densification and hardening), design features and type of finish. To manufacture the highest quality wood-cement composites it is recommended to use fillers, obtained from waste wood with the least amount of water-soluble substances such as spruce, fir, pine. Water-cement ratio and wood-cement ratio in the mixture have a significant impact on the quality of wood-cement composite. By reducing the water-cement ratio or increasing the strength of cement one can improve the strength of wood-cement composite. Fractional composition of organic filler has significant influence on the properties of wood-cement composite. The average value of the shape factor of particles (ratio of the largest dimension to smallest) should not be more than 8. The surface treatment of wood filler gel composed of liquid silica and calcium chloride, increases the adhesive bond strength for the filler of aspen by 8.4 times, of birch by 4.3 times, of pine by 2.3 times. The gel is particularly effective in the production of wood-cement composites from green wood.

Keywords: wood-cement composites, wood filler, composite structure, strength

Suggested citation: Zaprudnov V.I. *Sozdanie kachestvennykh drevesno-tsementnykh materialov* [Creation of quality wood-cement materials] *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 54–60. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-54-60

References

- [1] Zaprudnov V.I. *Trekhsloynnye konstruksii s drevesno-tsementnymi teploizolyatsionnymi sloyami* [Three-layer constructions with wood-cement heat-insulating layers]. Moscow: MGUL, 2006, 322 p.
- [2] Ugolev B.N. *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya* [Wood science with the basics of forest commodity science]. Moscow: Lesnaya prom-st, 1986, 266 p.
- [3] Zaprudnov V.I., Podchufarov V.S. *Deformativnost' kovra iz fibrotsementnoy massy pri izgotovlenii trekhsloynnykh stenovykh paneley dlya maloetazhnogo domostroeniya* [The deformativity of carpet from fibrocement mass in the production of three-layer wall panels for low-rise housing construction] *Scientific Works of MLTI*, 1988, v. 203, pp. 167–171.
- [4] Podchufarov V.S., Chemleva T.A., Shcherbakov A.S. *Ob optimal'nom sostave arbolita povyshennogo kachestva* [On the optimal composition of high-quality arbolite] *Scientific Works of MLTI*, 1976, v. 93, pp. 68–88.
- [5] Ryb'ev I.A. *Dve vazhneyshie zakonomernosti v svoystvakh materialov s konglomeratnym tipom struktury* [Two major regularities in the properties of materials with a conglomerate type of structure] *Building Materials*, 1965, no. 1, pp. 17–20.
- [6] Shcherbakov A.S., Khoroshun L.P., Podchufarov V.S. *Arbolit. Povyshenie kachestva i dolgovechnosti* [Arbolite. Improving quality and long-eternity]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry], 1979, 160 p.
- [7] Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betona* [Technology of concrete]. Moscow: Higher School, 1987, 415 p.
- [8] Zaprudnov V.I. *Issledovanie protsessa vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov na svoystva drevesno-tsementnogo uteplitelya* [Investigation of the process of the influence of technological factors on the properties of wood-cement insulator] *Scientific Works of MSFU*, 1996, v. 285, pp. 12–17.
- [9] Sanaev V.G., Zaprudnov V.I., Gorbacheva G.A., Oblivin A.N. *Factors affecting the quality of wood-cement composites* [Factors affecting the quality of wood-cement composites]. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov Series II: Forestry. Wood Industry. Agricultural Food Engineering*, 2016, v. 9 (58), no. 2, pp. 63–71.
- [10] Egorova E.M. *Zashchita stal'noy armatury v arbolite*. V kn.: *Raschet, konstruirovaniye i tekhnologiya izgotovleniya betonnykh i zhelezobetonnykh izdeliy* [Protection of steel reinforcement in an arbolite. In the book: Calculation, design and technology of manufacturing of concrete and reinforced concrete products]. Moscow: NIIB, 1985, pp. 29–31.

Author's information

Zaprudnov Vyacheslav Ilyich — D-r Sci. (Tech.), Professor of BMSTU (Mytishchi branch), zaprudnov@mgul.ac.ru

Received 26.06.2017

КИНЕТИКА КИСЛОТНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПРИРОДНЫХ ПОЛИСАХАРИДОВ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В МОНОСАХАРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОРМОВЫХ ДОБАВОК И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

Г.Л. Олиференко¹, А.Н. Иванкин¹, Ю.Н. Жилин¹, О.П. Прошина¹, А.Н. Зарубина¹, Н.Л. Вострикова², А.В. Куликовский², М.И. Бабурина²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1
²ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН», 109316, Москва, ул. Талалихина, д. 26

oliferenko2@inbox.ru

Проблема переработки полисахаридов растительных тканей методом гидролиза в простые сахара и получение на их основе ценных пищевых и кормовых продуктов имеет важное народнохозяйственное значение и является актуальной. Проведено изучение кинетики химической дегградации древесной биомассы для последующего получения компонентов питательных микробиологических сред и кормов сельскохозяйственных животных. В качестве объектов исследования использовали опилки древесины сосны *Pinus sylvestris* в возрасте 55 лет и опилки дуба *Quercus robur* в возрасте 120 лет. Гидролиз древесных опилок осуществляли разбавленной серной кислотой при температуре кипения раствора 90...105 °С в течение 0...6 ч. Определение содержания углеводов в гидролизатах проводили хроматографическим методом с использованием электрохимического детектора. Общее количественное содержание углеводов в гидролизатах определяли в пересчете на глюкозу спектрофотометрическим методом с антроновым реактивом. Исследования показали, что выбранные условия гидролиза позволяют за 0,5 ч высвободить из гемицеллюлозы примерно треть содержащихся в древесине сахаров. Дальнейшая температурная обработка приводит к распаду указанных углеводов и их трансформации в другие сахара. Рассмотрение кинетики накопления и разрушения сахаров при кислотном гидролизе позволило определить условия достижения наибольшей степени конверсии при сохранении лабильных углеводов: температура 100 °С, время 0,5 ч, концентрация кислоты 5 % об. масс. По полученным экспериментальным данным найдены значения эффективных констант скоростей накопления отдельных углеводов, их выход и значения эффективных энергий активации в процессе гидролиза. Кинетический анализ процесса подтвердил возможность осуществления управляемого гидролитического распада древесной биомассы. Гидролизаты, полученные в виде водных растворов, содержащих до 40 мг/мл свободных сахаров, подвергали нейтрализации до значения рН среды, равного 6,0–7,0, и последующей лиофильной сушке. Показана возможность использования сухих гидролизатов в составе микробиологической среды для интенсивного выращивания микрофлоры, а также в качестве ингредиента кормов для выращивания продуктивных животных.

Ключевые слова: кинетика, свободные углеводы древесины, кинетический анализ образования, кислотный гидролиз, химическая технология

Ссылка для цитирования: Олиференко Г.Л., Иванкин А.Н., Жилин Ю.Н., Прошина О.П., Зарубина А.Н., Вострикова Н.Л., Куликовский А.В., Бабурина М.И. Кинетика кислотной трансформации природных полисахаридов древесной биомассы в моносахара для получения кормовых добавок и микробиологических сред // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 61–67. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-61-67

В литературе описаны методы осуществления кислотного гидролиза древесного сырья с целью его дальнейшего превращения в биоэтанол [1–3]. Однако данные по кинетическому образованию минорных сахаров (моносахаридов) из древесины, представляющие существенный интерес для получения легкоусвояемых углеродсодержащих питательных компонентов, отсутствуют. Использование современных аналитических методов идентификации моносахаридов, основанных на селективном анализе индивидуальных веществ, позволяет восполнить этот пробел.

Цель настоящей работы — изучение кинетики химической дегградации древесной биомассы для последующего получения компонентов питательных микробиологических сред и кормов сельскохозяйственных животных.

Методика эксперимента

В качестве объектов исследования использовали опилки древесины сосны *Pinus sylvestris* в возрасте 55 лет и опилки дуба *Quercus robur* в возрасте 120 лет.

Изучение состава углеводов в гидролизатах проводили хроматографическим методом с использованием хроматографической системы BioLC, включающей градиентный насос GS50, электрохимический детектор ED50, генератор элюента EG50 Generator с 10mN NaOH, хроматографический термостат LC25 с колонкой CarboPac PA20 производства DIONEX (Германия). Определение содержания свободных углеводов осуществляли в водных экстрактах 0,01 г образца (или 100 мкл жидкости) в 100 г воды HPLC/0,45 мкм при 25 °С. В качестве стандар-

тов углеводов использовали: арабинозу (Ara, C₅H₁₀O₅, D(-)-Arabinose ≥ 99 %, A3131 Sigma), галактозу (Gal, C₆H₁₂O₆, D-(+)-Galactose ≥ 99 %, G0750 Sigma-Aldrich), глюкозу (Glc, C₆H₁₂O₆, D-(+)-Glucose ≥ 99,5 %, G8270 Sigma), ксилозу (Xyl), маннозу (Man, C₆H₁₂O₆, D-(+)-Mannose from wood ≥ 99 % M2069 Sigma), фруктозу (Fru, C₆H₁₂O₆, D(-)-Fructose ≥ 99 %, F0127 Sigma), сахарозу (Sug, C₁₂H₂₂O₁₁, α-D-Glc-(1→2)-β-D-Fru, Sucrose ≥ 99,5 % S9378 Sigma), рибозу (Rib, C₅H₁₀O₅, D(-)-Ribose ≥ 99 % R7500 Sigma), лактозу (Lac, C₁₂H₂₂O₁₁ · H₂O, β-D-Gal-(1→4)-α-D-Glc, α-Lactose monohydrate reagent grade L3625 Sigma-Aldrich), водные растворы с концентрацией 0,001 мг/мл.

Кинетические измерения проводили, обрабатывая 5 г опилок в 100 мл 5%-ного раствора H₂SO₄ при 100 °С в течение 0...6 ч. При исследовании кинетики гидролиз проводили в режимах, обеспечивающих кинетическую область протекания реакции за счет интенсивного перемешивания. Энергию активации процесса гидролиза определяли по уравнению Аррениуса:

$$k = k_0 \exp(-E/RT),$$

где k₀ — предэкспоненциальный множитель;

E — энергия активации;

R — универсальная газовая постоянная;

T — абсолютная температура.

Кинетический обсчет кривых осуществляли с применением методов математической статистики в соответствии с подходами, описанными в работах [2, 4, 5].

Мягкий гидролиз гемицеллюлоз проводили 5%-ной серной кислотой при температуре кипения раствора (100...105 °С). Навеску воздушно-сухих опилок массой 5 г помещали в кони-

ческую колбу вместимостью 500 мл, добавляли 100 мл 5%-ной серной кислоты и кипятили с обратным холодильником на электрической плитке в течение 0...6 ч. Для регулирования кипения под колбу подкладывали асбестовую сетку. По окончании гидролиза опилки отфильтровывали через бумажный фильтр.

Общее количественное содержание углеводов в гидролизатах определяли в пересчете на глюкозу спектрофотометрическим методом с антроновым реактивом [6].

Полученные при гидролизе растворы сахаров (технологические растворы сахаров) содержат повышенное количество сбраживаемых сахаров, что позволяет использовать их в производстве кормов для животных [4, 7].

Обсуждение результатов

Хроматографическим методом определено количество минорных сахаров, накопленных в процессе обработки древесных опилок 5%-ным раствором серной кислоты (табл. 1).

Как видно из полученных данных, выбранные условия гидролиза позволяют за 0,5 ч высвободить из гемицеллюлозы примерно треть содержащихся в древесине сахаров. Дальнейшая температурная обработка приводит к распаду указанных углеводов и их трансформации в другие сахара. Некоторые сахара являются оптическими изомерами предшественников (например, Gal), поэтому очевидно, что вначале их не обнаруживали в реакционной смеси. Можно предположить, что их дальнейшее превращение, связанное с конформационным трансформированием, в конечном итоге заканчивалось гидролитическим распадом.

Опилки сосны и дуба являются разноплановыми источниками сахаров. Соотношения основных

Т а б л и ц а 1

Количество углеводов, высвобождаемых из древесной биомассы при сернокислотном гидролизе, мг/мл

The amount of carbohydrates released from wood biomass in sulfuric acid hydrolysis, mg/ml

Углевод	Выход пика, мин	Опилки сосны				Опилки дуба			
		Время обработки, ч							
		0	0,5	1	4	0	0,5	1	4
Ara	5,06	н/о*	0,003	0,006	0,001	н/о	0,05	0,08	0,006
Gal	6,31	н/о	0,001	0,001	0,003	н/о	н/о	0,005	0,001
Glc	6,56	н/о	0,21	0,38	0,13	0,005	0,18	0,29	0,09
Xyl	6,82	н/о	0,09	0,16	0,003	н/о	0,16	0,24	0,007
Man	7,29	н/о	0,07	0,1	0,12	н/о	0,04	0,23	0,11
Fru + Sach	9,75	0,002	12,8	17,5	5,0	0,01	17,7	34,5	8,8
Pib	9,95	0,01	0,14	0,18	0,002	0,03	0,06	0,13	0,003
Lac	14,85	н/о	0,36	0,44	0,006	н/о	0,13	0,31	0,02
Сумма		н/о	13,7	18,7	5,3	н/о	35,0	35,8	9,1
Выход свободных сахаров (по антрону), %		0	6,6	37,2	10,5	0	14,8	70,1	15,5

* Не обнаружено при содержании менее 0,001 мг/мл.

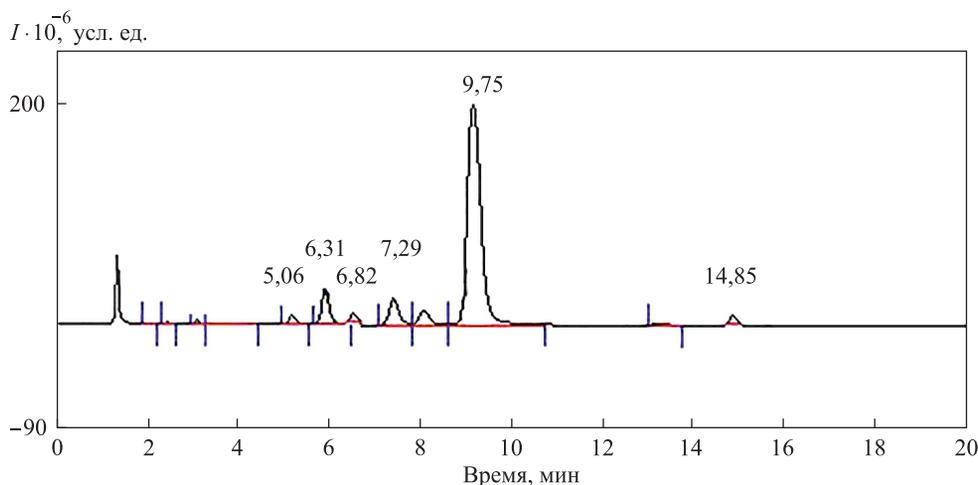


Рис. 1. Соотношение основных углеводов при сернокислотном гидролизе опилок дуба
Fig. 1. Ratio of basic carbohydrates in the sulfuric acid hydrolysis of oak sawdust

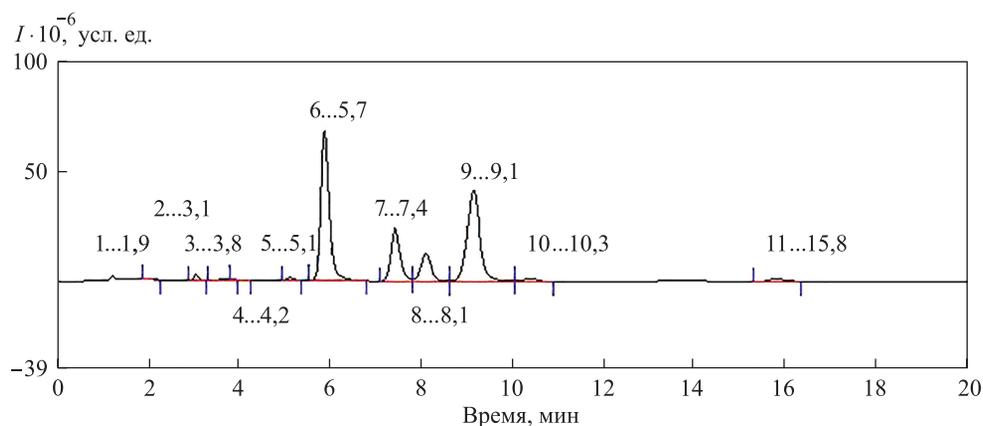


Рис. 2. Соотношение основных углеводов при сернокислотном анализе опилок сосны
Fig. 2. The ratio of the main carbohydrates in the sulfuric acid analysis of pine sawdust

углеводов при сернокислотном гидролизе можно оценить на основании рис. 1 и 2, где приведены хроматограммы определения содержания высвобождаемых углеводов в реакционной смеси (условия: 5%-ная серная кислота 1:20, время 30 мин, температура 100 °С; время выхода пиков различных веществ соответствует значениям, указанным в табл. 1). Из данных хроматограмм видно, что соотношение основных сахаров Glc:Хул:Fru:Лас для сосны составляет 2,5:1:100:3, в то время как для дубовых опилок — 1,5:1,2:250:1.

Установлено, что накопление свободных сахаров в гидролизате зависит от продолжительности гидролиза. При 95, 100 и 105 °С кинетические зависимости имеют вид, характерный для реакций псевдопервого порядка (рис. 3, а).

Макроконстанту скорости реакции $k_{эфф}$ (с⁻¹) находили графически из уравнения $\ln(P_{\infty} - P) = \ln P_{\infty} - k_{эфф}t$ как тангенс угла наклона прямой в координатах $\{\ln [P_{\infty}/(P_{\infty} - P)], t\}$, вычисленный по методу наименьших квадратов, где P — концентрация продукта реакции в момент времени t , г/л;

P_{∞} — концентрация продукта реакции после завершения реакции, г/л (рис. 3).

Для кинетической кривой реакции первого порядка, начальный период которой не был зафиксирован, макроконстанту скорости реакции

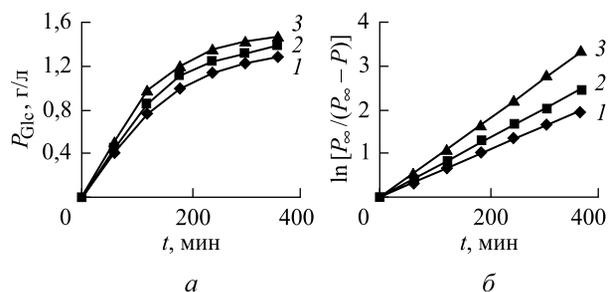


Рис. 3. Зависимость накопления глюкозы от длительности процесса (а) и ее анаморфозы в полулогарифмических координатах (б) при температуре, °С: 1 — 95, 2 — 100, 3 — 105

Fig. 3. Dependence of the accumulation of glucose on the duration of the process (а) and its anamorphosis in semilogarithmic coordinates (б) at a temperature, °С: 1 — 95, 2 — 100, 3 — 105

можно найти графически из выражения

$$\ln(P_{\infty} - P) = \ln P_{\infty} - kt, \quad (1)$$

где P_{∞} — концентрация продукта реакции после завершения реакции;

P — концентрация продукта реакции в момент времени t [8].

Из уравнения (1) видно, что в случае реакции первого порядка абсолютная величина эффективной константы скорости не зависит от того, в каких единицах выражается концентрация продуктов реакции. Поэтому для расчета эффективной константы скорости можно использовать любые физические величины, пропорциональные концентрации. Такой величиной в данном случае является содержание углевода. За P_{∞} принят уровень, измеренный после 4 ч гидролиза серной кислотой.

Графики зависимости $\ln [P_{\infty}/(P_{\infty} - P)] = f(t)$, представленные на рис. 3, б, имеют вид прямой линии, что доказывает правильность сделанного ранее предположения о протекании реакции гидролиза по псевдопервому порядку [9–12]. Эффективные константы скорости реакции находят графически из тангенса угла наклона прямой в координатах $\{\ln [P_{\infty}/(P_{\infty} - P)], t\}$ по методу наименьших квадратов на начальных участках кривых высвобождения моносахаридов. Энергию активации процесса определяют из уравнения Аррениуса. Значения эффективных суммарных констант скорости реакции и эффективной энергии активации процесса представлены в табл. 2.

В табл. 3 приведены некоторые макрокинетические константы накопления продуктов, не претерпевающих окислительной деструкции в процессе кислотного гидролиза.

Из табл. 3 видно, что в процессе гидролиза изученных видов сырья наиболее быстро происходит накопление глюкозы и фруктозы. Во

Т а б л и ц а 2

Кинетические характеристики гидролиза древесного сырья раствором серной кислоты и определение суммарной кажущейся энергии активации процесса

Kinetic characteristics of the hydrolysis of wood raw materials with sulfuric acid solution and determining the total apparent activation energy of the process

Температура, °С	Эффективная константа скорости $k_{эф} \cdot 10^4, c^{-1}$	Кажущаяся суммарная энергия активации, кДж/моль
95	2,17 ± 0,03	20,1 ± 0,5
100	2,44 ± 0,05	20,1 ± 0,5
105	2,62 ± 0,07	20,1 ± 0,5

всех случаях отмечается деструкция продуктов. Кинетические кривые накопления в результате гидролиза имеют экстремумы [13–17].

В результате анализа кинетики накопления и разрушения сахаров при кислотном гидролизе определены условия достижения наибольшей степени конверсии при сохранении лабильных углеводов: температура 100 °С, время 0,5 ч, концентрация кислоты 5% об. масс.

В состав получаемой смеси углеводов входят все основные моно- и дисахариды, которые являются высокопитательными веществами с повышенной биологической ценностью и могут быть использованы в рецептурах питательных сред. Гидролизаты, полученные в виде водных растворов, содержащих до 40 мг/мл свободных сахаров, подвергали нейтрализации до значения рН среды 6,0–7,0 и последующей лиофильной сушке. Сухие гидролизаты использовали в составе микробиологической среды для интенсивного выращивания микрофлоры. Состав модельной питательной среды (г/л): пептон — 20; дрожже-

Т а б л и ц а 3

Эффективные значения констант скоростей накопления отдельных углеводов $k_{эф}$, их выход X и эффективные значения энергии активации в процессе гидролиза
Effective values of the rate constants of accumulation of individual carbohydrates $k_{эф}$, their yield X and effective values of activation energy in the process of hydrolysis

Углевод	Температура, °С						Эффективная энергия активации, кДж/моль
	95		100		105		
	$k_{эф} \cdot 10^4, c^{-1}$	$X^*, \%$	$k_{эф} \cdot 10^4, c^{-1}$	$X^*, \%$	$k_{эф} \cdot 10^4, c^{-1}$	$X^*, \%$	
Ara	0,77 ± 0,02	50,3	1,13 ± 0,03	51,4	1,26 ± 0,01	54,6	18,1 ± 0,3
Gal	0,82 ± 0,02	49,2	1,16 ± 0,01	51,0	1,52 ± 0,02	53,4	20,6 ± 0,2
Glc	1,24 ± 0,03	56,2	1,33 ± 0,03	58,7	1,65 ± 0,02	64,5	22,4 ± 0,1
Xyl	1,63 ± 0,02	44,5	1,77 ± 0,03	46,7	2,52 ± 0,04	54,1	26,5 ± 0,5
Man	1,14 ± 0,01	31,4	1,42 ± 0,02	34,7	1,92 ± 0,03	40,3	19,6 ± 0,2
Fru + Sach	1,45 ± 0,03**	63,2	1,55 ± 0,03	66,8	1,93 ± 0,02	69,2	20,9 ± 0,1
Pib	0,96 ± 0,02	32,6	1,21 ± 0,03	39,4	1,78 ± 0,02	41,7	21,3 ± 0,2
Lac	1,11 ± 0,02	44,0	1,19 ± 0,02	49,4	1,42 ± 0,01	55,7	18,8 ± 0,5

* Выход определяли по истечении 0,5 ч гидролиза 5%-ной кислотой.

** Определено условное значение константы по суммарному содержанию.

вой экстракт — 14; K_2HPO_4 — 6; KH_2PO_4 — 3; $NaCl$ — 5; $MgSO_4$ — 5; полученный гидролизат — 10; исходный pH равен 6,8. Культивирование в данной среде продуцента *E. coli* 1814 позволяло с большой скоростью выращивать биомассу продуцента, развитие которого за 6 ч культивирования обеспечивало увеличение оптической плотности культуральной жидкости D_{546} в 9–10 раз против исходного значения, что является подтверждением эффективности использования данного гидролизата для микробиологических целей.

Полученные гидролизаты использовали также в качестве ингредиента кормов для выращивания продуктивных животных. Состав корма, %: пшеница 26,92; ячмень 44,14; отруби пшеничные 10,0; шрот подсолнечный 5,0; глютен кукурузный 3,0; шрот соевый 2,0; мука рыбная 5,0; опытный гидролизат 5,0; лизин кормовой 5,0; $CaCO_3$ 0,86; соль 0,25; фосфат обесфторенный 1,70; витаминный премикс 1,0; ферментный препарат эндо-1,4- β -ксилаза 0,01; ваниль 0,01. В 1 кг корма содержалось: обменной энергии — 12,64 МДж; сырого протеина — 178,4 г; лизина — 8,3 г; метионина с цистином — 6,0 г; клетчатки — 50,0 г; жира — 23,1 г; кальция — 11,5 г; фосфора — 7,6 г.

Использование разработанной добавки для выращивания молодняка свиней позволило повысить продуктивность животных на 8...10 % и снизить затраты на корма для получения единицы продукции на 6...9 %.

Таким образом, кинетический анализ процесса кислотного гидролиза древесины подтвердил возможность осуществления управляемого гидролитического распада древесной биомассы с целью получения высокоэффективных питательных продуктов.

Список литературы

[1] Трофимова Н.Н., Гордиенко И.И., Бабкин В.А. Изучение зависимости выхода редуцирующих веществ от параме-

- тров кислотного гидролиза целлолигина лиственницы // Химия растительного сырья, 2005. № 4. С. 25–28.
- [2] Иванкин А.Н., Красноштанова А.А. Гидролиз нанобиомакромолекулярных систем. М.: МГУЛ, 2010. 394 с.
- [3] Горохов Д.Г., Бабурин М.И., Иванкин А.Н., Прошина О.П. Жидкое биотопливо из растительного и животного сырья: технические и экономические аспекты // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2010. Т. 73. № 4. С. 74–78.
- [4] Сушкова В.И., Воробьева Т.И. Безотходная конверсия растительного сырья в биологически активные вещества. М.: Экология, 2007. 204 с.
- [5] Rafiqul I.S., Sakinah A.M. Design of process parameters for the production of xylose from woodsawdust // Chemical Engineering Research and Design, 2012, v. 90, no. 9. pp. 1307–1312.
- [6] Лисицын А.Б., Иванкин А.Н., Неклюдов А.Д. Методы практической биотехнологии. М.: Изд-во ВНИИМП, 2002. 402 с.
- [7] Корольков И.И. Перколяционный гидролиз растительного сырья. М.: Лесная пром-сть, 1990. 272 с.
- [8] Неклюдов А.Д., Иванкин А.Н. Коллаген: получение, свойства и применение. М.: МГУЛ, 2007. 336 с.
- [9] Оболенская А.В., Ельницкая З.П., Леонова А.А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы: учеб. пособие для вузов. М.: Экология, 1991. 320 с.
- [10] Неклюдов А.Д., Иванкин А.Н. Экологические основы биотехнологических производств: учеб. пособие. М.: МГУЛ, 2002. 404 с.
- [11] Трофимова Н.Н., Бабкин В.А. Изучение кислотного гидролиза полисахаридов древесины лиственницы для получения кристаллической глюкозы // Химия растительного сырья, 2009. № 3. С. 31–37.
- [12] Nejatizadeh-Barandozi F., Tahmasebi S. FT-IR study of the polysaccharides isolated from the skin juice, gel juice, and flower of *Aloe vera* tissues affected by fertilizer treatment // Organic and Medicinal Chemistry Letters, 2012, no. 2, pp. 33–37.
- [13] Халимова Л.Х., Шакиров А.Н., Скорняков А.Н., Петухова Н.И., Зорин В.В. Исследование влияния предобработки древесных опилок глицерином и их ферментативный гидролиз // Башкирский химический журнал, 2012. № 4 (19). С. 10–12.
- [14] Jin S., Zhang G., Zhang P., Li F., Fan S., Li J. Thermochemical pretreatment and enzymatic hydrolysis for enhancing saccharification of Catalpa sawdust // Bioresource Technology, 2016, v. 205, no. 4, pp. 34–39.
- [15] Wang B., Shen X.-J., Wen J.-L., Xiao L., Sun R.-C. Evaluation of organosolv pretreatment on the structural characteristics of lignin polymers and follow-up enzymatic hydrolysis of the substrates from Eucalyptus wood // International Journal of Biological Macromolecules, 2017, v. 97, no. 4, pp. 447–459.
- [16] Кононов Г.Н. Дендрохимия. В 2-х томах. М.: МГУЛ, 2015. Т. 1. 480 с.
- [17] Кононов Г.Н. Дендрохимия В 2-х томах. М.: МГУЛ, 2015. Т. 2. 481с.

Сведения об авторах

Олиференко Галина Львовна – канд. хим. наук, доцент кафедры химии МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), oliferenko2@inbox.ru

Иванкин Андрей Николаевич — д-р хим. наук, профессор кафедры химии МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), aivan-kin@mgul.ac.ru

Жилин Юрий Николаевич — канд. хим. наук, доцент кафедры химии МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), iouri-jiline@yandex.ru

Прошина Ольга Петровна — канд. хим. наук, доцент кафедры химии МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), proshina@mgul.ac.ru

Зарубина Анжелла Николаевна — канд. хим. наук, доцент кафедры химии МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zarubina@mgul.ac.ru

Вострикова Наталья Леонидовна — канд. техн. наук, зав. лабораторией ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН», nvostrikova@list.ru

Куликовский Андрей Владимирович — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН», kulikovskiy87@gmail.com

Бабурин Марина Ивановна — канд. биол. наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН», baburina2005@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 14.06.2017 г.

KINETICS OF ACID TRANSFORMATION OF NATURAL POLYSACCHARIDES OF WOOD BIOMASS TO MONO SUGAR FOR OBTAINING FEED ADDITIVES AND MICROBIOLOGICAL MEDIA

G.L. Oliferenko¹, A.N. Ivankin¹, Yu.N. Zhilin¹, O.P. Proshina¹, A.N. Zarubina¹, N.L. Vostrikova², A.V. Kulikovskiy², M.I. Baburina²

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

²«Federal Scientific Center of Food Systems them. V.M. Gorbатов RAS», Talalikhin st., 26, 109316, Moscow, Russia

oliferenko2@inbox.ru

The problem of processing polysaccharides of plant tissues by the method of hydrolysis into simple sugars and obtaining on their basis valuable food products has important economic value and remains relevant. The study of the kinetics of chemical degradation of the wood biomass for subsequent production of components microbiological nutrient media and feed farm animals. Sawdust of pine wood *Pinus sylvestris* 55 years of age and sawdust oak *Quercus robur* the age of 120 years were used for the experiment. Hydrolysis of sawdust was carried out by diluted sulfuric acid at the boiling point of the solution 90–105 °C for 0–6 hours. Carbohydrate content ratio in the hydrolysates was carried out by chromatographic method using an electrochemical detector. The total quantitative content of carbohydrates in the hydrolysates was determined in terms of glucose using spectrophotometry with anthrone reagent. Studies have shown that the selected conditions of hydrolysis allow about 0,5 hour to release from hemicellulose about a third of the sugar contained in the wood. Further heat treatment leads to the disintegration of these carbohydrates and their transformation into other sugars. To examine the kinetics of accumulation and destruction of sugars during acid hydrolysis allowed us to determine the conditions for achieving the highest degree of conversion while maintaining the labile carbohydrates: 100 °C, time 0,5 hours, the concentration of acid is 5 % by mass. Based on the experimental data obtained, the effective rate constants of accumulation of individual carbohydrates, their yield and the values of the effective activation energies in the process of hydrolysis were found. Kinetic analysis of the process confirmed the possibility of controlled hydrolytic breakdown of woody biomass. The obtained hydrolysates in the form of aqueous solutions containing 40 mg/ml of free sugars, subjected to neutralization to a pH of 6,0–7,0 and subsequent freeze drying. The possibility of using dry hydrolysates in the composition of microbiological medium for intensive cultivation of microorganisms, and also as an ingredient in feed for growing productive animals.

Keywords: free carbohydrates of wood, kinetic analysis of formation, acid hydrolysis

Suggested citation: Oliferenko G.L., Ivankin A.N., Zhilin Yu.N., Proshina O.P., Zarubina A.N., Vostrikova N.L., Kulikovskiy A.V., Baburina M.I. *Kinetika kislotnoy transformatsii prirodnykh polisakharidov drevesnoy biomassy v monosakhara dlya polucheniya kormovykh dobavok i mikrobiologicheskikh sred* [Kinetics of acid transformation of natural polysaccharides of wood biomass to mono sugar for obtaining feed additives and microbiological media]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 61–67. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-61-67

References

- [1] Trofimova N.N., Gordienko I.I., Babkin V.A. *Izuchenie zavisimosti vykhoda redutsiruyushchikh veshchestv ot parametrov kislotnogo gidroliza tsellolignina listvennitsy* [A study of the dependence of the yield of reducing substances on the parameters of acid hydrolysis of larch cello lignin] *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2005, no. 4, pp. 25–28.
- [2] Ivankin A.N., Krasnoshtanova A.A. *Gidroliz nanobiomakromolekulyarnykh sistem* [Hydrolysis of nanobiocomacromolecular systems]. Moscow: MGUL Publ., 2010, 394 p.
- [3] Gorokhov D.G., Baburina M.I., Ivankin A.N., Proshina O.P. *Zhidkoe biotopivo iz rastitel'nogo i zhivotnogo syr'ya: tekhnicheskoe i ekonomicheskie aspekty* [Liquid biofuel from plant and animal raw materials: technical and economic aspects] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2010, t. 73, no. 4, pp. 74–78.
- [4] Sushkova V.I., Vorob'eva T.I. *Bezotkhodnaya konversiya rastitel'nogo syr'ya v biologicheski aktivnye veshchestva* [Wasteless conversion of plant raw materials into biologically active substances]. Moscow: Ecology Publ., 2007, 204 p.
- [5] Rafiqul I.S., Sakinah A.M. Design of process parameters for the production of xylose from woodsawdust. *Chemical Engineering Research and Design*, 2012, v. 90, no. 9, pp. 1307–1312.
- [6] Lisitsyn A.B., Ivankin A.N., Neklyudov A.D. *Metody prakticheskoy biotekhnologii* [Methods of practical biotechnology]. Moscow: VNIIMP Publ., 2002, 402 p.
- [7] Korol'kov I.I. *Perkolyatsionnyy gidroliz rastitel'nogo syr'ya* [Percolation hydrolysis of plant raw materials]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry], 1990, 272 p.
- [8] Neklyudov A.D., Ivankin A.N. *Kollagen: poluchenie, svoystva i primeneniye* [Collagen: production, properties and application]. Moscow: MGUL Publ., 2007, 336 p.
- [9] Obolenskaya A.V., El'nitskaya Z.P., Leonova A.A. *Laboratornye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy* [Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose]. Moscow: Ecology Publ., 1991, 320 p.
- [10] Neklyudov A.D., Ivankin A.N. *Ekologicheskie osnovy biotekhnologicheskikh proizvodstv* [Ecological foundations of biotechnological productions]. Moscow: MGUL Publ., 2002, 404 p.
- [11] Trofimova N.N., Babkin V.A. *Izuchenie kislotnogo gidroliza polisakharidov drevesiny listvennitsy dlya polucheniya kristallicheskoy glyukozy* [Study of the acid hydrolysis of larch wood polysaccharides to obtain crystalline glucose] *Chemistry of plant raw materials*, 2009, no. 3, pp. 31–37.

- [12] Nejatizadeh-Barandozi F., Tahmasebi S. FT-IR study of the polysaccharides isolated from the skin, gel juice, and flower of *Aloe vera* tissues, affected by fertilizer treatment. *Organic and Medicinal Chemistry Letters*, 2012, no. 2, pp. 33–37.
- [13] Khalimova L.Kh., Shakirov A.N., Skorniyakov A.N., Petukhova N.I., Zorin V.V. *Issledovanie vliyaniya predobrabotki drevesnykh opilok glitserinom i ikh fermentativnyy gidroliz* [Investigation of the effect of pretreatment of sawdust by glycerin and their enzymatic hydrolysis] *Bashkirsky khimicheskoe zhurnal*, 2012, no. 4 (19), pp. 10–12.
- [14] Jin S., Zhang G., Zhang P., Li F., Fan S., Li J. Thermochemical pretreatment and enzymatic hydrolysis for enhancing saccharification of Catalpa sawdust. *Bioresource Technology*, 2016, v. 205, no. 4, pp. 34–39.
- [15] Wang B., Shen X.-J., Wen J.-L., Xiao L., Sun R.-C. Evaluation of organosolv pretreatment on the structural characteristics of lignin polymers and follow-up enzymatic hydrolysis of the substrates from Eucalyptus wood. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, v. 97, no. 4, pp. 447–459.
- [16] Kononov G.N. *Dendrokimiya* [Dendrochemistry]. In 2 v. Moscow: MGUL Publ., 2015, v. 1, 480 p.
- [17] Kononov G.N. *Dendrokimiya* [Dendrochemistry]. In 2 v. Moscow: MGUL Publ., 2015, v. 2, 481 p.

Authors' information

Oliferenko Galina L'vovna — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Department of Chemistry BMSTU (Mytishchi branch), oliferenko2@inbox.ru

Ivankin Andrey Nikolayevich — Dr. Sci. (Chem.), Professor of the Department of Chemistry BMSTU (Mytishchi branch), aivankin@mgul.ac.ru

Zhilin Yuriy Nikolayevich — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Department of Chemistry BMSTU (Mytishchi branch), iouri-jiline@yandex.ru

Proshina Ol'ga Petrovna — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Department of Chemistry BMSTU (Mytishchi branch), proshina@mgul.ac.ru

Zarubina Anzhella Nikolaevna — Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Department of Chemistry BMSTU (Mytishchi branch), zarubina@mgul.ac.ru

Vostrikova Natal'ya Leonidovna — Cand. Sci. (Tech.), Head of Laboratory of Federal Scientific Center of Food Systems them. V.M. Gorbатов RAS, nvostrikova@list.ru

Kulikovskiy Andrey Vladimirovich — Cand. Sci. (Tech.), leading scientist of the Federal Scientific Center of Food Systems them. V.M. Gorbатов RAS, kulikovsky87@gmail.com

Baburina Marina Ivanovna — Cand. Sci. (Biol.), Associate Professor, leading of the scientist Federal Scientific Center of Food Systems them. V.M. Gorbатов RAS, baburina2005@yandex.ru

Received 14.06.2017

УДК 676.064.1; 674:678.02(075.8)

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-68-72

СОСТАВ ДЛЯ ГИДРОФОБИЗАЦИИ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.М. Тарасов, М.В. Лопатников, А.Ю. Гранкин, П.К. Леонтьев, И.В. Грачева

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

smtarasoff@mail.ru

При решении задач, связанных с разработкой экологически безопасных и высокоэффективных составов для придания гидрофобности целлюлозным и древесным материалам, возникает вопрос о возможности замены традиционно используемых компонентов с целью качественного улучшения свойств существующих материалов на основе целлюлозы и композиционных материалов на основе древесины. В данной работе решаются задачи, связанные с: повышением гидрофобизирующей эффективности состава для придания гидрофобности целлюлозным и древесным материалам; снижением расхода стабилизатора за счет его более эффективного действия при стабилизации состава в слабокислой среде при $\text{pH} = 5,5 \dots 6,0$; улучшением осаждения и удержания катионных дисперсных частиц состава на целлюлозном волокне; повышением эффективности состава при pH до 8,0; увеличением механической прочности целлюлозного материала при его формовании в нейтральной и слабощелочной среде; уменьшением отрицательного влияния на белизну целлюлозного материала; увеличением длительности срока хранения готовой бумаги. Решение поставленных задач обеспечивается тем, что в качестве главной гидрофобизирующей основы разработанного состава используются канифоль (живичная, живичная модифицированная, талловая или талловая модифицированная), парафин, а также алкиламидопропилбетаины высших жирных кислот. Приводятся данные, которые свидетельствуют о том, что применение разработанного гидрофобизирующего состава не оказывает выраженного отрицательного эффекта на физико-механические свойства офсетной бумаги. При незначительном снижении разрывной длины возрастает стойкость поверхности бумаги к выщипыванию, которая важна при офсетной печати. Приведенные данные могут быть использованы в технологии изготовления промышленно вырабатываемых бумаги и картона для повышения их качественных показателей и замены импортных гидрофобизирующих составов на отечественные инновационные разработки.

Ключевые слова: целлюлоза, древесные композиционные материалы, гидрофобизирующая эффективность, алкиламидопропилбетаин

Ссылка для цитирования: Тарасов С.М., Лопатников М.В., Гранкин А.Ю., Леонтьев П.К., Грачева И.В. Состав для гидрофобизации целлюлозных материалов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 68–72. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-68-72

Разработка новых и улучшение качества существующих целлюлозных и древесных композиционных материалов является одним из приоритетных направлений МГУЛ (ныне — Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана) [1]. Это отражено во многих научных работах, выполненных сотрудниками университета [2, 3].

Состав для гидрофобизации целлюлозных материалов

Данная работа является продолжением исследований авторов в области разработки экологически безопасных и высокоэффективных составов для придания гидрофобности целлюлозным и древесным материалам [4].

Формулы и рецептуры составов запатентованы [5]. Составы в зависимости от их назначения могут содержать канифоль талловую модифицированную, парафин, талловые жирные кислоты и стабилизатор, в качестве которого используются лаурилсульфат натрия, лауретсульфат натрия, кокоамидопропилбетаин или кокоамидопропиламинохлорид [6–8].

Ранее разработанные авторами составы обладали недостатками, которые были выявлены в результате лабораторных исследований и

опытно-промышленных испытаний. К наиболее распространенным недостаткам относятся: 1) относительно малое содержание канифоли и, как следствие, недостаточно высокая гидрофобизирующая эффективность; 2) высокое содержание стабилизатора; 3) использование в композиции состава только талловой модифицированной канифоли, что ограничивает его применение; 4) наличие в составе талловых жирных кислот, имеющих сравнительно невысокую гидрофобизирующую эффективность, но способных при определенных условиях вызывать ряд производственных проблем: нарушение обезвоживания бумаги в сеточной части буммашины, «смоляные затруднения», особенно при плохом качестве производственной воды [9] и используемых коагулянтов [10]; 5) резкое снижение гидрофобизирующей эффективности состава при $\text{pH} > 6,5$.

Цель работы

Задачи, решаемые в данной работе, заключаются в следующем: повышение гидрофобизирующей эффективности состава; снижение расхода стабилизатора за счет его более эффективного действия при стабилизации состава в слабокислой среде при $\text{pH} = 5,5 \dots 6,0$; улучшение осажде-

ния и удержания катионных дисперсных частиц состава на целлюлозном волокне; по-вышение эффективности при pH до 8,0; увеличение механической прочности целлюлозного материала при его формовании в нейтральной и слабощелочной среде; уменьшение отрицательного влияния на белизну целлюлозного материала; увеличение длительности срока хранения готовой бумаги.

Решение поставленных задач обеспечивается тем, что в качестве главной гидрофобизирующей основы разработанного состава используются канифоль (живичная, живичная модифицированная, талловая или талловая модифицированная) и парафин. Состав стабилизирован в слабокислой среде и дополнительно содержит алкиламидопропилбетаины высших жирных кислот в следующем соотношении компонентов, масс. %:

Канифоль.....	62–69
Парафин,%	8–16
Алкиламидопропилбетаины высших жирных кислот, %.....	17–23

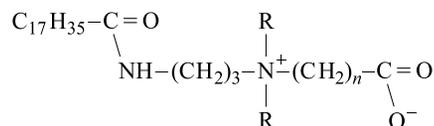
Указанные выше сорта канифоли часто используются для гидрофобизации целлюлозных материалов, так как применение талловой немодифицированной канифоли весьма ограничено. Водные дисперсии канифоли отличаются трудностью приготовления и низкой стабильностью, а в виде натриевого мыла эта канифоль недостаточно эффективна и имеет повышенную чувствительность к солям жесткости воды. В разработанном составе канифоль находится в дисперсном виде. Используется живичная канифоль сосновая марки А (российского или китайского производства) и ее модификации, что важно при гидрофобизации бумаги, для которой нормируется показатель «белизна». Для всех остальных видов целлюлозных и древесных композиционных материалов может применяться канифоль практически любой марки, например, талловая, экстракционная и их модификации.

Для гидрофобизации целлюлозных материалов важно иметь стабильный состав поставляемых промышленных партий, которые должны соответствовать требованиям ГОСТ или ТУ.

Парафин придает целлюлозному материалу высокую гидрофобность и повышает его эксплуатационные свойства, но при высоком содержании отрицательно влияет на механическую прочность материала. Помимо усиления гидрофобизирующей эффективности разработанного состава, парафин облегчает диспергирование талловой модифицированной канифоли.

Алкиламидопропилбетаины высших жирных кислот представляют собой полусинтетические продукты — смесь бетаинов на основе амидов

растительных жирных кислот. Они оказывают на водные дисперсии канифоли достаточно хорошее стабилизирующее действие, не склонны к гидролизу. Алкиламидопропилбетаины вырабатываются из смеси различных жирных кислот, в том числе ненасыщенных, поэтому содержат примеси, способные с течением времени окисляться. Рассмотрим в качестве примера формулу амидопропилбетаина стеариновой кислоты. Она может быть следующей:



Здесь R может быть: —H
—CH₃
—C₂H₅

$n = 2, 3, 4$ (чаще всего).

Алкиламидопропилбетаины высших жирных кислот рекомендуются для стабилизации составов на основе канифоли, предназначенных для гидрофобизации широкого ассортимента бумаги и картона. Наиболее эффективно их применение для целлюлозных материалов, содержащих в композиции вторичное волокнистое сырье.

В предлагаемом гидрофобизирующем составе использовались алкиламидопропилбетаины высших жирных кислот различных зарубежных и отечественных производителей.

Результаты и обсуждение

Разработанный гидрофобизирующий состав представляет собой сложную многокомпонентную дисперсию, размеры частиц которой могут варьироваться от коллоидных (< 0,1 мкм) до микрогетерогенных (> 1 мкм) со средним размером около 1 мкм (при концентрации 1 % и менее). При концентрации гидрофобизирующего состава более 25 % его дисперсия представляет собой твердый гель со слабо выраженными текучими свойствами, который при разбавлении и перемешивании вновь восстанавливает жидкое дисперсное состояние.

Компоненты состава: канифоль 9 г (64,3 %); парафин 2 г (14,3 %); алкиламидопропилбетаины 3 г (21,4 %); серная кислота для доведения состава до pH = 5,5...6,0.

Методика приготовления состава. Алкиламидопропилбетаины загружают в предварительно взвешенный стакан объемом 250 мл, доливают около 150 мл дистиллированной воды, ставят на водяную баню, включают нагрев и перемешивание с помощью механической мешалки. Температура в стакане постепенно доводится до 85...90 °С с максимальным темпом нагрева.

Смесь твердых канифоли и парафина помещают в фарфоровую емкость и нагревают до

полного сплавления компонентов с образованием однородного маслянистого расплава ($t \approx 120 \text{ }^\circ\text{C}$). Расплав необходимо постепенно вводить в стакан с алкиламидопропилбетаином, так как резкий ввод всей массы расплава может привести к вскипанию смеси и выплеску ее через край стакана.

Сразу после ввода смеси канифоли и парафина в стакане образуется однородная дисперсия с желтоватым оттенком. Значение рН дисперсии доводят до значения 5,5...6,0 добавлением небольшого количества серной кислоты (обычно от одной до нескольких капель в зависимости от концентрации кислоты). При достижении указанного значения рН возможно осветление дисперсии. Затем проводят интенсивное перемешивание дисперсии при температуре 85...90 °С в течение не менее 1 ч, что необходимо для достижения ее однородности.

Для получения дисперсии необходимой концентрации (25 % и более) производят ее выпаривание при тех же условиях. Обычно выпаривание прекращают при сильном возрастании вязкости дисперсии, делающем затруднительным ее дальнейшее перемешивание (при концентрации дисперсии выше 30 %). Время выпаривания обычно составляет 1...2 ч.

При достижении вязкости дисперсии, когда перемешивание еще возможно, но уже становится затруднительным, нагрев выключают, горячую воду из водяной бани сливают, после чего наполняют ее холодной водой. Через 5 мин операцию повторяют до 5 раз для постепенного охлаждения готовой дисперсии. Процесс заканчивают при температуре готовой дисперсии около 35 °С.

Общая продолжительность процесса в зависимости от требуемой концентрации готового состава составляет от 3 до 4 ч.

Апробация полученного состава. В качестве ближайшего аналога был выбран один из представителей семейства канифольных гидрофобизирующих составов «Сакоцелл», производимый

для российского рынка по финской лицензии.

Изготавливалась пробная лабораторная партия бумаги офсетной № 1 массой 70 г/м² зольностью 10 % со следующим составом по волокну: целлюлоза сульфатная хвойная беленая — 50 %, степень помола — 30 °ШР; целлюлоза сульфатная лиственная беленая — 50 %, степень помола — 32 °ШР. Изготовление офсетной бумаги № 1 на лабораторном листоотливном аппарате включает следующие этапы:

1. Роспуск волокнистого материала (целлюлозы) в воде с образованием водно-волокнутой суспензии.

2. Введение в водно-волокнутую суспензию минерального наполнителя (каолина).

3. Введение в водно-волокнутую суспензию химических добавок в следующем порядке и со следующими расходами по сухому веществу: катионный крахмал — 5 кг/т; гидрофобизирующий состав — 10 кг/т; сульфат алюминия — 30 кг/т.

4. Корректировка рН водно-волокнутой суспензии добавкой серной кислоты или гидроксида натрия до необходимого значения (рН = 6,5 и рН = 7,5).

5. Формование бумажного полотна путем фильтрации водно-волокнутой суспензии через сетку листоотливного аппарата с образованием на сетке мокрого бумажного полотна.

6. Прессование бумажного полотна, заключающееся в механическом отжиме воды из него при помощи специального валика.

7. Сушка бумажного полотна при температуре около 95 °С в течение 7 мин.

Свойства офсетной бумаги, изготовленной с использованием предлагаемого состава и ближайшего аналога, представлены в таблице.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что использование разработанного гидрофобизирующего состава не оказывает выраженного отрицательного эффекта на физико-механические

Т а б л и ц а

Свойства офсетной бумаги
Offset paper properties

Состав для обработки	Показатель					
	Разрывная длина, м	Степень проклейки, мм	Поверхностная впитываемость, г/м ²	Влагопрочность, %	Выщипывание, м/с	Излом, ч.д.п.
рН = 6,5						
Без реагентов	4000	0,2	70	5	2,0	4
Предлагаемый состав	3900	2,0	8	7	2,3	4
Ближайший аналог	3900	2,0	10	8	2,2	4
рН = 7,5						
Без реагентов	4100	0,2	70	5	2,1	5
Предлагаемый состав	4000	1,8	14	6	2,3	5
Ближайший аналог	4000	0,8	40	5	2,2	4

свойства офсетной бумаги. При незначительном снижении разрывной длины несколько возрастает стойкость поверхности к выщипыванию, имеющая большое значение при офсетной печати.

При pH = 6,5 физико-механические показатели бумаги, изготовленной с использованием предлагаемого состава и ближайшего аналога, существенно не различаются, хотя отмечена несколько более выраженная гидрофобизирующая эффективность предлагаемого состава (значение поверхностной впитываемости 8 г/м² против 10 г/м² у ближайшего аналога).

При pH = 7,5 ближайший аналог не показал удовлетворительной гидрофобизирующей эффективности (значения степени проклейки и поверхностной впитываемости ниже установленных нормативами), в то время как предлагаемый состав проявил достаточную эффективность в этих условиях. При использовании же современных коагулянтов (полигидроксихлориды алюминия взамен его сульфата) от предлагаемого состава следует ожидать еще более высокой действенности, так как новые коагулянты эффективны в нейтральной и слабощелочной среде.

Выводы

Результаты данной работы могут быть использованы в технологии изготовления промышленно вырабатываемых бумаги и картона для повышения их качественных показателей и замены импортных гидрофобизирующих составов на отечественные инновационные разработки.

Сведения об авторах

Тарасов Сергей Михайлович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), smtarasoff@mail.ru

Лопатников Михаил Викторович — канд. техн. наук, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), lopatnikov@mgul.ac.ru

Гранкин Александр Юрьевич — программист управления образовательных технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), grankin@bmstu.ru

Леонтьев Павел Константинович — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), pashe11@yandex.ru

Грачева Ирина Владимировна — студентка МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), irena.magic@yandex.ru

Список литературы

- [1] Обливин А.Н., Лопатников М.В. Теоретические основы формирования композиционных материалов на древесных наполнителях // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2014. № 2 (101). С. 103–108.
- [2] Вьюнков С.Н. Технология древесных плит с использованием связующего на основе жидкого стекла: Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1999. 109 с.
- [3] Тарасов С.М. Полиоксихлорид алюминия в технологии целлюлозных композиционных материалов: Дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУЛ, 2004. 163 с.
- [4] Non-organic/polymer fiber composite and method of making same: United States Patent 5091252, 1992. 10 p.
- [5] Состав для гидрофобизации целлюлозных материалов Пат. 2334037 Российская Федерация / С.М. Тарасов.; заявитель и патентообладатель МГУЛ. № 2007106660/12, заявл. 22.02.2007, опубликован 20.09.08. Бюл. № 26.
- [6] Culita D.C., Marinescu G., Bleotu C., Chifiriuc M.C., Tudose M., Musuc A.M., Somacescu S., Munteanu C. Multifunctional Silver Nanoparticles-Decorated Silica Functionalized with Retinoic Acid with Anti-Proliferative and Antimicrobial Properties // J. Inorganic and Organo-metallic Polymers and Materials, 2016, v. 26, no. 5, pp. 1043–1052.
- [7] Sathees K.S., Kanagaraj G. Investigation of Characterization and Mechanical Performances of Al₂O₃ and SiC Reinforced PA6 Hybrid Composites // J. Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2016, v. 26, no. 4, pp 788–798.
- [8] Modiri S. Synthesis of an Organic–Inorganic Alq₃-Based Hybrid Material by Sol–Gel Method // J. Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2015, v. 25, no. 4, pp 680–686.
- [9] Park W. Synthesis of Multifunctional Silica Composites Encapsulating a Mixture Layer of Quantum Dots and Magnetic Nanoparticles // J. Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2014, v. 24, no. 1, pp 78–86.
- [10] Zamani F., Izadi E. Synthesis and Characterization of Copper (II)–Cysteine / SiO₂–Al₂O₃ as an Efficient and Reusable Heterogeneous Catalyst for the Oxidation of Aromatic Alcohols // J. Inorganic and Organometallic Polymers and Materials, 2013, v. 23, no. 6, pp 1501–1510.

Статья поступила в редакцию 30.08.2017 г.

COMPOSITION FOR HYDROPHOBIZATION OF CELLULOSIC MATERIALS

S.M. Tarasov, M.V. Lopatnikov, A.Yu. Grankin, P.K. Leontyev, I.V. Gracheva

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

smtarasoff@mail.ru

Solving problems related to the development of ecologically safe and highly effective compositions for imparting water repellency to cellulosic and wood materials, the question about the possibility of replacing the traditionally used components for qualitative improvement of properties of existing materials based on cellulose and wood based composite materials arises. In this paper, the authors addressed the challenges associated with improving the efficiency of hydrophobizing composition to impart the hydrophobicity of cellulose and wood materials; reducing the consumption of stabilizer due to its more effective action in the stabilization of the composition in a slightly acidic environment at pH = 5,5–6,0; to improve the deposition and retention of cationic dispersed particle composition on cellulose fiber; increasing the efficiency of the composition at pH to 8.0; increase the mechanical strength of the cellulose material during its formation in neutral and slightly alkaline environment; decrease the negative impact on the whiteness of the cellulose material; increasing the duration of the shelf life of the finished paper. The solution posed by the authors of the tasks is ensured by the fact, as the main framework developed hydrophobizing composition used rosin (gum, modified gum, tall oil or modified tall oil), paraffin, and higher fatty acids of alkylamidopolyamine. The authors present data that suggests that the use of the developed hydrophobe effect of ion composition has no pronounced negative effect on the physic-mechanical offset printing paper. With a slight reduction in breaking length increases the surface resistance of the paper to the plucking, which is important in offset printing. The given data can be used in technology of manufacturing of industrially produced paper and paperboard to enhance their quality indicators and replacement of import waterproofing compounds in the domestic innovative developments.

Keywords: cellulose, wood composite materials, repellent efficacy, alkylamidopoly-amine

Suggested citation: Tarasov S.M., Lopatnikov M.V., Grankin A.Yu., Leontyev P.K., Gracheva I.V. *Sostav dlya gidrofobizatsii tsellyuloznykh materialov* [Composition for hydrophobization of cellulosic materials]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 68–72. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-68-72

References

- [1] Oblivin A.N., Lopatnikov M.V. *Teoreticheskie osnovy formovaniya kompozitsionnykh materialov na drevesnykh napolnityakh* [Theoretical bases of forming composite materials on wood fillers] *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*, 2014, no. 2 (101), pp. 103–108.
- [2] V'yunkov S.N. *Tekhnologiya drevesnykh plit s ispol'zovaniem svyazuyushchego na osnove zhidkogo stekla* [Technology of wood boards using a binder based on liquid glass. Cand. Sci. (Tech.) diss.]. SPb., 1999, 109 p.
- [3] Tarasov S.M. *Polioksidhlorid alyuminiya v tekhnologii tsellyuloznykh kompozitsionnykh materialov* [Polyoxychloride of aluminium in technology of cellulose-content composite materials. Cand. Sci. (Tech.) diss.]. Moscow, MSFU Publ., 2004. 163 p.
- [4] Non-organic/polymer fiber composite and method of making same: United States Patent 5091252, 1992. 10 p.
- [5] *Sostav dlya gidrofobizatsii tsellyuloznykh materialov* [Composition for hydrophobization of cellulosic materials]. Pat. 2334037 Russian Federation. S.M. Tarasov. The applicant and the owner of the MGUH. No. 2007106660/12; Claimed. 22.02.007; Publ. 20.09.2008. Bul. no. 26.
- [6] Culita D.C., Marinescu G., Bleotu C., Chifriuc M.C., Tudose M., Musuc A.M., Somacescu S., Munteanu C. Multifunctional Silver Nanoparticles-Decorated Silica Functionalized with Retinoic Acid with Anti-Proliferative and Antimicrobial Properties. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2016, v. 26, no. 5, pp. 1043–1052.
- [7] Sathees K.S., Kanagaraj G. Investigation of Characterization and Mechanical Performances of Al₂O₃ and SiC Reinforced PA6 Hybrid Composites. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*. July 2016, v. 26, no. 4, pp. 788–798.
- [8] Modiri S. Synthesis of an Organic–Inorganic Alq₃-Based Hybrid Material by Sol-Gel Method. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2015, v. 25, no. 4, pp. 680–686.
- [9] Park W. Synthesis of Multifunctional Silica Composites Encapsulating a Mixture Layer of Quantum Dots and Magnetic Nanoparticles. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2014, v. 24, no. 1, pp. 78–86.
- [10] Zamani F., Izadi E. Synthesis and Characterization of Copper (II)–Cysteine / SiO₂–Al₂O₃ as an Efficient and Reusable Heterogeneous Catalyst for the Oxidation of Aromatic Alcohols. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2013, v. 23, no. 6, pp. 1501–1510.

Authors' information

Tarasov Sergey Mikhaylovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of BMSTU (Mytishchi branch), smtarasoff@mail.ru

Lopatnikov Mikhail Viktorovich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of BMSTU (Mytishchi branch), lopatnikov@mgul.ac.ru

Grankin Alexandr Yuryevich — programmer of educational technology control of BMSTU (Mytishchi branch), grankin@mgul.ac.ru

Leontyev Pavel Konstantinovich — student of BMSTU (Mytishchi branch), pashe11@yandex.ru

Gracheva Irina Vladimirovna — student of BMSTU (Mytishchi branch), irena.magic@yandex.ru

Received 30.08.2017

О НЕПРИМЕНИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ «СМАЧИВАЕМОСТЬ» ПО ГОСТ 595–79 ПРИ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ДРЕВЕСНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ДЛЯ НИТРОВАНИЯ

С.Н. Никольский, К.И. Ковалева, Г.Г. Политенкова, М.Г. Михалева, С.В. Стовбун

Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (ИХФ РАН), 119991, г. Москва, ул. Косыгина, д. 4

nikolskij56@mail.ru

Рассматриваются факторы, определяющие показатель «смачиваемость» по ГОСТ 595–79 древесной целлюлозы, предназначенной для последующей переработки в нитроцеллюлозу (коллоксилин, пироксилин), как один из важнейших параметров, определяющих ее пригодность для нитрования. В экспериментах целлюлозу использовали как в исходном состоянии, так и в виде агрегатированного материала после физико-химического модифицирования на экспериментальной установке ИХФ РАН. В результате экспериментов с образцами агрегатированной целлюлозы, полученными из товарной беленой и небеленой древесной целлюлозы как хвойных, так и лиственных пород древесины, установлено, что основными факторами, влияющими на показатель «смачиваемость» по ГОСТ 595–79, являются: наличие воздушных пузырей в целлюлозной массе; степень уплотнения волокнистой массы в процессе обезвоживания на сетке фильтра; использование оборотной воды при промывке целлюлозной суспензии. Таким образом, показатель «смачиваемость» по ГОСТ 595–79 для хлопковой целлюлозы: 1) зависит не только от физико-химических и морфологических свойств древесной целлюлозы, 2) не может быть критерием, определяющим качество древесной целлюлозы для нитрования, 3) не может быть критерием для сравнения древесной и хлопковой целлюлозы по отношению к процессу нитрования. Установлено, что независимо от величины показателя «смачиваемость» процесс нитрования обеспечивает получение конечной продукции с требуемой концентрацией окиси азота. Следовательно, показатель «смачиваемость» по ГОСТ 595–79, не может применяться в качестве базового критерия при оценке качества древесной целлюлозы при нитровании.

Ключевые слова: хлопковая целлюлоза, древесная целлюлоза для нитрования, пироксилин, показатель «смачиваемость», ГОСТ 595–79

Ссылка для цитирования: Никольский С.Н., Ковалева К.И., Политенкова Г.Г., Михалева М.Г., Стовбун С.В. О неприменимости показателя «смачиваемость» по ГОСТ 595–79 при оценке качества древесной целлюлозы для нитрования // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 73–76.
DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-73-76

В соответствии с требованиями ГОСТ 595–79 «Целлюлоза хлопковая. Технические условия» в перечне показателей качества присутствует такой параметр, как «смачиваемость». Хорошо известно, что это один из важнейших показателей, который определяет пригодность целлюлозы для нитрования. При этом вполне справедливо считается, что параметры ГОСТ 595–79, включая смачиваемость, достаточно полно отражают используемые в промышленности физико-химические свойства хлопковой целлюлозы, критичные для нитрования.

Тем не менее проводившиеся ранее эксперименты не позволяют однозначно определить комплекс физико-химических факторов, влияющих на смачиваемость хлопковой целлюлозы [1, 2]. В то же время с середины XXI в. и особенно в годы Великой Отечественной войны для нитрования и получения пироксилина широко использовалась древесная целлюлоза [3].

В связи с этим представляется крайне важным разобраться, в какой степени смачиваемость по ГОСТ 595–79 характеризует качество древесной целлюлозы по отношению к нитрованию.

Цель настоящей работы — рассмотреть факторы, влияющие на показатель «смачиваемость» древесной целлюлозы, но не связанные с ее физико-хими-

ческими или морфологическими особенностями, а также степень значимости данного параметра для процесса нитрования древесной целлюлозы.

Материалы и методы исследования

Материалом для экспериментов послужили следующие промышленные образцы товарной целлюлозы из древесины и однолетних растений:

- целлюлоза сульфатная беленая из смеси лиственных пород древесины по ГОСТ 28172–89, марка ЛС-0 (изготовитель — ОАО «Архангельский ЦБК»);
- целлюлоза сульфатная беленая из хвойных пород по ГОСТ 9571–89, марка ХБ-2 (изготовитель — ОАО «Архангельский ЦБК»);
- целлюлоза сульфитная беленая из хвойных пород горячего облагораживания (опытная партия, изготовитель — ОАО «Сясьский ЦБК»);
- целлюлоза хлопковая (изготовитель — компания UzCell, Узбекистан).

Древесную целлюлозу использовали как в исходном состоянии, так и в виде агрегатированного материала — агрегата целлюлозы (АЦ) после физико-химического модифицирования на экспериментальной установке ИХФ РАН до содержания альфа-целлюлозы более 98 % [4].

Основные стадии получения АЦ на экспериментальной установке.

I. Стадия подготовки сырья. Основные операции:

- роспуск товарной целлюлозы при жидкостном модуле 30 кг/кг;
- тонкое диспергирование волокнистой суспензии;
- обезвоживание на сетке нутч-фильтра с применением вакуума.

II. Стадия химического модифицирования подготовленного сырья. Основные операции:

- обработка волокнистой суспензии водным раствором едкого натра различной концентрации;
- промывка и обезвоживание конечного продукта.

III. Сушка конечного продукта.

Испытания образцов волокнистых полуфабрикатов по показателю «смачиваемость» проводили в соответствии с методикой ГОСТ 595–79.

Проколы в образцах АЦ выполняли стальной спицей диаметром 2 мм. Проколы делали медленно в виде сквозных вертикальных каналов с квазиравномерным распределением по торцевой поверхности образца. Геометрические размеры образцов с проколами полностью соответствовали требованиям нормативной документации на проведение испытаний.

Результаты и обсуждение

Для оценки степени связанности параметра смачиваемости древесной целлюлозы с ее физико-химическими или морфологическими свойствами был выполнен ряд экспериментов по оценке влияния на смачиваемость проколов тонкой спицей массы древесной целлюлозы.

Данные о зависимости смачиваемости от количества проколов в образце приведены в табл. 1. Для контроля измеряли смачиваемость образца из хлопковой целлюлозы.

Т а б л и ц а 1

Влияние количества проколов на смачиваемость образца древесной целлюлозы марки ЛС-0

Influence of the number of punctures on the absorption of a wood pulp sample of grade ЛС-0

Образец целлюлозы	Смачиваемость, г
Целлюлоза древесная (АЦ из целлюлозы ЛС-0)	
Контрольный образец (без проколов)	125
Образец целлюлозы с проколами	
5 проколов	136
10 проколов	135
20 проколов	132
Хлопковая целлюлоза (контрольный образец без проколов)	140

Как видно из табл. 1, при прокалывании массы целлюлозы ее смачиваемость возрастает: со значений, вообще не отвечающих требованиям ГОСТ 595-79, до значений, соответствующих второму сорту.

Вполне очевидно, что такой способ повышения смачиваемости древесной целлюлозы не связан ни с каким ее физико-химическим модифицированием или изменением морфологического строения.

Вероятнее всего, увеличение значений показателя «смачиваемость» обусловлено наличием воздушных пузырей в массе древесной целлюлозы. При этом образование воздушных пузырей вызвано более плотной упаковкой агрегатов целлюлозы по сравнению с хлопковой целлюлозой. Это обусловлено морфологическими различиями между древесной целлюлозой и хлопковой (ГОСТ 7500–85). При нанесении проколов возникают каналы, обеспечивающие беспрепятственное смачивание образцов АЦ. Воздушные пробки при этом исчезают. Показатель смачиваемости, соответственно, увеличивается практически до требуемых по ГОСТ 595–79 значений.

Это, в свою очередь, указывает на неприменимость параметра смачиваемости по ГОСТ 595–79 для древесной целлюлозы.

Для дополнительного подтверждения полученных результатов проведены эксперименты по влиянию на смачиваемость следующих факторов:

- 1) степени уплотнения массы на фильтре (изменяли за счет продолжительности фильтрации на сетке нутч-фильтра);
- 2) наличия мелкой фракции (в специальных экспериментах использовалась оборотная вода для промывки образца);
- 3) повторного роспуска образца (таким путем можно повысить показатель).

Установлено, что увеличение концентрации массы древесной целлюлозы при формировании на сетке приводит к существенному снижению ее смачиваемости (табл. 2).

Использование оборотной воды при окончательной промывке целлюлозы также приводит

Т а б л и ц а 2

Зависимость смачиваемости модифицированной древесной целлюлозы марки ЛС-0 от ее концентрации при формировании

Dependence of the absorption of modified wood pulp grade ЛС-0 on its concentration during molding

Концентрация массы, % а.с.в.	Смачиваемость, г
6,3	143
7,2	134
9,1	127

к уплотнению после сушки и, как следствие, к снижению смачиваемости древесной целлюлозы.

Применение достаточно простого технологического приема, а именно повторного роспуска и последующее формование с использованием свежей воды обеспечило значительное повышение показателя «смачиваемость» — с 119 до 135 г.

В заключение рассмотрим результат нитрования образцов модифицированной древесной целлюлозы марок ЛС-0, ХБ-2, сульфитной белевой хвойной целлюлозы, имеющих содержание альфа-целлюлозы более 98 %, смачиваемость которых по ГОСТ 595–79 находилась в интервале от 90 до 125 г. Установлено, что независимо от величины смачиваемости нитрование образцов проходило практически одинаково и объемная концентрация окиси азота для всех образцов составила 210...213 мл/г.

Выводы

В настоящей работе выявлено, что показатель «смачиваемость» по ГОСТ 595–79 для хлопковой целлюлозы:

- 1) зависит не только от физико-химических и морфологических свойств древесной целлюлозы;
- 2) не может быть критерием, определяющим качество древесной целлюлозы для нитрования;
- 3) не может быть критерием для сравнения древесной и хлопковой целлюлозы по отношению к процессу нитрования.

Сведения об авторах

Никольский Сергей Николаевич — канд. хим. наук, старший научный сотрудник Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, nikolskij56@mail.ru

Ковалева Ксения Игоревна — ведущий инженер Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, kovaleva_kseniya@bk.ru

Политенкова Галина Григорьевна — научный сотрудник Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, g_politenkova@mail.ru

Михалева Мария Геннадьевна — инженер-исследователь Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, wawe@bk.ru

Стовбун Сергей Витальевич — д-р. физ.-мат. наук, зав. лабораторией Института химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, s.stovbun@chph.ras.ru

Основанием для таких выводов послужила экспериментально установленная зависимость смачиваемости от манипуляций, не меняющих морфологические и физико-химические свойства целлюлозы. Следует отметить, что исторически введение показателя смачиваемости для древесной целлюлозы было связано с необходимостью отсеять бракованное сырье с относительно большим содержанием лигнина, смол и жиров. При современном производстве сульфатной белевой древесной целлюлозы доля остаточного лигнина значительно меньше этого количества [5] и поэтому не является проблемой для нитрования.

Список литературы

- [1] Фиошина М.А., Русин Д.Л. Основы химии и технологии порохов и твердых ракетных топлив. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2001. 207 с.
- [2] Дементьева Д.И., Кононов И.С., Мамашев Р.Г., Харитонов В.А. Введение в технологию энергонасыщенных материалов. Бийск: Алтайский ГТУ, 2009. 254 с.
- [3] Целлюлозно-бумажная промышленность СССР. Материалы о развитии отрасли. М.: Минлесбумпром СССР, 1983. 634 с.
- [4] Ковалева К.И., Горшков В.В., Никольский С.Н., Стовбун С.В. Технологическая автоматизированная линия физико-химической модификации товарной целлюлозы // Матер. 18-й Междунар. науч.-техн. конф. «Год экологии в России и на предприятиях ЦБП. Качество макулатурного сырья. Производство бумаги и картона для гофротары и упаковки», Караваево, 25–26 мая 2017 г. Караваево: ОАО «Караваево», 2017. С. 45–50.
- [5] Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. СПб.: Политехника, 2005.

Статья поступила в редакцию 04.09.2017 г.

ABOUT THE INDEPENDENCE OF THE INDICATOR «ABSORPTION CAPACITY» BY GOST 595–79 AT THE EVALUATION OF THE QUALITY OF WOOD CHEMICAL PULP FOR NITRATION

S.N. Nikolskiy, K.I. Kovaleva, G.G. Politenkova, M.G. Mikhaleva, S.V. Stovbun

Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, st. Kosygina, 4

nikolskij56@mail.ru

The factors determining the «absorption capacity» index according to GOST 595–79 of wood pulp for subsequent processing into nitrocellulose (colloxylin, pyroxylylene) are considered as one of the most important parameters determining its suitability for nitration. In experiments, cellulose was used both as a starting material and as aggregated material after physicochemical modification at the experimental installation of the Institute of Experimental Chemistry of the Russian Academy of Sciences. As a result of the conducted experiments on samples of aggregated cellulose obtained from commercial bleached and unbleached wood pulp, both coniferous and hardwood, it was found that the main factors determining the «absorption capacity» index in accordance with GOST 595–79 are: the presence of air bubbles in the pulp; the degree of compaction of the pulp during dehydration on the filter screen, the use of recycled water during the washing of the cellulosic suspension. Thus, it was experimentally shown that the «absorption capacity» index for GOST 595–79 for cotton cellulose, firstly, is not determined solely by the physicochemical and morphological properties of wood pulp, and secondly, it cannot be a criterion determining the quality of wood pulp for nitration and, thirdly, it cannot be a criterion for comparing wood and cotton cellulose with respect to the nitration process. It was found that irrespective of the value of the «absorption capacity» index, the nitration process provides the final product with the required concentration of nitric oxide. Consequently, the «absorption capacity» index in accordance with GOST 595–79 cannot be used as a basic criterion in assessing the quality of wood pulp during nitration.

Keywords: cotton cellulose, wood chemical pulp for nitration, pyroxylylene, «absorption capacity» indicator, GOST 595–79

Suggested citation: Nikolskiy S.N., Kovaleva K.I., Politenkova G.G., Mikhaleva M.G., Stovbun S.V. *O neprimenimosti pokazatelya «smachivaemost'» po GOST 595–79 pri otsenke kachestva drevesnoy tsellyulozy dlya nitrovaniya* [About the independence of the indicator «absorption capacity» by GOST 595–79 at the evaluation of the quality of wood chemical pulp for nitration]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 73–76. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-73-76

References

- [1] Fiozhina M.A., Rusin D.L. *Osnovy khimii i tekhnologii porokhov i tverdykh raketnykh topliv* [Fundamentals of chemistry and technology of propellants and solid rocket fuels]. Moscow: Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 2001, 207 p.
- [2] Dement'eva D.I., Kononov I.S., Mamashev R.G., Kharitonov V.A. *Vvedenie v tekhnologiyu energonasyschennykh materialov* [Introduction to the technology of energy-saturated materials]. Biysk: Altai State Technical University, 2009, 254 p.
- [3] *Tsellyulozno-bumazhnaya promyshlennost' SSSR. Materialy o razvitiit otrasli* [Pulp and paper industry of the USSR. Materials about the development of the industry]. Moscow: Minlesbumprom USSR, 1983, 634 p.
- [4] Kovaleva K.I., Gorshkov V.V., Nikolskiy S.N., Stovbun S.V. *Tekhnologicheskaya avtomatizirovannaya liniya fiziko-khimicheskoy modifikatsii tovarnoy tsellyulozy* [Technological automated line of physical and chemical modification of commodity pulp]. Materials of the 18th International Scientific and Technical Conference The Year of Ecology in Russia and at the pulp and paper industry. Quality of recycled raw materials. Manufacture of paper and cardboard for corrugated packaging and packaging, «Kara-vaevo» 25–26 May 2017, pp. 45–50.
- [5] *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva* [Technology of pulp and paper production]. In 3 t. St. Petersburg: Politechnica, 2005.

Authors' information

Nikolskiy Sergey Nikolaevich — Cand. Sci. (Chem.), senior scientist, Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, nikolskij56@mail.ru

Kovaleva Ksenia Igorevna — leading engineer of Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, kovaleva_kseniya@bk.ru

Politenkova Galina Grigoryevna — scientist, Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, g_politenkova@mail.ru

Mikhaleva Maria Gennadyevna — Cand. Sci. (Phys.-Math.), research engineer, Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, wawe@bk.ru

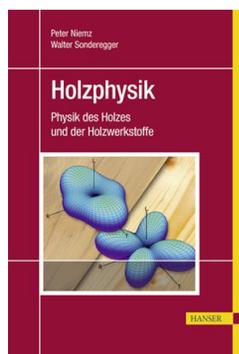
Stovbun Sergey Vitalyevich — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of laboratory of Semenov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, s.stovbun@chph.ras.ru

Received 04.09.2017

«HOLZPHYSIK: PHYSIK DES HOLZES UND DER HOLZWERKSTOFFE» — НОВАЯ КНИГА ПИТЕРА НИМЦА И ВАЛЬТЕРА СОНДЕРЕГГЕРА ДЛЯ НАУКИ И ПРАКТИКИ

Г.А. Горбачева

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



На пороге шестого технологического уклада, характеризующегося нацеленностью на развитие и применение наукоемких технологий, природный функциональный материал, возобновляемый ресурс — древесина — находит новые сферы применения. Новая книга профессора Питера Нимца (Peter Niemz) и доктора Вальтера Сондереггера (Walter Sonderegger) «Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe» («Физика древесины и древесных материалов»), вышедшая в августе 2017 г. в издательстве Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG (Германия), содержит сведения о строении, свойствах и качестве древесины и древесных материалов, являющиеся необходимой теоретической базой для технологических процессов перерабатывающих производств и дальнейшей эксплуатации изделий и конструкций. Авторы книги — сотрудники Института строительных материалов (IfB) Высшей технической школы Цюриха (ETHZ, Швейцария). Профессор Питер Нимц, выдающийся ученый, более 20 лет возглавлявший отдел физики древесины в IfB ETHZ, академик, член правления Международной академии наук о

древесине (IAWS), широко известен научными работами в области физики, математики, механики древесины и древесных материалов, технологии деревообработки. Доктор Вальтер Сондереггер, получивший научную степень за труды в области физики древесины, является автором многочисленных работ по исследованию физико-механических свойств древесины и древесных материалов. В книге изложены инновационные методики и результаты новейших исследований в области физики древесины, примеры практического использования древесины и древесных материалов, обширные справочные данные. Издание вносит значительный вклад в развитие физики древесины и древесных материалов, создает научную базу для расширения возможностей использования древесины как природного функционального материала и рекомендуется для использования в образовательном процессе, исследовательской деятельности и в перерабатывающей промышленности. **Ключевые слова:** физика древесины и древесных материалов, инновационные методики исследований, справочные данные

Ссылка для цитирования: Горбачева Г.А. «Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe» — новая книга Питера Нимца и Вальтера Сондереггера для науки и практики // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 77–79. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-77-79

В настоящее время, на пороге шестого технологического уклада [1], характеризующегося нацеленностью на развитие и применение наукоемких технологий, таких как био- и нанотехнологии, геновая инженерия, мембранные и квантовые технологии, фотоника, микромеханика, традиционный строительный и поделочный материал — древесина — становится все более популярным и находит новые сферы применения. Уникальное сочетание свойств этого возобновляемого ресурса позволяет расширить уже имеющийся спектр возможностей использования древесины как природного функционального материала. Появление инновационных методик исследований древесины в начале XXI в. способствовали развитию наук о строении и свойствах древесины и древесных материалов. Использование последних достижений науки в образовательном процессе и промышленности имеет важное значение и позволяет обеспечить выход на принципиально новый уровень экономики.

В августе 2017 г. в издательстве Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG (Германия) вышла новая книга Питера Нимца (Peter Niemz) и Вальтера Сондереггера (Walter Sonderegger) «Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe» («Физика древесины и древесных материалов») [2]. Авторы книги — сотрудники Института строительных материалов (IfB) Высшей технической школы Цюриха (ETHZ, Швейцария), старейшего учебного заведения Швейцарии, которое ежегодно входит в десятку лучших вузов мира [3]. Профессор Питер Нимц, выдающийся ученый, более 20 лет возглавлявший отдел физики древесины в IfB ETHZ [3], академик, член правления Международной академии наук о древесине (IAWS), член Регионального координационного совета по современным проблемам древесиноведения (РКСД), широко известен научными работами в области физики, математики, механики древесины и древесных материалов, технологии деревообработки. Его ученик, доктор Вальтер

Сондереггер, получил научную степень за труды в области физики древесины, является автором многочисленных работ по исследованию физико-механических свойств древесины и древесных материалов.

Книга «Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe» содержит сведения о строении, свойствах и качестве древесины и древесных материалов, служащие необходимой теоретической базой для технологических процессов деревоперерабатывающих производств и дальнейшей эксплуатации изделий и конструкций. Здесь представлены инновационные методики и результаты исследований, примеры практического использования древесины и древесных материалов. Первое издание книги Нимца (1993) [4] имело большой успех и нашло применение в разных сферах — образовании, науке и промышленности — в первую очередь благодаря удачному принципу построения: минимальное количество текста и большой объем наглядного материала. Данный способ подачи материала облегчает работу с книгой и для иностранных читателей. В новом издании на 580 страницах авторы сохранили тот же принцип и представили значительное количество формул, графиков, схем и таблиц.

Книга хорошо структурирована, включает 20 глав. Во введении содержатся краткие сведения о лесопользовании, мировых запасах древесины, физико-механических свойствах древесины, технологиях обработки древесины, производстве продукции в лесной и деревообрабатывающей промышленности. Отдельная глава посвящена ретроспективному обзору исследований в области физики древесины, истории формирования научно-исследовательских центров в области деревообработки в разных странах. Авторы книги отметили и несомненный вклад выдающихся российских ученых — профессора Ю.М. Иванова и профессора Б.Н. Уголева — в развитие физики древесины [5]. Строение древесины и структура древесных материалов, физические (влажность и свойства, связанные с ее изменением, плотность; тепловые, электрические, звуковые, оптические характеристики), механические, технологические и эксплуатационные свойства древесины и древесных материалов детально описаны авторами, отражена взаимосвязь между структурой и свойствами, влияние различных факторов на характеристики древесины и древесных материалов. Сведения из области механики древесины и древесных материалов подробно изложены авторами в нескольких главах, приводятся результаты многолетних экспериментальных исследований показателей механических свойств древесины и древесных материалов, выполненных сотрудниками отдела физики древесины под

руководством Нимца [2]. Разработка и внедрение в промышленность инновационных методик испытаний древесины и древесных материалов стали возможными благодаря достигнутым в XXI в. значительным успехам в области метрологии, особенно неразрушающего контроля. Данное направление исследований входит в сферу научных интересов Нимца, его вклад отмечен медалью Вильгельма Клаудица, которой он был награжден в 2014 г.

В книге подробно описаны методы синхротронной микротомографии, нейтронной радиографии и томографии, наноиндентирования, спектрометрического анализа, рентгенографические и другие виды исследования, которые позволяют получить новые представления о структуре и механизмах структурных изменений при действии различных факторов. Изложены вопросы разрушения и старения древесины и материалов на ее основе, напряжения и деформации в древесине и древесных материалах, использование физических свойств древесины для онлайн-контроля качества, имеющие крайне важное значение для деревообработки. Глава, посвященная моделированию структуры и свойств древесины и древесных материалов, содержит описание общих подходов. Несомненную ценность представляют приведенные в книге обширные справочные данные о показателях свойств древесины различных пород и древесных материалов, о методиках испытаний, нормативных документах.

Книга «Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe» («Физика древесины и древесных материалов») П. Нимца и В. Сондереггера, содержащая фундаментальные сведения о строении, свойствах и качестве древесины и древесных материалов, результатах новейших исследований в области физики древесины и значительный объем справочных данных, вносит значительный вклад в развитие физики древесины и древесных материалов, способствует созданию научной базы для расширения возможностей применения древесины как природного функционального материала. Издание принесет пользу в образовательном процессе, исследовательской деятельности и деревообрабатывающей промышленности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 37.8809.2017/БЧ «Исследование строения, свойств и характеристик древесины как природного функционального материала для разработки энергосберегающих и экологических технологий продукции с заданными механическими, электрическими, химическими и тепловыми характеристиками».

Список литературы

- [1] Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь, 2010. № 4. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/17800/> (дата обращения: 14.09.2017).
- [2] Niemz P., Sonderegger W. Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2017. 580 p.
- [3] World University Rankings 2016–2017. URL: https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings/2017/world-ranking#!/page/0/length/25/sort_by/rank/sort_order/asc/cols/stats (дата обращения 14.09.2017).
- [4] Niemz P. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Stuttgart: DRW-Verlag, 1993. 243 p.
- [5] Уголев Б.Н., Горбачева Г.А., Ницц П. Фундаментальные и прикладные исследования древесины в Швейцарской Высшей Технической Школе Цюриха (ETHZ) // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 2014. № 4 (340). С. 162–167.

Сведения об авторе

Горбачева Галина Александровна — канд. техн. наук, доцент кафедры древесиноведения и технологии деревообработки МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал) gorbacheva@mgul.ac.ru

Статья поступила в редакцию 01.11.2017 г.

«HOLZPHYSIK: PHYSIK DES HOLZES UND DER HOLZWERKSTOFFE» IS A NEW BOOK BY PETER NIEMZ & WALTER SONDEREGGER FOR SCIENCE AND PRACTICE

G.A. Gorbacheva

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

gorbacheva@mgul.ac.ru

On the threshold of the sixth technological mode, which is characterized by a focus on the development and application of high technologies, wood as a natural functional material and a renewable resource, finds new applications. The new book written by Professor Peter Niemz and Dr. Walter Sonderegger «Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe» («Wood physics: physics of wood and wood-based materials»), published in August, 2017 by Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, Germany provides important basic knowledge about the structure, properties and quality of wood and wood materials as a necessary base for technological processes of woodworking industry and further use of the wooden products and constructions. The authors work for the Institute for Building Materials (IfB) of the Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ, Switzerland). An outstanding scientist, Professor Peter Niemz is Fellow of the International Academy of Wood Sciences (IAWS), more than 20 years headed the Wood Physics Group of IfBETHZ, he is well known by his research in physics, mathematics, mechanics of wood and wood materials, wood-processing technologies. Dr. Walter Sonderegger has a doctoral degree in wood physics, focuses on physical and mechanical properties of wood and wood materials. The Authors presented the new and innovative test methods, the results of the newest research in the field of wood physics, examples of practical use of wood and wood-based materials, directory of important characteristic values and properties. The book makes a significant contribution to the development of the physics of wood and wood materials, provides a scientific basis to expand the use of wood as a natural functional material and is recommended for use for education, research activities and for wood-processing industry.

Keywords: physics of wood and wood materials, innovative test methods, directory of important characteristic values and properties

Suggested citation: Gorbacheva G.A. «Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe» – novaya kniga Pitera Nimtsa i Val'era Sondereggera dlya nauki i praktiki [«Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe» is a new book by Peter Niemz & Walter Sonderegger for science and practice]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 77–79. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-77-79

References

- [1] Kablov E.N. *Shestoy tekhnologicheskij ukklad* [The sixth technological mode]. Nauka i zhizn' [Science and life], 2010, no. 4. Available at: <https://www.nkj.ru/archive/articles/17800>
- [2] Niemz P., Sonderegger W. Holzphysik: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG, 2017, 580 p.
- [3] World University Rankings 2016–2017. Available at: https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings/2017/world-ranking#!/page/0/length/25/sort_by/rank/sort_order/asc/cols/stats (14.09.2017).
- [4] Niemz P. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Stuttgart: DRW-Verlag, 1993, 243 p.
- [5] Ugolev B.N., Gorbacheva G.A., Niemz P. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya drevesiny v Shvejcarskoj Vysshej Tehnicheskoj Shkole Cjuriha (ETHZ)* [Fundamental and Applied Research on Wood in Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ)]. Lesnoy zhurnal [Forestry journal], 2014, no. 4 (340), pp. 162–167.

Author's information

Gorbacheva Galina Aleksandrovna — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of Department of Wood Science and Technology of BMSTU (Mytishchi branch), gorbacheva@mgul.ac.ru

Received 01.11.2017

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ 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

Предлагается новый подход к проектированию тепловых труб (ТТ), основанный на опыте, приобретенном в результате экспериментального и теоретического исследования механизмов переноса теплоты, массы и импульса в ТТ. Современный подход к проектированию и расчету максимально достижимого теплопереноса в тепловых трубах (ТТ) построен на упрощенных моделях, не учитывающих процессы гетерогенно-гомогенной объемной конденсации в паровом потоке, возникновение вихревых структур в результате процессов вдува-отсоса, гидравлические потери на трение при встречном движении пара и жидкости на межфазной границе. Движение двухфазной смеси, происходящее в поле аэродинамических и гравитационных сил, приводит к неравномерному расходу конденсированной фазы на теплообменную поверхность фитиля. Обоснован термодинамический подход к проблеме интенсификации теплопереноса на основе понятия эксергии (часть теплоты, которую можно использовать для получения механической работы). Предлагается изменить схему парожидкостного тракта для получения холодильного эффекта. В то же время эти предложения не исчерпывают всех возможностей построения новых принципиальных схем ТТ. Известны контурные ТТ, которые успешно справляются с теплопереносом при небольших тепловых потоках. При решении вопроса о создании устройств, способных передавать большие тепловые потоки при высоких удельных тепловых нагрузках, следует учитывать механизмы теплопереноса в парожидкостном тракте. Последовательный и более полный учет всех механизмов теплопереноса лежит в основе построения новых высокоэффективных ТТ.

Ключевые слова: двухфазный, гетерофазные флуктуации, межфазная граница

Ссылка для цитирования: Шульц А.Н. Новые подходы к проектированию тепловых труб // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 80–85. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-80-85

Максимально достижимый теплоперенос в тепловых трубах (ТТ) рассчитывается по упрощенным моделям, не учитывающим процессы гетерогенно-гомогенной объемной конденсации в паровом потоке. Недостаточно изучено влияние процессов вдува-отсоса на гидродинамику течения влажного пара, влияние неконденсируемых газов (НКГ) на гидродинамику и теплообмен в торце конденсатора. Практически отсутствуют работы по исследованию процессов запуска ТТ из замороженного состояния теплоносителя. Большинство экспериментальных работ по исследованию теплопереноса в ТТ основано на применении термодинамических измерений температуры стенок зон теплообмена, что значительно ограничивает объем полученной информации [1, 2].

Основным видом потерь давления в пусковой период работы ТТ являются потери давления в паре. При достижении максимального теплопереноса эти потери могут составлять половину капиллярного напора, создаваемого фитилем. Для изучения механизмов тепло- и массообмена в ТТ разработана методика экспериментального исследования структуры парового потока с помощью оптических средств контроля на основе следующих приборов: интерферометра Маха — Цендера, теневого прибора Теплера, лазерного оптического светового ножа. С помощью данной методики выявлены механизмы переноса теплоты, массы и импульса в плоском канале низко-

температурной ТТ. Основные результаты проведенных экспериментов опубликованы в [1–5]. Показано, что увеличение удельных тепловых нагрузок усиливает роль процессов объемной конденсации в теплопереносе, а процессы вдува-отсоса создают устойчивые вихревые структуры в зонах испарения и конденсации. Основной перенос массы и импульса парокapпельного потока происходит в пределах границ возникающих вихревых структур. Движение капель в поле аэродинамических и гравитационных сил, приводит к неравномерному расходу конденсированной фазы на теплообменные поверхности конденсатора. В [6] обоснован термодинамический подход к проблеме интенсификации теплопереноса на основе понятия эксергии (часть теплоты, которую можно использовать для получения механической работы). В [4–6] предлагается изменить схему парожидкостного тракта для получения холодильного эффекта. Последовательный и более полный учет всех механизмов теплопереноса в ТТ лежит в основе построения новых высокоэффективных устройств для утилизации низкопотенциального тепла.

Механизмы теплопереноса, не учитываемые в расчетных моделях

Гидродинамика парового потока. Интерференграмма течения пара в плоской низкотемпературной ТТ (ацетон) показали распределение плотности и степени пересыщения пара в попе-

речных сечениях, теневым методом выявлено ядро потока, с помощью фотографий обнаружены капли и их треки [1, 2]. Изучение треков капель в испарителе (при $q_w \approx 1$ Вт/см²) выявило существование устойчивых поперечных вихрей (z-валы) с размерами $\sim 1/3$ поперечного сечения канала. Визуализировано синусоидальное движение ядра потока вдоль испарителя в пределах границ вихревых структур. В конденсаторе обнаружены продольные вихри (X-валы). В торце конденсатора наблюдается обширная зона крупномасштабного вихревого течения, вдоль границ которой происходит основной массоперенос. По мере уменьшения скорости ядра потока по трекам капель прослеживается падение капель на нижнюю теплообменную поверхность конденсатора.

Структура парового потока. В большинстве работ принимается модель равновесного парового потока, замороженного по отношению к фазовым переходам. Реальная картина не подтверждается экспериментом. Интерферограммы позволили выяснить распределение степени пересыщения пара (рис. 1) в поперечных сечениях плоской ТТ [3].

Методом светового ножа выявлено наличие жидкой фазы в потоке. По количеству и размеру капель оценивали сухость пара x_0 и влажность $(1 - x_0)$. Формировалось ядро потока, на

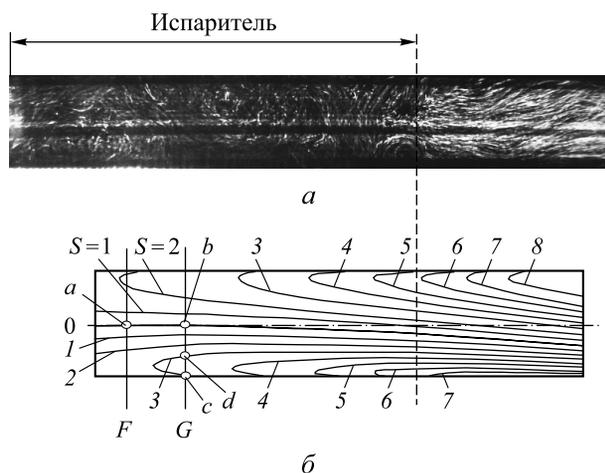


Рис. 1. Течение пара в плоской низкотемпературной ТТ: *a* — фотография двухфазного потока в испарителе и конденсаторе (получена методом светового ножа); *б* — интерференционные линии в зоне испарения ТТ (настройка интерферометра Маха — Цендера на полосу бесконечной ширины, разности фаз $S = 0, 1, \dots, 8$, режим $Q = 230$ Вт, $Re = 460$, $Re_r = 30$, теплоноситель — ацетон)

Fig. 1. The flow of vapor in a flat low-temperature TT: *a* — a photograph of a two-phase flow in an evaporator and a condenser (obtained by the light sheet method); *б* — interference lines in the evaporation zone of the TT (adjustment of the Mach-Zehnder interferometer to an infinite-width strip, phase difference $S = 0, 1, \dots, 8$, mode $Q = 230$ W, $Re = 460$, $Re_r = 30$, heat transfer agent is acetone)

оси которого влажность и степень пересыщения $\chi = P/P_s$ возрастали по ходу потока.

Большую роль в организации готовых ядер конденсации играют процессы испарения. Повышение удельной тепловой нагрузки в испарителе может привести к термокапиллярной и барокапиллярной неустойчивости межфазной поверхности и выбросу капель из мениска пор фитиля.

Существенное различие удельных тепловых потоков на верхней и нижней поверхностях теплообмена подтверждено измерениями теплового баланса в установке [2].

Физические механизмы интенсификации теплопереноса

Взаимодействие струй на межфазной границе. Встречное движение пара и жидкого теплоносителя в ТТ и термосифонах (ТС) традиционного исполнения вызывает касательные напряжения на межфазной границе, направленные против потока жидкости. Данное явление затягивает запуск ТТ, а в некоторых случаях приводит и к его срыву. Согласно [6, 7], с увеличением тепловой нагрузки обратный расход жидкости в открытых капиллярах может в пять раз превышать прямой. Следовательно, изменение знака касательных напряжений повышает расход жидкого теплоносителя в шесть раз.

Кроме того, образование капиллярных волн на открытой межфазной поверхности при достижении критерия Вебера ($We = \rho_n v_n^2 \lambda / 2\pi\sigma > 1$) приводит к уносу жидкости в паровой поток и паразитной рециркуляции теплоносителя. Перестройка парожидкостного тракта с целью организации спутных струй пара и жидкости исключает эту проблему.

Термодинамический подход к проблеме интенсификации теплопереноса. Максимально достижимый теплоперенос в ТТ ограничен капиллярными силами фитиля, покрывающими все виды потерь давления в парожидкостном тракте. Можно создать механический насос, дополнительный к капиллярному, работающему за счет внешнего теплоподвода. В [6] изложен метод интенсификации теплопереноса за счет использования эксергетических ресурсов парового потока. Суть метода заключается в создании циркуляционного контура в ТТ, преобразующего часть теплосодержания пара в кинетическую энергию парового потока, которая затем преобразуется в кинетическую энергию жидкости, движущейся к испарителю.

Определенная таким образом работа δA может быть использована для оценки подъема жидкости на высоту h_z , так как $\delta A = m_{жс} g h_z$. Капиллярный потенциал $P_k = \rho_{жс} g h_{к.} = 2\sigma \cos \alpha / R_{зф}$. Так как в ТТ циркулирует одна и та же масса, отношение

эксергетического потенциала gh_3 к капиллярному gh_k найдем из уравнения

$$\frac{h_3}{h_k} = \frac{k_{п}RT_{и}R_{эф}P_{ж}\eta_3}{(k_{п}-1)\mu 2\sigma \cos\alpha} \left[\left(\frac{P_k}{P_{и}} \right)^{\frac{k_{п}-1}{k_{п}}} - 1 \right], \quad (1)$$

где $\eta_3 = \Delta T_{и} / T_{и} \leq 0,1$ — эксергетический коэффициент полезного действия (КПД).

При запуске жидкометаллических ТТ из замороженного состояния теплоносителя расчетные оценки по формуле (1) показывают, что $h_3/h_k > 1$. Данное обстоятельство объясняет причину срыва запуска, осушение испарителя и значительный перегрев стенок. Для ТТ с низкотемпературными теплоносителями при работе вблизи капиллярных ограничений $h_3/h_k \geq 1$.

Механизм преобразования энергии пара в кинетическую энергию жидкости основан на влиянии расхода теплоносителя в касательных напряжениях на открытых капиллярных канавках. Данное явление можно оценить критерием Вебера:

$$We = \frac{\rho_n v^2 \lambda}{2\pi\sigma} = \frac{(1 - \xi) \cdot 0,5 \Delta P_{кап} \lambda}{2\pi\sigma},$$

где ξ учитывает потери давления в паре на трение. Длину капиллярной волны λ выбирают равной $4d_{пор}$, согласно экспериментальным данным [3]. Оптимизация параметров ТТ по условию $0,5 \Delta P_{кап} = \Delta P_{п}$ обеспечивает $We > 1$ при значениях $\xi \leq 0,7$.

Из [3, 6] следует, что эксергетические ресурсы в ТТ достаточны для работы механического насоса, компенсирующего потери капиллярного напора в конденсаторе. Для точной оценки требуется экспериментальное определение КПД такого насоса.

Влияние полей массовых сил. Вращение вокруг оси создает поле центробежных сил, которое при соответствующем профилировании канала вызывает появление центробежного ускорения $\omega^2 R$, компенсирующего гравитационное. При вертикальном расположении оси ТТ можно полностью скомпенсировать гравитационные силы по условию $g \cos \alpha = \omega^2 R \sin \alpha$, где α — угол наклона стенки к оси. При горизонтальном положении вращение ТТ вызывает появление массовых сил, создающих дополнительный к капиллярному движущий перепад давления. Экспериментальные исследования влияния вращения ТТ на теплообмен выявили увеличение коэффициентов испарения и конденсации. Появляется сепарационный эффект, способствующий удалению капель жидкой фазы из парового потока и равномерному расходу конденсированной фазы на теплообменные поверхности конденсатора. Уменьшается гидростатический перегрев

теплоносителя, облегчается его дегазация. Кроме того, интенсифицируется внешний теплообмен на оребренных поверхностях испарителя и конденсатора.

Фазовые переходы в электрическом поле. В переохлажденном паре в результате флуктуаций постоянно происходит образование комплексов различных размеров r из нескольких молекул и их испарение. Если в результате электрического разряда комплекс поглотит электрон, то он скачкообразно переходит в новое качество. Скорость зародышеобразования из таких комплексов гораздо выше, чем у незаряженных ядер конденсации. Они быстрее достигают размеров больше критических ($r > r_{кр}$), растут по ходу потока и способствуют возникновению гомогенной объемной конденсации при относительно небольших степенях пересыщения. Данное явление целесообразно использовать для интенсификации процесса конденсации пара в конденсаторе вращающихся ТТ.

Бинарные смеси для получения новых теплофизических свойств ТТ

Бинарные смеси, состоящие из хладагента и абсорбента, позволяют получить холодильный эффект в ТТ [8–10]. Хладагентом может быть аммиак, метиламин, вода; соответствующим абсорбентом — вода, хлористый литий, бромистый литий.

Новые теплофизические свойства ТТ можно получить на основе: 1) пароструйной холодильной машины [5]; 2) абсорбционной холодильной машины непрерывного действия (рис. 2).

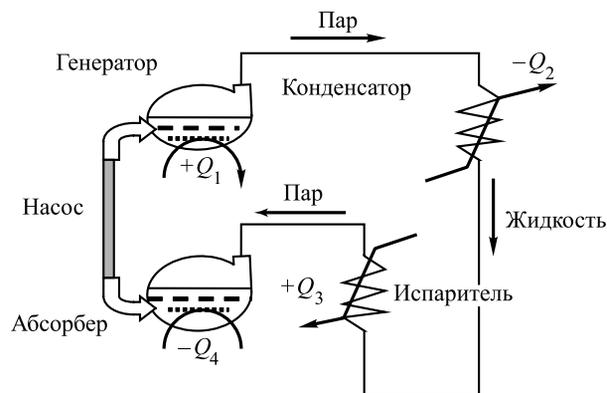


Рис. 2. Принципиальная схема термодинамического расчета абсорбционной холодильной ТТ

Fig. 2. Schematic diagram of thermodynamic calculation of absorption refrigeration TT

Энергетически более выгоден второй вариант. Бинарные смеси для таких машин имеют следующие особенности: 1) при кипении раствора пары состоят главным образом из легкокипящего агента; 2) теплый жидкий раствор абсорбирует

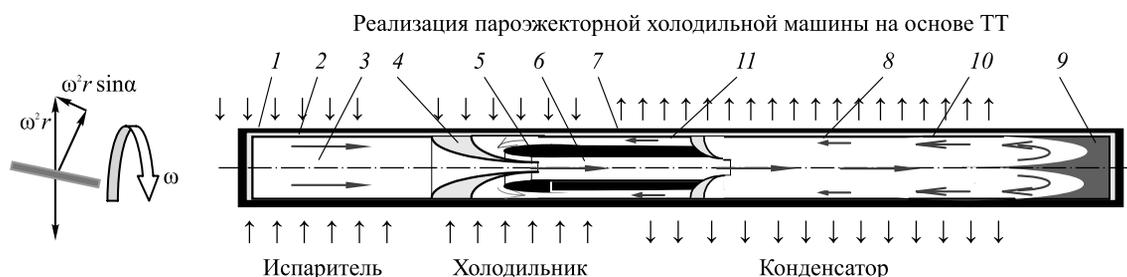


Рис. 3. Принципиальная схема модифицированной тепловой трубы с холодильным эффектом: 1 — корпус; 2 — фитиль; 3 — испаритель; 4 — сопло эжектора; 5 — осесимметричная вставка; 6 — камера смешения; 7 — конденсатор; 8 — сопловой аппарат инжектора; 9 — диффузор; 10 — капиллярные канавки специальной формы; 11 — холодильная камера; $\omega = 2\pi n / 60$; α — угол между осью ТТ и поверхностью фитиля; $\uparrow\downarrow$ — направление движения пара

Fig. 3. Schematic diagram of a modified heat pipe with a cooling effect: 1 — housing; 2 — wick; 3 — evaporator; 4 — ejector nozzle; 5 — axisymmetric inset; 6 — mixing chamber; 7 — the condenser; 8 — injector nozzle; 9 — diffuser; 10 — capillary grooves of special shape; 11 — the refrigerating chamber; $\omega = 2\pi n / 60$; α — angle between the TT axis and the surface of the wick; $\uparrow\downarrow$ — the direction of steam

пары легкокипящего агента с более низкой температурой при том же давлении.

Термодинамическое равновесие растворов вытекает из первого закона Коновалова, согласно которому при постоянной температуре раствора давление пара увеличивается с возрастанием концентрации того компонента, который содержится в большем количестве в паровой фазе.

По своей теплофизической природе ТТ идеально подходит для данного решения. Роль насоса жидкой фазы в этом случае выполняют:

- капиллярные силы фитиля;
- эксергетические ресурсы парового потока;
- массовые силы от гравитационного поля и поля центробежных сил.

Утилизация низкопотенциальных тепловых ресурсов. Выводы

Все известные к настоящему времени низкопотенциальные тепловые ресурсы (ТР) можно представить как совокупность тепловых ресурсов естественной среды и ноосферы [5]. Из них следует выделить суммарный охлаждающий импульс атмосферного воздуха и ТР выхлопных газов автомобильного транспорта.

Концепция построения новых принципиальных схем устройств для утилизации низкопотенциальных тепловых ресурсов заключается в выполнении следующих условий:

- 1) организация спутных струй пара и жидкого теплоносителя во всех зонах теплообмена;
- 2) использование эксергетических ресурсов парового потока в конденсаторе для преобразования кинетической энергии пара в дополнительный к капиллярному движущий перепад давления в жидкости за счет влияния касательных напряжений на межфазной поверхности в открытых капиллярных канавках;

3) использование полей массовых сил от гравитации и от вращения устройства вокруг оси для получения дополнительного к капиллярному движущего перепада давления в жидкости;

4) введение в паровой тракт бинарных смесей для получения цикла абсорбционной холодильной машины;

5) использование влияния электрических полей на интенсификацию процессов тепло- и массообмена в конденсаторе;

6) применение конструкции фитиля по принципу обратно-менискового испарения.

На рис. 3 представлен вариант холодильной машины, исполненной в горизонтальном расположении. При вертикальном исполнении холодильная машина хорошо вписывается в конструкцию автомобильного рефрижератора. Утилизация выхлопных газов автомобиля происходит при нижнем расположении испарителя, сброс тепла в конденсаторе — при его размещении над крышей теплоизолированной камеры холодильника. Это позволяет охлаждать продукты в камере рефрижератора.

На рис. 4 представлен вариант термосифона для замораживания грунта. Гидрозатвор рассчи-

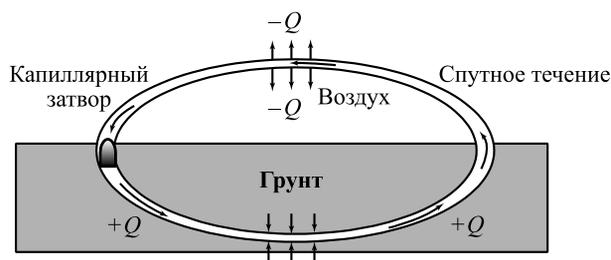


Рис. 4. Термосифон для замораживания грунта со спутным течением пара и жидкости

Fig. 4. Thermosyphon for freezing the soil with a tangential flow of vapor and liquid

тывается по оптимальным параметрам с целью создания гидростатического давления, дополнительного к капиллярному: $\Delta P = \rho_{\text{ж}} g h(y)$, где $0 < h < h_{\text{max}}$. Такие устройства позволяют утилизировать охлаждающий импульс атмосферного воздуха для замораживания грунта с целью увеличения прочности фундаментных оснований мостов, дорог, зданий и других объектов.

Список литературы

- [1] Шульц А.Н., Быстров П.И., Гончаров В.Ф., Харченко В.Н. Исследование нестационарного тепло- и массообмена в жидкометаллических тепловых трубах // Тепло-массообмен—VI: Матер. VI Всесоюз. конф. по тепло-массообмену. Минск, 26–29 июля 1980 г. Минск: ИТМО АН БССР, 1980. Т. IV. С. 94–99.
- [2] Шульц А.Н. Перенос тепла, массы и импульса в испарительно-конденсационных теплообменниках: Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2006. 220 с.
- [3] Шульц А.Н. Выбор оптических методов исследования течений неравновесного парового потока // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2006. № 6 (48). С. 135–140.
- [4] Шульц А.Н. Оптические неоднородности в неравновесном потоке тепловых труб // Вестник МГУЛ — Лесной вестник, 2006. № 6 (48). С. 140–149.
- [5] Шульц А.Н., Данилов С.А., Ивлиютин А.И. Влияние объемной конденсации на тепломассообмен в низкотемпературной тепловой трубе при наличии неконденсируемого газа // Тр. II Всесоюз. конф. «Теплофизика и гидрогазодинамика процессов испарения и конденсации». Рига, 26–28 декабря 1988 г. Рига: РПИ, 1988. Т. II. С. 10–11.
- [6] Shults A.N., Kharchenko V.N. Exergetic approach to the problem of heat transfer intensification in heat pipes // 8th Int. Conf. Heat Pipe (Beijing, 14–18 September 1992), China. Препринт.
- [7] Шульц А.Н., Харченко В.Н. Интенсификация теплопереноса в элементах силовой оптики на основе тепловых труб // Вопросы гидродинамики и теплопередачи в технологических процессах: Науч. тр. МЛТИ. М.: МЛТИ, 1993. Вып. 259. С. 36–48.
- [8] Шульц А.Н. Определение энтальпии неравновесного парового потока // Тр. 4-й Рос. нац. конф. по теплообмену. Москва, 23–27 октября 2006 г. М.: МЭИ, 2006. Т. 5. С. 329–332.
- [9] Шульц А.Н. Потери энергии в паровом потоке тепловых труб // Сб. науч. тр. докторантов и аспирантов МГУЛ, 2006. Вып. 334 (7). С. 24–26.
- [10] Шульц А.Н. Модифицированная тепловая труба для утилизации низкопотенциальных тепловых ресурсов // Сб. науч. тр. докторантов и аспирантов МГУЛ, 2006. Вып. 334 (7). С. 10–12.

Сведения об авторе

Шульц Александр Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры физики МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), shultsalek@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.06.2017 г.

NEW APPROACHES TO DESIGN OF HEAT PIPES

A.N. Shults

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

shultsalek@mail.ru

In this work new approach is offered to design heat pipes (HP) based on experience, acquired as a result of pilot and theoretical study of mechanisms of heat transfer, weight and an impulse in a HP. Modern approach to design and calculation of the most achievable heat transfer in the heat pipes (HP) is based on the simplified models which aren't considering processes of heterogeneous and homogeneous volume condensation in a steam stream, emergence of vortex structures as a result of processes of a blowing – a suction, hydraulic losses on friction at oncoming traffic of steam and liquid on interphase border. The movement of two-phase mix happening in the field of aerodynamic and gravitational forces leads to an uneven expense of the condensed phase on a heat-exchange surface of a match. Thermodynamic approach to a heat transfer intensification problem on the basis of concept of an exergy is reasonable (the part is warm which can be used for receiving mechanical work). It is offered to change the scheme of a vapor-liquid path for receiving refrigerating effect. However, these offers don't exhaust all opportunities to create new schematic diagrams of a HP, emergence of planimetric HP which successfully cope with heat-transfer at small thermal streams is known, for example. At the solution of a question of creation of devices capable to transfer big thermal streams at high specific thermal loadings, it is necessary to consider heat-transfer mechanisms in a vapor-liquid path. Consecutive and whenever possible fuller accounting of all mechanisms of heat-transfer in a HP is the cornerstone of creation of new highly effective HP.

Keywords: two-phase, heterophase fluctuations, interphase border

Suggested citation: Shults A.N. *Novye podkhody k proektirovaniyu teplovykh trub* [New approaches to design of heat pipes]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 80–85.

DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-80-85

References

- [1] Shults A.N., Bystrov P.I., Goncharov V.F., Kharchenko V.N. *Issledovanie nestatsionarnogo teplo- i massoobmena v zhidkometallicheskikh teplovykh trubakh* [Research non-stationary warm and a mass exchange in the zhidkometallicheskikh heat pipes] *Heatmass Exchange–VI: Materials of VI All-Union Conference on Heatmass Exchange*. Minsk: ITMO AN BSSR, 1980, v. IV, pp. 94–99.
- [2] Shults A.N. *Perenos tepla, massy i impul'sa v isparitel'no-kondensatsionnykh teploobmennikakh: Dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Transfer of heat, weight and an impulse in vaporizing and condensation heat exchangers: Dis. ... Dr. Sci. (Tech.)]. Moscow, 2006, 272 p.
- [3] Shults A.N. *Vybor opticheskikh metodov issledovaniya techeniy neravnovesnogo parovogo potoka* [Selection of optical methods of research of currents of a nonequilibrium steam stream] *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik*, 2006, no. 6 (48), pp. 135–140.
- [4] Shults A.N. *Opticheskie neodnorodnosti v neravnovesnom potoke teplovykh trub* [Optical of heterogeneity in a nonequilibrium stream of heat pipes.] *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik*. Moscow, 2006, no. 6 (48), pp. 140–149.
- [5] Shults A.N., Danilov S.A., Ivlyutin A.I. *Vliyaniye ob'emnoy kondensatsii na teplomasoobmen v nizkotemperaturnoy teplovykh trubeh pri nalichii nekondensiruемого gaza* [Influence of volume condensation on heat-mass transfer in a low-temperature heat pipe in the presence of not condensed gas] *Works of the Second All-Union Conference «Thermophysics and Hydraulic Gas Dynamics of Processes of Evaporation and Condensation»*, Riga, 26–28 December 1988. Riga: RPI, 1988, v. II, pp. 10–11.
- [6] Shults A.N., Kharchenko V.N. *Exergetic approach to the problem of heat transfer intensification in heat pipes* [Exergetic approach to the problem of heat transfer intensification in heat pipes] *8th of International Conference Heat Pipe (14–18 September 1992, Beijing), China*.
- [7] Shults A.N., Kharchenko V.N. *Intensifikatsiya teploperenosa v elementakh silovoy optiki na osnove teplovykh trub* [Intensification of heattransfer in elements of power optics on the basis of heat pipes] *Voprosy gidrodinamiki i teploperedachi v tehnologicheskikh processah. Nauchnye trudy MLTI* [Questions of hydrodynamics and a heat transfer in technological processes. Scientific works of MLTI]. Moscow: MLTI, 1993, v. 259, pp. 36–48.
- [8] Shults A.N. *Opredeleniye ental'pii neravnovesnogo parovogo potoka* [Definition of an enthalpy of a nonequilibrium steam stream] *Tr. 4-y Ros. nats. konf. po teploobmenu*. Moskva, 23–27 oktyabrya 2006. Moscow: MEI, 2006, v. 5, pp. 329–332.
- [9] Shults A.N. *Poteri energii v parovom potoke teplovykh trub* [Losses of energy in a steam stream of heat pipes] *Sb. nauch. tr. doktorantov i aspirantov MGUL*, 2006, v. 334(7), pp. 24–26.
- [10] Shults A.N. *Modificirovannaya teplovaya truba dlya utilizatsii nizkopotencial'nykh teplovykh resursov* [The modified thermal pipe for utilization of low-potential thermal resources] *Sb. nauch. tr. doktorantov i aspirantov MGUL*, 2006, v. 334 (7), pp. 10–12.

Author's information

Shults Alexandr Nikolaevich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of Department of Physics of BMSTU (Mytishchi branch), shultsalek@mail.ru

Received 21.06.2017

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ПЛОСКОГО ТЕЛА С ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ ЕГО КОРМЫ СТРУЕЙ НАВСТРЕЧУ НАБЕГАЮЩЕМУ ПОТОКУ

В.И. Мышенков, Н.О. Савенко

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

Представлены результаты численного исследования на основе уравнений Навье — Стокса с использованием k - ε -модели турбулентной вязкости взаимодействия плоской встречной струи, истекающей из донного среза аппарата прямоугольной формы (типа крыла), с набегающим потоком при различных значениях определяющих параметров. Установлены режимы взаимодействия плоской встречной струи с набегающим потоком, аналогичные случаю осесимметричного течения, с закрытой отрывной областью и малым прониканием струи в поток и с открытой отрывной областью и большим прониканием струи. Определены диапазоны устойчивого и неустойчивого течений с колебаниями структуры от одной «бочки» к нескольким в зависимости от значений определяющих параметров. Обнаружено, что глубина проникания струи в набегающий поток при всех M_∞ с увеличением M_a возрастает примерно по экспоненциальному закону, давление в критической точке области струйного взаимодействия с увеличением M_a при $M_\infty \leq 2$ практически не меняется, а при $M_a = 2,5; 3$ ведет себя немонотонно. Температура в критической точке с увеличением M_a при числах M_∞ в диапазоне $1,5 \leq M_\infty \leq 2,5$ увеличивается. Установлено, что с увеличением степени нерасчетности струи n размеры области струйного взаимодействия возрастают, критическая точка струйного течения линейно смещается от среза сопла в сторону набегающего потока. Геометрия поверхности раздела струйного течения и набегающего потока с увеличением n не изменяется, смена режимов течения не обнаружена. **Ключевые слова:** обтекание, набегающий поток, давление, струя, число Маха, число Рейнольдса, степень нерасчетности

Ссылка для цитирования: Мышенков В.И., Савенко Н.О. Численное исследование обтекания плоского тела с истекающей из его кормы струей навстречу набегающему потоку // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 86–93. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-86-93

Проблема взаимодействия сверхзвуковой струи, истекающей навстречу набегающему потоку, возникла в связи с разработкой проекта мягкой посадки летательного аппарата, а также при изучении возможности спасения его отдельных частей (элементов). Кроме того, в процессе экспериментальных исследований данной задачи обнаружилось, что встречная струя в определенных условиях может снизить интегральное сопротивление аппарата за счет изменения его обтекания аналогично воздействию на обтекающий поток выступающей перед телом тонкой «иглы». Конечно, при оценке лобового сопротивления аппарата в этом случае необходимо учитывать величину обратной тяги, создаваемой струей, истекающей навстречу набегающему потоку (встречной струей). Все это свидетельствует о том, что проблема взаимодействия встречной струи с набегающим потоком является важной и актуальной.

Объекты и методы исследований

В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований определяющих параметров [1–12]: числа Маха струи на срезе сопла M_a , числа Маха набегающего потока M_∞ ; степени нерасчетности струи $n = p_a/p_\infty$, где

p_a — давление на срезе сопла вытекающей струи, p_∞ — давление в набегающем потоке на бесконечности; температуры газа струи T_a ; геометрии обтекаемого тела; относительного размера диаметра среза сопла (отнесенного к диаметру миделя аппарата) и других параметров установлены режимы образующегося течения — стационарные и нестационарные, малого (с одной «бочкой») и большого (с несколькими «бочками») проникания струи в набегающий поток.

Конечно, параметр подобия степень нерасчетности $n = p_a/p_\infty$, используемый при изучении затопленных и спутных струйных течений, в данной задаче вряд ли можно применить, так как встречная струя вытекает в среду не с давлением p_∞ , а с давлением, близким к давлению торможения за прямым скачком $p_{0\infty}^*$, образующимся при обтекании аппарата набегающим потоком. Поэтому в работах [1–12] в качестве определяющего параметра наряду с n используется параметр N , равный отношению давления торможения струи p_{0a}^* и давления набегающего потока: $p_{0\infty}^* - N = p_{0a}^*/p_{0\infty}^*$.

Проведенные исследования показали, что струя при $M_a > 1$ в случае стационарного режима течения проникает до точки торможения (столкновения) струи и набегающего потока, где дав-

ление равно давлению их торможения $p_{оо}^*$ и $p_{оа}^*$. Через точку торможения проходит поверхность раздела потока газа встречной струи с газом набегающего потока, вдоль которой струйное течение разворачивается по направлению набегающего потока, образуя в зависимости от параметра N открытую или закрытую область отрывного течения на поверхности аппарата.

Размеры области отрывного течения определяются геометрией обтекаемого тела, относительным размером диаметра среза сопла вытекающей струи, параметром N , числами M_a и M_{∞} , а также положением точек отрыва и смыкания отрывной зоны, образуемой струйным течением. Если положение точек отрыва и прилипания (присоединения) не фиксировано, то отрывное течение оказывается неустойчивым и в результате — нестационарным. Для случая образования открытой отрывной области течение взаимодействия встречной сверхзвуковой струи с набегающим потоком, как показывают эксперименты [5], всегда устойчиво и стационарно.

Следует отметить, что экспериментальные данные взаимодействия встречной струи с набегающим потоком довольно разрознены. Попытки обобщения их результатов предпринимались в работах [4, 12]. Процесс обобщения экспериментальных данных осложняется многообразием (различием) геометрий исследуемых моделей. Однако эти попытки следует считать полезными. Ниже приводятся результаты такого обобщения, выполненные в работе [12].

Экспериментальные и численные (на основе уравнений Эйлера) исследования обтекания цилиндрической модели с углом полураствора $\theta = 10^\circ$ и диаметром среза сопла, в три раза меньшим диаметра цилиндра, встречной струей с $M_a = 3,8$ и набегающим потоком с $M_{\infty} = 2,04$, проведенные в работах [10–12] при различных значениях параметра N , позволили авторам выявить следующие режимы обтекания в зависимости от отношения полных давлений встречной струи и набегающего потока ($N = p_{оа}^* / p_{оо}^*$):

1) при $N \leq 6,5$ имеет место стационарный режим обтекания модели аппарата с малым прониканием струи в набегающий поток;

2) при $6,5 \leq N \leq 8,2$ наблюдается нестационарный, переходный режим обтекания модели от малого проникания струи в набегающий поток к большому и наоборот;

3) при $8,2 \leq N \leq 25$ режим обтекания стационарный с большим прониканием встречной струи в набегающий поток;

4) при $25 \leq N \leq 27,5$ обтекание модели снова нестационарно, с переходом от режима с большим прониканием струи к малому и наоборот;

5) наконец, при $N \geq 27,5$ картина течения стабилизируется и устанавливается режим малого

проникания встречной струи с одной бочкой в набегающий поток.

При этом, согласно [10–12], полное лобовое (кормовое) сопротивление модели со встречной струей с изменением параметра N изменяется немонотонно в зависимости от режима обтекания, но всегда оказывается на 10...30 % меньше, чем сопротивление цилиндрической модели без встречной струи.

Данные, полученные по зонам режимов обтекания по параметру N , относятся к конкретной геометрической модели и определенным определяющим параметрам, а также к условиям осесимметричного течения. В случае различия определяющих параметров и геометрии аппарата, очевидно, что установленные диапазоны по N режимов стационарных и нестационарных течений будут различаться.

Эксперименты и численные исследования с плазменными и горячими встречными струями [7–10] показывают, что длина их проникания в набегающий поток из-за большего удельного импульса выше, чем у холодных струй, а режимы обтекания с изменением параметра N аналогичны режимам обтекания для случая холодных струй, рассмотренного выше.

Постановка задачи

Настоящая работа посвящена численному моделированию обтекания плоского аппарата (типа крыла) с истекающей из его кормовой части плоской струей навстречу набегающему потоку, имитирующему некоторые этапы процесса его мягкой посадки. Задача решается в двухмерном пространстве в рамках вязкого совершенного газа на основе уравнений Навье — Стокса (Рейнольдса) для случая турбулентного режима течения с использованием широко распространенной на практике k - ϵ -модели турбулентности. Решение разностных уравнений, аппроксимирующих уравнения вязкого газа, выполнялось методом установления, чтобы была возможность получать как стационарные, так и нестационарные решения с помощью пакета прикладных программ (ППП) ANSYS Fluent. Для упрощения расчетов газ истекающей встречной струи и газ набегающего потока считались одинаковыми.

Геометрия рассматриваемого летательного аппарата имела плоскую форму толщиной $h = 1$ м, длиной $l = 5...12$ м, ширина среза сопла вытекающей струи из кормовой части модели d_a принималась равной h . Набегающий поток поступал в расчетную область справа налево, а встречная струя вытекала из донного среза модели слева направо.

Расчетная область имела форму прямоугольника, а ограничивающие его поверхности (гра-

ни) располагались от обтекаемого аппарата с истекающей встречной струей на достаточном расстоянии ($H = 50$ м, $L = 90$ м), чтобы отраженные от них ударные волны и волны разрежения не искажали течения у поверхности аппарата. Поперечное сечение модели и расчетная область представлены на рис. 1.

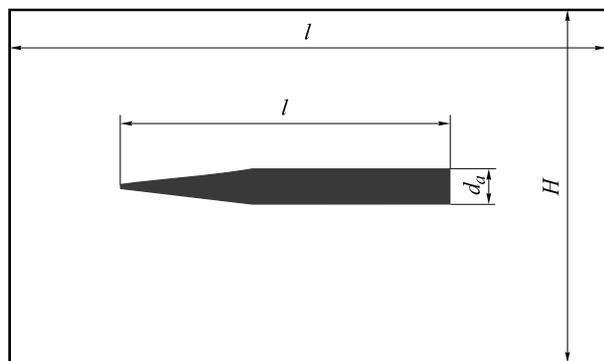


Рис. 1. Геометрия среза модели, расчетная область
Fig. 1. The geometry of the model cutoff, the computational space

Граничные условия данной задачи задавались на поверхностях (гранях) расчетной области, на поверхности аппарата и на срезе сопла вытекающей струи. На входной и боковых поверхностях (гранях) области счета параметры течения задавались равными параметрам набегающего потока на бесконечности, на выходной поверхности (границе) задавались условия мягкого сопряжения, т. е. равенство нулю вторых производных от всех параметров в направлении набегающего потока. На поверхности аппарата задавались условия прилипания потока, т. е. равенство нулю вектора скорости, и условия теплоизоляции, т. е. равенство нулю производной теплового потока q_w по нормали к поверхности. На срезе сопла задавались параметры вытекающей струи: плотность, компоненты скорости, температура T_a , давление p_a (для определения степени нерасчетности струи), число Маха M_a .

В расчетах использовались существенно неравномерные разностные сетки с максимальным сгущением у поверхности аппарата в областях образования пограничных слоев и слоев смешения, которые насчитывали до нескольких миллионов расчетных точек.

В качестве начальных данных для решения рассматриваемой комплексной задачи можно использовать несколько вариантов их задания:

1) первый вариант — задание во всей расчетной области, кроме среза сопла и поверхности аппарата, параметров, равных параметрам набегающего потока;

2) второй вариант — задание параметров полученного заранее решения задачи обтекания тела с закрытым торцом (без струи);

3) третий вариант — задание параметров полученного заранее решения задачи истечения встречной струи в затопленное пространство. Очевидно, этот вариант является самым неэффективным, поскольку большая часть расчетной области оказывается заполненной параметрами течения, очень далекими от получаемого решения.

В настоящей работе при решении задачи в основном использовался первый вариант задания начальных данных. Решение задачи обычно продолжалось до выполнения обычных критериев установления решения для стационарной задачи (течения) либо по заданному числу итерационных шагов для нестационарного течения.

Значения определяющих параметров

Численное исследование задачи обтекания потоком воздуха плоского аппарата с вытекающей из его кормовой части плоской струей навстречу набегающему потоку проведено при следующих значениях определяющих параметров: числа Маха набегающего потока $M_\infty = 1; 1,5; 2; 2,5; 3$; числа Маха встречной струи на срезе сопла $M_a = 1; 1,5; 2; 2,5; 3$; температура набегающего потока и температура струи на срезе сопла $T_\infty = T_a = 300$ К; показатели адиабаты набегающего потока и струи $\gamma_\infty = \gamma_a = 1,4$; число Прандтля $Pr = 0,71$; степень нерасчетности встречной струи $n = p_a/p_\infty$ (здесь p_a — давление на срезе сопла струи, p_∞ — давление в набегающем потоке на бесконечности), $1 \leq n \leq 100$.

При этом числа Рейнольдса ($Re = \rho v d_m / \mu$, где ρ, v, μ — плотность, скорость, вязкость газа соответственно, d_m — характерный размер задачи) газа струи Re_a и набегающего потока Re_∞ для $n = 1$ и $p_a = p_\infty = 1$ ат варьировались в диапазоне $2,2 \cdot 10^7 \leq Re \leq 6,6 \cdot 10^7$; при $n = 100$, $p_a = 5$ ат и $p_\infty = 0,05$ ат число Re_a изменялось от 10^8 до $3 \cdot 10^8$, а Re_∞ — от 10^6 до $3 \cdot 10^6$. Следовательно, все течения, рассматриваемые в настоящей работе, находятся полностью в области турбулентного режима.

Типичная картина стационарного обтекания плоского аппарата со встречной струей, получаемая в процессе расчетов, схематически представлена на рис. 2 для случаев, когда проникание струи в набегающее течение малое (с одной «бочкой») и закрытой отрывной областью на теле (рис. 2, а) и большое (возможно, с несколькими «бочками») и открытой отрывной зоной (рис. 2, б).

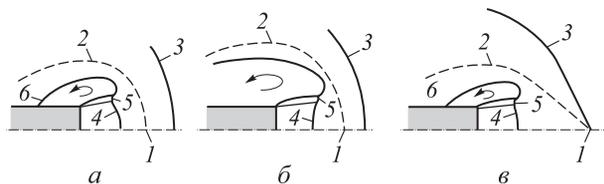


Рис. 2. Структуры течений при взаимодействии струи с набегающим потоком: *a* — с закрытой отрывной зоной; *б* — с открытой отрывной зоной; *в* — с длинным прониканием в поток; 1 — критическая точка; 2 — линия раздела встречной струи с набегающим потоком; 3 — головной скачок уплотнения; 4 — центральный скачок уплотнения; 5 — отраженный скачок

Fig. 2. Structures of currents in the interaction of a jet with an incoming flow: *a* — with a closed separation zone; *б* — with an open separation zone; *в* — with a long penetration into the stream; 1 — critical point; 2 — the line of separation of a counter-flow with an oncoming stream; 3 — head shock wave; 4 — central shock wave; 5 — reflected shock

Сравнение с экспериментальными данными

Для проверки достоверности получаемых численных решений рассматриваемой задачи целесообразно было бы сравнить их с соответствующими экспериментальными данными. Однако из-за отсутствия таковых для исследуемой в данной работе плоской модели аппарата были специально проведены расчеты осесимметричного обтекания цилиндрической модели со сферическим затуплением кормовой части и истекающей струей, исследованной в работе

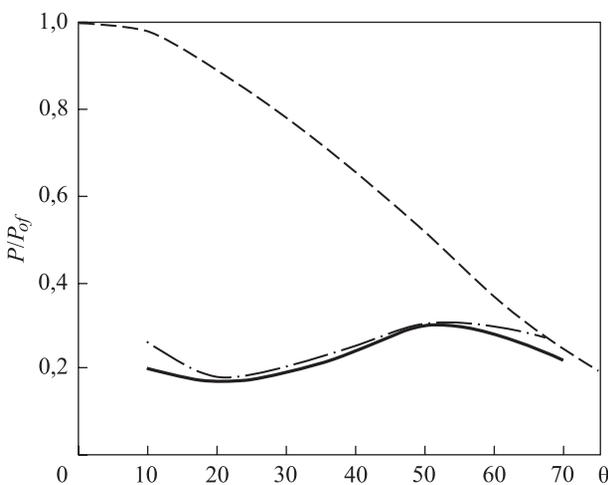


Рис. 3. Распределение давления, отнесенного к полному давлению потока, по сферическому затуплению цилиндрической модели (θ — угол по сферическому затуплению начиная от критической точки):
 расчет; ——— эксперимент; - - - без струи

Fig. 3. The distribution of pressure, referred to the total pressure of the flow, according to the spherical blunting of the cylindrical model (θ — the angle over the spherical blunting starting from the critical point):
 calculation; ——— experiment; - - - without flow

[2] при следующих определяющих параметрах: $M_a = 1$; $M_\infty = 2,5$; $N = 5,5$; $\gamma_\infty = \gamma_a = 1,4$; $Re_\infty = 1,4 \cdot 10^6$ ($Re_\infty = \rho_\infty v_\infty d_m / \mu_\infty$), отношении диаметра выходного сечения сопла к диаметру мишени модели $\lambda = d_a / d_m = 0,132$. Согласование полученных расчетных данных с экспериментальными результатами работы [2] по структуре взаимодействия встречной струи с набегающим потоком и по распределению давления на сферическом затуплении оказалось, как видно из рис. 3, вполне удовлетворительным.

Для сравнения с экспериментальными данными работы [4] был специально проведен расчет истечения встречной осесимметричной струи в набегающий поток при $M_a = 3$, $M_\infty = 3$, $N = 14$; результат сравнения представлен на рис. 4.

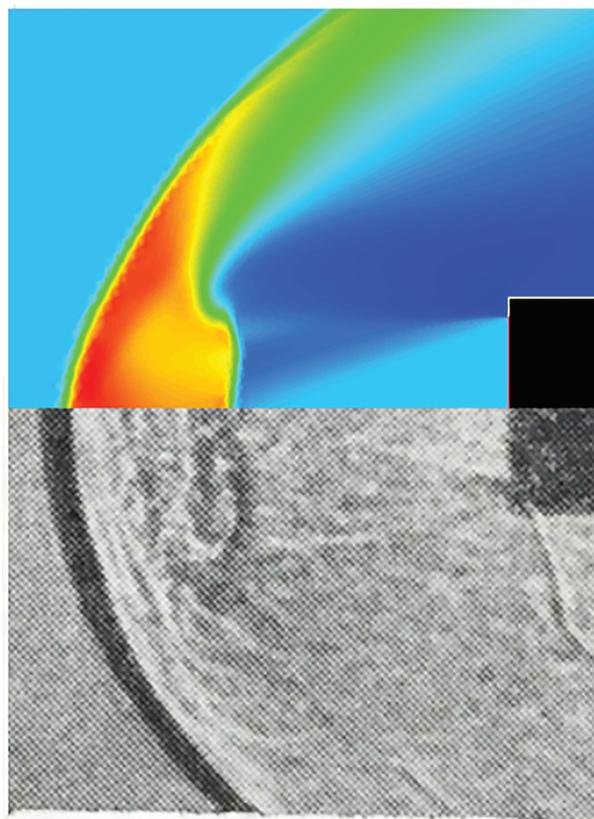


Рис. 4. Картина взаимодействия струи со встречным потоком при $M_a = 3$, $M_\infty = 3$, $N = 14$ (эксперимент [4], картина распределения плотности, расчет)

Fig. 4. The pattern of the interaction of the flow with the counterflow at $M_a = 3$, $M_\infty = 3$, $N = 14$ (experiment [4], the pattern of the density distribution, calculation)

Проведенное сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными работ [2, 4] показали удовлетворительное их согласование — как качественное, так и количественное, что может быть свидетельством достоверности получаемых расчетных результатов.

Параметрические исследования

Влияние числа Маха встречной струи M_a на параметры взаимодействия ее с набегающим потоком исследовалось при следующих значениях определяющих параметров: $n = 100$; $M_\infty = 1; 1,5; 2; 2,5; 3$; $T_\infty = T_a = 300$ К. При этом числа M_a варьировались в диапазоне от 1 до 3.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 5, показывают, что глубина проникания струи в набегающий поток при всех рассмотренных M_∞ с увеличением M_a возрастает примерно по экспоненциальному закону.

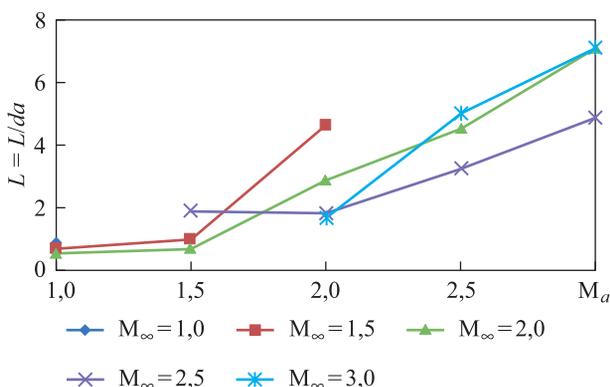


Рис. 5. Зависимость изменения длины проникания струи во встречный поток от чисел Маха M_∞ и M_a (расстояние критической точки от среза сопла)

Fig. 5. The dependence of the change in the penetration length of the flow into the counterflow from the Mach numbers M_∞ and M_a (the distance of the critical point from the nozzle cut)

В случае глубокого проникания струи критическая точка торможения приближается к ударной волне набегающего потока, что приводит к изменению формы обтекаемой структуры и самого течения. В этом случае поверхность раздела струйного течения и набегающего потока, имеющая форму кругового сегмента при $M_a \leq 2$, принимает при $M_a \geq 2,5$ клиновидную форму. При этом ударная волна в набегающем потоке также принимает форму клина, как видно из рис. 6, т. е. становится как бы «присоединенной».

Давление в критической точке при $M_\infty \leq 2$, как видно из рис. 7, практически остается неизменным с увеличением M_a , а при $M_a = 2,5; 3$ ведет себя немонотонно с увеличением M_a . Температура же в критической точке с увеличением M_a при $1,5 \leq M_\infty \leq 2$ сначала монотонно возрастает, а далее с увеличением M_a при $M_\infty = 3$ ведет себя немонотонно (рис. 8). Все эти изменения давления и температуры в критической точке вызваны перестройкой волновой структуры при взаимодействии встречной струи с набегающим потоком газа, как отмечалось выше (см. рис. 6).

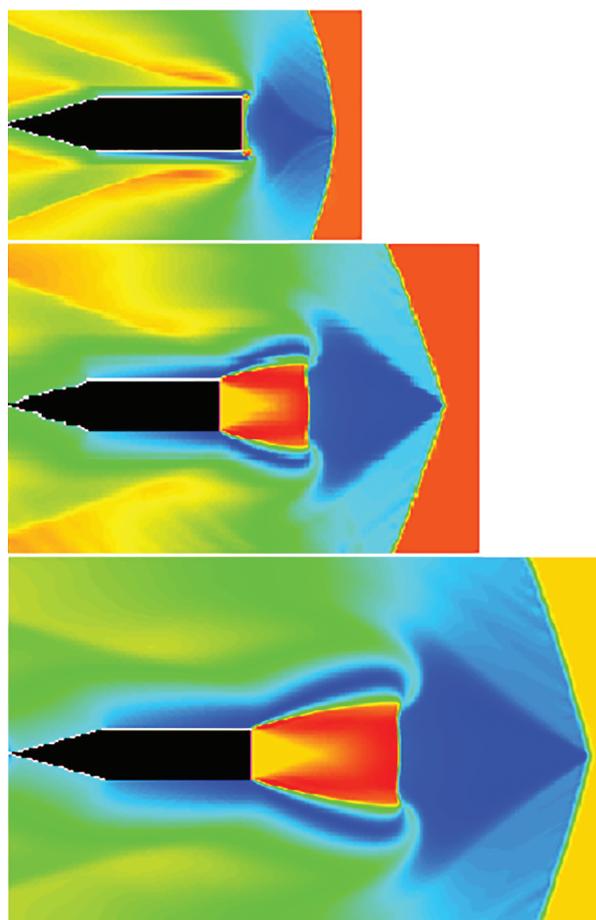


Рис. 6. Картина взаимодействия струи со встречным потоком при $n = 100$, $M_\infty = 3$ и различных M_a (сверху вниз: $M_a = 2$; $M_a = 2,5$; $M_a = 3$)

Fig. 6. The pattern of interaction of the flow with the counterflow at $n = 100$, $M_\infty = 3$ and various M_a (from top to bottom: $M_a = 2$, $M_a = 2.5$, $M_a = 3$)

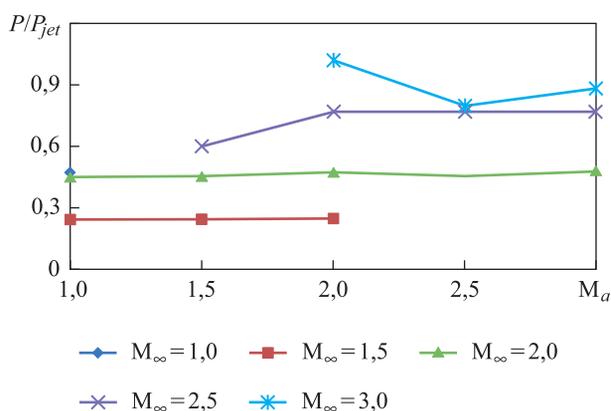


Рис. 7. Изменение давления в критической точке, отнесенного к полному давлению на срезе сопла при различных M_∞ и M_a

Fig. 7. The change in pressure at the critical point, referred to the total pressure at the nozzle cut for different M_∞ and M_a

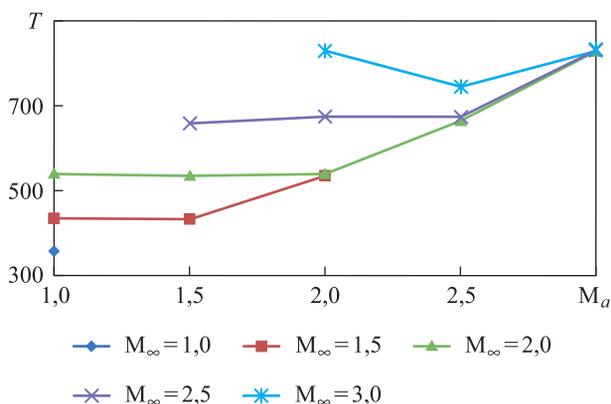


Рис. 8. Температура в критической точке при различных M_∞ и M_a

Fig. 8. The temperature at the critical point for different M_∞ and M_a

Проведенные расчеты по влиянию чисел M_∞ и M_a для $n = 100$ и $M_\infty < 3$ на параметры и структуру возникающего течения показали, что:

1) при $M_a/M_\infty < \approx 1,45$ образуется устойчивое симметричное течение с одной «бочкой» относительно плоскости симметрии;

2) при $M_a/M_\infty \in [\approx 1,45; 1,65]$ возникает неустойчивое течение с колебаниями от одной «бочки» к нескольким;

3) при $M_a/M_\infty > \approx 1,7$ образуется течение с устойчивой первой «бочкой» и колеблющимися второй и последующими «бочками».

При $n = 100$ и $M_\infty \geq 3$ критическая точка смыкается с ударной волной в набегающем потоке (глубокое проникание струи), течение перестраивается, формируется обтекание фиктивного клиновидного тела и возникает присоединенная ударная волна в виде клина (см. рис. 6, б). В этом случае:

1. При $M_a/M_\infty \in [\approx 0,6; 0,8]$ образуется устойчивое несимметричное течение, смещенное относительно плоскости симметрии обтекаемого тела (см. рис. 6, а). Однако при постановке условия симметрии течения в плоскости симметрии обтекаемого тела течение становится симметричным.

2. При $M_a/M_\infty > 0,8$ образуется устойчивое симметричное течение (см. рис. 6, средний).

Исследование влияния параметра n (степени нерасчетности струи) на процесс взаимодействия плоской встречной струи с набегающим потоком проводилось при следующих значениях определяющих параметров задачи: число Маха струи $M_a = 2$, число Маха набегающего потока $M_\infty = 2$; температура газов потока и струи $T_\infty = T_a = 300$ К; $1 \leq n \leq 100$.

Расчеты показали, что с увеличением n размеры области струйного взаимодействия возрастают, а критическая точка струйного течения линейно удаляется от среза сопла в сторону набе-

гающего потока. Геометрия поверхности раздела струйного течения и набегающего потока с увеличением n не изменяется, смена режимов течения не обнаружена.

Выводы

1. На основе уравнений Навье — Стокса с использованием k - ε -модели турбулентной вязкости с помощью ППП ANSYS Fluent проведено исследование взаимодействия плоской встречной струи, истекающей из донного среза аппарата прямоугольной формы (типа крыла), с набегающим потоком при различных значениях определяющих параметров.

2. Установлены режимы взаимодействия плоской встречной струи с набегающим потоком, аналогичные случаю осесимметричного течения, с закрытой отрывной областью и малым прониканием струи в поток и с открытой отрывной областью и большим прониканием струи.

3. Определены диапазоны устойчивого и неустойчивого течений с колебаниями структуры от одной «бочки» к нескольким в зависимости от значений определяющих параметров.

4. Установлено, что глубина проникания струи в набегающий поток при всех M_∞ с увеличением M_a возрастает примерно по экспоненциальному закону.

5. Давление в критической точке области струйного взаимодействия с увеличением M_a при $M_\infty \leq 2$ практически остается постоянным, а при $M_a = 2,5; 3$ ведет себя немонотонно, что вызвано перестройкой волновой структуры течения.

6. Температура в критической точке с увеличением M_a при $1,5 \leq M_\infty \leq 2,5$ монотонно увеличивается.

7. Обнаружено, что при некоторых значениях определяющих параметров образуется устойчивое несимметричное течение со смещением критической точки вбок.

8. Установлено, что с увеличением степени нерасчетности струи n размеры области струйного взаимодействия возрастают, критическая точка струйного течения линейно смещается от среза сопла в сторону набегающего потока. Геометрия поверхности раздела струйного течения и набегающего потока с увеличением n не изменяется, смена режимов течения не обнаружена.

Список литературы

- [1] Charwat A.F., Faulmann D. Investigation of the flow and drag due to control jets discharging upstream into a supersonic flow // Proc. 15th Int. Astronaut. Congress, Warsaw, September 7–12, 1964, v. 3. Paris: Gauthier Villard, 1965.
- [2] Finley P.J. The flow of a jet from a body opposing a supersonic free stream // J. Fluid Mech., 1966, v. 26, no. 2, pp. 337–368.

- [3] Сухнев В.А. Исследование обтекания и аэродинамического сопротивления тела со струей, направленной против сверхзвукового потока разреженного газа // Изв. АН СССР, МЖГ, 1973. № 6. 148 с.
- [4] Карпман И.М. Истечение недорасширенной струи во встречный сверхзвуковой и дозвуковой поток // Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 1. С. 89–96.
- [5] Юдинцев Ю.Н., Чиркашенко В.Ф. Режимы взаимодействия встречной струи с набегающим сверхзвуковым потоком // Газодинамика и акустика струйных течений; Под ред. Дулова В. Г. Новосибирск: Ин-т теоретической и прикладной механики СО АН СССР, 1979. С. 75–106.
- [6] Tretyakov P.K., Fomin V.M., Yakovlev V.I. New principles of control of aerophysical processes research development // Proc. Int. Conf. on the Methods Aerophys. Res., Novosibirsk, 29 June — 3 July, 1996. Novosibirsk: Inst. Theoret. and Appl. Mech., 1996, v. 2, pp. 210–220.
- [7] Leonov S. Experiments on influence of plasma jet lift and drag of wing // Proc. of the 1st Workshop on weakly ionized gases, Colorado, 9–13 June, 1997, s. I., Colorado, 1997, v. 1, pp. J1–J24.
- [8] Malmuth N.D., Fomin V.M., Maslov A.A., Fomichev V.P., Shashkin A.P., Korotaeva T.A., Shilyuk A.N., Pozdnyakov G.A. Influence of a counterflow plasma jet on supersonic blunt body pressures. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999, pp. 1170–1177.
- [9] Ganiev Y.C., Gordeev V.P., Krasilnikov A.V., Aerodynamic drag reduction by plasma and hot-gas injection // J. Thermophys. Heat Trans, 2000, v. 14, no. 1, pp. 10–17.
- [10] Фомин В.М., Малмус Н.Д., Маслов А.А. Численное исследование влияния встречной набегающему сверхзвуковому потоку холодной струи на суммарные аэродинамические характеристики затупленного тела // Доклады РАН, 2000. Т. 374. № 1. С. 55–57.
- [11] Fomin V.M., Maslov A.A., Malmuth N.D. Numerical investigation of counterflow jet penetration in hypersonic flow // Proc. 2 Workshop on Magneto-plasma-aerodynamics in Aerospace Applications, Moscow, 5–7 Apr., 2000. Moscow: Inst. of High Temperatures of RAS, 2000, pp. 116–121.
- [12] Фомин В.М., Маслов А.А., Шашкин А.П., Коротаева Т.А., Малмус Н.Д. Режимы обтекания, формируемые противоточной струей в сверхзвуковом потоке // Прикладная мех. и техн. физика, 2001. Т. 42. № 5. С. 27–36.

Сведения об авторах

Мышенков Виталий Иванович — д-р физ.-мат. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), myshenkov@mgul.ac.ru

Савенко Никита Олегович — магистр МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), savenkonkt@gmail.com

Статья поступила в редакцию 30.06.2017 г.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE FLOW PAST A PLANE BODY WITH A JET FLOWING OUT OF ITS STERN TOWARDS THE SUPERSONIC FLOW

V.I. Myshenkov, N.O. Savenko

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

savenkonkt@gmail.com

The results of a numerical study based on the Navier — Stokes equations using (k- ϵ) a model of the turbulent viscosity of the interaction of a flat counterflow flowing from the bottom cutoff of a rectangular-shaped apparatus (wing type) are presented, with an oncoming flow for different values of the determining parameters. The regimes of interaction of a flat counter flow with an incoming flow are established, analogous to the case of an axisymmetric flow, with a closed tearing region and a small penetration of the jet into the flow and with an open tearing region and a large penetration of the jet. The ranges of stable and unstable flows with the structure oscillations from one «barrel» to several are determined depending on the values of the determining parameters. It is found that the depth of penetration of the jet into the incoming flow for all M_∞ increases with an increase in M_a approximately in exponential order, and the pressure at the critical point of the jet interaction region with Ma increases at $M_\infty \leq 2$ practically does not change, and at $M_a = 2,5$ itself is non-monotonic. The temperature at the critical point increases with M_a at M_∞ in the range $1,5 \leq M_\infty \leq 2,5$. It is established that with increasing degree of non-calculation of the jet, the dimensions of the jet interaction region increase, the critical point of the jet flow linearly shifts from the nozzle cut to the oncoming stream. The geometry of the interface between the jet flow and the incoming flow with increasing n does not change, and a change in the flow regimes has not been detected.

Keywords: flowing around, the oncoming flow, pressure, jet, numbers of Max , Reynolds numbers, at the ratio of nozzle pressure to ambient pressure

Suggested citation: Myshenkov V.I., Savenko N.O. *Chislennoe issledovanie obtekaniya ploskogo tela s istekayushchey iz ego kormy struey navstrechu nabegayushchemu potoku* [Numerical investigation of the flow past a plane body with a jet flowing out of its stern towards the supersonic flow]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 86–93. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-86-93

References

- [1] Charwat A.F., Faulmann D. Investigation of the flow and drag due to control jets discharging upstream into a supersonic flow. Proc. 15th Int. Astronaut. Congress, Warszawa, September 7–12, 1964, v. 3. Paris: Gauthier Villard, 1965.
- [2] Finley P.J. The flow of a jet from a body opposing a supersonic free stream. *J. Fluid Mech.*, 1966, v. 26, no. 2, pp. 337–368.
- [3] Sukhnev V.A. *Issledovanie obtekaniya i aerodinamicheskogo soprotivleniya tela so struey, napravlennoy protiv sverkhzvukovogo potoka razrezhennogo gaza* [An investigation of the flow and aerodynamic drag of a body with a jet directed against a supersonic flow of a rarefied gas]. *Izvestia RAN, Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1973, no. 6, 148 p.
- [4] Karpman I.M. *Istechenie nedorasshirennoy strui vo vstrechnyy sverkhzvukovoy i dozvukovoy potok* [The expiration of an underexpanded jet into a counter supersonic and subsonic flow]. *Izvestia RAN, Mekhanika zhidkosti i gaza*, 1977, no. 1, pp. 89–96.
- [5] Yuditsev Yu.N., Chirkashenko V.F. *Rezhimy vzaimodeystviya vstrechnoy strui s nabegayushchim sverkhzvukovym potokom* [Regimes of interaction of a counter jet with an incoming supersonic flow]. *Gas dynamics and acoustics of jet streams*. Novosibirsk: Institute of Theoret. and Appl. Mechanics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1979, pp. 75–106.
- [6] Tretyakov P.K., Fomin V.M., Yakovlev V.I. New principles of control of aerophysical processes research development. Proc. Int. Conf. on the Methods Aerophys. Res., Novosibirsk, 29 June – 3 July, 1996. Novosibirsk: Inst. Theoret. and Appl. Mech., 1996, v. 2, pp. 210–220.
- [7] Leonov S. Experiments on influence of plasma jet lift and drag of wing // Proc. of the 1st Workshop on weakly ionized gases, Colorado, 9–13 June, 1997, s. I, Colorado, 1997, v. 1, pp. J1–J24.
- [8] Malmuth N.D., Fomin V.M., Maslov A.A., Fomichev V.P., Shashkin A.P., Korotaeva T.A., Shpiyuk A.N., Pozdnyakov G.A.. Influence of a counterflow plasma jet on supersonic blunt body pressures. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999, pp. 1170–1177.
- [9] Ganiev Y.C., Gordeev V.P., Krasilnikov A.V., Aerodynamic drag reduction by plasma and hot-gass injection. *J. Thermophys. Heat Trans.*, 2000, v. 14, no. 1, pp. 10–17.
- [10] Fomin V.M., Malmuth N.D., Maslov A.A. *Chislennoe issledovanie vliyaniya vstrechnoy nabegayushchemu sverkhzvukovomu potoku kholodnoy strui na summarnye aerodinamicheskie kharakteristiki zatuplennogo tela* [Numerical investigation of the influence of a cold jet on the sum of aerodynamic characteristics of a blunt body on the oncoming supersonic flow]. *Doklady RAS*, 2000, v. 374, no. 1, pp. 55–57.
- [11] Fomin V.M., Maslov A.A., Malmuth N.D. Numerical investigation of counterflow jet penetration in hypersonic flow. Proc. 2 Workshop on Magneto-plasma-aerodynamics in Aerospace Applications, Moscow, 5–7 Apr., 2000. Moscow: Inst. of High Temperatures of RAS, 2000, pp. 116–121.
- [12] Fomin V.M., Maslov A.A., Shashkin A.P., Korotaeva T.A., Malmuth N.D. *Rezhimy obtekaniya, formiruemye protivotochnoy struey v sverkhzvukovom potoke* [Flow modes formed by a counterflow jet in a supersonic flow]. *Applied mekh. and techn. Physics*, 2001, t. 42, no. 5, pp. 27–36.

Authors' information

Myshenkov Vitaliy Ivanovich — D-r Sci. (Phis.-math.), Professor of BMSTU (Mytishchi branch), myshenkov@mgul.ac.ru

Savenko Nikita Olegovich — Master (Degree) of BMSTU (Mytishchi branch), savenkonkt@gmail.com

Received 30.06.2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИОННОГО МОДУЛЯТОРА ДАТЧИКА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Н.М. Пушкин¹, К.В. Лакшин¹, А.С. Новичков²

¹АО «НПО измерительной техники», 141074, Московская обл., г. Королёв, ул. Пионерская, д. 2

²МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

npoit@npoit.ru

Выполнен анализ динамических характеристик вибрационного модулятора датчика электростатического поля «Зонд-3М». Приведены данные о конструкции датчика и его вибрационном модуляторе. Выполнен анализ амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик модулятора. Выявлена нелинейная зависимость частоты вынужденных колебаний модулятора от его амплитуды при амплитуде колебаний более 1 мм. Такая зависимость обусловлена наличием в конструкции модулятора нелинейного элемента — плоской упругой пластины. Использован метод гармонического баланса, найдено уравнение «скелетной кривой» амплитудно-частотной зависимости колебаний в районе резонансной частоты. Приведены уравнения, описывающие амплитуду силы тока в катушке возбуждения. Определены основные условия для разработки системы автоматической подстройки и стабилизации амплитуды и частоты колебаний вибрационного модулятора.

Ключевые слова: датчик электростатического поля, вибрационный модулятор, амплитудно-частотная характеристика

Ссылка для цитирования: Пушкин Н.М., Лакшин К.В., Новичков А.С. Исследование динамических характеристик вибрационного модулятора датчика электростатического поля // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 94–100. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-94-100

Датчики электростатического поля используются при контроле процессов электризации летательных аппаратов. Одним из основных элементов датчиков электростатического поля являются вибрационный модулятор. Вибрационный модулятор осуществляет модуляцию напряженности электростатического поля в районе чувствительного элемента датчика. Вследствие этого измерение и преобразование электростатического поля осуществляются на переменном напряжении, что существенно снижает погрешность измерения. Вибрационный модулятор представляет собой сложную электромеханическую и электромагнитную систему, обеспечение стабильных эксплуатационных характеристик которой — достаточно сложная задача. Решение данной задачи во многом определяется динамическими характеристиками вибрационного модулятора. Анализ динамических характеристик вибрационного модулятора датчика электростатического поля «Зонда-3М» посвящена данная работа.

Объекты и методы исследования

В датчике электростатического поля «Зонд-3М БЫ2.714.003-01» [1, 2] для модулирования напряженности электрического поля в районе чувствительного элемента применяется механический модулятор вибрационного типа. Схема конструкции датчика приведена на рис. 1.

Измерительный электрод 1 выполнен неподвижным. Модуляция поля E осуществляется механическим модулятором 3, совершающим

колебания с амплитудой Z_0 относительно оси пружины 4.

Индукцированный электрическим полем E заряд усиливается с помощью предусилителя 2.

Механический модулятор представляет собой удлиненную пластину из ферромагнитного материала. В корпусе измерителя 7 пластина укреплена с помощью плоской пружины таким

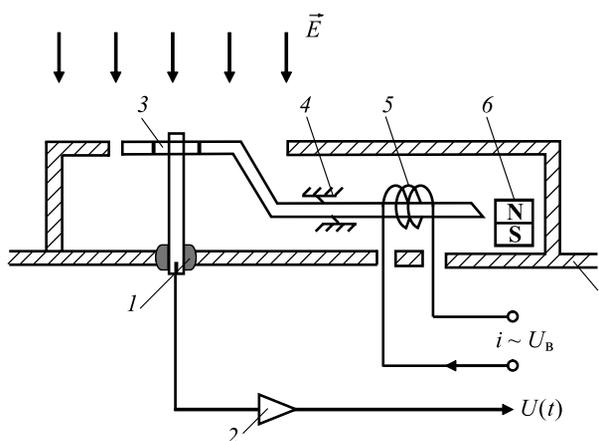


Рис. 1. Конструкция датчика электростатического поля вибрационного типа: 1 — измерительный электрод; 2 — пружина; 3 — механический модулятор; 4 — плоская пружина; 5 — обмотка генератора; 6 — постоянный магнит; 7 — корпус датчика

Fig. 1. Construction of a vibration-type electrostatic field sensor: 1 — measuring electrode; 2 — a spring; 3 — mechanical modulator; 4 — flat spring; 5 — generator winding; 6 — permanent magnet; 7 — sensor body

образом, что ось пружины и ось пластины взаимно перпендикулярны. Ось пружины проходит через центр тяжести пластины модулятора. Такое взаимное расположение осей пружины и пластины модулятора обеспечивают устойчивость при воздействии вибрационных и ударных нагрузок. В районе одного из концов пластины установлен постоянный магнит *b*.

Протекание тока *i* по обмотке *5* приводит к намагничиванию пластины модулятора. При этом конец пластины, находящийся вблизи магнита, попеременно притягивается то к одному, то к другому его полюсу. Второй конец пластины при этом совершает колебания (вибрирует) относительно оси пружины с амплитудой *Z*.

Проведем анализ динамических характеристик данного вибрационного модулятора. Упрощенная схема задающего генератора, вырабатывающего переменное напряжение $\sim U_B$ для питания обмотки, представлена на рис. 2.

Варьируя параметры генератора, можно обеспечить механические колебания модулятора на различной частоте. Таким образом, колебательное движение пластины модулятора осуществляет-

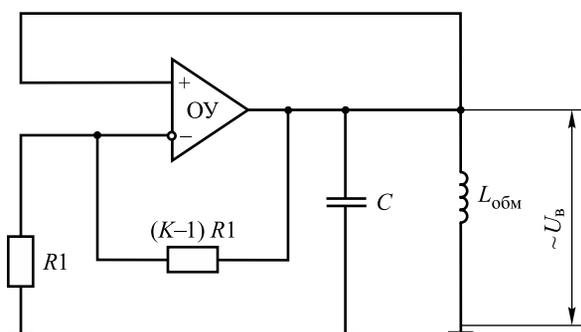


Рис. 2. Упрощенная схема вибрационного генератора датчика электростатического поля: *L_{обм}* — индуктивность обмотки модулятора; ОУ — операционный усилитель; *K* — коэффициент передачи операционного усилителя

Fig. 2. Simplified scheme of the vibration generator of the electrostatic field sensor: *L_{обм}* — inductance of the modulator winding; ОУ — operational amplifier; *K* — transmission factor of the operational amplifier

ся за счет действия на него электромагнитной возбуждающей силы *F_з*, которая изменяется по гармоническому закону. Дифференциальное уравнение движения модулятора можно записать в виде [3]

$$\frac{\partial Z^2}{\partial t} + 2x \frac{\partial Z}{\partial t} + \omega_0^2 Z = \frac{F_z}{G} \sin(\omega_B t).$$

Здесь $x = \frac{1}{2} \frac{\eta}{G}$, где

η — сила сопротивления движения при единичной скорости;

G — масса пластины модулятора;
 $\omega_0 = \sqrt{\xi / G}$ (ω_0 — частота собственных колебаний модулятора; ξ — коэффициент упругости пружины).

Амплитуда колебаний модулятора *Z* и фаза ψ определяются соотношениями [4]

$$Z = \frac{F_z / G}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_B^2) - 4x^2 \omega_B^2}};$$

$$\psi = -\arctg\left(\frac{2x \omega_B}{\omega_0^2 - \omega_B^2}\right).$$

Амплитудная и фазочастотная характеристики модулятора приведены на рис. 3.

Анализируя амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) модулятора, можно заключить, что в зависимости от соотношений собственной резонансной частоты ω_0 и частоты возбуждающей силы ω_B можно различить два режима работы: нерезонансный и резонансный.

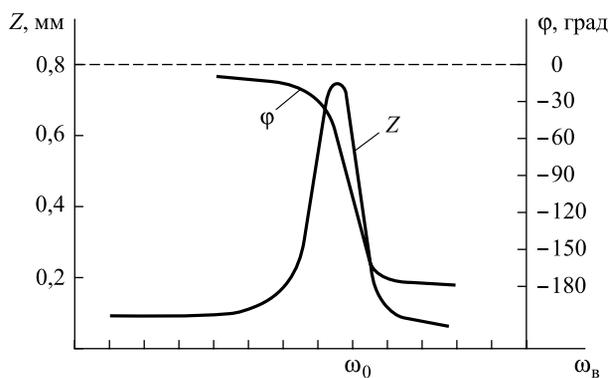


Рис. 3. Амплитудная и фазочастотная характеристики модулятора датчика поля

Fig. 3. Amplitude and phase frequency characteristics of the field sensor modulator

Зависимости амплитуды *Z₀* и фазы ψ модулятора от изменения частоты ω_0 напряжения возбуждения стабильны по амплитуде при нерезонансном режиме работы. Выбирая частоту возбуждения ω_B в 4,5–5,0 раз ниже резонансной частоты ω_0 модулятора, можно получить датчик, чувствительность которого практически не зависит от изменения частоты возбуждения.

Однако нерезонансный режим работы модулятора не позволяет обеспечить амплитуду его колебаний более 0,1 мм, что обуславливает низкую чувствительность датчика в целом.

Если выбрать частоту ω_B возбуждения равной частоте резонанса модулятора (резонансный режим), то, используя высокую добротность механической системы, можно обеспечить большую амплитуду колебаний модулятора ($Z_0 = 0,3 \dots 1,5$ мм) и получить высокочувствительный, экономичный датчик электростатического поля.

Амплитуда колебаний модулятора определяется величиной напряжения возбуждения задающего генератора.

Экспериментально полученные АЧХ модулятора для различных значений напряжения возбуждения приведены на рис. 4.

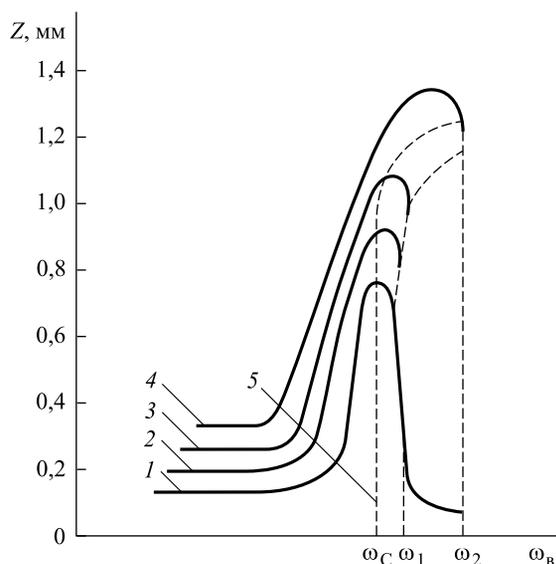


Рис. 4. Экспериментальные АЧХ модулятора датчика поля: 1 — $U_{в1}$; 2 — $U_{в1} > U_{в2}$; 3 — $U_{в2} > U_{в1}$; 4 — $U_{в3} > U_{в2}$; 5 — $\omega_1^2 = \omega_0^2 (1 + 0,75\beta Z_0^2)$

Fig. 4. Experimental frequency response of the field sensor modulator: 1 — $U_{в1}$; 2 — $U_{в1} > U_{в2}$; 3 — $U_{в2} > U_{в1}$; 4 — $U_{в3} > U_{в2}$; 5 — $\omega_1^2 = \omega_0^2 (1 + 0,75\beta Z_0^2)$

Анализ приведенных характеристик позволяет заключить, что в датчике наблюдается нелинейная зависимость частоты вынужденных колебаний модулятора от его амплитуды при $Z_0 \geq 1$ мм. Такая зависимость обусловлена наличием в системе модулятора нелинейного элемента – плоской упругой пружины.

Резонансная частота ω_0 механического модулятора в значительной мере зависит от условий окружающей среды, в частности от температуры. На рис. 5 представлены АЧХ модулятора, полученные при разных значениях температуры окружающей среды.

Для снижения температурной погрешности измерителя, обусловленной изменением амплитуды колебаний резонансного модулятора, необходимо обеспечить стабильность амплитуды при изменении температуры окружающей среды.

Существенной особенностью АЧХ модулятора (при $Z_0 \geq 1$ мм) является возбуждение в диапазоне от ω_1 до ω_2 (см. рис. 4). Точное определение частоты колебаний модулятора с учетом нелинейности пружины затруднительно. Однако, используя метод гармонического баланса, как показано в [5], можно получить приближенное уравнение «ске-

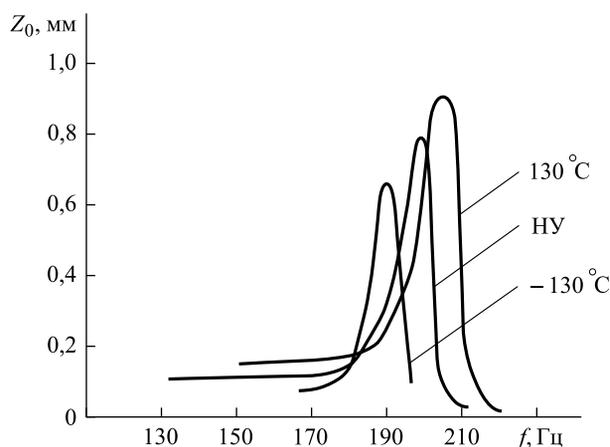


Рис. 5. Изменение АЧХ модулятора при воздействии температуры в диапазоне $-130...+130$ °С: НУ — нормальные условия

Fig. 5. Modification of the frequency response of the modulator when exposed to a temperature in the range of $-130...+130$ °С

летной кривой» для таких механических систем, отражающее зависимость частоты ω_c колебаний модулятора от амплитуды Z_0 в виде:

$$\omega_1^2 = \omega_0^2 (1 + 0,75\beta Z_0^2),$$

где β — коэффициент, характеризующий нелинейную восстанавливающую силу пружины.

Учитывая отмеченные особенности АЧХ, можно заключить, что для обеспечения устойчивых колебаний модулятора в резонансном режиме с большими амплитудами частоту напряжения возбуждения ω_b следует выбирать из условия (рис. 4):

$$\omega_c \leq \omega_b < \omega_1.$$

Для сохранения стабильной амплитуды колебаний резонансного модулятора необходимо обеспечить не только неизменность тока в обмотке катушки возбуждения, но и постоянную автоматическую подстройку генератора на частоту механического резонанса при условии постоянства амплитуды колебаний.

Система возбуждения совместно с модулятором (см. рис. 1 и 2) относится к типу связанных электромеханических систем и описывается системой уравнений [2]

$$\left. \begin{aligned} G \frac{dZ^2}{dt} + \eta \frac{dZ}{dt} + C_M Z - \mu_M i &= 0; \\ L_K \frac{di}{dt} + R_K i + \mu \frac{dZ}{dt} &= U_B \cos \omega t, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где G, C_M — масса модулятора и жесткость пружины;

$Z(t)$ — амплитуда перемещения модулятора;
 $i(t), U_B(t)$ — ток и напряжение в катушке возбуждения;

η — коэффициент демпфирования;

μ_M — электромеханический коэффициент;

L_K, R_K — индуктивность и сопротивление обмотки катушки возбуждения.

Данную модель можно привести к эквивалентной электрической схеме путем введения активного и реактивного сопротивлений:

$$L_K \frac{di}{dt} + (R_K + R_M) i + \frac{1}{C_\Sigma} \int i dt = U_B \cos \omega t, \quad (2)$$

где

$$R_M = \frac{\mu_M^2 \eta \omega}{(C_M + G \omega^2)^2 + \eta^2 \omega^2}; \quad C_\Sigma = \frac{(C_M + G \omega^2)^2 + \eta^2 \omega^2}{\mu_M^2 (G \omega^2 + C_M) \omega^2}.$$

Решая уравнения (1) и (2), можно найти амплитуду перемещения модулятора и амплитуду тока (J_0) в обмотке катушки возбуждения:

$$Z_0 = \frac{\mu J_0}{\sqrt{(C_M - G \omega^2)^2 + \eta^2 \omega^2}};$$

$$J_0 = \frac{U_B}{\sqrt{(R_K + R_M)^2 + (\omega L_K - 1 / \omega C_\Sigma)^2}}.$$

Полагая, что в системе отсутствует демпфирование, выражение для амплитуды тока в обмотке приведем к виду

$$J_0 = \frac{U_B}{\sqrt{R_K^2 + \omega^2 (L_K + \mu_M / (C_M - G \omega^2))^4}}.$$

Отсюда следует, что на частотах $\omega_0^i = [(C_M + \mu_M^2 L_K^{-1}) / G]^{1/2}$ и в окрестности частоты электромеханического резонанса модулятора $\omega_0 = \omega_M = \sqrt{C_M / G}$ имеет место минимум амплитуды колебаний тока.

Представляя решения уравнений (1) и (2) в виде $i(t) = J_0 \cos(\omega t + \omega_1)$ и $Z(t) = Z_0 \cos(\omega t + \omega_2)$, получаем фазочастотные характеристики данной электромеханической системы возбуждения:

$$\cos \psi_1 = [R_K + R_M(\omega)] \left\{ [R_K + R_M(\omega)]^2 + \left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right]^2 \right\}^{-1/2};$$

$$\sin \psi_1 = \left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right] \left\{ [R_K + R_M(\omega)]^2 + \left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right]^2 \right\}^{-1/2};$$

$$\cos \psi_2 = \frac{[R_K + R_M(\omega)](C_M + G \omega^2) - \eta \omega \left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right]}{\sqrt{[(C_M + G \omega^2)^2 + \eta^2 \omega^2] \left\{ [R_K + R_M(\omega)]^2 + \left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right]^2 \right\}}};$$

$$\sin \psi_2 = \frac{\left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right] (C_M + G \omega^2) + \eta \omega [R_K + R_M(\omega)]}{\sqrt{[(C_M + G \omega^2)^2 + \eta^2 \omega^2] \left\{ [R_K + R_M(\omega)]^2 + \left[\omega L_K - \frac{1}{\omega C_\Sigma(\omega)} \right]^2 \right\}}}.$$

Результаты исследования

На рис. 6 и 7 приведены графические результаты расчета параметров колебаний модулятора датчика (см. рис. 1), обладающего частотой механического резонанса $f_M = 200$ Гц.

Механические колебания модулятора могут оказывать влияние на электрическую цепь системы возбуждения. При этом наблюдается изменение величины тока в обмотке катушки возбуждения L_K . Физически это явление объясняется тем, что в области механического резонанса резко

нарастает амплитуда механических колебаний модулятора в магнитном поле постоянного магнита (см. рис. 4). Наводимая при этом в обмотке катушки ЭДС, прикладываясь встречно к напряжению возбуждения U_B , и сила тока, протекающего через обмотку катушки, падает. Это свойство электромеханической цепи — наведение ЭДС в обмотке катушки, величина которой связана с амплитудой перемещения модулятора, — можно использовать для стабилизации амплитуды колебаний модулятора и автоматической подстройки частоты механического резонанса.

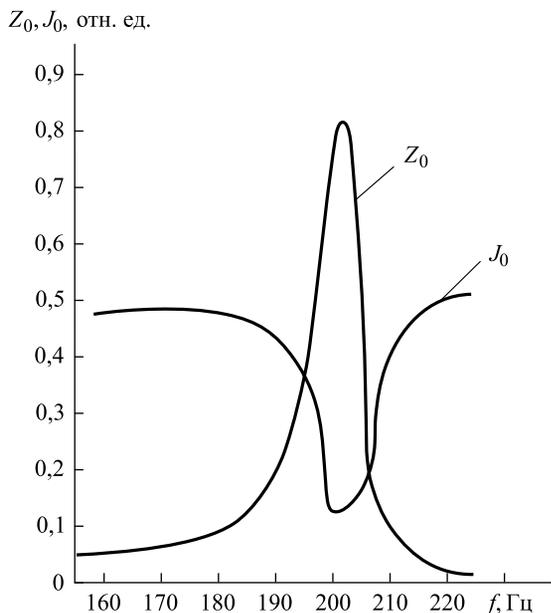


Рис. 6. Зависимость амплитуды колебаний модулятора и тока в катушке от частоты колебаний модулятора ($\omega_0 = f_M = 200$ Гц)
Fig. 6. Dependence of the oscillation amplitude of the modulator and the current in the coil on the oscillation frequency of the modulator ($\omega_0 = f_M = 200$ Hz)

С целью обеспечения стабилизации амплитуды колебаний резонансного модулятора были разработаны и исследованы схемы автоматической подстройки. Для получения сигнала о частоте и амплитуде колебаний механического модулятора применяется дополнительная обмотка обратной связи, напряжение с которой используется для управления режимом и частотой генератора модулятора. В целях дополнительной стабилизации амплитуды колебаний модулятора можно также использовать эффект равенства нулю суммарного вращающегося момента, действующего на модулятор при минимальном значении сопротивления магнитной цепи модулятор — постоянный

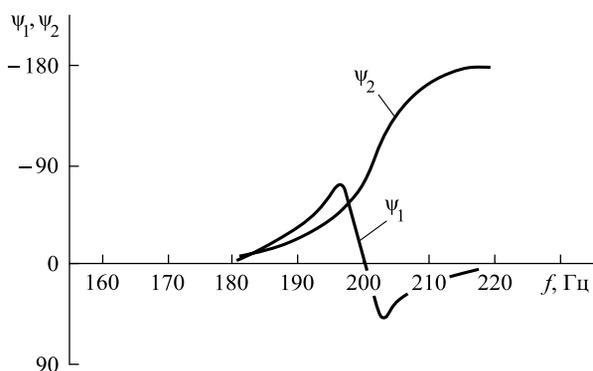


Рис. 7. Фазочастотные характеристики колебаний модулятора и тока в катушке модулятора
Fig. 7. Phase-frequency characteristics of oscillations in the modulator and current in the modulator coil

магнит. Для этого в магнитную схему модулятора дополнительно введены полюсные наконечники (рис. 8).

Магнитное сопротивление в такой системе достигает своего минимального значения при отклонении модулятора l от оси $0-0'$ на угол, равный θ_0 , и обуславливает тем самым максимальное значение магнитной силы F_M .

При отклонении модулятора $0-0'$ на углы $\theta_x \neq \theta_0$ относительно пружины возникает момент магнитной силы $\bar{M}_M = \bar{F}_M l$, стремящийся сохранить равенство $\theta_0 = \theta_x$.

Полагая, что модулятор не абсолютно жесткий, а его масса равна нулю, моменты вращения, действующие на модулятор, будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \bar{M}_M &= \bar{F}_M l = F_M l \sin(\theta_0 - \theta_x); \\ \bar{M}_Z &= \bar{F}_x l = F_Z l, \end{aligned} \right\}$$

где $F_Z = \xi Z$.
 Здесь ξ — коэффициент упругости пружины;
 $Z = l \sin \theta_x \approx l \theta_x$ — амплитуда перемещения конца модулятора (при углах $3...50^\circ$).

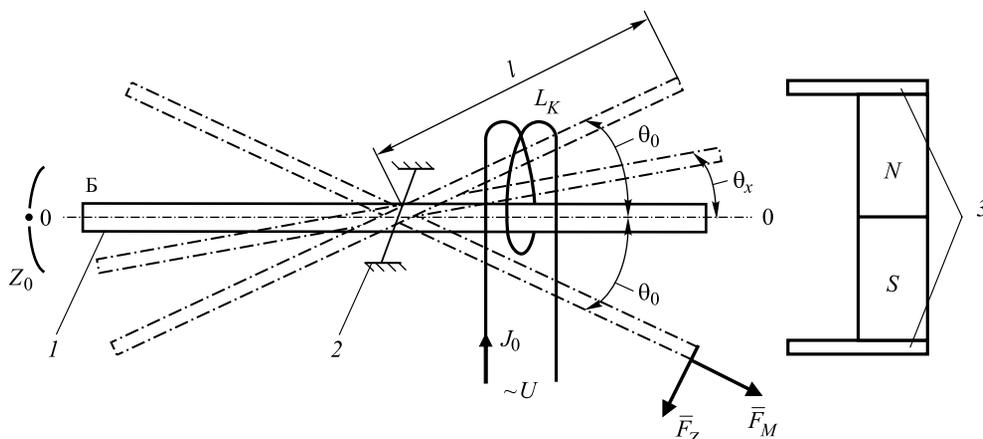


Рис. 8. Схема колебаний модулятора в силовом поле магнита с полюсными наконечниками
Fig. 8. Scheme of oscillations of the modulator in the force field of a magnet with pole pieces

Модулятор будет находиться в равновесии, если $M_{\Sigma} = 0$, т. е.

$$F_M l \sin(\theta_0 - \theta_x) - \xi l \theta_x = 0.$$

Для малых углов θ_0 и θ_x , при которых реально работает модулятор, после соответствующих преобразований получим

$$\theta_x = \frac{\theta_0 \frac{F_M}{\xi l}}{1 + \frac{F_M}{\xi l}}.$$

Отсюда видно, что при $F_M / \xi l \gg 1$ угол $\theta_x \approx \theta_0$ и мало зависит от изменения F_M и F_z до величин отклонения, равных 30...40 %.

Таким образом, при протекании переменного тока по обмотке катушки L_K модулятор будет периодически отклоняться на угол $\pm\theta_0$ и амплитуда Z перемещения его противоположного конца будет постоянна.

Вывод

Разработанные методы и схемно-конструктивные решения позволили обеспечить стабилизацию амплитуды колебаний резонансного элект-

ромеханического модулятора и минимальную погрешность датчика электростатического поля при воздействии температуры, равной ± 130 °С, и частоты вибраций до 200 м/с² [6, 7].

Список литературы

- [1] Пушкин Н.М. Электрофизические методы контроля и диагностики изделий РКТ. М.: Научный консультант, 2016. 277 с.
- [2] Датчики электрического поля «Зонд-3М БЫ2.714.003». Техническое описание. Королев: НПО Измерительной техники, 1989. 45 с.
- [3] Львович А.Ю. Основы теории электромеханических систем. Л.: ЛГУ, 1973. 196 с.
- [4] Болотин А.И., ред. Вибрации в технике: Справочник. Т. 1. М.: Машиностроение, 1978. 196 с.
- [5] Калинин Б.А., Пинчугин А.В. Модуляторы малых сигналов. Л.: Энергия, 1980. 196 с.
- [6] Датчик электрического поля «Зонд-3 БЫ2.714.003». Технические условия. URL: <http://www.ooo-pribor.ru/descriptions/38523/>
- [7] Измеритель напряженности электростатического поля. Пат. RU 2606927 C1/МПК G01R 29/00 (2006.01)/А.Н. Филиппов, Н.М. Пушкин, А.В. Фролов, О.П. Петренко; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники» (RU); заявл. 10.08.2015, опублик. 10.01.2017, бюл. № 1.

Сведения об авторах

Пушкин Николай Моисеевич — д-р техн. наук, главный конструктор АО «НПО измерительной техники», npoit@npoit.ru

Лакшин Кирилл Владимирович — магистр, инженер 2-й категории АО «НПО измерительной техники», npoit@npoit.ru

Новичков Александр Сергеевич — студент МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), npoit@npoit.ru

Статья поступила в редакцию 19.09.2017 г.

INVESTIGATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE VIBRATING MODULATOR SENSOR OF THE ELECTROSTATIC FIELD

N.M. Pushkin¹, K.V. Lakshin¹, A.S. Novichkov²

¹ JSC «NPO Measuring equipment», Pionerskaya str., 2, 141074, Korolev, Moscow region, Russia

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

npoit@npoit.ru

Dynamic characteristics of the vibration modulator of the electrostatic field sensor «Zond-3M» are analyzed. Data on the design of the sensor and its vibration modulator are given. An analysis of the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of the modulator is performed. The nonlinear dependence of the frequency of the forced oscillations of the modulator on its amplitude with the amplitude of oscillations over 1 mm is revealed. This dependence is due to the presence in the modulator design of a nonlinear element — a flat elastic plate. The harmonic balance method was used, the equation of the «skeleton curve» of the amplitude-frequency dependence of the oscillations near the resonant frequency was found. Equations describing the amplitude of the current in the excitation coil are given. The main conditions for the development of a system of automatic adjustment and stabilization of the amplitude and frequency of vibrations of the vibrational modulator are determined.

Keywords: electrostatic field sensor, a vibration modulator, amplitude-frequency characteristic

Suggested citation: Pushkin N.M., Lakshin K.V., Novichkov A.S. *Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik vibratsionnogo modulyatora datchika elektrostatoicheskogo polya* [Investigation of the dynamic characteristics of the vibrating modulator sensor of the electrostatic field]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 94–100. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-94-100

References

- [1] Pushkin N.M. *Elektrofizicheskie metody kontrolya i diagnostiki izdeliy RKT* [Electrophysical methods of control and diagnostics of RKT products]. Moscow: Nauchnyy konsul'tant [Scientific adviser], 2016, 277 p.
- [2] *Datchiki elektricheskogo polya «Zond-3M BY2.714.003». Tekhnicheskoe opisaniye* [Sensors of the electric field «Zond-3M BY2.714.003». Technical description]. Korolev: «NGO of Measuring Equipment, 1989, 45 p.
- [3] L'vovich A.Yu. *Osnovy teorii elektromekhanicheskikh sistem* [Fundamentals of the theory of electromechanical systems]. Leningrad: Leningrad State University, 1973, 196 p.
- [4] Bolotin A.I., red. *Vibratsii v tekhnike* [Vibrations in technology]: Handbook. T. 1. Moscow: Mashinostroeniye [Mechanical Engineering], 1978. 196 p.
- [5] Kalinchuk B.A., Pinchugin A.V. *Modulyatory malykh signalov* [Modulators of small signals]. Leningrad: Energy, 1980, 196 p.
- [6] *Datchik elektricheskogo polya «Zond-3 BY2.714.003». Tekhnicheskie usloviya* [Sensor of the electric field «Zond-3 BY2.714.003». Technical conditions]. Available at: <http://www.ooo-pribor.ru/descriptions/38523/>
- [7] Filippov A.N., Pushkin N.M., Frolov A.V., Petrenko O.P. *Izmeritel' napryazhennosti elektrostatoicheskogo polya* [Electrostatic field strength meter]. Pat. RU 2606927 C1 / IPC G01R 29/00 (2006.01). Applicant and patent holder Joint-stock company «Scientific and Production Association of Measuring Equipment» (RU); claimed. August 10, 2015, publ. 01/10/2012, bul. 1.

Authors' information

Pushkin Nikolay Moiseevich — D-r Sci. (Tech.), Chief designer in the direction of JSC «NPO Measuring equipment», npoit@npoit.ru

Lakshin Kirill Vladimirovich — Magister, engineer of 2nd category of JSC «NPO Measuring equipment», npoit@npoit.ru

Novichkov Aleksandr Sergeevich — student of BMSTU (Mytishchi branch), npoit@npoit.ru

Received 19.09.2017

О СВОЙСТВАХ КОЭФФИЦИЕНТОВ РОСТА И КОЭФФИЦИЕНТОВ ВОЗРАСТАНИЯ

А.В. Бурделёв

Функция k -значной логики $f(x_1, \dots, x_n)$, для которой существует линейная форма $L(x_1, \dots, x_n) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$, $x_i \in \{0, 1, \dots, k\}$, с вещественными коэффициентами и набор вещественных порогов $b_0 < b_1 < \dots < b_k$ таких, что для всех $i \in \overline{0, k-1}$ выполняется условие $f(x_1, \dots, x_n) = i \Leftrightarrow b_i \leq L(x_1, \dots, x_n) < b_{i+1}$, называется пороговой k -значной функцией. Для пороговой k -значной функции коэффициентом роста по переменной называется величина $\Delta_i = \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} (f(x_1, \dots, x_{i-1}, k-1, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n))$ коэффициентом возрастания по переменной называется величина $\lambda_i = \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^{n-1}} \sum_{\varepsilon=0}^{k-2} \sum_{l=\varepsilon+1}^{k-1} (f(x_1, \dots, x_{i-1}, \varepsilon, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{i-1}, l, x_{i+1}, \dots, x_n))$. Установлен ряд свойств

коэффициентов. В частности, установлена связь между коэффициентами роста и мультипликативными коэффициентами: $\lambda_i = 2\xi_i - (k-1)\|f\|$, где $\xi_i = \sum_{(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^n} x_i f(x_1, \dots, x_n)$ — мультипликативный коэффициент;

$\|f\|$ — сумма значений функции f по всем переменным (вес функции). Показано, что коэффициенты роста являются аналогом параметров Чоу в k -значном случае. Исследована возможность прямой характеристики пороговой k -значной функции коэффициентами роста и возрастания.

Ключевые слова: пороговая функция, коэффициенты роста, коэффициенты возрастания, характеристика пороговой функции

Ссылка для цитирования: Бурделёв А.В. О свойствах коэффициентов роста и коэффициентов возрастания // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 101–108. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-101-108

В работах [1, 3] представлен новый алгоритм характеристики k -значных пороговых функций. Проблема характеристики булевых пороговых функций подробно рассмотрена в работах [3–5]. Данный алгоритм распространяет на k -значную область подход к характеристике булевых пороговых функций, разработанный М. Дертоузосом в работе [3].

В подходе Дертоузоса для первичной аппроксимации коэффициентов линейной формы пороговой булевой функции используются коэффициенты характеристического вектора, а далее осуществляется пошаговая модификация (корректировка) данного вектора. Эксперименты, проведенные Дертоузосом для небольших значений n , проиллюстрировали оправданность такого подхода: для части функций коэффициенты характеристического вектора напрямую дают разделяющую плоскость, для оставшейся части требуется сравнительно небольшое количество итераций.

Если в булевом случае наиболее удачным решением является использование коэффициентов характеристического вектора, сводящихся к коэффициентам Чоу, то при переходе в k -значную область выбор меры близости к функциям $x_i, i = \overline{1, n}$ для первичной аппроксимации коэффициентов линейной формы не очевиден.

В работах [1, 2, 6] предложено несколько мер близости k -значной функции $f(x)$ к функциям

$x_i, i = \overline{1, n}$: мультипликативные коэффициенты, разностные коэффициенты, квадратичные коэффициенты, коэффициенты роста и коэффициенты возрастания.

Определение 1 [7, 8]. Функция k -значной логики $f(x_1, \dots, x_n)$, для которой существует линейная форма $L(x_1, \dots, x_n) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$, $x_i \in \mathbb{Z}_k$ с вещественными коэффициентами и набор вещественных порогов $b_0 < b_1 < \dots < b_k$ таких, что для всех $i \in \overline{0, k-1}$ выполняется условие

$$f(x_1, \dots, x_n) = i \Leftrightarrow b_i \leq L(x_1, \dots, x_n) < b_{i+1},$$

называется пороговой k -значной функцией. Не ограничивая общность определения, можем положить здесь и далее $b_0 = -\infty$ и $b_k = +\infty$.

Замечание. В силу неоднозначности задания пороговой функции будем полагать возможным использование порогов, удовлетворяющих нестрогому неравенству

$$b_0 \leq b_1 \leq \dots \leq b_k.$$

В случае равенства порогов $b_i = b_{i+1}$ для некоторого $i \in \overline{0, k-1}$, очевидно, функция $f(x_1, \dots, x_n)$ не принимает значения i . Также далее будем полагать строгое двустороннее неравенство в определении пороговой k -значной функции:

$$f(x_1, \dots, x_n) = i \Leftrightarrow b_i < L(x_1, \dots, x_n) < b_{i+1}.$$

Этого всегда можно добиться небольшим изменением соответствующего порога или весов.

Определение 2. Для функции k -значной логики $f(x_1, \dots, x_n)$ мультипликативным коэффициентом переменной x_i называется величина

$$\xi_i = \sum_{(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^n} x_i f(x_1, \dots, x_n);$$

разностным коэффициентом переменной x_i называется величина

$$\eta_i = \sum_{(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^n} |x_i - f(x_1, \dots, x_n)|;$$

квадратичным коэффициентом переменной x_i называется величина

$$\delta_i = \sum_{(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^n} (x_i - f(x_1, \dots, x_n))^2.$$

Определение 3. Для функции k -значной логики $f(x_1, \dots, x_n)$ коэффициентом роста по переменной x_i называется величина

$$\Delta_i = \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} (f(x_1, \dots, x_{i-1}, k-1, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)).$$

Определение 4. Для функции k -значной логики $f(x_1, \dots, x_n)$ коэффициентом возрастания по переменной x_i называется величина

$$\lambda_i = \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^{n-1}} \sum_{l=0}^{k-2} \sum_{\varepsilon=l+1}^{k-1} (f(x_1, \dots, x_{i-1}, \varepsilon, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{i-1}, l, x_{i+1}, \dots, x_n)).$$

Все введенные выше коэффициенты характеризуют меру близости функций $f(x_1, \dots, x_n)$ и x_i , однако для задачи нахождения аналитического представления k -значной пороговой функции они подходят с разной эффективностью. В работах [1, 2, 6] показано, что наиболее удачно эту роль выполняют коэффициенты роста и коэффициенты возрастания. Исследованию свойств этих двух коэффициентов посвящена данная работа.

Свойства коэффициентов роста и возрастания. Аналог параметров Номуры и коэффициентов Чоу в k -значном случае

Связь между коэффициентами роста и коэффициентами возрастания. Коэффициенты роста и коэффициенты возрастания при малых значениях k имеют очевидную связь между собой.

Теорема 1. При $k = 2$ для всех $i = \overline{1, n}$ коэффициенты роста и возрастания совпадают: $\lambda_i = \Delta_i$.

Доказательство. Подставив в определение 4 значение $k = 2$, получим

$$\begin{aligned} \lambda_i &= \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^{n-1}} \sum_{l=0}^0 \sum_{\varepsilon=1}^1 (f(x_1, \dots, x_{i-1}, \varepsilon, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{i-1}, l, x_{i+1}, \dots, x_n)) = \\ &= \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^{n-1}} (f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)) = \Delta_i. \end{aligned}$$

Теорема 2. При $k = 3$ для всех $i = \overline{1, n}$ коэффициенты роста и возрастания связаны соотношением $\lambda_i = 2\Delta_i$.

Доказательство. Для компактности математических выкладок (при фиксированном i) обозначим $f(x_1, \dots, x_{i-1}, s, x_{i+1}, \dots, x_n) = f(s)$. Подставив в определение 4 значение $k = 3$ и раскрыв внутренние суммы, получим

$$\begin{aligned} \lambda_i &= \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^{n-1}} \sum_{l=0}^1 \sum_{\varepsilon=l+1}^2 (f(x_1, \dots, x_{i-1}, \varepsilon, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{i-1}, l, x_{i+1}, \dots, x_n)) = \\ &= \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^{n-1}} (f(1) - f(0) + f(2) - f(0) + f(2) - f(1)) = \\ &= \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^{n-1}} 2(f(2) - f(0)) = 2\Delta_i. \end{aligned}$$

Коэффициенты роста и возрастания всегда имеют одинаковые знаки, которые совпадают со знаками коэффициентов линейной формы функции для один-монотонных и пороговых функций.

Определение 5. В пространстве \mathbb{Z}^n ортантом называется множество векторов, координаты которых имеют одинаковые знаки.

Теорема 3. Пусть пороговая функция k -значной логики $f(x_1, \dots, x_n)$ задается линейной формой $L(x_1, \dots, x_n) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$. Обозначим через \vec{L} вектор (a_1, a_2, \dots, a_n) . Тогда вектор коэффициентов роста $(\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n)$ и вектор коэффициентов возрастания $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ лежат в одном ортанте с вектором \vec{L} . Иными словами, знаки соответствующих координат у всех трех векторов совпадают.

Доказательство. Согласно работе [8], k -значная пороговая функция является полностью монотонной, т. е. для любого $s \leq n$, любого подмножества

переменных x_{i_1}, \dots, x_{i_s} и любых двух фиксаций переменных $(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_s)$, $(x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) = (\delta_1, \dots, \delta_s)$ соответствующие этим фиксациям подфункции

$$f_\varepsilon = f(x_1, \dots, x_n | (x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_s)),$$

$$f_\delta = f(x_1, \dots, x_n | (x_{i_1}, \dots, x_{i_s}) = (\delta_1, \dots, \delta_s))$$

удовлетворяют одному из следующих условий: либо $f_\varepsilon \leq f_\delta$, либо $f_\varepsilon \geq f_\delta$. Рассмотрим фиксации переменной x_j значениями $x_j = p$ и $x_j = p + 1$ для некоторого $p = 0, k - 2$. Для любого значения $p = 0, k - 2$ соотношение между фиксациями f_p и f_{p+1} определяется только соответствующим знаком коэффициента линейной формы a_j : если $a_j > 0$, то $f_p \leq f_{p+1}$; если $a_j = 0$, то $f_p = f_{p+1}$; если $a_j < 0$, то $f_p \geq f_{p+1}$.

Тогда слагаемые из определения 3

$$\xi_{KR} \equiv f(x_1, \dots, x_{j-1}, k - 1, x_{j+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{j-1}, 0, x_{j+1}, \dots, x_n)$$

и слагаемые из определения 4

$$\xi_{KV} \equiv \sum_{l=0}^{k-2} \sum_{\varepsilon=l+1}^{k-1} (f(x_1, \dots, x_{j-1}, \varepsilon, x_{j+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{j-1}, l, x_{j+1}, \dots, x_n))$$

имеют одинаковый знак с коэффициентом линейной формы a_j либо равны нулю. Суммы зна-

чений ξ_{KR} и ξ_{KV} , соответствующие значениям коэффициента роста Δ_i и коэффициента возрастания λ_i , будут иметь одинаковый знак, и этот знак совпадает со знаком коэффициента линейной формы a_j . В случае когда $a_j = 0$, суммы значений ξ_{KR} и ξ_{KV} будут также равны нулю.

Связь между коэффициентами роста и мультипликативными коэффициентами. Сложность вычисления одного коэффициента роста, согласно определению 3, составляет $O(k^{n-1})$ операций. Сложность вычисления одного коэффициента возрастания, согласно определению 4, на два порядка больше и составляет $O(k^{n+1})$ операций. Покажем далее, что можно упростить вычисление коэффициентов возрастания и снизить трудоемкость их нахождения.

Теорема 4. Коэффициенты возрастания и мультипликативные коэффициенты связаны соотношением $\lambda_i = 2\xi_i - (k - 1)\|f\|$, где $\|f\|$ — сумма значений функции f по всем переменным (вес функции).

Доказательство. Для компактности математических выкладок (при фиксированном i) обозначим $f(x_1, \dots, x_{i-1}, s, x_{i+1}, \dots, x_n)$ через $f(s)$. Тогда

$$\lambda_i = \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \sum_{l=0}^{k-2} \sum_{\varepsilon=l+1}^{k-1} (f(\varepsilon) - f(l)).$$

Раскроем средний знак суммы по $l = \overline{0, k - 2}$ и вынесем за знак суммирования константы

$$\begin{aligned} \lambda_i &= \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \left[\sum_{\varepsilon=1}^{k-1} (f(\varepsilon) - f(0)) + \sum_{\varepsilon=2}^{k-1} (f(\varepsilon) - f(1)) + \dots + \sum_{\varepsilon=k-1}^{k-1} (f(\varepsilon) - f(k-2)) \right] = \\ &= \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \left[\left(\sum_{\varepsilon=1}^{k-1} f(\varepsilon) - (k-1)f(0) \right) + \left(\sum_{\varepsilon=2}^{k-1} f(\varepsilon) - (k-2)f(1) \right) + \dots + (f(k-1) - f(k-2)) \right] = \\ &= \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \left[\left(\sum_{\varepsilon=1}^{k-1} f(\varepsilon) + \sum_{\varepsilon=2}^{k-1} f(\varepsilon) + \dots + f(k-1) \right) - (k-1)f(0) - (k-2)f(1) - \dots - f(k-2) \right] = \\ &= \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \left[(k-1)f(k-1) + (k-2)f(k-2) + \dots + 2f(2) + f(1) - \right. \\ &\quad \left. - (k-1)f(0) - (k-2)f(1) - \dots - 2f(k-3) - f(k-2) \right] = \\ &= \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \left[(k-1)f(k-1) - (k-1)f(0) + \sum_{j=1}^{k-2} (jf(j) - (k-j-1)f(j)) \right] = \\ &= \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \left[(k-1)f(k-1) - (k-1)f(0) + \sum_{j=1}^{k-2} (2j+1-k)f(j) \right] = \end{aligned}$$

$$= \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \left[\sum_{j=0}^{k-1} (2j+1-k)f(j) \right] =$$

$$= \left[\sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \sum_{j=0}^{k-1} 2jf(j) \right] - \left[\sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} \sum_{j=0}^{k-1} (k-1)f(j) \right] = 2\xi_i - (k-1)f.$$

Таким образом, коэффициенты возрастания могут быть напрямую вычислены из мультипликативных коэффициентов и веса функции. Следовательно, трудоемкость вычисления одного коэффициента возрастания будет составлять $O(k^n)$ операций.

Аналог параметров Номуры и коэффициентов Чоу в k -значном случае. Прямое соответствие коэффициентов возрастания и мультипликативных коэффициентов позволяет выделить вектор параметров на основе коэффициентов роста, который аналогичен вектору параметров Номуры (аналог коэффициентов Чоу в булевом случае [9, 10]).

Определение 6 [10]. Для k -значной функции $f(x_1, \dots, x_n)$ параметрами Номуры называется упорядоченный набор весов $(c_0, c_1, \dots, c_n, n_0, n_1, \dots, n_{k-1})$, где $c_i = \sum_{x \in \mathbb{Z}_k^n} x_i f(x)$, $i = 1, n$;

$$n_j = |f^{-1}(j)|, j = \overline{0, k-1}.$$

Соответствие параметров Номуры и k -значной функции далее будем обозначать $f(x) \rightarrow (c_0, c_1, \dots, c_n, n_0, n_1, \dots, n_k)$.

Теорема 5 (k -значный аналог теорем Чоу) [10]. Если две различные k -значные функции имеют одинаковые параметры Номуры, то они обе непороговые. Если две k -значные функции имеют параметры Номуры, которые отличаются друг от друга только перестановкой коэффициентов c_0, c_1, \dots, c_n , и одна из них пороговая, то вторая функция также является пороговой и может быть задана системой пороговых неравенств первой функции с соответствующей перестановкой переменных линейной формы.

Известно [10], что при применении к вектору переменных преобразований однотипности параметры Номуры пороговой k -значной функции изменяются следующим образом.

Теорема 6 [6]. Пусть $f(x_1, \dots, x_n)$ — k -значная пороговая функция, и $f(x) \rightarrow (c_0, c_1, \dots, c_n, n_0, n_1, \dots, n_{k-1})$, тогда

$$f(\pi(x)) \rightarrow (\pi(c_0, c_1, \dots, c_n), n_0, n_1, \dots, n_{k-1}),$$

$$f(\chi_i(x)) \rightarrow (c_0, \dots, c_{i-1}, (k-1) \times$$

$$\times \sum_{x \in \mathbb{Z}_k^n} f(x) - c_i, c_{i+1}, \dots, c_n, n_0, n_1, \dots, n_{k-1}),$$

где $\pi(x_1, \dots, x_n) = (x_{\pi(1)}, \dots, x_{\pi(n)})$, $\pi \in S_n$ — преобразование перестановки переменных; $\chi_i(x_1, \dots, x_n) = (x_1, \dots, x_{i-1}, k-1-x_i, x_{i+1}, \dots, x_n)$, $i = \overline{1, n}$ —

замена знаков логики отдельных переменных с помощью преобразования отрицания Лукашевича.

На основании коэффициентов возрастания можно ввести вектор параметров возрастания и доказать для него аналогичные свойства.

Определение 7 (аналог параметров Номуры и коэффициентов Чоу). Для k -значной функции $f(x_1, \dots, x_n)$ вектором параметров возрастания называется упорядоченный набор весов $(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n, n_0, n_1, \dots, n_{k-1})$, где λ_i — коэффициенты возрастания, $i = \overline{1, n}$, $n_j = |f^{-1}(j)|$ — вес j -го слоя значений функции, $j = \overline{0, k-1}$.

Соответствие параметров возрастания и k -значной функции далее будем обозначать $f(x) \rightarrow (\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n, n_0, n_1, \dots, n_k)$.

Теорема 7 (k -значный аналог теорем Чоу). Если две различные функции имеют одинаковые векторы параметров возрастания, то они обе непороговые. Если две функции имеют векторы параметров возрастания, которые отличаются друг от друга только перестановкой коэффициентов $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n$ и одна из них пороговая, то вторая функция также является пороговой и может быть задана системой пороговых неравенств первой функции с соответствующей перестановкой переменных линейной формы.

Доказательство. Между множеством параметров Номуры и векторов параметров возрастания устанавливается взаимно однозначное соответствие

$$(c_0, c_1, \dots, c_n, n_0, n_1, \dots, n_{k-1}) =$$

$$= \left(\frac{\lambda_0 - C}{2}, \frac{\lambda_1 - C}{2}, \dots, \frac{\lambda_n - C}{2}, n_0, n_1, \dots, n_{k-1} \right),$$

где $C = (k-1) \sum_{j=0}^{k-1} n_j$.

Пусть две различные функции имеют одинаковые векторы параметров возрастания, тогда они имеют одинаковые параметры Номуры. Поэтому по теореме 5 они обе не пороговые. Если две функции имеют векторы параметров возрастания, которые отличаются друг от друга только перестановкой коэффициентов $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n$, то они имеют параметры Номуры, которые отличаются друг от друга только перестановкой коэффициентов c_0, c_1, \dots, c_n ; и если одна из функций пороговая,

то вторая функция также является пороговой и может быть задана системой пороговых неравенств первой функции с соответствующей перестановкой переменных линейной формы.

В случае применения к аргументам k -значной пороговой функции преобразований однотипности вектор параметров возрастания изменяется следующим образом.

Теорема 8. Пусть $f(x_1, \dots, x_n)$ — k -значная пороговая функция с вектором параметров возрастания $f(x) \rightarrow (\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n, n_0, n_1, \dots, n_k)$, тогда верны следующие соответствия:

$$f(\pi(x)) \rightarrow (\pi(\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_n), n_0, n_1, \dots, n_{k-1}),$$

$$f(\chi_i(x)) \rightarrow (\lambda_0, \dots, \lambda_{i-1}, 2(k-1)$$

$$\sum_{x \in \mathbb{Z}_k^n} f(x) - \lambda_i, \lambda_{i+1}, \dots, c_n, n_0, n_1, \dots, n_{k-1}).$$

Доказательство. Для доказательства достаточно воспользоваться равенством $\lambda_i = 2\xi_i - (k-1)\|f\|$ и теоремой 6.

Прямая характеристика пороговых k -значных функций коэффициентами роста и коэффициентами возрастания

Определение 8. Будем говорить, что линейная форма $L(x_1, \dots, x_n) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$ дает чистое разделение областей значений пороговой k -значной функции $f(x_1, \dots, x_n)$, принимающей все значения из множества \mathbb{Z}_k , если для любого $\alpha = \overline{0, k-2}$ выполняется строгое неравенство

$$\begin{aligned} & \max_{f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = \alpha} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\} < \\ & < \min_{f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = \alpha+1} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\}. \end{aligned}$$

Если это неравенство выполняется, то границы b_0, b_1, \dots, b_k можно определить, например, следующим способом:

$$b_\alpha = \min_{f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = \alpha} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\}, \quad \alpha = \overline{0, k-1},$$

$$b_k = \max_{f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = k-1} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\} + 1.$$

В случае когда функция $f(x_1, \dots, x_n)$ не принимает некоторых значений из множества $\overline{0, k-1}$, необходимо следующим образом убрать из рассмотрения соответствующие области значений: пусть функция $f(x_1, \dots, x_n)$ принимает значения $0 \leq \alpha_0 < \alpha_1 < \dots < \alpha_t < k$, $0 < t < k$. Тогда для всех $i = \overline{0, t-1}$ необходимо проверить выполнение строгого неравенства

$$\begin{aligned} & \max_{f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = \alpha_i} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\} < \\ & < \min_{f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = \alpha_{i+1}} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\}. \end{aligned}$$

Пороги в этом случае можно определить, например, следующим образом: 1) для всех значений $\alpha_0, \dots, \alpha_t$ присвоить значения

$$b_{\alpha_i} = \min_{f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = \alpha_i} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\};$$

2) если функция принимает значение $k-1$, то положить

$$b_k = \max_{f(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n) = k-1} \{a_1\varepsilon_1 + \dots + a_n\varepsilon_n\} + 1,$$

в противном случае положить $b_k = +\infty$; для оставшихся значений $j \in \mathbb{Z}_k \setminus \{\alpha_0, \dots, \alpha_t\}$ (которые не являются значениями функции $f(x_1, \dots, x_n)$), начиная со старшего, присвоить соответствующему порогу значение $b_j = b_{j+1}$.

В ряде случаев коэффициенты роста и коэффициенты возрастания напрямую дают уравнение разделяющей плоскости. В работе [11] осуществлена попытка изучения класса пороговых булевых функций, для которых коэффициенты характеристического вектора [3, 11] напрямую дают уравнение разделяющей плоскости. С ростом n доля таких пороговых булевых функций (называемых авторами работы [11] «линейными») среди пороговых булевых функций быстро убывает.

Рассмотрим далее вопрос о том, какая доля пороговых k -значных функций может быть реализована линейной формой, в качестве коэффициентов которой взяты коэффициенты роста или коэффициенты возрастания. Для фиксированных значений k и n введем следующие обозначения:

$Y_{\Delta}^{k,n}$ — доля функций, для которых коэффициенты роста напрямую дают уравнение разделяющей плоскости;

$Y_{\lambda}^{k,n}$ — доля функций, для которых коэффициенты возрастания напрямую дают уравнение разделяющей плоскости;

$Y_{\Delta-\lambda}^{k,n}$ — доля функций, для которых коэффициенты роста напрямую дают уравнение разделяющей плоскости, а коэффициент возрастания — нет;

$Y_{\lambda-\Delta}^{k,n}$ — доля функций, для которых коэффициенты возрастания напрямую дают уравнение разделяющей плоскости, а коэффициент роста — нет;

$Y_{\Delta\lambda}^{k,n}$ — доля функций, для которых коэффициенты возрастания и коэффициенты роста одновременно напрямую дают уравнение разделяющей плоскости.

Для введенных обозначений верны следующие равенства:

$$Y_{\Delta}^{k,n} = Y_{\Delta-\lambda}^{k,n} + Y_{\Delta\lambda}^{k,n},$$

$$Y_{\lambda}^{k,n} = Y_{\lambda-\Delta}^{k,n} + Y_{\Delta\lambda}^{k,n}.$$

Чтобы получить экспериментальные данные о доле пороговых k -значных функций, для которых коэффициенты роста или коэффициенты возрастания напрямую дают уравнение разделяющей плоскости, были сгенерированы случайным образом 100 000 пороговых функций для каждого значения n и k . Генерация осуществлялась следующим образом: в интервале $(-5000; 5000)$ случайным образом выбирались n коэффициентов линейной формы a_1, \dots, a_n ; далее в интервале

$$\left((k-1) \sum_{i=1, n: a_i < 0} a_i; (k-1) \sum_{i=1, n: a_i > 0} a_i \right)$$

случайным образом выбирались и упорядочивались по возрастанию пороги b_0, \dots, b_k .

В табл. 1 приведены результаты экспериментального вычисления величин $Y_{\Delta-\lambda}^{k,n}$, $Y_{\Delta\lambda}^{k,n}$ и $Y_{\lambda-\Delta}^{k,n}$. В каждой ячейке табл. 1 в столбец записан вектор $(Y_{\Delta-\lambda}^{k,n}, Y_{\Delta\lambda}^{k,n}, Y_{\lambda-\Delta}^{k,n})$.

Дальнейшее убывание величин $Y_{\Delta-\lambda}^{k,n}$, $Y_{\Delta\lambda}^{k,n}$, $Y_{\lambda-\Delta}^{k,n}$ при $n = 2$ показано в табл. 2.

Согласно теореме 2, коэффициенты роста и возрастания совпадают при $k = 2$. Это означает, что доля функций при $k = 2$ будет одинаковой для обоих коэффициентов, т. е.

$$Y_{\Delta}^{2,n} = Y_{\lambda}^{2,n} = Y_{\Delta\lambda}^{2,n},$$

$$Y_{\Delta-\lambda}^{2,n} = Y_{\lambda-\Delta}^{2,n} = 0.$$

Значения величин $Y_{\Delta\lambda}^{2,n}$ приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 1

Экспериментальные значения величин $Y_{\Delta-\lambda}^{k,n}$, $Y_{\Delta\lambda}^{k,n}$, $Y_{\lambda-\Delta}^{k,n}$
The experimental values of $Y_{\Delta-\lambda}^{k,n}$, $Y_{\Delta\lambda}^{k,n}$, $Y_{\lambda-\Delta}^{k,n}$

k	n							
	2	3	4	5	6	7	8	9
3	0	0,1302	0,1752	0,2051	0,1058	0,0002	0,0000	0,0000
	1	0,6720	0,4891	0,1915	0,0380	0,0329	0,0095	0,0049
	0	0,1330	0,1758	0,2052	0,1059	0,0002	0,0000	0,0000
4	0,0854	0,1589	0,0474	0,0193	—	—	—	—
	0,7896	0,5457	0,2926	0,0585	—	—	—	—
	0,0921	0,1736	0,0533	0,0188	—	—	—	—
5	0,0854	0,0937	0,0499	—	—	—	—	—
	0,7896	0,4483	0,0953	—	—	—	—	—
	0,0921	0,0743	0,0393	—	—	—	—	—
6	0,1139	0,1203	0,0351	—	—	—	—	—
	0,7521	0,2783	0,0335	—	—	—	—	—
	0,0845	0,0757	0,0217	—	—	—	—	—
7	0,1071	0,1238	—	—	—	—	—	—
	0,7146	0,1734	—	—	—	—	—	—
	0,0563	0,0699	—	—	—	—	—	—
8	0,1514	0,1210	—	—	—	—	—	—
	0,6425	0,1114	—	—	—	—	—	—
	0,0557	0,0531	—	—	—	—	—	—
9	0,1845	0,1034	—	—	—	—	—	—
	0,5781	0,0702	—	—	—	—	—	—
	0,0607	0,0352	—	—	—	—	—	—
10	0,2194	0,0809	—	—	—	—	—	—
	0,5228	0,0456	—	—	—	—	—	—
	0,0620	0,0228	—	—	—	—	—	—

Т а б л и ц а 2

Экспериментальные значения величин $Y_{\Delta-\lambda}^{k,n}$, $Y_{\Delta\lambda}^{k,n}$, $Y_{\lambda-\Delta}^{k,n}$
The experimental values of $Y_{\Delta-\lambda}^{k,n}$, $Y_{\Delta\lambda}^{k,n}$, $Y_{\lambda-\Delta}^{k,n}$

k	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$Y_{\Delta-\lambda}^{k,n}$	0,2510	0,2822	0,2960	0,3088	0,3077	0,3091	0,3030	0,3011	0,2876	0,2786	0,2727
$Y_{\Delta\lambda}^{k,n}$	0,4741	0,4159	0,3715	0,3330	0,3026	0,2735	0,2567	0,2387	0,2244	0,2104	0,1998
$Y_{\lambda-\Delta}^{k,n}$	0,0575	0,0525	0,0492	0,0429	0,0404	0,0341	0,0300	0,0248	0,0221	0,0189	0,0167

Экспериментальные значения величин $Y_{\Delta\lambda}^{2,n}$
The experimental values of $Y_{\Delta\lambda}^{2,n}$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$Y_{\Delta\lambda}^{2,n}$	1	1	0,9545	0,7950	0,6685	0,5894	0,4325	0,2806	0,1694	0,1108	0,0782	0,0589	0,0443

Анализ экспериментальных данных табл. 1–3 позволяет сделать следующие выводы:

– доля функций, для которых коэффициенты роста или коэффициенты возрастания напрямую дают уравнение разделяющей плоскости, убывает с ростом значений k и n ;

– доля функций, характеризуемых коэффициентами возрастания, больше, чем доля функций, характеризуемых коэффициентами роста, только для малых значений k и n (ячейки выделены более темным цветом). С ростом k и n соотношение меняется на противоположное вплоть до 20-кратного отличия при $k = 17$ и $n = 2$;

– при фиксированном k с ростом n величины $Y_{\Delta-\lambda}^{k,n}$ и $Y_{\lambda-\Delta}^{k,n}$ имеют тенденцию к сближению, что можно объяснить полученными экспериментальными данными, демонстрирующими убывание максимального значения угла между векторами $(\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n)$ и $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ с ростом n . Таким образом, с ростом n повышается вероятность того, что оба вектора либо одновременно оказываются лежащими в области решения, либо одновременно лежат вне этой области.

Выводы

Показана ключевая роль коэффициентов роста и коэффициентов возрастания в решении задачи характеристики пороговых k -значных функций, а также возможность применения данного инструмента для решения других прикладных задач дискретной математики. Выявленные свойства демонстрируют сильную структурную связь между пороговыми k -значными функциями и введенными в работах [1, 2, 4] коэффициентами.

Сведения об авторе

Бурделёв Александр Владимирович — старший преподаватель кафедры математического моделирования и анализа данных факультета прикладной математики и информатики Белорусского государственного университета, aburd2011@mail.ru

Статья поступила в редакцию 21.08.2017 г.

Список литературы

- [1] Бурделёв А.В., Никонов В.Г. О новом алгоритме характеристики k -значных пороговых функций // Computational nanotechnology, 2017. Вып. 1. С. 7–14.
- [2] Бурделёв А.В., Никонов В.Г. О построении аналитического задания k -значной пороговой функции // Computational nanotechnology, 2015. Вып. 2. С. 2–13.
- [3] Дертоузос М. Пороговая логика. М.: Мир, 1967. 343 с.
- [4] Минский М., Паперт С. Перцептроны. М.: Мир, 1971. 262 с.
- [5] Бутаков Е.А. Методы синтеза релейных устройств из пороговых элементов. М.: Энергия, 1970, 328 с.
- [6] Бурделёв А.В., Никонов В.Г., Лапиков И.И. Распознавание параметров узла защиты информации, реализованного пороговой k -значной функцией // Тр. Санкт-Петербургского Института информатики и автоматизации Российской академии наук. 2016. Вып. 46. С. 108–127.
- [7] Obradovic Z. Learning with Discrete Multi-Valued Neurons // Machine Learning: Proc. 7th Int. Conf. / ed. B.W. Porter and R.J. Mooney, Austin, TX, Morgan-Kaufmann, 1990. Springer US, 1990, pp. 392–399.
- [8] Никонов В.Г., Никонов Н.В. Особенности пороговых представлений k -значных функций // Тр. по дискретной математике, 2008. Т. 11. С. 60–85.
- [9] Chow C. On the characterization of threshold functions // In Proceedings of the Symposium on Switching Circuit Theory and Logical Design (FOCS), Detroit, Michigan, USA, October 17–20, 1961. Detroit, 1961 pp. 34–38.
- [10] Moraga C. Multiple-valued threshold logic // Optical Computing. Digital and Symbolic / ed. R. Arrathoon. New York: Marcel Dekker Inc., 1989, pp. 161–183.
- [11] Беляков-Бодин В.И., Розенблит С.И. Исследование некоторых вопросов синтеза пороговых функций. М.: Институт теоретической и экспериментальной физики Гос. комитета по использованию атомной энергии СССР, 1972. 15 с.

ABOUT PROPERTIES OF EXPANSION COEFFICIENTS AND INCREASE COEFFICIENTS

A.V. Burdeliov

Belarusian State University, 4, Nezavisimosti avenue, 220030, Minsk, Republic of Belarus

aburd2011@mail.ru

A function of k -valued logic $f(x_1, \dots, x_n)$, for which there exists a linear form, $L(x_1, \dots, x_n) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$, $x_j \in \{0, 1, \dots, k\}$ with real coefficients and a set of real cutoffs $b_0 < b_1 < \dots < b_k$ such as that for all $i \in \{0, k-1\}$ the condition $f(x_1, \dots, x_n) = i \Leftrightarrow b_i \leq L(x_1, \dots, x_n) < b_{i+1}$, is called a cutoff k -valued function. For the cutoff k -valued function of expansion the coefficients are defined as

$$\Delta_i = \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)} (f(x_1, \dots, x_{i-1}, k-1, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)).$$

increase coefficients are defined as

$$\lambda_i = \sum_{(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^{n-1}} \sum_{l=0}^{k-2} \sum_{\epsilon=l+1}^{k-1} (f(x_1, \dots, x_{i-1}, \epsilon, x_{i+1}, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_{i-1}, l, x_{i+1}, \dots, x_n)).$$

We determine several properties of these coefficients. Especially determined relation between expansion coefficients and multiplication coefficients as below $\lambda_i = 2\xi_i - (k-1)\|f\|$, where $\xi_i = \sum_{(x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{Z}_k^n} x_i f(x_1, \dots, x_n) -$

multiplicative factor, $\|f\|$ — sum of all values of function f . We demonstrate that expansion coefficients are analogous of Chow coefficients in k -valued case. We also studied the ability of strict characterization of k -valued cutoff function by expansion coefficients and increase coefficients.

Keywords: learning of cutoff functions, cutoff function, expansion coefficients, increase coefficients

Suggested citation: Burdeliov A.V. *O svoystvakh koefitsientov rosta i koefitsientov vozrastaniya* [About properties of expansion coefficients and increase coefficients]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 101–108. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-101-108

References

- [1] Burdeliov A.V., Nikonov V.G. *O novom algoritme kharakterizatsii k-znachnykh porogovykh funktsiy* [On a new algorithm for characterizing k -valued threshold functions] *Computational nanotechnology*, 2017, v. 1. pp. 7–14.
- [2] Burdeliov A.V., Nikonov V.G. *O postroenii analiticheskogo zadaniya k-znachnoy porogovoy funktsii* [On the construction of an analytic assignment of a k -valued threshold function] *Computational nanotechnology*, 2015, v. 2. pp. 2–13.
- [3] Dertouzos M. *Porogovaya logika* [Threshold logic]. Moscow: Mir Publ., 1967. 343 p.
- [4] Minskiy M., Papert S. *Perseptrony*. [Perceptrons]. Moscow: Mir Publ., 1971. 262 p.
- [5] Butakov E.A. *Metody sinteza releynykh ustroystv iz porogovykh elementov* [Methods of synthesis of relay devices from threshold elements]. Moscow: Energia Publ., 1970, 328 p.
- [6] Burdeliov A.V., Nikonov V.G., Lapikov I.I. *Raspoznavanie parametrov uzla zashchity informatsii, realizovannogo porogovoy k-znachnoy funktsiyey* [Recognition of the parameters of the information security node implemented by the threshold k -value function] *Proceedings of the St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences*, 2016, v. 46, pp. 108–127.
- [7] Obradovic Z. Learning with Discrete Multi-Valued Neurons. *Machine Learning: Proc. 7th Int. Conf.*, ed. B.W. Porter and R.J. Mooney, Austin, TX, Morgan-Kaufmann, 1990. Springer US Publ., 1990, pp. 392–399.
- [8] Nikonov V.G., Nikonov N.V. *Osobennosti porogovykh predstavleniy k-znachnykh funktsiy* [Singularities of threshold representations of k -valued functions] *Proc. on discrete mathematics*, 2008, v. 11, pp. 60–85.
- [9] Chow C. On the Characterization of Threshold Functions. *Proceedings of the Symposium on Switching Circuit Theory and Logical Design (FOCS)*, Detroit, Michigan, USA, October 17–20, 1961. Detroit, 1961 pp. 34–38.
- [10] Moraga C. Multiple-valued threshold logic. *Optical Computing. Digital and Symbolic*. New York: Marcel Dekker Inc., 1989, pp. 161–183.
- [11] Belyakov-Bodin V.I., Rozenblit S.I. *Issledovanie nekotorykh voprosov sinteza porogovykh funktsiy* [Investigation of some problems of synthesis of threshold functions]. Moscow: Institute of Theoretical and Experimental Physics Gos. Committee on the Use of Atomic Energy of the USSR Publ., 1972, 15 p.

Authors' information

Burdeliov Alexandr Vladimirovich — senior lecturer at the Department of Mathematical Modeling and Data Analysis at the Faculty of Applied Mathematics and Computer Science, Belarusian State University, aburd2011@mail.ru

Received 21.08.2017

ОБ ОДНОМ КЛАССЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ. ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И АПОСТЕРИОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСОБЕННОСТЕЙ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

К.К. Рыбников¹, А.Г. Чернышова², Н.В. Евсеев³

¹ООО «Полиэдр», 115035, Москва, набережная Овчинниковская, д. 22/24, стр. 2

²Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет», 141070, Московская обл., г. Королёв, ул. Гагарина, д. 42

³МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

chernyshova-anna@bk.ru

Рассмотрены примеры использования метода наименьших квадратов для анализа биржевых котировок и прогнозирования будущей цены, а также меры экологического контроля предприятий. Математические модели применяются для прогнозирования экономических процессов около 100 лет, в настоящее время этот процесс переживает определенный кризис. Только создание новых подходов к анализу временных рядов (определение начальных точек и периодов для волн Эллиота, промежутков стабильности, учет психологических факторов поведения биржевых игроков и т. д.) даст новые результаты в формировании методов прогнозирования. Построение функции $F(x)$ является основой математического аппарата для определения трендов экономических процессов, по которым можно не только разрабатывать прогнозы, но и проводить апостериорный анализ. Предполагается, что началом ценового движения служат так называемые промежутки стабильности, т. е. консолидация тренда в узком ценовом коридоре. Определение промежутков стабильности является отдельной, пока мало изученной, задачей. Только комплексное использование старых методов и новых аналитических подходов (возможно, эвристических) приведет к успеху, который будет зависеть от совместных усилий экономистов, социологов и математиков. Предложенный подход является универсальным для первичного математического анализа не только временных рядов, определенных количественными показателями технических и экономических процессов, но и аналогичных показателей при изучении математических моделей в социологии.

Ключевые слова: ММВБ, котировки, биржа, метод наименьших квадратов, экологический контроль, аналитика, прогнозирование

Ссылка для цитирования: Рыбников К.К., Чернышова А.Г., Евсеев Н.В. Об одном классе математических методов анализа временных рядов. Возможности прогнозирования и апостериорных исследований особенностей социально-экономических процессов // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2017. Т. 21. № 6. С. 109–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-109-113

История развития математических подходов к анализу экономических процессов насчитывает около 100 лет [1]. Математические модели в экономике можно разделить на два основных класса: аналитические модели и модели прогнозов. К первому классу можно отнести модели планирования, основанные на использовании методов математического программирования, а также статистические иллюстрации. Первой моделью второго класса, видимо, стала модель денежной эмиссии О.Ю. Шмидта, представленная в 1922 г. Она горячо обсуждалась как экономистами, так и математиками [2, 3]. Именно эта дискуссия дала толчок развитию математических методов в экономике.

В дальнейшем на первое место выдвинулись модели трендов временных рядов, математической основой которых является метод наименьших квадратов (МНК).

Цель работы

Реализация этого метода приводит к построению приближенной формулы

$$f(x) \approx F(x),$$

где $f(x)$ — функция, заданная таблично, $f(x_i) = y_i$ ($i = 0, 1, 2, \dots, n$);

$$F(x) = \sum_{j=0}^m a_j x_j.$$

Само построение заключается в решении задачи выбора коэффициентов a_0, a_1, \dots, a_m таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений значений функции от значений $F(x)$ в точках x_0, x_1, \dots, x_n

$$S(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=0}^n (F(x_i) - y_i)^2$$

была бы наименьшей.

Эта задача сводится к определению единственного решения системы $m+1$ линейных уравнений с $m+1$ неизвестными a_0, a_1, \dots, a_m :

$$\frac{\partial S(a_0, a_1, \dots, a_m)}{\partial a_k} = 0, \quad k = 0, 1, \dots, m.$$

Построение функции $F(x)$ является основой математического аппарата для определения трен-

дов экономических процессов, по которым можно не только разрабатывать прогнозы, но и проводить апостериорный анализ [3–9].

Примером первого направления может служить прогноз движения цены на акции МТС на ММВБ за период с 08.10.2013 по 04.04.2014 (рис. 1). В соответствии с этими данными цена на акции МТС с ноября по декабрь 2013 г. колеблется между 225 и 240 руб. Однако с января по апрель 2014 г. цена возрастает с 230 до 280 руб.

Результаты и обсуждение

Анализ этих данные позволяет утверждать, что построение общего тренда невозможно. Однако, если взять данные только за четыре месяца (с 09.01.2014 по 04.04.2014) (см. рис. 1), то МНК приводит к построению простого квадратного тренда $f(x) = x^2 + 7x + 237$, где x — показатель временной шкалы.

Так, для значений x , соответствующих началу апреля 2014 г., значение тренда равно 281. В действительности цена акций МТС к началу апреля 2014 г. составила 280 руб. Таким образом, если рассматривать значение 281 как прогноз, его следует признать удовлетворительным.

Авторы предполагают, что началом ценового движения служат так называемые промежутки стабильности, т. е. консолидация тренда в узком ценовом коридоре. К сожалению, определение промежутков стабильности является отдельной, пока мало изученной, задачей. Другой перспективный подход — анализ (или прогноз) изменений в инвестиционной политике корпораций.

Аналогичные прогнозы можно строить для любых трендовых данных, например для транс-

портного и промышленного индекса Доу. Очевидной трудностью при определении фьючерсных прогнозов является необходимость правильно угадывать периоды, соответствующие волнам Эллиота [8, 9] (именно восходящей волне Эллиота соответствует рассмотренный выше период — с 09.01.2014 по 04.04.2014).

В настоящее время процесс развития методов прогнозирования переживает определенный кризис. Ясно, что только создание новых подходов к анализу временных рядов (определение начальных точек и периодов для волн Эллиота, определение промежутков стабильности, учет психологических факторов поведения биржевых игроков и т. д.) даст новые результаты в формировании методов прогнозирования. При этом продвижение в разработке данных методов возможно только при использовании старых классических способов анализа устойчивых по тенденции процессов, основанных на применении метода наименьших квадратов. Разумеется, простое использование этого метода не всегда возможно, но авторы полагают, что только комплексное применение старых методов и новых аналитических подходов (может быть, эвристических) приведет к успеху, который будет зависеть от совместных усилий экономистов, социологов и математиков [6, 7]. Последние должны сыграть главную роль в создании математических моделей, позволяющих делать относительно достоверные прогнозы.

Авторы считают себя вправе сопроводить это утверждение цитатой из знаменитого романа Станислава Лема «Возвращение со звезд» [10]. В далеком будущем математик-тополог Ремер (в прошлом инженер) говорит главному герою,



Рис. 1. Прогноз движения цены на акции МТС
Fig. 1. The forecast of the price fluctuations for MTS shares

космонавту Элу Бреггу: «И знаете, почему именно математика? Потому что она выше всего. Работы Абеля и Кронекера сегодня так же хороши, как четыреста лет назад, и так будет всегда. Возникают новые пути, но и старые ведут дальше. Они не зарастают. Там... там — вечность. Только математика не боится ее».

Другим направлением в использовании трендов является апостериорный анализ. В работе [5] при изучении зависимостей энергозатрат от объема производства для ряда цеховых подразделений предприятия «Воскресенские минеральные удобрения» был построен линейный тренд. При изучении показателей, значительно уклоняющихся от тренда, было выявлено, что эти ситуации соответствуют отступлениям от стандартного технологического режима (дополнительное плавление комовой серы, промывка цистерн, переработка кислоты с повышенной концентрацией). Выявление подобных ситуаций может быть полезно при осуществлении экологического контроля [4, 5].

В работах [4, 5] предлагался регрессионный анализ взаимосвязи объема производства продукции и потребления электрической и тепловой энергии на основных подразделениях предприятий «Воскресенские минеральные удобрения» и «Аммофос» в 1995–1998 гг. Были построены временные тренды по каждому из цехов, причем практически во всех случаях для линейных трендов были получены достаточно большие коэффициенты детерминации, что говорит о сильной зависимости расхода энергоресурсов от объема производства. В качестве примера можно рассмотреть график зависимости количества потребленной электроэнергии от валового объема производства, произведенной цехом ЭФК № 3 в III квартале 1995–1997 гг. (рис. 2).

Уравнение регрессии имеет вид $y = 127,58x + 316053$. Коэффициент детерминации равен 0,9577.

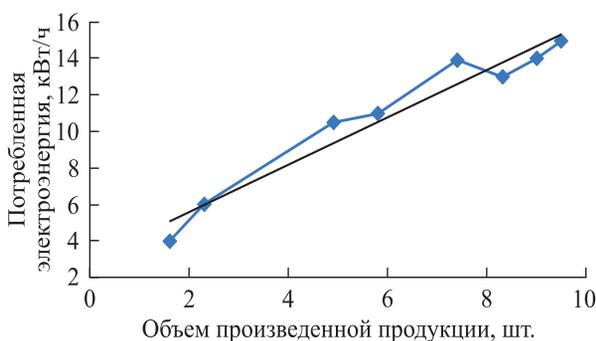


Рис. 2. Зависимость количества потребленной электроэнергии от валового объема произведенной продукции для цеха ЭФК № 3

Fig. 2. Dependence of electricity consumption on the gross volume of products produced for the workshop EFC No. 3

Только в редких случаях первоначальный анализ деятельности цехов показал неадекватность модели линейной регрессии функции зависимости расхода энергорасходов от объема производства. Эти случаи, все без исключения, касались расхода теплоэнергии.

Приведем пример, сопоставив графики временных рядов и линейных трендов для одного такого подразделения, производящего аммофос (рис. 3).

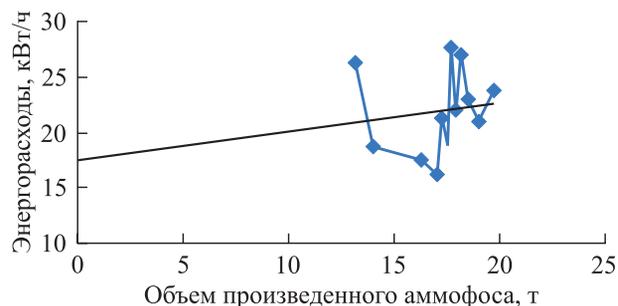


Рис. 3. Зависимость энергорасходов от объема производства аммофоса

Fig. 3. Dependence of energy consumption on the volume of ammophos production

Линейный тренд имеет вид $y = 109,28x + 188263$. Коэффициент регрессии равен 0,5328.

В этом случае не учитывались изменения в стандартном технологическом режиме производства. Будем называть эти изменения обкаткой оборудования.

Когда учет таких процессов производится (рис. 4), получаем уточнение линейного тренда ($y = 97,965x + 366987$) и коэффициент регрессии, равный 0,5815. Заметим, что коэффициент регрессии повысился. Аналогичные результаты получены практически по всем подразделениям.

Ясно, что аналогичный подход, связанный с выявлением неадекватности линейной модели,

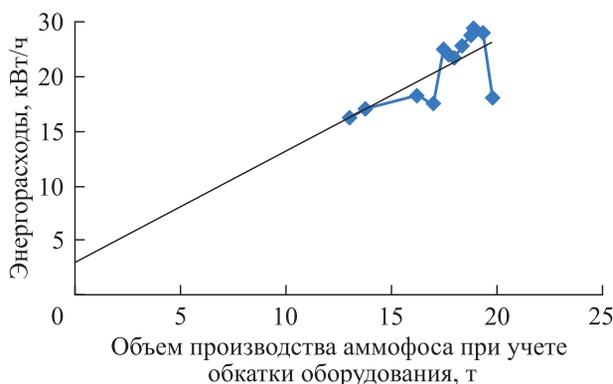


Рис. 4. Зависимость энергорасходов от объема производства аммофоса при учете обкатки оборудования

Fig. 4. Dependence of energy consumption on the volume of ammophos production while running-in of the equipment

позволяет обнаружить случаи технических сбоев или технологической перестройки стандартных режимов производства, что, как правило, приводит к выбросам загрязняющих веществ в окружающую среду. Выявление и анализ таких ситуаций должны быть включены в систему экологического контроля за работой предприятия, работающего в режиме наращивания объемов выпускаемой продукции.

Выводы

Таким образом, перспективы апостериорного технологического анализа точек, значительно отклоняющихся от тренда, связаны с возможным выявлением уже имевших место случаев нарушения предприятием экологических норм, а также предпосылок возникновения техногенных катастроф.

Заметим также, что предложенный подход является универсальным для первичного математического анализа не только временных рядов, определенных количественными показателями технических и экономических процессов, но и аналогичных показателей при изучении математических моделей в социологии.

Список литературы

- [1] Евсеев Н.В., Рыбников К.К., Чернышова А.Г. Классические тренды технических и экономических процессов, основанные на методе наименьших квадратов, и перспективы их использования // *Обозрение прикладной и промышленной математики*, 2014. Т. 21. Вып. 4. С. 356–357.
- [2] Белых А.А. История советских экономико-математических исследований (1917 г. – начало 60-х гг.). Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1990. 152 с.
- [3] Рыбников К.К. Математики Московского государственного университета леса. М.: МГУЛ, 2009. 132 с.
- [4] Рыбников М.К., Рыбников К.К. Методы выявления изменений в стандартном режиме производства на химических предприятиях, производящих минеральные удобрения, как информация для экологического контроля // *Тр. Междунар. конф. «Математические и физические методы в экологии и мониторинге природной среды»*, Королёв, 2001. М.: МГУЛ, 2001. С. 238–240.
- [5] Рыбников К.К. О возможностях использования результатов анализа трендовых моделей объема энергозатрат в условиях растущего объема производства для экологического контроля // *Обозрение прикладной и промышленной математики*, 2003. Т. 10. Вып. 1. С. 213–214.
- [6] Савицкий А.А., Горшенина Н.С. Инвестиционный проект как форма реализации инвестиционной политики корпоративных структур // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*, 2009. № 4. С. 168–170.
- [7] Курзин П.А., Курзина В.М., Рыбников М.К., Рыбников К.К. Математические основы принятия управленческих решений. М.: МГУЛ, 2007. 150 с.
- [8] Мэрфи Дж.Дж. Технический анализ финансовых рынков: полный справочник по методам и практике трейдинга / пер. с англ. О. Новицкой, В. Сидорова, М.: Вильямс, 2016. 496 с.
- [9] Арталь Л., Салес Ж. Ипотека и уравнения. Математика в экономике. Мир математики. Т. 19. М.: ДеАгостини, 2014. 160 с.
- [10] Лем С. Возвращение со звезд / пер. с польск. Е. Вайсброта, Р. Нудельмана. М.: АСТ, 2015. 320 с.

Сведения об авторах

Рыбников Константин Константинович — кандидат физ.-мат. наук, доцент, директор ООО «Полиэдр», kkrubnikov@mail.ru

Чернышова Анна Геннадьевна — специалист по учебно-методической работе I категории кафедры гуманитарных и социальных дисциплин Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московской области «Технологический университет», chernyshova-anna@bk.ru

Евсеев Никита Владимирович — магистрант космического факультета МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), evseevnickita@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26.09.2017 г.

ONE CLASS OF MATHEMATICAL METHODS FOR TIME SERIES ANALYSIS. THE POSSIBILITIES OF PREDICTION AND A POSTERIORI ANALYSIS OF THE PECULIARITIES OF THE ECONOMIC PROCESSES

K.K. Rybnikov¹, A.G. Chernyshova², N.V. Evseev³

¹ «Polyhedron», 115035, Moscow, Ovchinnikovskaya embankment, 22/24 build. 2

² University of Technology, Gagarin street, 42, Korolev, Moscow region, 141070

³ BMSTU (Mytishchi branch), 1 st. Institutskaya, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

chernyshova-anna@bk.ru

Examples of application of the method of least squares for the analysis of exchange quotations and forecasting of the future price are considered. Measures of environmental control of enterprises are also considered. For the application of mathematical methods in the economy there is a sufficiently large layer for studying, since the application of mathematical models for forecasting economic processes hardly amounts to more than 100 years. At present, the development of forecasting methods is undergoing a certain crisis. It is clear that only the creation of new approaches to the analysis of time series (the determination of the starting points and periods for Elliott waves, stability intervals, the accounting of psychological factors of the behavior of exchange players, etc.) will give new results in the formation of forecasting methods. The construction of the function $F(x)$ is the basis of the mathematical apparatus for determining the trends of economic processes, according to which it is possible not only to develop forecasts, but also to make a posteriori analysis. The authors suggest that the beginning of the price movement is the so-called stability intervals, that is, the consolidation of the trend in a narrow price corridor. Unfortunately, the problem of determining intervals of stability is a separate, yet little studied task. Of course, the simple use of this least-squares method is not always possible, but the authors believe that only a comprehensive use of old methods and new analytical (maybe sometimes heuristic) approaches will lead to success, which will depend on the joint efforts of economists, sociologists and mathematicians. The authors would like to note that the approach presented in the article is universal for the primary mathematical analysis of not only time series determined by quantitative indicators of technical and economic processes, but also similar indicators in the study of mathematical models in sociology.

Keywords: MICEX, quotations, exchange, least square method, environmental monitoring, analytics, prediction

Suggested citation: Rybnikov K.K., Chernyshova A.G., Evseev N.V. *Ob odnom klasse matematicheskikh metodov analiza vremennykh ryadov. Vozmozhnosti prognozirovaniya i aposteriornykh issledovaniy osobennostey sotsial'no-ekonomicheskikh protsessov* [One class of mathematical methods for time series analysis. The possibilities of prediction and a posteriori analysis of the peculiarities of the economic processes]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2017, vol. 21, no. 6, pp. 109–113. DOI: 10.18698/2542-1468-2017-6-109-113

References

- [1] Evseev N.V., Rybnikov K.K., Chernyshova A.G. *Klassicheskie trendy tekhnicheskikh i ekonomicheskikh protsessov, osnovannye na metode naimen'shikh kvadratov, i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Classical trends of technical and economic processes based on the method of least squares, and the prospects for their use] *Survey of Applied and Industrial Mathematics*, 2014, vol. 21, iss. 4, pp. 356–357.
- [2] Belykh A.A. *Istoriya sovetskikh ekonomiko-matematicheskikh issledovaniy (1917 – nachalo 60-kh godov)* [The history of Soviet economic and mathematical research (1917 – early 60-ies)]. Leningrad: Leningrad University Press Publ., 1990, 152 p.
- [3] Rybnikov K.K. *Matematiki Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa* [Mathematics of Moscow State Forest University]. Moscow: MGUL Publ., 2009, 132 p.
- [4] Rybnikov M.K., Rybnikov K.K. *Metody vyavleniya izmeneniy v standartnom rezhime proizvodstva na khimicheskikh predpriyatiyakh, proizvodnyashchikh mineral'nye udobreniya, kak informatsiya dlya ekologicheskogo kontrolya* [Methods for detecting changes in the standard production mode at chemical plants producing mineral fertilizers, as information for environmental control]. *Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii «Matematicheskie i fizicheskie metody v ekologii i monitoringe prirodnoy sredy»*, Korolev [Proceedings of the international conference «Mathematical and physical methods in ecology and monitoring of the natural environment», Korolev, 2001]. Moscow: MGUL Publ., 2001, pp. 238–240.
- [5] Rybnikov K.K. *O vozmozhnykh ispol'zovaniya rezul'tatov analiza trendovykh modeley ob'ema energozatrat v usloviyakh rastushchego ob'yema proizvodstva dlya ekologicheskogo kontrolya* [On the possibilities of using the results of the analysis of trend models of the volume of energy consumption in conditions of a growing volume of production for environmental control]. *Obozrenie prikladnoy i promyshlennoy matematiki* [Survey of Applied and Industrial Mathematics], 2003, v. 10, iss. 1, pp. 213–214.
- [6] Savitskiy A.A., Gopshenina N.S. *Investitsionnyy projekt kak forma realizatsii investitsionnoy politiki korporativnykh struktur* [Investment project as a framework for the implementation of the investment policy of the corporate structure]. *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik*, 2009, no. 4, pp. 168–170.
- [7] Kurzin P.A., Kurzina V.M., Rybnikov M.K., Rybnikov K.K. *Matematicheskie osnovy prinyatiya upravlencheskikh resheniy* [Mathematical foundations of making managerial decisions]. Moscow: MGUL Publ., 2007, 150 p.
- [8] Murphy John J. [Technical analysis of financial markets: a complete guide to trading methods and practices]. Moscow: Williams Publ., 2016, 496 p.
- [9] Artal L., Sales J. *Ipoteka i uravneniya. Matematika v ekonomike. Mir Matematiki* [Mortgage and Equations. Mathematics in economics. The World of Mathematics T. 19.]. Moscow: DeAgostini Publ., 2014, 160 p.
- [10] Lem S. *Vozvrashchenie so zvezd* [Return from the stars], trans. from Polish E. Weissbrot, R. Nudelman. Moscow: AST Publ., 2015. 320 p.

Authors' information

Rybnikov Konstantin Konstantinovich — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Director of «Polyhedr Ltd.», kkrybnikov@mail.ru

Chernyshova Anna Gennadievna — specialist in educational and methodological work of the 1st category of the Department of Humanitarian and Social Disciplines of the University of Technology, chernyshova-anna@bk.ru

Evseev Nikita Vladimirovich — master's degree student of Space Faculty of BMSTU (Mytishchi branch), evseevnickita@gmail.com

Received 26.09.2017