

Главный редактор

Санаев Виктор Георгиевич, проф., д-р техн. наук, Ректор МГУЛ, Москва

Зам. главного редактора

Никишов Владимир Дмитриевич, проф., канд. техн. наук, академик
РАЕН, МГУЛ, Москва

Редакционный совет журнала

Азаров Василий Ильич, проф., д-р техн. наук, заслуженный деятель науки и
техники РФ, академик РАЕН, Москва

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

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

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

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

Евдокимов Юрий Михайлович, профессор, канд. хим. наук; академик Нью-
Йоркской Академии Наук, чл.-корр. 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, МГУЛ, Москва

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

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

Кожухов Николай Иванович, академик РАН, проф., д-р экон. наук, МГУЛ,
Москва

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

Комаров Евгений Геннадиевич, проф., д-р техн. наук, МГУЛ, Москва

Корольков Анатолий Владимирович, проф., д-р физ.-мат. наук, МГУЛ,
Москва

Кох Нильс Элмерс, 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, МГУЛ, Москва

Майорова Елена Ивановна, проф., д-р юр. наук, канд. с.-х. наук, МГУЛ, Москва

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

Моисеев Николай Александрович, академик РАН, проф., д-р с.-х.
наук, МГУЛ, Москва

Редькин Анатолий Константинович, проф., д-р техн. наук, МГУЛ, Москва

Рыкунин Станислав Николаевич, проф., д-р техн. наук, МГУЛ, Москва

Семенов Юрий Павлович, проф., д-р техн. наук, МГУЛ, Москва

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

Теодоронский Владимир Сергеевич, проф., д-р с.-х. наук, академик
РАЕН, МГУЛ, Москва

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

Тулузаков Дмитрий Владимирович, доц., канд. техн. наук, МГУЛ, Москва

Цветков Вячеслав Ефимович, проф., д-р техн. наук, академик
РАЕН, МГУЛ, Москва

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

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

Ответственный секретарь Расева Елена Александровна

Редактор В.Б. Ивлиева

Набор и верстка М.А. Зверев

Электронная версия Н.К. Зверева

Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телера-
диовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12923 от 17.06.2002

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

Материалы настоящего журнала могут быть перепечатаны и воспроизведе-
ны полностью или частично с письменного разрешения издательства.

© ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2016

Подписано в печать 29.08.2016.
Тираж 600 экз.
Заказ №
Объем 11,75 п. л.

Издательство Московского
государственного университета леса
141005, Мытищи-5, Московская обл.,
1-я Институтская, 1, МГУЛ. (498) 687-41-33
les-vest@mgul.ac.ru

Editor-in-chief

Sanaev Victor Georgievich, professor, Dr.Sci.(Tech.), Rector of MSFU, Moscow

Deputy Editor-in-Chief

Nikishov Vladimir Dmitrievich, professor, Ph.D.(Tech.), academician of the Rus-
sian Academy of Natural Sciences, MSFU, Moscow

Editorial council of the journal

Azarov Vasily Il'ich, professor, Dr.Sci.(Tech.), Honored Worker of Science and
Technology of Russia, Academy of Natural Sciences, Moscow

Artamonov Dmitriy Vladimirovich, Professor, Dr. Sci. (Tech.), Penza State
Belyaev Mikhail Yur'evich, Dr.Sci.(Tech.), Head of Department, Deputy Director of
S.P. Korolev RSC "Energiya", Moscow

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

Drapalyuk Mikhail Valentinovich, professor, Dr.Sci.(Tech.), Vice-Rector for Sci-
ence 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.), MSFU, Moscow

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

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

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

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

Komarov Evgeniy Gennadievich, professor, Dr.Sci.(Tech.), MSFU, Moscow

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

Mayorova Elena Ivanovna, Dr.Sci.(Jurisprudence), Ph.D.(Agricultural), MSFU,
Moscow

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

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

Red'kin Anatoliy Konstantinovich, professor, Dr.Sci.(Tech.), MSFU, Moscow

Rykunin Stanislav Nikolaevich, professor, Dr.Sci.(Tech.), MSFU, Moscow

Semenov Yuriy Pavlovich, professor, Dr.Sci.(Tech.), MSFU, 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, MSFU, Moscow

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

Tuluzakov Dmitriy Vladimirovich, associate professor, Ph.D.(Tech.), MSFU, Moscow

Tsvetkov Vyacheslav Efimovich, professor, Dr.Sci.(Tech.), academician of the
Russian Academy of Natural Sciences, MSFU, Moscow

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

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

Assistant Editor Raseva Elena Aleksandrovna

Editor V.B. Ivlieva

PageMaker M.A. Zverev

Electronic version N.K. Zvereva

The journal is registered by the Ministry of the Russian Federation for the press, TV
and radio broadcasting and means of mass communications

Certificate on registration ПИ № 77-12923 от 17.06.2002

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.

© ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2016

It is sent for the press 29.08.2016.
Circulation 600 copies
Order №
Volume 11,75 p. p.

Publishing house of Moscow
State Forest University
141005, Mytitschi, Moscow Region, Russia
1st Institutskaya street, 1, MSFU. (498) 687-41-33
les-vest@mgul.ac.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Древесиноведение

Галкин В.П., Санаев В.Г., Уголев Б.Н., Калинина А.А. <i>Влияние растягивающих напряжений на изменение величины усушки</i>	4
Горбачева Г.А., Уголев Б.Н., Санаев В.Г., Белковский С.Ю. <i>Характеризация эффекта памяти формы древесины бука методом термомеханической спектроскопии</i>	10
Данилов Д.А. <i>Влияние лесохозяйственных воздействий и состава насаждений на анатомические показатели и плотность древесины сосны и ели</i>	15
Котов А.А., Иванов Г.А. <i>Теоретические и экспериментальные исследования изменения модуля упругости ствола растущей березы по высоте</i>	20
Николаева Н.Н., Воробьев В.В. <i>Роль тканей коры в создании рельефа поверхности ствола <i>betula pendula</i> var. <i>Carelica</i></i>	25
Пеккоев А.Н., Харитонов В.А. <i>Качество древесины плантационных культур ели в условиях Средней тайги Карелии</i>	29
Сапожников И.В., Скуратов Н.В., Алексеева И.И., Самойленко Д.А., Мамонтов М.П., Матвеева К.А. <i>Определение коэффициентов влагопроводности при низкотемпературной сушке древесины</i>	34
Угрюмов С.А., Осетров А.В. <i>Анализ химического состава и свойств древесных плит на основе модифицированных клеевых композиций</i>	40
Угрюмов С.А., Смирнов Д.А. <i>Оценка свойств фурановых олигомеров и древесных плит на их основе</i>	44
Федюков В.И., Салдаева Е.Ю., Цветкова Е.М. <i>Комплексная оценка технического качества древесины на корню</i>	48
Шарапов Е.С., Чернов В.Ю., Смирнова Е.В. <i>Исследование кинематики процесса сверления древесины тонкими буровыми сверлами</i>	52
Шлычков С.В. <i>Влияние породы древесины на качество акустических панелей</i>	60
Обливин А.Н., Лопатников М.В., Тарасов С.М. <i>Древесные композиционные материалы на неорганическом связующем</i>	64
Санаев В.Г., Степанов И.М., Запруднов В.И., Усачев М.С., Тарасенко П.А., Малашин А.А., Нефедов П.В., Колесник Т.В. <i>Межотраслевая целевая программа ускоренного инновационного развития технологий аэрокосмического мониторинга леса с выводом их на лидирующие позиции в мире и гигaproект аэрокосмос-лес</i>	69
Жердева М.В., Артюшенко В.М. <i>Использование модуля морфологического анализа в <i>Lisene.net</i></i>	81
Рубинштейн А.И., Полещук О.М., Городецкая Т.А., Чернова Т.В. <i>О некоторых возможных применениях нечетких множеств</i>	85
Шипов Н.В., Полещук О.М., Шмаков А.В. <i>Дополнительные свойства интеграла в смысле главного значения и вариант сведения интеграла Лебега-Стилтьеса к интегралу Римана-Стилтьеса</i>	88

CONTENTS

Wood-knowledge

Galkin V.P., Sanaev V.G., Ugolev B.N., Kalinina A.A. <i>The influence of tensile stresses on the change of wood shrinkage</i>	4
Gorbacheva G.A., Ugolev B.N., Sanaev V.G., Belkovskiy S.Yu. <i>Characterization of the shape memory effect of beech wood by the method of thermomechanical spectrometry</i>	10
Danilov D.A. <i>The effect of silvicultural influences and forest stand structure on anatomic indicators and density of pine and spruce wood</i>	15
Kotov A.A., Ivanov G.A. <i>Theoretical and experimental studies of the variation of elasticity modulus of a growing birch trunk along its height</i>	20
Nikolaeva N.N., Vorobiev V.V. <i>Role of the bark tissues complex in formation of the trunk surface relief in betula pendula var. Carelica</i>	25
Pekkoev A.N., Charitonov V.A. <i>The wood quality of spruce plantation crops in the conditions of the Middle taiga of Karelia</i>	29
Sapozhnikov I.V., Skuratov N.V., Alexeeva I.I., Samoylenko D.A., Mamontov M.P., Matveeva K.A. <i>Determination of diffusion coefficients at low temperature wood drying</i>	34
Ugryumov S.A., Osetrov A.V. <i>Analysis of chemical composition and properties of wood boards based on modified adhesive composition</i>	40
Ugryumov S.A., Smirnov D.A. <i>The assessment of properties of furan oligomers and wood-based panels based on them</i>	44
Fedyukov V.I., Saldayeva E.Yu., Tsvetkova E.M. <i>Integrated assessment of the technical quality of standing wood</i>	48
Sharapov E.S., Chernov V.Y., Smirnova E.V. <i>Kinematics of drilling process in wood drilling resistance measurements</i>	52
Shlychkov S.V. <i>The dependence of the acoustic panel quality on wood</i>	60
Oblivin A.N., Lopatnikov M.V., Tarasov S.M. <i>Wood composite materials of inorganic binders</i>	64
Sanaev V.G., Stepanov I.M., Zaprudnov V.I., Usachev M.S., Tarasenko P.A., Malashin A.A., Nefedov P.V., Kolesnik T.V. <i>The intersectoral target program of rapid developing the innovation technologies of aerospace forests monitoring with bringing them to the world leading position and “aerocosmos-forest” megaproject</i>	69
Zherdeva M.V., Artyushenko V.M. <i>Use of the module of the morphological analysis in Lucene.net</i>	81
Rubinshtein A.I., Poleshchuk O.M., Gorodetskaya N.A., Chernova T.V. <i>On some possible applications of fuzzy sets theory</i>	85
Shipov N.V., Poleshchuk O.M., Shmakov A.V. <i>Additional properties of the functional $p(1/x)$ and Lebesgue–Stieltjes integral connection with Riemann–Stieltjes integral</i>	88

ВЛИЯНИЕ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ УСУШКИ

В.П. ГАЛКИН, проф., МГУЛ, д-р техн. наук⁽¹⁾,
В.Г. САНАЕВ, проф., МГУЛ, д-р техн. наук⁽¹⁾,
Б.Н. УГОЛЕВ, проф., МГУЛ, д-р техн. наук⁽¹⁾,
А.А. КАЛИНИНА, вед. инж., МГУЛ⁽¹⁾

rector@mgul.ac.ru, vgalkin@mgul.ac.ru, kalinina@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

При удалении связанной адсорбционной воды возникает усушка древесины. Если усушка древесины происходит под нагрузкой, коэффициент усушки изменяется в зависимости от величины и направления действующих напряжений. При растяжении усушка уменьшается, а при сжатии возрастает.

Влияние растягивающей нагрузки на величину усушки исследовали на экспериментальной установке. Уменьшение усушки при увеличении растягивающих напряжений описывается линейной зависимостью. При напряжениях, приближающихся к пределу прочности древесины, усушка составляет менее 30 % от свободной. Уменьшенное нагрузкой значение усушки получило название редуцированная усушка β' , а отношение редуцированной усушки к свободной усушке β – коэффициент редуцирования K' .

При свободной усушке зависимость усушки от влажности древесины включает два характерных диапазона. Начальный, нелинейный, до влажности 15 % и второй, линейный, от влажности 15 % и менее. На первом диапазоне происходит удаление как адсорбционной воды, так и микрокапиллярной. Усушку вызывает снижение количества адсорбционной воды. На втором участке зависимости присутствует только адсорбционная вода, в связи с чем зависимость усушки приобретает линейный характер.

Растягивающая нагрузка придает зависимости усушки от влажности древесины дополнительную нелинейность. Начало линейного участка зависимости смещается в сторону более низкой влажности. При увеличении нагрузки не только снижается значение усушки, но и уменьшается влажность начала линейного диапазона.

Исследование коэффициентов усушки нагруженной древесины создает основу разработки более точных математических моделей для расчетов напряженного состояния древесины в процессах ее гидротермической обработки.

Ключевые слова: коэффициент усушки, влажность древесины, усушка, напряжения, остаточные деформации.

При удалении связанной адсорбционной воды возникает усушка древесины. Если усушка древесины происходит под нагрузкой, коэффициент усушки изменяется в зависимости от величины и направления действующих напряжений. При растяжении усушка уменьшается, а при сжатии возрастает.

Процессы сушки древесины сопровождаются градиентами влажности по толщине сортиментов [1]. Когда влажность поверхностных зон становится ниже предела насыщения клеточных стенок древесины, возникают растягивающие напряжения вследствие сопротивления внутренних зон свободной усушке. При этом во внутренних зонах действуют сжимающие напряжения [2, 9].

На рис. 1 приведена свободная усушка древесины сосны в радиальном и тангенциальном направлении [3, 10].

В зависимостях усушки от влажности древесины прослеживаются два участка. Начальный нелинейный от влажности около 60 % до 15 %. Второй, практически линейный, при влажности менее 15 %. Нелинейность зависимости усушки от влажности возникает в результате удаления микрокапиллярной воды, не вызывающей усушку, вместе с адсорбционной, создающей в клеточной стенке капилляры переменного сечения [4–8]. При влажности менее 15 % древесина содержит только адсорбционную воду, энергия связей которой с древесинным веществом намного превосходит энергию связей микрокапиллярной воды. Поэтому зависимость усушки от влажности приобретает линейный характер.

Влияние растягивающей нагрузки на величину усушки исследовали на экспериментальной установке. Уменьшение усушки



Рис. 1. Зависимость тангенциальной и радиальной усушки от влажности древесины
 Fig. 1. The dependence of the tangential and radial shrinkage on the wood moisture

при увеличении растягивающих напряжений описывается линейной зависимостью. При напряжениях, приближающихся к пределу прочности древесины, усушка составляет менее 30 % от свободной. Уменьшенное нагрузкой значение усушки получило название редуцированной усушки β' , а отношение редуцированной усушки к свободной усушке β – коэффициента редуцирования K' [7, 11].

На рис. 2 приведены результаты одного из опытов, подтверждающие указанные положения. Влажный образец древесины ясеня вначале нагружали и сушили под постоянной растягивающей нагрузкой. Высушенный образец разгружали и выдерживали; затем его вновь вымачивали до первоначальной влажности.

Здесь вверх от нулевой линии отложены деформации сжатия, а вниз – растяжения. Кривая 0–1–2 представляет упруго-эластическую деформацию при растяжении влажной древесины $\varepsilon_{ev1} = 0,015$. (Из-за краткости начального периода нагружения пластические деформации практически отсутствуют.) Кривая 2–3–4 отражает достаточно продолжительную сушку под нагрузкой ($P = 50Н$). На участке 4–5–6 показано возвращение упруго-эластической деформации сухой древесины $\varepsilon_{ev2} = 0,006$ после разгрузки и некоторой выдержки.

Для анализа деформационных превращений древесины нанесены кривая сво-

бодной усушки 2'–11 и кривая последующего свободного разбухания 11–12 по данным измерений парного образца. Ордината точки 11 соответствует величине свободной усушки $\beta = 0,106$ к моменту разгрузки образца (точка 4). Ордината точки 4 отражает величину усушки $\beta_s = 0,056$. Усадке $\beta^* = \beta_s + \varepsilon_{ev2} = 0,056 + 0,006 = 0,062$ древесины, высушенной под нагрузкой, соответствует ордината точки 6. Общая невозвращенная после разгрузки деформация (отрезок 6–11) включает три вида деформаций: полную замороженную упруго-эластическую ε_f , соответствующую отрезку 6–8, пластическую ε_p и замороженную усушку β_f .

При увлажнении древесины, начатом в момент, соответствующий точке 6, происходят два противоположно направленных процесса: «размораживание» замороженных деформаций и разбухание образца. Отрезок 6–7 отражает результат частичного размораживания и разбухания образца. Полное размораживание $\varepsilon_f = \varepsilon_{ev1} - \varepsilon_{ev2} = 0,015 - 0,006 = 0,009$ соответствует отрезку 6–8. Дальнейшее увлажнение восстанавливает первоначальный размер образца (точка 9) и выявляет накопленную во время сушки и не изменившуюся при вымачивании пластическую деформацию растяжения $\varepsilon_p = 0,007$ (отрицательная ордината точки 10). Деформация ε_p представлена отрезком 8–13. Участок 12–13 соответствует редуцированной усушке $\beta' = 0,076$. Отре-

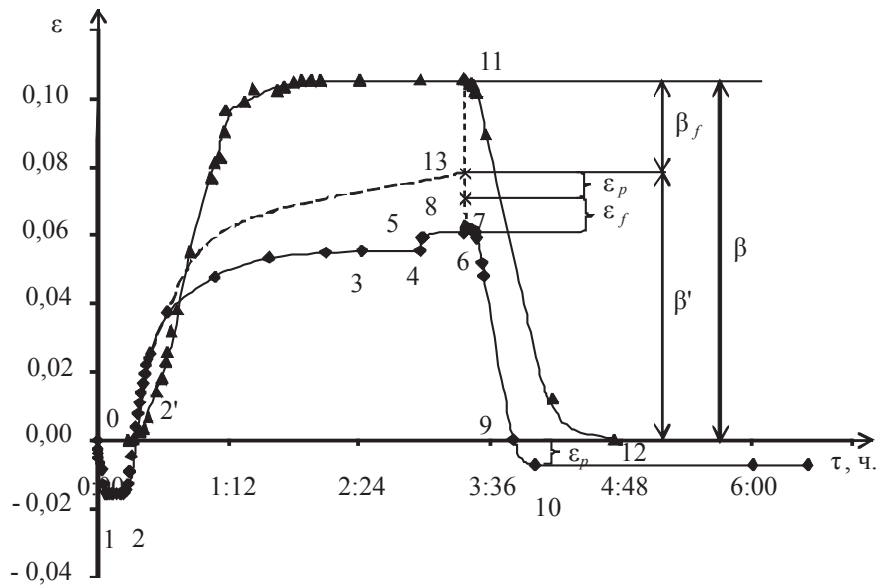


Рис. 2. Изменение деформации во время опыта (ясень, растяжение, танг. $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W_{\text{нач.}} = 86\%$, $W_{\text{кон.}} = 2\%$, $P = 50\text{ Н}$)

Fig. 2. Change of deformation during the experiment (Ash, stretching, tang. $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W_{\text{нач.}} = 86\%$, $W_{\text{кон.}} = 2\%$, $P = 50\text{ Н}$)

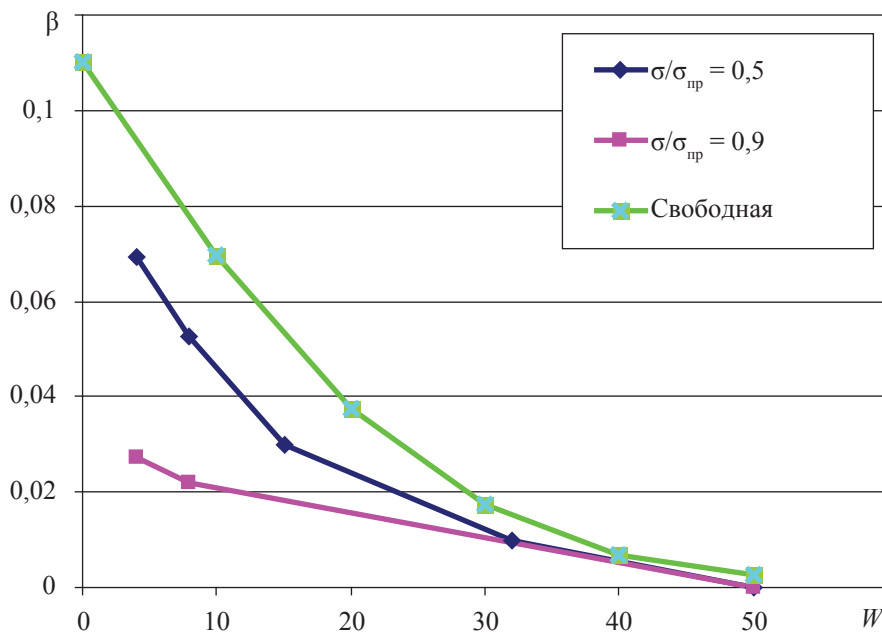


Рис. 3. Зависимость усушки от влажности древесины при различных значениях растягивающей нагрузки
Fig. 3. The dependence of shrinkage on the wood moisture at different values of tensile load

зок 11–13 отражает замороженную усушку $\beta_f = \beta - \beta' = 0,106 - 0,076 = 0,030$.

При воздействии растягивающей нагрузки изменяется характер зависимости величины усушки от влажности древесины [7]. На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости усушки от влажности древесины. Величина растягивающей нагрузки

составляла 0, 5 и 0, 9 от предела прочности при растяжении в тангенциальном направлении при влажности древесины выше предела насыщения клеточных стенок. Экспериментально установлено, что при нагрузках до половины предела прочности характер зависимости редуцированной усушки от влажности древесины подобен усушке при

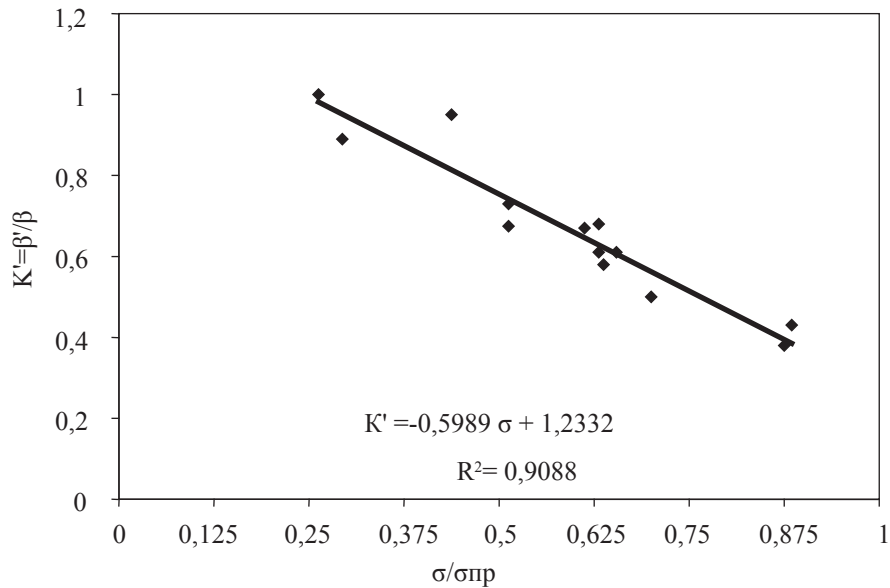


Рис. 4. Зависимость «редуцированной усушки» от напряжений (ясень, растяжение, танг. $t = 80$ °С, $W \geq W_{пн}$, $\sigma = 1,6$ МПа)

Fig. 4. Dependence of «reduced shrinkage» on stress (Ash, stretching, tang. $T = 80$ °C, $W \geq W_{pn}$, $\sigma = 1,6$ MPa)

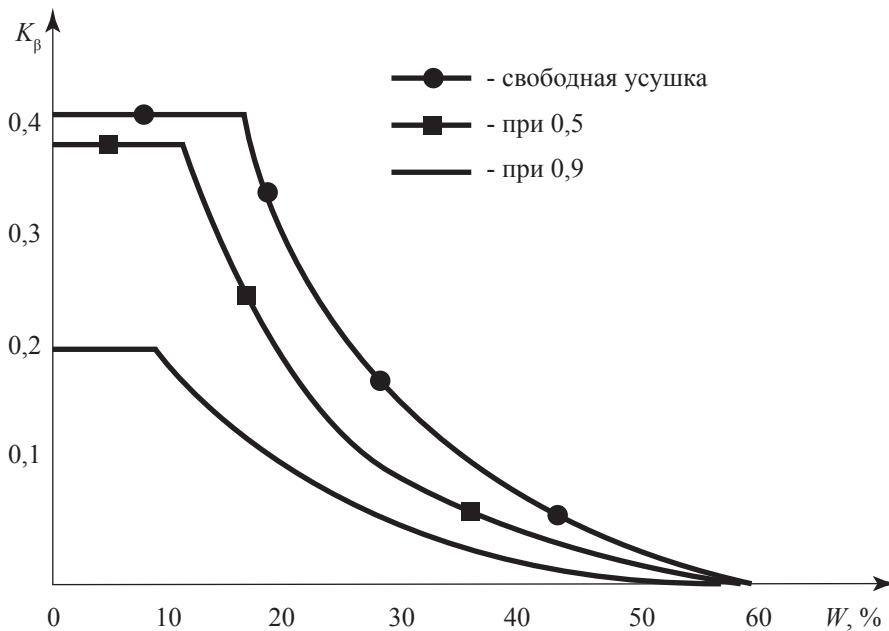


Рис. 5. Изменение коэффициентов усушки в зависимости от растягивающей нагрузки

Fig. 5. Variation of shrinkage factors depending on the tensile stress

отсутствии напряжений. В диапазоне начальной влажности до 15 % зависимость нелинейная. При дальнейшем снижении влажности зависимость приобретает линейный характер. Нагрузки, превышающие половину предела прочности древесины, увеличивают протяженность диапазона нелинейной зависимости.

Как следует из рис. 3, величина замороженной усушки также повышается при снижении влажности. Аналогичные зависимости могут быть использованы при определении коэффициента замороженной усушки.

Зависимость редуцированной усушки от величины нагрузки можно считать линей-

ной. Отношение редуцированной усушки β' к свободной β получило название коэффициента редуцирования K' . Зависимость коэффициента редуцирования от величины относительной растягивающей нагрузки приведена на рис. 4. Как видно из приведенного рисунка, при напряжениях, близких к пределу прочности древесины, величина усушки составляет менее 30 % от свободной.

Эти данные необходимы для уточненного расчета сушильных напряжений, в котором учитывается влияние величины нагрузки и диапазона снижения влажности на величину коэффициента усушки древесины.

При свободной усушке зависимость усушки от влажности древесины включает два характерных диапазона. Начальный, нелинейный, до влажности 15 % и второй, линейный, от влажности 15 % и менее. На первом диапазоне происходит удаление как адсорбционной воды, так и микрокапиллярной. Усушку вызывает снижение количества адсорбционной воды. На втором участке зависимости присутствует только адсорбционная вода, в связи с чем зависимость усушки приобретает линейный характер.

Растягивающая нагрузка придает зависимости усушки от влажности древесины дополнительную нелинейность. Начало линейного участка зависимости смещается в сторону более низкой влажности. При увеличении нагрузки не только снижается значение усушки, но и уменьшается влажность начала линейного диапазона.

Исследование коэффициентов усушки нагруженной древесины создает основу

разработки более точных математических моделей для расчетов напряженного состояния древесины в процессах ее гидротермической обработки.

Библиографический список

1. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины. 4-е издание, перераб. и доп. / П.С. Серговский, А.И. Расев. – М.: Лесная пром-сть, 1987. – 360 с.
2. Уголев, Б.Н. Контроль напряжений при сушке древесины / Б.Н. Уголев, Ю.Г. Лапшин, Е.В. Кротов – М.: Лесная пром-сть, 1980. – 208 с.
3. Галкин, В.П. Исследование влияния температуры на усушку микросрезов древесины / В.П. Галкин // Деревообрабатывающая промышленность. – 2010. – Вып. 1. – С. 9–10.
4. Лоскутов, С.Р. Взаимодействие древесины с физически активными низкомолекулярными веществами / С.Р. Лоскутов. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. – 172 с.
5. Клеточная стенка древесины и ее изменения при химическом воздействии / И.И. Бейнарт и др. – Рига: 1972. – 511 с.
6. Чудинов, Б.С. Вода в древесине / Б.С. Чудинов. – Новосибирск: Наука, 1984. – 270 с.
7. Уголев, Б.Н. Коэффициенты усушки древесины при действии растягивающих нагрузок / Б.Н. Уголев, В.П. Галкин, А.А. Калинина // Технология и оборудование для переработки древесины: сб. науч. тр. – Вып. 358. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2011. – С. 4–9.
8. Ugolev, B. N. Wood as a natural smart material. Wood Science and Technology. Journal of the International Academy of Wood Science, (2014) vol. 48, Number 3, S.553–568. DOI 10.1007/s00226-013-0611-2.
9. Уголев, Б.Н. Многоформный эффект памяти древесины / Б.Н. Уголев, Г.А. Горбачева, С.Ю. Белковский – Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2014. – № 2(101). – С. 62–66.
10. Уголев, Б.Н. Экспериментальное исследование показателей эффекта памяти древесины. / Б.Н. Уголев, Г.А. Горбачева, С.Ю. Белковский // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2014. – № 2(101). – С. 66–69.
11. Уголев, Б.Н. Экспериментальные исследования влияния наноструктурных изменений древесины на ее деформативность / Б.Н. Уголев, В.П. Галкин, Г.А. Горбачева и др. // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2012. – № 7(90). – С. 124–126.

THE INFLUENCE OF TENSILE STRESSES ON THE CHANGE OF WOOD SHRINKAGE

Galkin V.P., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Sanaev V.G., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; **Ugolev B.N.**, Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Kalinina A.A., MSFU⁽¹⁾

rector@mgul.ac.ru, vgalkin@mgul.ac.ru, kalinina@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moskow reg., Russia

At removing the bounded adsorption water, wood shrinkage appears. If wood shrinkage occurs under load the coefficient of shrinkage varies, depending on the magnitude and direction of stresses. At tension shrinkage decreases and at compression it increases.

The effect of tensile load on the magnitude of shrinkage was investigated using experimental plant. Reduction of shrinkage by increasing the tensile stress is described by a linear dependence. At stresses approaching the maximum tensile strength of wood its shrinkage is less than 30 % of free shrinkage. The reduced value of shrinkage under load has been called the reduced shrinkage β' , and the ratio of the reduced shrinkage to free shrinkage β has been named the coefficient of reduction K' .

When the free shrinkage being used, the dependence of shrinkage on the moisture content of the wood includes two characteristic ranges; they are an initial nonlinear region with the moisture content of 15 % and the second one – linear with the MC less than 15 %. Within the first range both adsorption and microcapillary water is removed. Shrinkage results from a decrease in amount of adsorption water. Within the second region of dependency there is only adsorption water; therefore, the dependence of the shrinkage becomes linear.

Tensile load gives an additional nonlinearity to the dependence of the shrinkage on the moisture content. The beginning of the linear interval of the dependence is shifted to lower moisture content levels. When the load increases the value of shrinkage reduces and, moreover, the beginning of the linear range of moisture content also decreases.

The study of the shrinkage coefficient of loaded wood creates the basis for developing more accurate mathematical models to calculate the stress state of wood in the process of hydrothermal treatment.

Keywords: a coefficient of shrinkage, wood moisture content, shrinkage, stress, frozen strain.

References

1. Sergovskiy P.S., Rasev A.I. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny* [Hydrothermal treatment and preservation of wood]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry], 1987. 360 p.
2. Ugolev B.N., Lapshin Yu.G., Krotov E.V. *Kontrol' napryazheniy pri sushke drevesiny* [Stresses control when drying]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Forest Industry], 1980. 208.
3. Galkin V.P. *Issledovanie vliyaniya temperatury na usushku mikrosrezov drevesiny* [Investigation of the influence of temperature on shrinkage mikrosrezov wood]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost']. V. 1, 2010. pp. 9-10.
4. Loskutov S.R. *Vzaimodeystvie drevesiny s fizicheski aktivnymi nizkomolekulyarnymi veshchestvami* [Interaction of wood with physically active low molecular weight substances]. Novosibirsk.: Izdatel'stvo SO RAN [FUE «Publishing House SB RAS»], 2004. 172 p.
5. Beynart I.I. i dr. *Kletochnaya stenka drevesiny i ee izmeneniya pri khimicheskom voz-deystvii* [Cell wall of wood and its changes during chemical exposure]. Riga, 1972. 511 p.
6. Chudinov, B. S. *Voda v drevesine* [Water timber]. Novosibirsk: Nauka, 1984. 270 p.
7. Ugolev B.N., Galkin V.P., Kalinina A.A. *Koeffitsienty usushki drevesiny pri deystvii rastyagivayushchikh nagruzok* [Shrinkage of wood under the action of tensile loads]. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny*. V. 358. Moscow: MGUL, 2011. pp. 4-9.
8. Ugolev B.N. Wood as a natural smart material. *Wood Science and Technology. Journal of the International Academy of Wood Science*, (2014) vol. 48, Number 3, pp. 553–568. DOI 10.1007/s00226-013-0611-2.
9. Ugolev B.N., Gorbacheva G.A., Belkovskiy S.Yu. *Mnogoformovyy effekt pamyati drevesiny* [The multi-shape memory effect of wood]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*. 2014. № 2 (101). pp. 62–66.
10. Ugolev B.N., Gorbacheva G.A., Belkovskiy S.Yu. *Eksperimental'noe issledovanie pokazateley efekta pamyati drevesiny* [Experimental investigation of the wood memory effect quantities]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*. 2014. № 2 (101). pp. 66-69.
11. Ugolev B.N., Galkin V.P., Gorbacheva G.A., Kalinina A.A., Belkovskiy S.Yu. *Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya nanostrukturnykh izmeneniy drevesiny na ee deformativnost'* [Experimental study of the effect of nanostructured wood changes its deformability]. *Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik*. 2012. № 7 (90). pp. 124-126.

УДК 630*812

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ ДРЕВЕСИНЫ БУКА МЕТОДОМ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ

Г.А. ГОРБАЧЕВА, доц., МГУЛ, канд. техн. наук⁽¹⁾,

Б.Н. УГОЛЕВ, проф., МГУЛ, д-р техн. наук⁽¹⁾,

В.Г. САНАЕВ, проф. МГУЛ, д-р техн. наук⁽¹⁾,

С.Ю. БЕЛКОВСКИЙ, асп. МГУЛ⁽¹⁾

gorbacheva@mgul.ac.ru, rector@mgul.ac.ru, belkovskiy@ro.ru

⁽¹⁾ ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

Комплексный биополимер древесины относится к классу функциональных материалов, в частности, к подклассу умных материалов (smart materials). Доминантным признаком умных материалов является эффект памяти формы (ЭПФ). Древесина запоминает две формы – постоянную и временную. Временных форм может быть несколько. Носителями ЭПФ древесины являются квазиостаточные «замороженные» деформации, возникающие под управляющим воздействием нагрузки в процессах сушки и охлаждения древесины и обусловленные временной перестройкой в наноструктуре древесины. Изменения в структуре древесины были исследованы методом термомеханической спектроскопии (ТМС). Получены количественные и молекулярно-релаксационные характеристики древесины образцов строганого шпона из бука при различных проявлениях ЭПФ. Показано, что исходная древесина бука имеет топологически дробную аморфно-кластерную структуру псевдосетчатого строения. При образовании замороженных деформаций происходят изменения в системе межмолекулярных взаимодействий (в первую очередь в сетке водородных связей), наблюдается существенная трансформация топологической структуры древесины, она становится триблочной. В древесине бука появляется высокотемпературный аморфный блок псевдосетчатого строения. При восстановлении начальной формы наблюдается исчезновение замороженных деформаций. При этом происходит полная структурная деградация высокотемпературного блока, восстанавливается исходная дробная структура древесины с некоторыми количественными изменениями молекулярно-релаксационных характеристик. Метод ТМС позволяет определить долю эластически активных цепей, участвующих в формировании замороженных деформаций. Данный метод является одним из способов характеристики эффекта памяти древесины, позволяющих проследить влияние деформационных превращений на характер межмолекулярного взаимодействия и межцепную организацию полимеров древесины.

Ключевые слова: умный материал, характеристика, эффект памяти формы древесины, термомеханическая спектроскопия, трансформация топологической структуры древесины

Комплексный биополимер древесины относится к классу функциональных материалов, в частности, к подклассу умных материалов (smart materials). Доминантным признаком умных материалов является эффект памяти формы (ЭПФ) [8, 15]. Древесина запоминает две формы – постоянную и временную. Временных форм может быть несколько, древесина проявляет многоформовый эффект памяти. Эффект памяти древесины основан на квазиостаточных «замороженных» деформациях. Они были экспериментально обнаружены Б.Н. Уголевым в начале 1960-х при сушке закрепленного образца [7]. Замороженные деформации возникают под управляющим воздействием нагрузки в процессах сушки и охлаждения древесины и обусловлены временной перестройкой в наноструктуре древесины. Для характеристики данного эффекта нами ранее были проведены исследования деформационных превращений, визуа-

лизация и квантификация с использованием показателей для полимеров с эффектом памяти формы [5, 6, 8, 14, 15].

Исследования изменений в структуре древесины для выявления компонентов, ответственных за формирование временной формы, восстановления постоянной формы, образования замороженных деформаций, необходимы для более полной характеристики эффекта памяти. Древесное вещество можно представить как композиционный материал, состоящий из микрофибрилл целлюлозы, внедренных в лигнин-гемицеллюлозную матрицу [9]. Пространственная структура матрицы является суперпозицией трех взаимопроницающих сеток: Н-сетки, образуемой лигнином и углеводами за счет водородных связей и сил физического взаимодействия; ЛУ-сетки, образуемой валентными связями между лигнином и гемицеллюлозами (в основном сложноэфирными связями между

лигнином и полиуронидами); Л-сетки, образуемой трехмерной разветвленной структурой лигнина (включая лабиринтные структуры – механические зацепления сегментов разветвленных макромолекул).

Ранее в наших исследованиях совместно с ИФТТ РАН [3] методом ИК-спектроскопии было показано, что сушка нагруженной древесины березы привела к изменениям, в первую очередь, в аморфных областях целлюлозы, а также в системе водородных связей древесины. A.L. Sisson, A. Lendlein [13] отмечают, что архитектура сеток химических или физических связей формирует основу эффекта памяти формы в полимерах. Сетки ковалентных или физических связей инициируют переключение в полимере при переходе от временной формы к постоянной. В работе [11] для прояснения механизма эффекта памяти были проведены эксперименты по наноиндентированию. Авторы полагают, что гемицеллюлозы отвечают за механизм фиксации формы, а лигнин – восстановления формы. Однако данное предположение носит дискуссионный характер и необходимы дополнительные исследования в данной области.

Метод термомеханической спектроскопии (ТМС), разработанный в институте химической физики РАН, базируется на термомеханическом анализе полимеров и позволяет осуществлять комплексное молекулярно-релаксационное (топологическое) тестирование полимеров любой структуры и строения [1, 12]. Использование данного метода для анализа матрицы древесины, содержащей гемицеллюлозы и лигнин, без применения растворителей и проведения многостадийных операций перевода целлюлозы в растворимое состояние, упрощает анализ. Термомеханические кривые (ТМК) древесины сняты в методическом варианте ТМС при взаимно перпендикулярной ориентации векторов приложения термомеханической нагрузки и оси направления волокон в температурном интервале сканирования от -100 до 300 °С.




Для исследований использовались образцы строганого шпона из древесины бука лесного (*Fagus sylvatica* L.) размерами

$250 \times 15 \times 0,6$ мм (длина×ширина×толщина). Вид образцов, процедура испытаний приведены в табл. 1. Эксперименты проводились в направлении вдоль волокон, чтобы исключить из рассмотрения деформационные превращения, обусловленные замороженной усушкой [2, 4]. Релаксационные параметры, фазовое состояние и молекулярные характеристики фрагментов макромолекул в структуре топологических блоков древесины были определены для комплекта образцов [10].

Исходная древесина бука имеет топологически диблочную аморфно-кластерную структуру псевдосетчатого строения с соотношением блоков $0,76 : 0,24$ (рис. 1). В результате изгиба и последующей сушки образец принимает временную форму, образуются замороженные деформации. При этом происходит существенная трансформация топологической структуры, она становится триблочной. В древесине бука появляется высокотемпературный аморфный блок псевдосетчатого строения $t^* = 19$ °С (средневесовая $M^*_{sw} = 4640$ и среднечисловая $M^*_{sn} = 2790$ молекулярные массы в блоке, коэффициент полидисперсности $K = 1,66$). Весовые доли низко- и высокотемпературного аморфных и кластерных блоков соотносятся как $0,26:0,3:0,4$. В древесине бука в аморфном блоке значительно снижаются молекулярные массы, что может свидетельствовать о разрушении трехмерных сеток, образуемых лигнином и гемицеллюлозами. В кластерном блоке повышается температура начала сегментальной релаксации в кластере, почти в два раза увеличивается молекулярная масса закластеризованных цепей. При этом доля более упорядоченного кластерного блока увеличивается. Переход при 19 °С, установленный методом ТМС для древесины бука, можно объяснить колебаниями освободившихся ОН-групп после разрыва слабых Н-связей в компонентах древесины [10].

При возвращении начальных условий происходит исчезновение замороженных деформаций, постоянная форма восстанавливается. Однако полного восстановления начальной формы не наблюдается из-за возникновения пластических деформаций. При

Характеристика образцов
Characterization of samples

№ образца	1-Бк-140	1-Бк-142	1-Бк-143
Форма Образца	Постоянная форма 	Временная форма 	Восстановленная форма 
Процедура испытаний	Перед испытаниями	Деформирование при определенных условиях Увлажнение при $t = 80^\circ\text{C}$ до $W_n > 100\%$, изгиб, сушка под нагрузкой при $t = 80^\circ\text{C}$ до $W_k \approx 9\%$, разгрузка	Возвращение начальных условий Увлажнение при $t = 80^\circ\text{C}$ до $W_n > 100\%$, изгиб, сушка под нагрузкой при $t = 80^\circ\text{C}$ до $W_k \approx 9\%$, разгрузка, повторное увлажнение при $t = 80^\circ\text{C}$ до $W_n > 100\%$, сушка до влажности $W_k \approx 9\%$,
Деформация образца	$\varepsilon = 0$	$\varepsilon = \varepsilon_s = \varepsilon_f + \varepsilon_p$, где ε_f – замороженная деформация;	$\varepsilon = \varepsilon_p$ ε_p – пластическая деформация

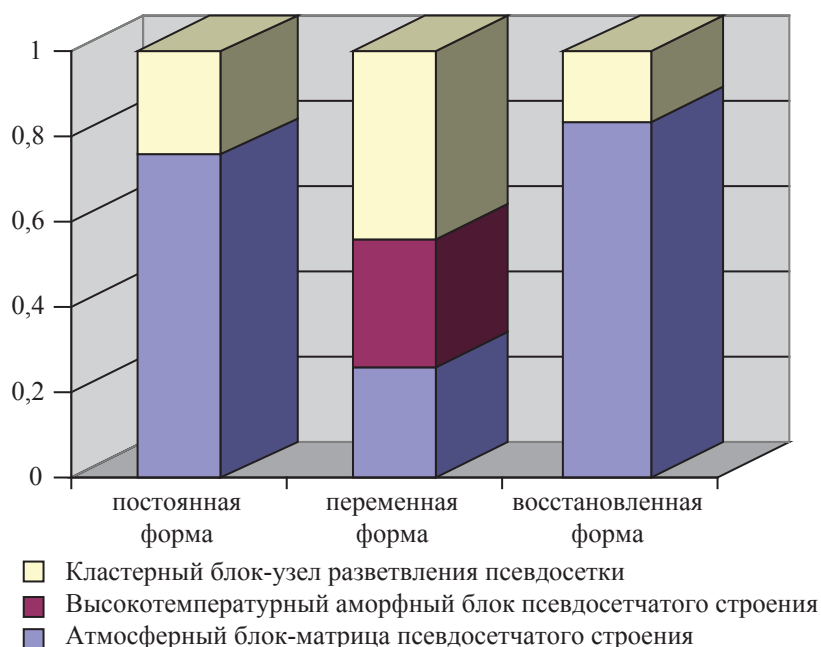


Рисунок. Трансформация топологической структуры древесины бука при проявлении эффекта памяти формы

Figure. The transformation of the typological structure of beech wood with the manifestation of the shape memory effect

этом происходит полная структурная деградация высокотемпературного блока, восстанавливается исходная диблочная структура с некоторыми количественными изменениями молекулярно-релаксационных характеристик. В древесине бука увеличивается доля аморфного блока, снижается геометрический свободный объем V_f . В кластерном блоке отмечается значительное снижение

молекулярной массы закластеризованных фрагментов цепей при увеличении температуры начала сегментальной релаксации в кластере Tcl и температуры начала молекулярного течения Tf .

Таким образом, методом термомеханической спектроскопии получены количественные и молекулярно-релаксационные характеристики древесины при различных

проявлениях эффекта памяти. При образовании и исчезновении замороженных деформаций, являющихся носителями эффекта памяти, происходят изменения в системе межмолекулярных взаимодействий (в первую очередь, в сетке водородных связей) наблюдается существенная трансформация топологической структуры древесины. Метод ТМС позволяет определить долю эластически активных цепей, участвующих в формировании замороженных деформаций. Формирование высокотемпературного аморфного блока псевдосетчатого строения происходит из-за изменений в аморфном блоке – матрице псевдосетчатого строения и кластерного блок-узла разветвления псевдосетки. Данный метод является одним из способов характеристики эффекта памяти древесины, позволяющих проследить влияние деформационных превращений на характер межмолекулярного взаимодействия и межцепную организацию полимеров древесины.

Библиографический список

1. Пат. 1763952 Российская Федерация, МПК G 01 N 21/00. Способ определения молекулярно-массового распределения полимеров / Ольхов Ю.А., Иржак В.И., Батурин С.М.; заявитель и патентообладатель Отд-ние ин-та хим. физики АН СССР. – № 4767397/05 ;заявл. 27.10.89; опубл. 23.09.1992, Бюл. № 35.
2. Санаев, В.Г. Изменение усушки древесины при развитии сушильных напряжений / В.Г. Санаев, Б.Н. Уголев, В.П. Галкин и др. // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2015. – Т. 19. – № 1. – С. 54–58.
3. Уголев, Б.Н. Изменение наноструктуры древесины при влагозадержанных деформациях / Б.Н. Уголев, В.П. Галкин, Г.А. Горбачева и др. // Сб. Научные труды МГУЛ, вып. 338 «Технология и оборудование для переработки древесины». – М.: МГУЛ, 2007. – С. 9–16.
4. Уголев, Б.Н. Исследование влияния уровня нагрузки и влажности на величину замороженной усушки древесины / Б.Н. Уголев, В.П. Галкин, А.А. Калинина // В сборнике: Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса, ФГБОУ ВПО «Костромской государственной технологической университет», 2012. – С. 42.
5. Уголев, Б.Н. Многоформный эффект памяти древесины / Б.Н. Уголев, Г.А. Горбачева, С.Ю. Белковский // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2014. – № 2(101). – С. 62–66.
6. Уголев, Б.Н. Экспериментальное исследование показателей эффекта памяти древесины / Б.Н. Уголев, Г.А. Горбачева, С.Ю. Белковский // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2014. – № 2(101). – С. 66–69.
7. Уголев, Б.Н. Метод исследования реологических свойств древесины при переменной влажности / Б.Н. Уголев // Заводская лаборатория. – 1961. – № 27(2). – С. 199–203.
8. Уголев, Б.Н. Наноструктурные изменения древесины как природного «умного» материала. Нанотехнологии и наноматериалы в лесном комплексе: монография / Б.Н. Уголев. – М.: МГУЛ, 2011. – С. 52–73.
9. Эриньш, П.П. Строение и свойства древесины как многокомпонентной полимерной системы / П.П. Эриньш // Химия древесины. – 1977. – №1. – С. 8–25.
10. Gorbacheva G.A., Olkhov Yu.A., Ugolev B.N., Belkovskiy S.Yu. Research of Molecular-Topological Structure at Shape-Memory Effect of Wood// Proc. of the 57th Int. Convention of SWST «Sustainable Resources and Technology for Forest Products», Zvolen, Slovakia, 2014, pp. 187-195.
11. Jakes J. E., Nayomi N., Zelinka S., Stone D. Water-activated, Shape Memory Twist Effect in Wood Slivers as an Inspiration for Biomimetic Smart Materials// Proc. of Int. Conference on Nanotechnology for Renewable Materials. – Quebec, Canada: 2012.
12. Olkhov Yu.A., Jurkowski B. On the more informative version of thermomechanical analysis at compression mode// Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2005. – V. 81. – № 3. – pp. 489 – 500.
13. Sisson A.L., Lendlein A. Advances in actively moving polymers. Macromol. Mater. Eng. 2012, 297. – pp. 1135–1137.
14. Ugolev B., Gorbacheva G., Belkovskiy S. Quantification of wood memory effect/ B. Ugolev// Proc. 2012 IAWs «Wood the Best Material for Mankind» and the 5th International Symposium on the «Interaction of Wood with Various Forms of Energy». – Zvolen, Slovakia: 2012. – pp. 31–37.
15. Ugolev B. N. Wood as a natural smart material. Wood Science and Technology. Journal of the International Academy of Wood Science, (2014) vol. 48, Number 3, pp.553–568. DOI 10.1007/s00226-013-0611-2.

CHARACTERIZATION OF THE SHAPE MEMORY EFFECT OF BEECH WOOD BY THE METHOD OF THERMOMECHANICAL SPECTROMETRY

Gorbacheva G.A., Assoc. Prof. MSFU, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾; **Ugolev B.N.**, Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Sanaev V.G., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Belkovskiy S.Yu., MSFU⁽¹⁾

gorbacheva@mgul.ac.ru, rector@mgul.ac.ru, belkovskiy@ro.ru

⁽¹⁾ Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moskow reg., Russia

Wood is a complex of biopolymers, it belongs to the class of functional materials, in particular, subclass of smart materials. The dominant feature of smart materials is a shape memory effect (SME). Wood can remember the two forms: permanent and temporary, the latter can be several. The frozen strains are the carriers of shape memory effect of wood. They are the result of temporary reconstruction of wood nanostructure. It takes place under the controlling load influence while wood stiffness increases at drying or cooling. Some changes in wood structure due to the shape memory effect were detected by the

method of the thermomechanical spectrometry (TMS). Relaxation parameters, phase state and molecular characteristics of the fragments in the structure of macromolecules topological blocks of wood were determined for beech sliced veneer samples at SME. It was shown that the original beech wood has topologically diblock amorphous-cluster structure of the pseudonetwork structure. During the formation of frozen strains some changes in the intermolecular interactions (primarily in the network of hydrogen bonds) take place, the significant transformation of the topological structure of the wood is observed because it becomes triblock. In beech wood a high-temperature amorphous block of pseudonetwork structure is formed. At recovering the permanent shape, the disappearing of the frozen strains is observed. A complete structural degradation of the high-temperature amorphous block of pseudonetwork structure takes place. The initial diblock structure of beech wood with some quantitative changes of molecular relaxation characteristics is restored. The method of TMS allows to determine the ratio of elastic active chains involved in the formation of the frozen strains. TMS is one of methods of characterization of shape memory effect of wood which makes it possible to research the influence of deformative conversions on intermolecular interaction and interchain organization of polymers.

Keywords: a smart material, characterization, the shape memory effect of wood, thermomechanical spectrometry, the transformation of the topological structure of wood.

References

1. Pat. 1763952 Rossiyskaya Federatsiya, MPK G 01 N 21/00. *Sposob opredeleniya molekulyarno-massovogo raspredeleniya polimerov* [Method for determining the molecular weight distribution of polymers] Ol'khov Yu.A., Irzhak V.I., Baturin S.M.; zayavitel' i patentobladatel' Otd-nie in-ta khim. fiziki AN SSSR. № 4767397/05 ; zayavl. 27.10.89 ; opubl. 23.09.1992, № 35.
2. Sanaev V.G., Ugolev B.N., Galkin V.P., Kalinina A.A., Aksenov P.A. *Izmenenie usushki drevesiny pri razviti sushil'nykh napryazheniy* [Change of wood shrinkage at the development of drying stresses]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik. 2015. T. 19. № 1. pp. 54–58.
3. Ugolev B.N., Galkin V.P., Gorbacheva G.A., Aksenov P.A., Bazhenov A.V. *Izmenenie nanostruktury drevesiny privlagozaderzhannykh deformatsiyakh* [Change the nanostructure of wood in moisture delayed deformations] Sb. nauchnyetruy MGUL, V. 338 Tekhnologiya i oborudovanie dlya pererabotki drevesiny [Coll. MSFU Proceedings, vol. 338 Technology and equipment for wood processing]. Moscow: MGUL, 2007. pp. 9-16.
4. Ugolev B.N., Galkin V.P., Kalinina A.A. *Issledovanie vliyaniya urovnya nagruzki i vlazhnosti na velichinu zamorozhennoy usushki drevesiny* [Study of the influence of load level and moisture content on the value of the frozen shrinkage of wood]. Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya lesopromyshlennogo kompleksa, Kostromskoy gosudarstvennyy tekhnologicheskyy universitet [Proc. International scientific and technical conference devoted to the 50th anniversary of mechanical wood technology department of KSTU «Actual problems and development prospects of forest industry complex»]. 2012. 42 p.
5. Ugolev B.N., Gorbacheva G.A., Belkovskiy S.Yu. *Mnogoformovyy effekt pamyati drevesiny* [The multi-shape memory effect of wood]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik. 2014. № 2 (101). pp. 62-66.
6. Ugolev B.N., Gorbacheva G.A., Belkovskiy S.Yu. *Ekspierimental'noe issledovanie pokazateley effekta pamyati drevesiny* [Experimental investigation of the wood memory effect quantities]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik. 2014. № 2 (101). pp. 66-69.
7. Ugolev B.N. *Metod issledovaniya reologicheskikh svoystv drevesiny pri peremennoy vlazhnosti* [Method of investigation of the rheological properties of wood at variable moisture content] Zavodskaya laboratoriya [Factory Laboratory]. Moscow: 1961. 27(2). pp. 199-203.
8. Ugolev B.N. *Nanostrukturnye izmeneniya drevesiny kak prirodnoye «umnogo» materiala* [Nanostructured changes in wood as a natural «smart» material] monograph: Nanotekhnologii i nanomaterialy v lesnomkomplekse [Nanotechnology and nanomaterials in the forest complex – monograph]. Moscow: MGUL, 2011. pp. 52-73.
9. Erin'sh P.P. *Stroenie i svoystva drevesiny kak mnogokomponentnoy polimernoy sistemy* [Structure and properties of wood as a multicomponent polymer system]. Khimiya drevesiny [Wood Chemistry]. Moscow: 1977. №1. pp. 8-25.
10. Gorbacheva G.A., Olkhov Yu.A., Ugolev B.N., Belkovskiy S.Yu. Research of Molecular-Topological Structure at Shape-Memory Effect of Wood. Proc. of the 57-th Int. Convention of SWST «Sustainable Resources and Technology for Forest Products», Zvolen, Slovakia, 2014, pp. 187-195.
11. Jakes J.E., Nayomi N., Zelinka S., Stone D. Water-activated, Shape Memory Twist Effect in Wood Slivers as an Inspiration for Biomimetic Smart Materials. Proc. of Int. Conference on Nanotechnology for Renewable Materials. Quebec, Canada: 2012.
12. Olkhov Yu.A., Jurkowski B. On the more informative version of thermomechanical analysis at compression mode. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2005. V. 81. № 3. pp. 489-500.
13. Sisson A.L., Lendlein A. Advances in actively moving polymers. Macromol. Mater. Eng. 2012, 297. pp. 1135-1137.
14. Ugolev B. Gorbacheva G., Belkovskiy S. Quantification of wood memory effect/ B. Ugolev// Proc. 2012 IAWA «Wood the Best Material for Mankind» and the 5th International Symposium on the «Interaction of Wood with Various Forms of Energy». Zvolen, Slovakia: 2012. pp. 31-37.
15. Ugolev B.N. Wood as a natural smart material. Wood Science and Technology. Journal of the International Academy of Wood Science, (2014). V. 48, Number 3, pp. 553-568. DOI 10.1007/s00226-013-0611-2.

УДК 630*812

ВЛИЯНИЕ ЛЕСОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И СОСТАВА НАСАЖДЕНИЙ НА АНАТОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ И ПЛОТНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ И ЕЛИ

Д.А. ДАНИЛОВ, директор ФБГНУ «Ленинградский НИИСХ «Белогорка»», канд. с.-х. наук⁽¹⁾

stownd200@mail.ru

⁽¹⁾ ФБГНУ «Ленинградский НИИСХ «Белогорка»

188338, Ленинградская область, Гатчинский район, д. Белогорка, ул. Институтская, д.1

Влияние уходов за лесом на плотность древесины может иметь разнонаправленный характер в зависимости от породы и состава древостоя. Макроскопическое строение древесины, т. е. соотношение зон поздней и ранней древесины, может после таких воздействий меняться также в зависимости от вида ухода: интенсивность рубок, разреживающих древостой и меняющих его состав, внесение удобрений, осушительные мелиоративные мероприятия и т.д. Для сосны и ели на анатомическом уровне строения древесины это находит отражение в изменении количества и размера клеток поздней и ранней древесины в годичном приросте за длительный период после лесохозяйственного воздействия. В чистых и смешанных древостоях сосны плотность древесины увеличивается от меньших к большим по диаметру стволам насаждения. Еловые древостои отличаются большей вариабельностью плотности древесины по ступеням толщины древостоя. В разных лесотипологических условиях в зависимости от состава древостоя и преобладания сосны и ели плотность древесины этих пород может значительно варьировать. Зная тенденцию направленности процесса, можно формировать такими воздействиями к возрасту сплошной рубки древесину с повышенной плотностью. В плантационных культурах интенсивного выращивания сосны и ели, с коротким оборотом рубки, влияние густоты и видов воздействий на ювенильной стадии выращивания и при своевременном разреживании позволяет получать древесину с плотностью не ниже средних показателей для района исследования к возрасту 40 лет. Однако на уровне годичного кольца в составе преобладает ранняя древесина как у ели, так и у сосны за весь период выращивания.

Ключевые слова: плотность древесины сосны и ели, состав насаждения, ранняя и поздняя древесина, рубки ухода и внесение удобрений.

В зависимости от условий произрастания, режима ухода формируется определенный тип структуры древесины у сосны и ели. Различия в строении древесины хвойных пород проявляется в границах тех основных признаков, которые у конкретного вида закреплены генетически. При этом в основном меняются размеры элементов и соотношения тканей. Возникшие соотношения тканей и размер элементов нужны дереву для физиологических проявлений в различных условиях внешней среды [1–5]. Однако изменения в структуре древесины могут быть вызваны необеспеченностью пластическими веществами или необходимостью размещения на меньшей площади определенного количества водопроводящих элементов. В различных по породному составу хвойных древостоях проявляются свои коренные отличия, обусловленные наследственностью и стратегиями роста древесных пород. В разных лесорастительных условиях происходит варьирование базисной плотности древесины, что связано с рядом

факторов, несходных по своему характеру. Поэтому представляется необходимым изучение взаимосвязей условий среды, физиологических и анатомических изменений древесины хвойных пород и лесохозяйственных воздействий на них, приводящих к изменению плотности древесины. Проводя лесохозяйственные уходы за составом насаждения и тем самым изменяя структуру древостоя на количественном уровне (распределение деревьев по ступеням толщины), мы получаем также трансформации на качественном уровне, т. е. на уровне физико-механических свойств древесины, в частности ее плотности. В настоящее время получен обширный материал по изменениям базисной плотности древесины сосны и ели в древостоях, пройденных рубками ухода и комплексным уходом (рубки+удобрения) в чистых и смешанных хвойных насаждениях, в различных типах леса, достигших возраста сплошной рубки. В различных типах леса Гатчинского района Ленинградской области были исследованы заложенные опыты с рубками ухода

и комплексным уходом с различными вариантами разреживаний и внесения удобрений и контролем без ухода. Также исследовались 40-летние плантационные культуры сосны и ели. Результаты исследования показали, что на секциях с комплексным уходом происходит увеличение плотности древесины как в чистых, так и в смешанных древостоях, независимо от типа леса. На секциях только с рубками ухода в чистых насаждениях происходит снижение плотности древесины сосны и в брусничном и в черничном типах леса. В смешанных насаждениях с участием сосны динамика уменьшения плотности древесины после рубок ухода зависит от доли участия сосны независимо от типа условий произрастания. С увеличением ее доли в составе происходит снижение базисной плотности древесины, с уменьшением участия сосны в составе ценоза плотность имеет большие показатели. Реакция ели на рубки и внесение удобрений в кисличных и черничных типах леса в чистых древостоях, как и у сосны, приводит к увеличению плотности древесины. В древостоях кисличного типа леса более интенсивные рубки приводят к более значимому увеличению плотности древесины ели по сравнению с секциями без рубки. Однако наблюдается тенденция увеличения плотности древесины с уменьшением доли ели в составе смешанных с лиственными породами насаждениях. Аналогичная ситуация наблюдается в смешанных сосново-еловых насаждениях, где ель после уменьшения ее доли в составе древостоя увеличивает базисную плотность древесины как при рубках ухода, так и при совместном действии удобрений и рубок. Проведенный двухфакторный дисперсионный анализ показал для ели статистически значимую зависимость изменений базисной плотности древесины от типа леса ($F_{\phi} = 4,73 > F_{st} = 2,51$) и состава насаждения ($F_{\phi} = 7,18 > F_{st} = 2,36$). Влияние организованных факторов, в нашем случае типа леса и состава насаждения, для ели на 56 % определяет изменения базисной плотности древесины в результате применяемых видов ухода за лесом. Для сосны дисперсионный анализ не выявил статистически значимой

зависимости от этих факторов в изменениях базисной плотности древесины на опытных объектах. Под воздействием ухода за лесом происходят количественные и качественные трансформации в древесине, ее плотность изменяется, о чем, в первую очередь, можно судить по содержанию ранней и поздней древесины. Характерной особенностью влияния удобрений на строение древесины, по мнению многих исследователей, является изменение соотношения ранней и поздней древесины. При этом отмечается, что если процент поздней древесины не изменяется, то сохраняется и величина плотности [2, 3, 6]. Комплексный уход (рубки+удобрение) в хвойных древостоях увеличивает среднюю ширину годичного кольца с одновременным увеличением показателей плотности древесины [2, 3, 7–10]. Изменения количества клеток ранней и поздней древесины, а также толщины клеточных оболочек служат наглядным примером степени воздействия ухода на древостой. Вариации этих показателей влияют на величину плотности древесины. Количество клеток ранней и поздней древесины в годичном кольце обусловлено биологией и наследственностью древесной породы. У ели количество клеток в годичном приросте больше, чем у сосны, и комплексный уход хоть и увеличивает их количество, но только до определенной величины. Наше исследование показало положительную тенденцию зависимости плотности древесины от количества клеток в зоне поздней древесины. В исследуемых чистых древостоях эта зависимость выражена более ярко, чем в смешанных. В чистых древостоях у сосны поздняя древесина, по-видимому, формируется из более крупных и толстостенных клеток по сравнению с не затронутым уходом древостоем. На секции с рубкой ухода происходит увеличение числа клеток ранней древесины, что приводит к некоторому снижению плотности древесины. В смешанных древостоях при комплексном уходе у сосны формируется слой поздней древесины из более мелких и тонкостенных клеток, соответственно уменьшается базисная плотность древесины и она оказывается ниже, чем в чистом сосно-

вом насаждении. В чистых еловых древостоях нарастание количества клеток поздней древесины после комплексного ухода сопровождается увеличением базисной плотности древесины по отношению к секциям без уходов. В смешанных древостоях плотность древесины ели выше, так как поздняя древесина, по-видимому, формируется из большего числа более мелких толстостенных клеток. Необходимо отметить, что строение древесины конкретной породы в смешанном древостое зависит от доли ее участия в составе насаждения. Изменения, происходящие в анатомическом строении древесины, можно рассматривать как проявление различных стратегий роста сосны и ели, в особенности при их совместном произрастании. Рассчитанные множественные коэффициенты корреляции плотности древесины с шириной годичного кольца и долей поздней древесины, а также с приростом по площади сечения (абсолютной полнотой) показали, что взаимосвязи с этими показателями тесные. В чистых ельниках увеличение доли поздней древесины не происходит в крупных ступенях толщины, в чистых сосняках увеличение доли поздней древесины происходит по все ступеням толщины насаждения.

В сосново-еловых древостоях происходит увеличение доли древесины у сосны и ели практически по всем ступеням толщины древостоя. В дополнительном приросте после комплексного ухода доля поздней древесины в годичном кольце возрастает: в чистых сосновых древостоях на 3–5 %, ельниках – 5–8 %; в смешанных сосново-еловых при доминировании в составе ели у сосны – 3–8 %, у ели – 3 %, при большем участии в составе насаждения сосны у ели 7–14 %, у сосны 1–2 % по сравнению с вариантами без уходов. В варианте только с рубками ухода у сосны прослеживается значимая взаимосвязь с шириной годичного кольца и долей поздней древесины. У ели базисная плотность коррелирует с шириной годичного кольца и долей поздней древесины как только с рубками ухода, так и с внесением удобрений. В сосново-еловых древостоях

у сосны связь базисной плотности древесины с долей поздней древесины и площадью прироста поперечного сечения еще более тесная, чем в чистом сосновом древостое. У ели также прослеживается более тесная взаимосвязь с шириной годичного кольца и долей поздней древесины, чем в чистом ельнике. Базисная плотность древесины у сосны и ели после комплексного ухода в чистых древостоях повышается на статистически значимом уровне к возрасту сплошной рубки. В смешанных хвойных древостоях на объектах этот показатель зависит от доли участия в составе сосны и ели. При преобладании в составе ели плотность обеих пород несколько снижается. После комплексного ухода происходит формирование базисной плотности древесины в результате изменений, происходящих на уровне анатомии древесины. Ель как в чистых, так и в смешанных хвойных древостоях увеличивает базисную плотность за счет количественного наращивания клеток поздней древесины в годичном приросте. Сосна увеличивает базисную плотность за счет увеличения толщины оболочек и размеров клеток поздней древесины в годичном приросте. На происходящие изменения в анатомическом строении древесины после комплексного ухода в сосново-еловом древостое влияет состав древостоя – доминирование сосны или ели в нем. Показатель варьирования плотности древесины в хвойных древостоях дает представление о степени воздействия уходов на ценоз. В зависимости от породы и состава варьирование плотности в древостоях имеет различные величины [2, 8, 9]. Большая вариабельность плотности по ступеням толщины в чистом сосняке на объекте комплексного ухода ($CV = 11 \div 13 \%$) отличает его от смешанного древостоя ($CV = 2 \div 6 \%$). Это также может служить показателем более сглаженных для сосны конкурентных взаимоотношений на уровне древостоя после комплексного ухода. Для ели вариабельность плотности по ступеням толщины в большей мере проявляется в смешанном древостое ($CV = 5 \div 12 \%$), чем в чистом ($CV = 3 \div 5 \%$).

В исследуемых плантационных культурах (опытный объект СпбНИИЛХа) интенсивное выращивание сосны и ели (1–2 тыс. шт./га) с коротким оборотом рубки позволяет получать древесину с плотностью не ниже средних показателей (ель 380 кг/м³, сосна 409 кг/м³) для района исследования к возрасту 40 лет. Однако на уровне строения годичного кольца древесины в его составе преобладает ранняя древесина как у ели, так и у сосны за весь период выращивания [4]. Исследование зон ранней и поздней древесины на опытных объектах выявило различие в изменениях этих показателей для сосны и ели. Наблюдается тенденция увеличения доли поздней древесины с возрастом в годичном приросте у ели на 5–7 %, у сосны 3–5 %. Средняя ширина годичного слоя для ели составила 2,24 мм, для сосны 1,57–1,93 мм. Коэффициент варьирования доли поздней древесины у ели 44–52 %, доли ранней древесины 20–75 %. У сосны размах коэффициента варьирования доли поздней древесины 28–69 %, ранней древесины 51–63 %. Коэффициенты корреляции базисной плотности древесины показывают для ели обратную значимую связь с показателем ранней древесины ($R = -0,53$) и слабую ($R = 0,25$) с поздней древесиной. С показателем средней ширины годичного слоя также значимую обратную зависимость ($R = -0,52$). Для сосны корреляция базисной плотности древесины с показателями ранней и поздней древесины ($R = -0,59; -0,43$) обратная значимая, как и со средней шириной годичного слоя ($R = -0,55$). По-видимому, на данном этапе роста этих пород количество ранней древесины определяет в большей мере базисную плотность древесины, чем доля поздней древесины. Средняя базисная плотность древесины для культур ели – 417 кг/м³, размах плотности по модельным деревьям 392–457 кг/м³. Для сосновых культур средняя базисная плотность древесины 429 кг/м³, размах варьирования плотности по модельным деревьям 395–488 кг/м³ [4]. Резюмируя результаты исследований, можно отметить, что в разных лесорастительных условиях происходит варьирование базисной плотности древесины,

что связано с рядом факторов, несходных по своему характеру. В различных по породному составу хвойных древостоях проявляются свои коренные отличия, обусловленные наследственностью и стратегиями роста древесных пород в изменении плотности древесины на анатомическом уровне строения годичных колец прироста в зависимости от видов ухода за лесом. Зная направленность процессов изменения плотности древесины сосны и ели от различных видов лесохозяйственных воздействий, можно их регулировать в зависимости от состава древостоя.

Библиографический список

1. Антонов, А.М. О взаимосвязи влияния топографии анатомических элементов на показатели плотности и прочности древесины / А.М. Антонов, Д.Ю. Коновалов, Д.Е. Чалых и др. // Известия Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии. – 2010. – № 190. – С. 25–34.
2. Данилов, Д.А., Скупченко В.Б. Изменения в строении древесины сосны и ели на анатомическом уровне в древостоях, пройденных рубками ухода, и комплексным уходом / Д.А. Данилов, В.Б. Скупченко // ИВУЗ «Лесной журнал». – 2014. – № 5. – С. 70–88.
3. Данилов, Д.А. Влияние комплексного ухода за лесом на плотность древесины в хвойных древостоях / Д.А. Данилов, В.П. Царенко, В.Б. Скупченко // Известия СПб-ГАУ. – 2013. – №30. – С. 48–53.
4. Данилов, Д.А., Степаненко С.М. Строение и плотность древесины ели и сосны в плантационных культурах Ленинградской области / Д.А. Данилов, С.М. Степаненко // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2013. – № 204. – С. 35–45.
5. Корчагов, С.А. Повышение качественной продуктивности насаждений на лесоводственной основе: автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук / С.А. Корчагов. – Архангельск, 2010. – 42 с.
6. Полуобяринов, О.И. Плотность древесины / О.И. Полуобяринов. – М.: Лесная пром-сть, 1976. – 259 с.
7. Смирнов, А.А. Влияние комплексного ухода на форму ствола и плотность древесины / А.А. Смирнов // Строение, свойства и качество древесины-2004. Труды IV Международного симпозиума I том. – СПб.: ЛТА, 2004. – С. 131–133.
8. Степаненко, И.И. Лесоводственные основы целевого выращивания сосновых насаждений в подзоне южной тайги европейской части России: автореф. дисс. ... д-ра с.-х. наук / И.И. Степаненко. – Архангельск: АГТУ, 2009. – 44 с.
9. Tuula Jyske The effects of thinning and fertilisation on wood and tracheid properties of Norway spruce (*Picea abies*) – the results of long-term experiments / Tuula Jyske // Department of Forest Resource Management, Faculty of Agriculture and Forestry University of Helsinki, Academic dissertation 2008. – 59 p.
10. Nutrition of trees. Lectures given at the 1989 Marcus Wallenberg Symposium in Falun, Sweden, on September 14, 1989. – 85p

THE EFFECT OF SILVICULTURAL INFLUENCES AND FOREST STAND STRUCTURE ON ANATOMIC INDICATORS AND DENSITY OF PINE AND SPRUCE WOOD

Danilov D.A., Leningrad Scientific Research Institute of Agriculture «Belogorka», Ph.D. (Agriculture)⁽¹⁾

stow200@mail.ru

⁽¹⁾ Leningrad Scientific Research Institute of Agriculture «Belogorka», 188338, Leningrad region, Gatchina district, vill. Belogorka, Institutskaya b.1 Russia

The impact of stand care on the wood density can be different depending on the breed and stand composition. The macroscopic structure of wood, i.e., the ratio of the areas of late and early wood may vary after such impacts, depending on the type of stand care: the intensity of logging a stand and changing its composition, fertilizing, drainage reclamation activities, etc. For pine and spruce on the anatomical level of the wood structure it results in the change of the number and size of both late and early wood cells in the annual growth over a long period after certain forest impacts. In pure and mixed stands of pine the wood density increases from the smallest values to the largest ones depending on the trunk diameter within plantations. Spruce stands show more variability of wood density depending on the thickness of the stand. In different forest typology conditions depending on the composition of the forest stand and the predominance of either pine or spruce the wood density of these species can vary greatly. If one knows the tendency of the process orientation it is possible to form commercial wood with high density by using such impacts up to the age of clear cutting. In plantation crops of intensive cultivation of pine and spruce with a short turnover both the stand density and species composition impacts on juvenile stages of a stand cultivation with timely applied thinning allows to get the wood with a density of not lower than the average one for the area under study by the age of 40 years. However, at the annual ring level the early wood prevails in both spruce and pine wood during the entire period of cultivation.

Keywords: pine and spruce wood density, the plantation composition, early and late wood, thinning and fertilization application.

References

1. Antonov A.M., Kononov D.Yu., Chalykh D.E., Korchagov S.A. *O vzaimosvyazi vliyaniya topografii anatomicheskikh elementov na pokazateli plotnosti i prochnosti drevesiny* [On the relationship of the influence of the topography of the anatomical elements on the indices of density and strength of wood] S-Pb: Izvestiya Sankt-Peterburgskoy Gosudarstvennoy Lesotekhnicheskoy Akademii [S-Pb. Izvestia Saint-Petersburg State Forest Technical Academy] №190. 2010 – S.25-34.
2. Danilov D.A., Skupchenko V.B. *Izmeneniya v stroenii drevesiny sosny i eli na anatomicheskom urovne v drevostoyakh proydennykh rubkami ukhoda i kompleksnym ukhodom* [Changes in the structure of pine and spruce at the anatomic level in the stands passed by the thinning operations and comprehensive care]. Arkhangel'sk: SAFU im. Lomonosova, IVUZ Lesnoy zhurnal [Forest journal], 2014, № 5. pp.70-88.
3. Danilov D.A., Tsarenko V.P., Skupchenko V.B. *Vliyanie kompleksnogo ukhoda za lesom na plotnost' drevesiny v khvoynykh drevostoyakh* [Effect of integrated care for wood on wood density in coniferous stands]. *Izvestiya SPBGU* [Izvestia of Saint-Petersburg State Agriculture University] №30. 2013. pp. 48-53.
4. Danilov D.A., Stepanenko S.M. *Stroenie i plotnost' drevesiny eli i sosny v plantatsionnykh kul'turakh Leningradskoy oblasti* [Structure and density of wood of spruce and pine in forest plantation of the Leningrad region] *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii*. № 204. 2013. pp. 35-45.
5. Korchagov S.A. *Povyshenie kachestvennoy produktivnosti nasazhdeniy na lesovodstvennoy osnove: diss. ... kand. s.-kh. nauk* [Improving quality and productivity of plantation forestry on the basis of: author. Diss. ...candidate. of agricultural Sciences]. Arkhangel'sk, 2010. 42 p.
6. Poluboyarinov O.I. *Plotnost' drevesiny* [Density of wood]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Timber industry], 1976. 259 p.
7. Smirnov A.A. *Vliyanie kompleksnogo ukhoda na formu stvola i plotnost' drevesiny* [Effect of comprehensive care on the shape of the trunk and density of wood]. *Stroenie, svoystva i kachestvo drevesiny-2004. Trudy IV Mezhdunarodnogo simpoziuma I tom* [Proceedings of the IV International Symposium volume I]. Sankt-Peterburg: LTA, 2004. pp. 131-133.
8. Stepanenko I.I. *Lesovodstvennye osnovy tselevogo vyrashchivaniya sosnovykh nasazhdeniy v podzone yuzhnoy taygi evropeyskoy chasti Rossii: diss. ...d-ra s.-kh. nauk* [Silvicultural basics of growing target pine stands in subzone of southern taiga in the European part of Russia: Diss. ...d-r s.-agricultural science.]. Arkhangel'sk, 2009. AGTU. 44 p.
9. Tuula Jyske The effects of thinning and fertilisation on wood and tracheid properties of Norway spruce (*Picea abies*) – the results of long-term experiments Tuula Jyske Department of Forest Resource Management, Faculty of Agriculture and Forestry University of Helsinki, Academic dissertation 2008. 59 p.
10. Nutrition of trees. Lectures given at the 1989 Marcus Wallenberg Symposium in Falun, Sweden, on September 14, 1989. 85 p.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ СТВОЛА РАСТУЩЕЙ БЕРЕЗЫ ПО ВЫСОТЕ

А.А. КОТОВ, проф., МГУЛ, д-р техн. наук⁽¹⁾,
Г.А. ИВАНОВ, доц., МГУЛ, канд. техн. наук⁽¹⁾

kotov@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д.1

Целью работы является установление изменения модуля упругости по высоте ствола дерева при статическом изгибе. Изменение модуля упругости растущего дерева по его высоте практически не исследовалось. Авторы предприняли попытку выполнить это тремя способами: на растущей березе, на свежеспиленном цельном стволе и на свежеспиленном и разрезанном на части стволе. Для геометрического описания профиля ствола использована аппроксимирующая формула. Смоделированы стволы березы с помощью выполненных их замеров. Разработаны и описаны методики выполнения замеров ствола и определения его прогиба тремя способами. Величина модуля упругости в первом случае искажается за счет влияния деформации корневой системы дерева. Но этот способ является самым простым и не требует спиливания растения. При втором способе свежеспиленный ствол укладывался на две опоры. Между ними к нему прикладывалась статическая нагрузка и замерялся прогиб. Расстояние между опорами дискретно изменялось от минимального до максимального значений. Модуль упругости вычислялся по формуле, полученной на основе интегрирования дифференциального уравнения упругой линии оси ствола. При третьем способе для вычисления модулей упругости отрезков стволов берез они разрезались на части длиной соответственно по 20 и 25 см. Затем эксперимент выполнялся аналогично второму способу при постоянной длине пролета балки. Результаты опытов позволяют отметить следующее: во-первых, с увеличением длины отрезка ствола модуль упругости возрастает; во-вторых, его увеличение носит нелинейный характер; в-третьих, темп нарастания уменьшается с увеличением длины испытываемого отрезка.

Ключевые слова: береза, статический изгиб, модуль упругости, ствол, корневая система, прогиб.

Целью работы является установление изменения модуля упругости по высоте ствола дерева при статическом изгибе.

Это связано с тем, что в справочниках, например, [1] приводятся величины модуля упругости древесины, полученные на стандартных образцах, вырезаемых из ствола. Кроме того, он может быть получен путем замеров плотности древесины при 15 % влажности с последующим ее пересчетом по линейным зависимостям [2]. В любом случае эти величины задаются для той или иной породы.

Рассмотрим ствол дерева в лесу и используем для геометрического описания его профиля, при совмещении начала координат с корневой шейкой, аппроксимирующую формулу [3]

$$r = a(H - x)^\mu, \quad (1)$$

где r – ордината образующей профиля ствола (радиус сечения с координатой x), м;

a – постоянный коэффициент для данного ствола, м^{1- μ} ;

μ – показатель степени, как правило, дробная величина;

H – высота ствола, м;

x – абсцисса сечения, м.

Осевой момент инерции сечения ствола дерева, расположенного на расстоянии x от начала координат (корневой шейки), будет равен

$$I(x) = (\pi / 4)a^4(H - x)^\mu. \quad (2)$$

Смоделируем ствол березы высотой $H = 4,59$ м с помощью замеров, представленных в табл. 1. Для данного ствола на основании формулы (1) получим коэффициент $a = 4,546 \times 10^{-3}$, м^{1- μ} и показатель степени $\mu = 0,665$, при которых ствол будет иметь профиль как на рис. 1.

Начало координат совмещено с геометрическим центром сечения на уровне шейки ствола дерева. Ось x направлена по оси ствола, ось y – перпендикулярно оси x . Постоянный коэффициент a и показатель степени μ определяются с помощью зависимостей [3], но с заменой параметра высоты груди $h = 1,3$ на $h = 0,5$ м.

Высоты замерялись рулеткой с точностью до 1 см; диаметры на соответствующем

Результаты замеров березы высотой $H = 4,59$ м
Measurement results of birch as high as $H = 4,59$ m

Высота замера, h , см	0	25	50	75	100	125	150
Диаметр ствола, d , мм	33,3	24,1	23,2	22,6	21,3	20,4	19,2

Опытные данные для березы высотой $H = 4,59$ м
Experimental data for birch as high as $H = 4,59$ m

Длина пролета балки, h , см	0	23,5	48,5	73,5	98,5	123,5	148,5
Координата приложения нагрузки, b , см	–	11,75	25,0	25,0	50,0	50,0	75,0
Изгибающая нагрузка, P , Н	–	58,86	58,86	39,24	39,24	19,62	19,62
Значение прогибов, Δu , мм	–	0,45	3,36	3,49	7,81	7,71	12,36

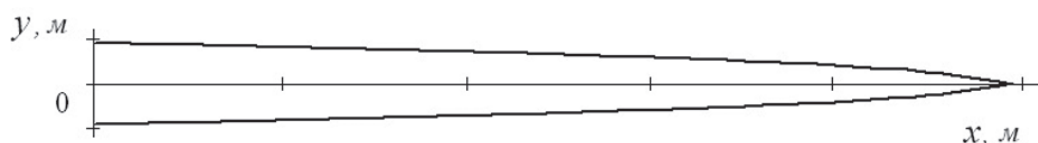


Рис. 1. Модель ствола березы высотой $H = 4,59$ м
Fig. 1. Model of a birch trunk as high as $H = 4,59$ m

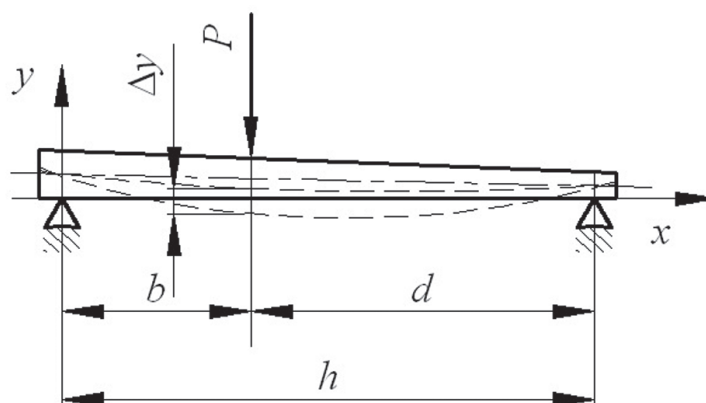


Рис. 2. Схема замеров прогиба отрезков ствола
Fig. 2. The scheme of the deflection measurements of trunk segments

ющих высотах в двух взаимно перпендикулярных плоскостях – штангенциркулем ШТЦ-1 с точностью до 0,1 мм. В качестве расчетной принималась средняя величина. Усилия замерялись динамометром Токаря Н.Г. (тип ДОР 01) с точностью 0,01 Н [4–7].

Модуль упругости определялся тремя способами: на растущей березе, на свежеспиленном цельном стволе и на свежеспиленном разрезанном на части ствола.

Величина модуля упругости в первом случае искажается за счет того, что здесь так-

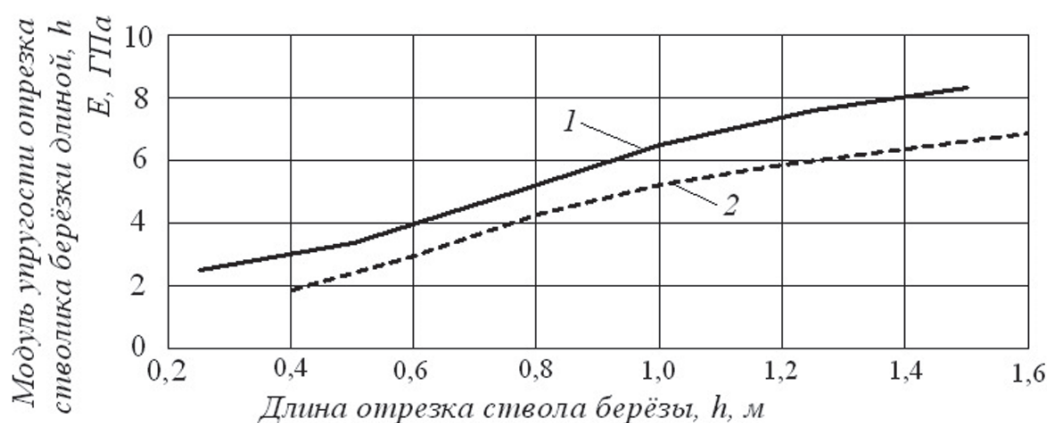
же присутствует деформация корневой системы дерева [8, 9].

Поэтому для определения модуля упругости отрезков высотой h_i дерево срезалось на уровне шейки и затем по схеме рис. 2 замерялся прогиб Δu_i , равный разности значений прогиба при верхнем и нижнем пределах нагружения под действием нагрузки P_i , равной также разности между верхним и нижним пределами нагружения. Опытные данные для березы высотой $H = 4,59$ м, полученные по схеме рис. 2, представлены в табл. 2. Модуль упругости

Результаты замеров для березы высотой $H = 4,59$ м

Measurement results for a birch as high as $H = 4,59$ m

Высота вырезаемого отрезка, Δh , см	0...25	25...50	50...75	75...100	100...125	125...150
Длина пролета балки, h , см	23,5	25	25	25	25	25
Координата приложения нагрузки, b , мм	11,75	12,5	12,5	13,33	12,5	12,5
Изгибающая нагрузка, P, H	58,86	58,86	58,86	58,86	58,86	58,86
Значение прогибов, Δu , мм	0,45	0,69	0,6	0,58	0,79	0,61



- 1 - Ствол березы высотой $H = 4,59$ м, диаметром шейки $d_0 = 33,3$ и диаметром на середине ствола $d_{1/2} = 15,8$ мм
- 2 - Ствол березы высотой $H = 3,92$ м, диаметром шейки $d_0 = 25,4$ и диаметром на середине ствола $d_{1/2} = 11,8$ мм

Рис. 3. График изменения модуля упругости ствола по высоте
Fig. 3. The diagram of the elastic modulus change of a trunk along its height

вычислялся по формуле (3), полученной на основе интегрирования дифференциального уравнения упругой линии оси ствола с учетом выражения (2). Результаты расчетов для берез высотой $H = 4,59$ и $H = 3,92$ м представлены на рис. 3.

$$E(h) = \frac{1}{-\Delta u \pi a^4} \times \left[\frac{-2(2H - 4\mu b + b)Pd \times (H - b)^{2-4\mu}}{h(4\mu - 3)(2\mu - 1)(4\mu - 1)} + Cb + D \right], \quad (3)$$

где C и D – константы интегрирования:

$$C = (m \cdot h - f - q - b \cdot m - z)/h; D = f.$$

Здесь

$$m = \frac{2P(H - b)^{2-4\mu}}{(2\mu - 1)(4\mu - 1)};$$

$$f = \frac{4PdH^{3-4\mu}}{h(2\mu - 1)(4\mu - 1)(4\mu - 3)};$$

$$q = \frac{4P(H - b)^{3-4\mu}}{(2\mu - 1)(4\mu - 1)(4\mu - 3)};$$

$$z = \{ (1 - 4\mu)h^2 + [4h\mu - d - 3b + 2H] \} \times \frac{2P(H - h)^{2-4\mu}}{h(2\mu - 1)(4\mu - 1)(4\mu - 3)}$$

График изменения модуля упругости ствола дерева по высоте позволяет отметить следующее (рис. 3). Во-первых, с увеличением длины отрезка модуль упругости возрастает. Во-вторых, его увеличение носит нелинейный характер. Темп нарастания уменьшается с увеличением длины h испытуемого отрезка.

Для вычисления модулей упругости отрезков стволов берез высотой $H = 4,59$ м и $H = 3,92$ м они разрезались на части длиной 25 и 20 см. Затем по схеме рис. 2 проводились замеры, представленные для первой березы в табл. 3.

Какой бы малой длины не был отрезок ствола, его диаметры в различных сечениях различаются. Следовательно, моменты инерции, вычисляемые по формуле (2), будут различны. Поэтому для вычисления усредненного момента инерции отрезка ствола воспользуемся формулой

$$I_i = \left[\frac{\pi}{4} \int_{h_i}^{h_{i+1}} a^4 (H-x)^4 dx \right] / (h_{i+1} - h_i), \quad (4)$$

где i – порядковый номер отрезка, отсчитываемый от шейки ствола.

Для вычисления модуля упругости отрезков воспользуемся известной формулой сопротивления материалов, полученной из условия малости работы касательных усилий в сравнении с работой нормальных [10, 11]. В нашем случае с учетом выражения (4) она будет иметь вид

$$E_i = \frac{P_i d_i^2 (h_i - d_i)^2}{3 \Delta y_i I_i h_i}. \quad (5)$$

По формуле (5) и данным табл. 3 проводились вычисления. Результаты расчетов показывают, что изменение модуля упругости отрезков дерева также носит нелинейный характер. Характер кривых аналогичен рис. 3.

Библиографический список

1. Боровиков, А.М. Справочник по древесине: справочник / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев; под ред. Б.Н. Уголева. – М.: Лесн. пром-сть, 1989. – 296 с.
2. Полубояринов, О.И. Плотность древесины / О.И. Полубояринов. – М.: Лесн. пром-сть, 1976. – 160 с.
3. Иванов, Г.А.. Уравнения образующей профиля кроны и дерева в целом / Г.А. Иванов. // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2000. – № 6. – С. 197–201.
4. Котов, А.А. Результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств нежелательной древесной растительности на вырубках // Лесопользование и воспроизводство лесных ресурсов: сб. научн. тр. – Вып. 280. – М.: МГУЛ, 1995. – С. 190–199.
5. Иванов, Г.А. Некоторые результаты исследования упругих свойств нежелательной древесной растительности / Г.А. Иванов, А.А. Котов // Технология и оборудование лесопромышленного производства: сб. научн. тр. – Вып. 356. – М.: МГУЛ, 2011. – С. 99–105.
6. Котов, А.А. Совершенствование технологий и создание средств механизации для химического ухода в лесных питомниках и культурах: монография / А.А. Котов. – М.: МГУЛ, 2008. – 314 с.
7. Иванов, Г.А. Изменение модуля упругости березы по высоте / Г.А. Иванов, А.А. Котов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы международной научно-технической конференции, 8–10 декабря 2009 г. – Вологда, ВоГТУ, 2010. – С. 152–155.
8. Иванов, Г.А. Коэффициент жесткости корневой системы дерева при статическом изгибе / Г.А. Иванов, А.А. Котов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2011. – № 3. – С. 98–102.
9. Иванов, Г.А. Приближенный способ определения модуля упругости древесных стволиков при изгибе / Г.А. Иванов, А.А. Котов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы международной научно-технической конференции, 8–10 декабря 2009 г. – Вологда, ВоГТУ, 2010. – С. 155–159.
10. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М.: Наука, 1976. – 608 с.
11. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела: уч. пособие для вузов / Ю.Н. Работнов. – 2-е изд., испр. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1988. – 712 с.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE VARIATION OF ELASTICITY MODULUS OF A GROWING BIRCH TRUNK ALONG ITS HEIGHT

Kotov A.A., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Ivanov G.A., Assoc. Prof. MSFU, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾

kotov@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moskow reg., Russia

The aim of this work is to establish the variation of the elasticity modulus of elasticity along the height of a tree trunk in static bending. The change in the elasticity modulus of a growing tree along its height has not virtually been studied. The authors have attempted to do this in three ways: along a growing birch, along a freshly felled trunk and along a freshly felled trunk cut into pieces. To make a geometric description of a trunk profile the approximation formula has been used. Using the measurements of birch trunks their models have been developed. In addition, the authors have developed and described some methods of measuring a tree trunk and those of quantitative determination of its deflection, produced in three ways. The value of the elasticity modulus, in the first case, is distorted due to the influence of the tree root system deformation. But this method is the simplest one and it does not require cutting a tree. In the second method a freshly felled trunk was placed on two supports. Some static load was applied to it between them and its deflection was measured. The distance between the supports was

discretely changed from the minimum value to the maximum one. The elasticity modulus was calculated by the formula derived by integrating the differential equation of an elastic line of a trunk axis. In the third method, to calculate the elasticity modulus of some birch trunk segments the trunks were cut into pieces by a length of respectively 20 and 25 cm. Then the experiment was carried out similarly to the second method with a constant span length of the beam. The results of the experiments allow us to note the following: first, with the increasing length of a chump, the elasticity modulus increases; secondly, its increase is non-linear in nature; thirdly, the rate of the above increase decreases with increasing a tested chump length.

Keywords: a birch, a static bend, the elasticity module, a trunk, a root system, a deflection.

References

1. Borovikov A.M., Ugolev B.N. *Spravochnik po drevesine* [Handbook on wood]. Moscow, Lesn. prom-st' Publ., 1989. 296 p.
2. Poluboyarinov O.I. *Plotnost' drevesiny* [The density of the wood]. Moscow, Lesn. prom-st' Publ., 1976. 160 p.
3. Ivanov G.A. *Upravneniya obrazuyushchey profilya krony i dereva v tselom* [The equations of the generatrix of the profile of the crown and the tree as a whole]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik. 2000, no. 6, pp. 197-201.
4. Kotov A.A. *Rezultaty eksperimental'nykh issledovaniy fiziko-mekhanicheskikh svoystv nezhelatel'noy drevesnoy rastitel'nosti na vyrubkakh* [The results of experimental researches of physical and mechanical properties of undesirable woody vegetation clearings]. *Lesopol'zovanie i vosproizvodstvo lesnykh resursov. sb. nauchn. tr.* [Forest use and reproduction of forest resources: Collected papers]. Moscow: MGUL, 1995, vol. 280, pp. 190-199.
5. Ivanov G.A., Kotov A.A. *Nekotorye rezultaty issledovaniya uprugikh svoystv nezhelatel'-noy drevesnoy rastitel'nosti* [Some results of study of the elastic properties of unwanted woody vegetation]. *Tekhnologiya i oborudovanie lesopromyshlennogo proizvodstva. sb. nauchn. tr.* [Technology and equipment of timber industry production: Collected papers]. Moscow: MGUL, 2011, vol. 356, pp. 99-105.
6. Kotov A.A. *Sovershenstvovanie tekhnologiy i sozdanie sredstv mehanizatsii dlya himicheskogo uhoda v lesnykh pitomnikah i kul'turah* [Perfection of technologies and creation of means of mechanization for chemical care in forest farm and cultures]. Moscow, MGUL, 2008. 314 p.
7. Ivanov G.A., Kotov A.A. *Izmenenie modulya uprugosti berezy po vysote* [Change of the module of elasticity of a birch on height] *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy mezhduna-rodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, 8-10 dekabrya 2009 g.* [Actual problems of development of a forest complex: materials of the international scientific and technical conference, on December, 8-10, 2009.]. Vologda, VoGTU, 2010, pp. 152-155.
8. Ivanov, G.A., Kotov, A.A. *Koeffitsient zhestkosti kornevoy sistemy dereva pri staticheskom izgibe* [Stiffness coefficient of root system of a tree at a static bend]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik. 2011, no. 3, pp. 98–102.
9. Ivanov G.A., Kotov A.A. *Priblizhennyi sposob opredeleniya modulya uprugosti drevesnykh stvolikov pri izgibe* [Approximate method of determining the modulus of elasticity of tree trunks when bending]. *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy mezhduna-rodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, 8–10 dekabrya 2009 g.* [Actual problems of development of a forest complex: materials of the international scientific and technical conference, on December, 8-10, 2009.]. Vologda, VoGTU, 2010, pp. 155–159.
10. Belyaev, N.M. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 608 p.
11. Rabotnov Yu.N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of deformable solids]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 712 p.

РОЛЬ ТКАНЕЙ КОРЫ В СОЗДАНИИ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ СТВОЛА *BETULA PENDULA* VAR. *CARELICA*

Н.Н. НИКОЛАЕВА, науч. сотрудник Института леса КарНЦ РАН, канд. биол. наук⁽¹⁾,
В.В. ВОРОБЬЕВ, мл. науч. сотрудник, Института леса КарНЦ РАН⁽¹⁾

nnikol@krc.karelia.ru, vorobiev70@mail.ru

⁽¹⁾ Институт леса Карельского научного центра РАН, г.Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11.

Показано, что формирование рельефа ствола у карельской березы (*Betula pendula* var. *carelica*) ребристой и дискообразной форм происходит преимущественно за счет древесины нормального и свилевого строения соответственно, тогда как у мелкобугорчатой формы – за счет тканей коры. Древесина аномального строения в сочетании с интенсивным развитием тканей коры определяет рельеф поверхности ствола шаровидно утолщенной и бугорчатых форм. Генеративные растения карельской березы по мощности и характеру развития тканей коры могут быть разделены на две большие группы. Первая группа – гладкокорые растения с относительно тонкой корой, кольцевая перидерма которых состоит из слоя феллогена, последовательно откладывающего слои феллемы (бересты) и феллодермы – ребристая, ледяная, мелкобугорчатая формы и бульшая часть безузорчатых особей. Вторая группа – растения с толстой продольно- или ромбовидно-трещиноватой корой, формирующие ритидом, состоящий из множества перидерм с включениями тканей непроводящей флоэмы – шаровидно утолщенная и бугорчатые формы, незначительное количество безузорчатых растений. В случае переходных форм участку ствола с конкретным рельефом поверхности соответствуют морфологические характеристики коры и древесины, свойственные данной форме поверхности ствола.

Ключевые слова: карельская береза, морфоформы, кора, аномальная древесина.

Экологическая форма березы повислой (*Betula pendula* Roth) карельская береза (*B. pendula* var. *carelica*) характеризуется полиморфизмом по жизненным формам [1, 2], габитусу [3], типу поверхности ствола, характеру распределения узорчатой текстуры древесины по стволу, цвету древесины и коры, ветвлению, занимаемым местообитаниям и т.д. В семенном потомстве карельской березы происходит неполное наследование признаков, часть растений формирует обычную прямослойную древесину (безузорчатая карельская береза), характерную для обычной березы повислой и без внешних морфологических проявлений, свойственных узорчатым особям карельской березы [4].

Большинство исследователей, вслед за Saarnio [5] и Евдокимовым [6], выделяют следующие основные морфоформы по рельефу поверхности ствола узорчатых растений карельской березы: мелкобугорчатую, шаровидно утолщенную, ребристую, дискообразную и большое количество переходных форм на основе различных сочетаний основных типов. Цель данного исследования – показать роль тканей коры в формировании конкретного рельефа поверхности ствола у карельской березы.

Исследования проводились на Агробиологической станции (в окрестностях г. Петрозаводск) – посадки 1958, 2006 и 2008 гг.; в культурах карельской березы в окрестностях г. Костомукша – посадка 1990 г.; в генетическом резервате карельской березы «Себежский», созданном на территории Псковской области в 1993 г. (возраст растений 15–90 лет). Выбор данных участков позволил проанализировать изменения морфологии коры у растений карельской березы на прегенеративном, генеративном и постгенеративном этапах, в естественном и искусственных насаждениях. Всего было обследовано 1107 узорчатых растений карельской березы. Среди деревьев карельской березы встречается большой процент растений с неравномерно бугорчатым и крупно-бугорчатым рельефом ствола, которые мы выделили среди переходных форм, так как в обследованных нами насаждениях эти формы составили более 60 %.

Известно, что для растений узорчатой карельской березы характерна толстая кора, которая в 4–6 раз толще, чем у обычной березы повислой [7, 8]. В пределах дерева карельской березы толщина коры напротив участка формирования узорчатой древесины значительно превосходит толщину коры в зоне с безузорчатой древесиной (рис. А–В, Е–F).

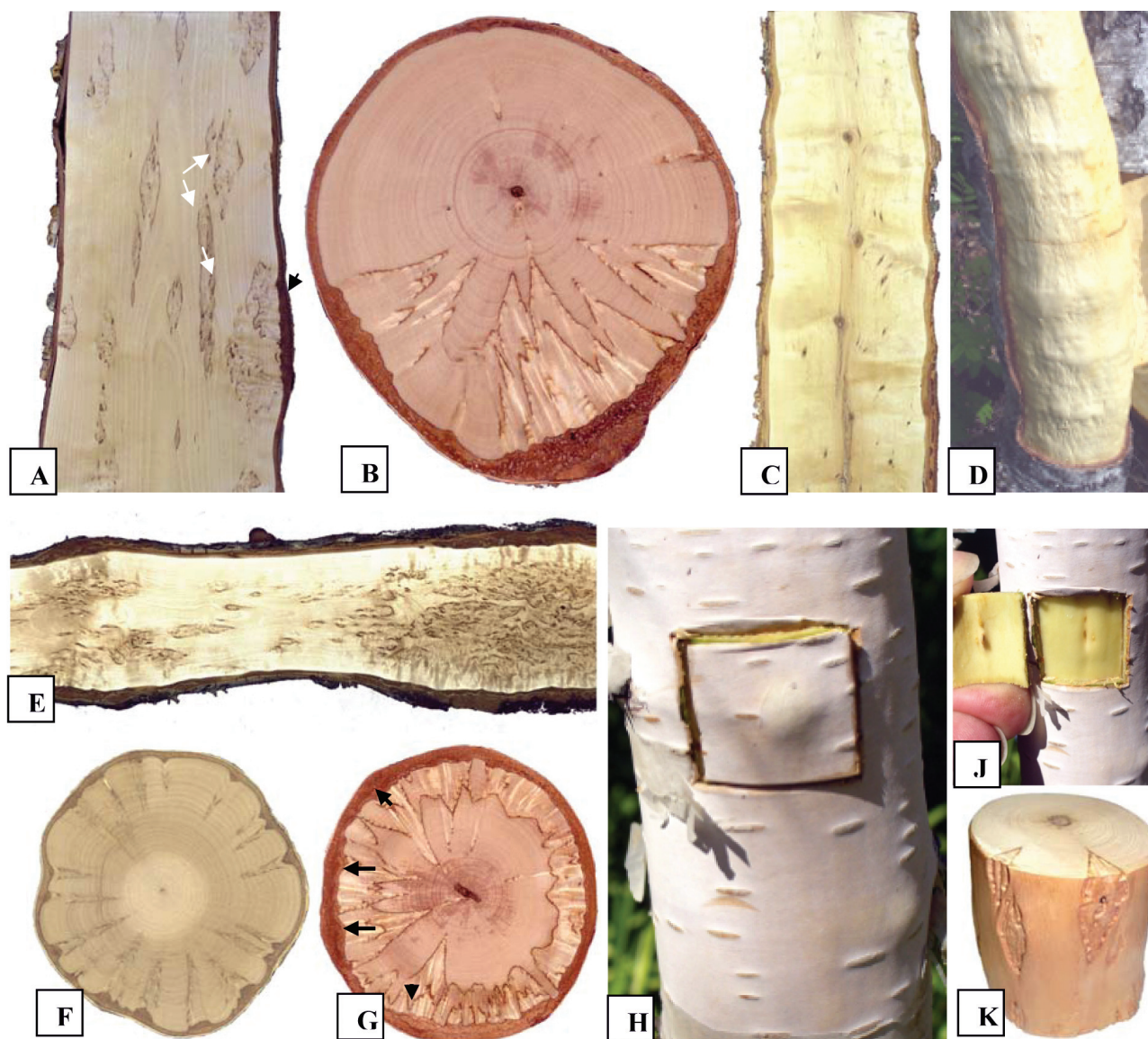


Рисунок. Карельская береза. А – Неравномерно бугорчатая форма. Зона с крупным рисунком и утолщенной корой (черная стрелка) – место формирования крупного утолщения, участки с узорчатой древесиной, сформированной на месте мелких бугорков (белые стрелки). В – Поперечный спил бугорчатой формы. С–D Дискообразная форма, продольный спил (С) и рельеф древесины ствола под снятой корой (D). Е – Шаровидно утолщенная форма, формирование рельефа ствола в основном за счет развития комплекса тканей коры в утолщениях. F–G – Поперечные спилы ребристой (F) и мелкобугорчатой (G) форм. Стрелки показывают зоны развития комплекса тканей флоэмы в мелких бугорках (G). H–K – Начало формирования мелкобугорчатого рельефа ствола, окоренный участок ствола (K)

Figure. Karelian birch. A – Neravnomernobugorchataya form. Area with a large pattern and thickened cortex (black arrow) – the place of formation of large thickening, areas with patterned wood formed in place of small tubercles (white arrows). B – Cross Speel knobby shape. C-D disc-shaped, longitudinal saw cut (C) and relief trunk wood under the bark is removed (D). E – Sharovidnoutolschenaya shape, forming relief barrel mainly due to the development of the complex in a thickened cortex tissue. F-G – Transverse rib saw cut (F) and tubercles (G) forms. The arrows show the complex tissues of the phloem area in small tubercles (G). H-K – Start building tuberculate stem relief debarked trunk portion (K)

Одинаковый рельеф поверхности ствола можно наблюдать у растений карельской березы разных форм роста [9]. Отметим, что ребристый и дискообразный рельеф поверхности ствола отмечен нами лишь у древовидных форм, тогда как утолщения разной степени выраженности (мелко-, неравномерно-, крупнобугорчатые и шаровидно утолщенные) встречаются и у древовидных и кустарниковых форм карельской березы.

Видимый рельеф поверхности ствола у мелкобугорчатой, неравномерно бугорчатой и крупнобугорчатой форм складывается в основном за счет сильного разрастания паренхимы коры (рис. В, G-J). Несомненно, что рельефу поверхности ствола всех бугорчатых форм соответствуют мощно развитые ткани коры и относительно равномерно по периметру развитый древесный цилиндр, сложенный тканями ксилемы аномального строения (узорчатая древесина) в местах формирования бугорчатости (рис. К). Толщина тканей коры коррелирует с размером утолщения: чем крупнее утолщение, тем больше толщина коры в данной зоне.

В отличие от шаровидноутолщенной у ребристой формы явно проступающие ребра на стволе образованы древесиной нормального строения (рис. F). У данных растений с внутренней стороны коры прослеживается формирование вертикально ориентированных выпуклых тяжей и соответствующих им по форме и длине желобков, довольно протяженных, со стороны ксилемы. Как раз в этих локальных углублениях и происходит формирование узорчатой древесины. Обычно ребристая форма карельской березы на поперечном срезе характеризуется невыразительным узором в виде строчек, идущих от центра к периферии, или узор локализован сектором желобка (рис. F). В целом, толщина тканей коры в зоне ребра незначительная – до $0,4 \pm 0,1$ см, тогда как в зоне желобка она может колебаться от 0,5 до 1,5 см. Растрескивание коры у данной формы практически отсутствует даже в очень зрелом возрасте. Возможно, это связано с вертикальной ориентацией тяжей аномальных тканей и их чередованием с вертикальными «ребрами» нормальной древесины.

Слабое развитие тканей комплекса коры, напротив участков с нормальной древесиной, не способствует созданию здесь высокого внутреннего давления, провоцирующего образование трещин. На соседнем участке активная пролиферация тканей коры сопровождается ингибированием роста древесины, что является сдерживающим фактором для увеличения давления, стимулирующего образование трещин на поверхности коры.

Растения следующего типа поверхности ствола составляют самую малочисленную группу – «дискообразная береза» (рис. С–D). Основу узора древесины здесь составляют свилеватость волокнистых элементов, которая обеспечивает перламутровый блеск, и сердцевинные повторения, представляющие собой результат жизнедеятельности личинок *Phytobia* spp. [10]. Процентное содержание растений данной формы в обследованных насаждениях не превысило 1 %. Рельеф ствола у таких деревьев создается за счет чередования «дисков» с относительно большими приростами древесины разной степени свилеватости и «дисков» с меньшими приростами древесины нормального строения. Данная форма характеризуется относительно равномерным развитием комплекса тканей коры в «дисках» и между ними. Диапазон толщины комплекса тканей коры составил 0,5–0,8 см.

Таким образом, рельеф ствола у бугорчатых и шаровидно утолщенной форм карельской березы в основном формируется за счет тканей коры. То же самое, но в меньшей степени наблюдается у ребристой и ледяной форм. Гладкокорые растения ребристой, ледяной, мелкобугорчатой формы и большая часть безузорчатых особей имеют относительно тонкую кору, кольцевая перидерма которых состоит из единственного слоя феллогена, последовательно формирующего слои феллемы (бересты). Шаровидно утолщенная и бугорчатые формы, незначительное количество безузорчатых растений характеризуются толстой продольно- или ромбовидно трещиноватой корой, в которой ритидом состоит из множества перидерм с включениями тканей непроводящей флоэмы. В случае переходных форм участку ствола с конкретным рельефом

поверхности соответствуют морфологические характеристики коры и древесины, свойственные данной форме поверхности ствола.

Библиографический список

1. Соколов, Н.О. Карельская береза / Н.О. Соколов. – Петрозаводск: Госиздат Карело-Финской ССР, 1950. – 114 с.
2. Николаева, Н.Н. Морфологические формы карельской березы / Н.Н. Николаева // Modern Phytomorphology. – 2014. – №6. – С. 161–166.
3. Любавская, А.Я. Карельская береза: монография – 2-е изд. / А.Я. Любавская. – М.: МГУЛ, 2006. – 128 с.
4. Hintikka T.J. Visakoivuista ja niiden anatomista / Helsinki. – 1941. – 346р.
5. Saarnio R. The quality and development of cultivated curly-birch (*Betula verrucosa* f. *carelica* Sok.) stands in southern Finland. // Folia For. – 1976. – 263. – P.1–28. (in Finnish with English summary)
6. Евдокимов, А.П. Эколого-биологические свойства и обоснование методов выращивания карельской березы: дис... канд. биол. наук. / А.П. Евдокимов. – Л., 1978. – 283 с.
7. Ермаков, В.И. Механизмы адаптации березы к условиям Севера. / В.И. Ермаков. – Л.: Наука, 1986. – 144 с.
8. Новицкая, Л.Л. Карельская береза: механизмы роста и развития структурных аномалий / Л.Л. Новицкая. – Петрозаводск: Verso, 2008. – 144 с.
9. Николаева, Н.Н. Морфология коры *Betula pendula* var. *carelica* на прегенеративном этапе / Н.Н. Николаева, В.В. Воробьев // Modern Phytomorphology. – 2014. – №6. – С. 167–174.
10. Nikolaeva N.N., Novitskaya L.L., Kushnir F.V. Peculiarities of parenchyma inclusions in the decorative wood of Karelian birch, burls and gnarls. // Wulfenia. – 2014. – 21. – P.103-110.

ROLE OF THE BARK TISSUES COMPLEX IN FORMATION OF THE TRUNK SURFACE RELIEF IN *BETULA PENDULA* VAR. *CARELICA*

Nikolaeva N.N., Ph.D., Forest Research Institute of KRC (RAS) ⁽¹⁾; Vorobiev V.V., Junior Researcher, Forest Research Institute of KRC (RAS) ⁽¹⁾

nnnikol@krc.karelia.ru, vorobiev70@mail.ru

⁽¹⁾ Forest Research Institute Karelian Research Center, Petrozavodsk, Pushkinskaya St., 11.

Abstract. It is shown that the trunk surface relief of Karelian birch (*Betula pendula* var. *carelica*) in the ribbed and ice birch forms is mainly formed by the xylem with normal and curly texture, whereas in the small-knobbed form it is shaped by bark tissues. The xylem with abnormal texture and well developed complex of bark tissue are responsible for the trunk surface relief in the tubercular (with necks and muffs) and knobbed forms. Middle-aged reproductive plants of Karelian birch can be clustered into two big groups depending on the extent and type of bark development. The first group is smooth-barked plants with a relatively thin bark and a ring periderm with a single phellogen layer that consecutively forms phellem (cork) layers – ribbed, ice birch, small-knobbed, and a majority of non-patterned (straight-grained) plants. The second group is plants with a longitudinally-fissured or rhomb-fissured thick bark which forms the rhytidome made up of multiple periderms with non-conducting phloem inclusions – the tubercular and knobbed forms, and a minor part of non patterned (straight-grained) plants. In transitional forms the trunk section with a specific relief correlates with the bark morphology and wood characteristic of that form of the trunk surface.

Keywords: Karelian birch, morphophorms, bark, abnormal wood.

References

1. Evdokimov A.P. *Ekologo-biologicheskie svoystva i obosnovanie metodov vyrashchivaniya karel'skoy berezy*. dis... kand. biol. nauk [Ecological and biological properties, and justification of methods of cultivation of Karelian birch. Diss.]. Leningrad 1978. 283 p.
2. Ermakov V.I. *Mekhanizmy adaptatsii berezy k usloviyam Severa*. [Mechanisms of birch adaptations to conditions of the North]. Leningrad: Nauka. 1986. 144 p.
3. Lyubavskaya A.Ya. *Karel'skaya bereza: monografiya*. [Karelian birch]. Moscow: MSFU, 2006. 128 p.
4. Nikolaeva N.N. *Morfologicheskie formy karel'skoy berezy* [Morphological forms of Karelian birch] Modern Phytomorphology [Modern Phytomorphology] 2014. №6. pp. 161-166.
5. Nikolaeva N.N., Vorob'ev V.V. *Morfologiya kory Betula pendula var. carelica na pregenerativnom etape* [Morphology of *Betula pendula* var. *carelica* bark at the pre-reproductive stage] Modern Phytomorphology [Modern Phytomorphology] 2014. №6. pp. 167-174.
6. Novitskaya L.L. *Karel'skaya bereza: mekhanizmy rosta i razvitiya strukturnykh anomalii* [Karelian birch: mechanisms of growth and development of structural abnormalities] Ros.akad.nauk, Karel.nauch.tsentr, In-t lesa. [Russian academy of sciences] Petrozavodsk: Verso, 2008. 144 p.
7. Sokolov N.O. *Karel'skaya bereza* [Karelian birch] Petrozavodsk: Gosizdat Karelo-Finskoy SSR, 1950. 114 p.
8. Hintikka T.J. Visakoivuista ja niiden anatomista Helsinki. 1941. 346p.
9. Nikolaeva N.N., Novitskaya L.L., Kushnir F.V. Peculiarities of parenchyma inclusions in the decorative wood of Karelian birch, burls and gnarls. Wulfenia. 2014. 21. pp. 103-110.
10. Saarnio R. The quality and development of cultivated curly-birch (*Betula verrucosa* f. *carelica* Sok.) stands in southern Finland. Folia For. 1976. 263. pp. 1-28. (in Finnish with English summary).

УДК 630*232.42 + 236.2

КАЧЕСТВО ДРЕВЕСИНЫ ПЛАНТАЦИОННЫХ КУЛЬТУР ЕЛИ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ КАРЕЛИИ

А.Н. ПЕККОЕВ, *науч. сотрудник Института леса КарНЦ РАН, канд. с-х. наук⁽¹⁾*,
В.А. ХАРИТОНОВ, *вед. инж. Института леса КарНЦ РАН⁽¹⁾*

pek-aleksei@list.ru, haritonov@krc.karelia.ru

⁽¹⁾ Институт леса Карельского научного центра Российской академии наук
185910, Россия, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11.

На Северо-Западе России, где располагаются крупные лесоперерабатывающие предприятия, запасы спелой хвойной древесины сильно истощены. В сложившихся условиях необходима интенсификация лесокультурного производства, в том числе за счет создания лесных плантаций. В данной статье приводится оценка качества древесины 41-летних плантационных культур ели разной густоты в условиях произрастания ельника черничного свежего. Установлено, что внесение минеральных удобрений и разреживания древостоев способствовали увеличению ширины годичных слоев за период эффективного действия мероприятий в зависимости от густоты культур на 14–49 %. Комплексные уходы наилучшим образом отразились на радиальном приросте культур с первоначальной густотой 3,0 тыс. шт./га. Древесина культур ели имела следующие качественные характеристики: количество годичных слоев в 1 см – 3,4–4,2 шт.; средняя ширина годичного слоя – 2,4–2,9 мм; процент поздней древесины – 21–28 %. С уменьшением первоначальной густоты культур, оставленных без ухода, происходило увеличение ширины годичных слоев и процента поздней древесины. После внесения минеральных удобрений и проведения разреживаний отмечено уменьшение плотности древесины ели на 1–10 % в течение 4–7 лет после каждого приема ухода. Плотность древесины за весь период выращивания в вариантах с одинаковой первоначальной густотой не имела существенных отличий и вне зависимости от проведенных мероприятий достигала высоких значений (365–379 кг/м³). По данному показателю древесина культур ели соответствовала средним значениям естественно произрастающих еловых древостоев таежной зоны.

Ключевые слова: ель, плантационные культуры, рубки ухода, внесение удобрений, качество древесины, плотность.

В настоящее время на Северо-Западе России, где сконцентрированы крупные лесоперерабатывающие предприятия, запасы спелой хвойной древесины сильно истощены. В сложившихся условиях необходима интенсификация лесокультурного производства, в том числе за счет создания лесных плантаций [9, 10]. Основными лесоводственными мероприятиями, оказывающими влияние не темп роста плантационных культур, являются разреживания и минеральные удобрения, однако их применение может повлиять на качество получаемого древесного сырья, которое определяется рядом показателей, такими как плотность древесины, количество годичных слоев в 1 см радиального прироста, содержание поздней древесины. Так, в сосновых насаждениях таежной зоны в результате применения способов ускорения роста, плотность вновь формируемой древесины снижалась от 5 до 15 % [1–3]. В еловых древостоях информация по влиянию лесоводственных мероприятий на плотность и процент поз-

дней древесины носит противоречивый характер. В исследованиях, проведенных Г.А. Чибисовым и С.А. Москалевой [6–8], показано, что в результате разреживаний ельников процент поздних зон и плотность древесины увеличивается. А.А. Смирновым [4] выявлена общая тенденция к увеличению плотности древесины как в разреженных, так и в удобренных ельниках. Однако О.И. Полубояринов [3] приводит данные о снижении плотности древесины ели после рубок ухода на 3–8 %. Это указывает на необходимость уточнения вопросов, связанных с изменением плотности древесного сырья под влиянием лесоводственных мероприятий при искусственном лесовосстановлении ели на вырубках.

В условиях среднетаежной подзоны Карелии для изучения роста и продуктивности культур ели, выращиваемых в плантационном режиме, в 70-х гг. прошлого столетия Петрозаводской ЛОС ЛенНИИЛХа были заложены опытные объекты, но после ее закрытия в середине 90-х гг. исследова-

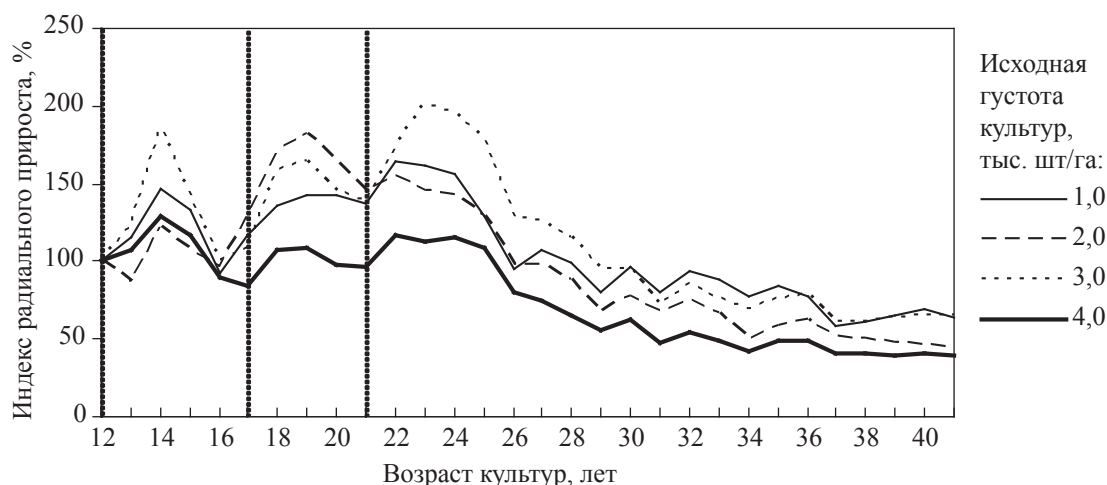


Рис. 1. Динамика радиального прироста в культурах ели разной густоты при ускоренном выращивании

Fig. 1. The dynamics of radial growth in cultures of different density spruce growing at an accelerated cultivation

ния на них прекратились. В настоящее время культуры достигли III класса возраста. Лабораторией лесовосстановления Института леса КарНЦ РАН опытные участки культур были восстановлены и исследования продолжены.

Цель данной работы – оценка качества древесины 41-летних плантационных культур ели разной густоты в условиях произрастания ельника черничного свежего.

Культуры ели созданы с различной исходной густотой (1, 2, 3 и 4 тыс. шт./га). В ходе их выращивания применялись разреживания и вносились минеральные удобрения [5].

Анализ радиального прироста выявил, что комплексный уход наиболее эффективен в культурах с первоначальной густотой 3 тыс. шт./га (рис. 1). При данной густоте внесение полного минеральные удобрения ($N_{100}P_{100}K_{100}$) в 12-летние культуры и такой же дозы удобрения в 17-летние культуры через 2 года после их разреживания способствовали достоверному увеличению радиального прироста в течении 4–5 лет после каждого из приемов ухода. Внесение азотных удобрений (N_{150}) в 21-летние культуры на следующий год после разреживания вызвало увеличение ширины годичных слоев на протяжении 7 лет. За период эффективного действия лесоводственных уходов,

который длился 16 лет, средние значения прироста по диаметру были на 49 % выше, чем до проведения мероприятий.

В культурах с первоначальной густотой 1 и 2 тыс. шт./га продолжительность положительного влияния удобрений на прирост наблюдалась на протяжении 13 лет. В этих вариантах за период эффективного действия удобрений радиальный прирост увеличился в среднем на 36 %. В культурах густотой 4 тыс. шт./га лесоводственные уходы отразились на приросте в меньшей степени. Так, полное минеральное удобрение ($N_{100}P_{100}K_{100}$) после первой подкормки вызвало 3-летнее увеличение радиального прироста в среднем на 17 %, а после второй – 2-летнее на 8 %. Внесение азотных удобрений (N_{150}) в 21-летние культуры на следующий год после разреживания отразилось на приросте по диаметру в течение 4 лет, увеличив его на 13 % по сравнению с периодом до проведения уходов.

Вследствие различий среднего диаметра деревьев в сравниваемых вариантах эффективность лесоводственных уходов более наглядно демонстрирует динамика изменения среднего прироста ствола по площади поперечного сечения (рис. 2). Начиная с 17 лет в варианте с исходной густотой культур 1,0 тыс. шт./га данный показатель превосходил аналогичные значения в куль-

Качество древесины 41-летних культур ели в черничном типе лесорастительных условий
The quality of wood for 41-year-old spruce plantation crops of different density
in the growing conditions of bilberry forests

Густота посадки, тыс. шт./га	Вариант опыта	Количество годовичных слоев в 1 см	Средняя ширина годовичного слоя, мм	Процент поздней древесины, %	Базисная плотность, кг/м ³
1,0	контроль	3,4	2,9 ± 0,10	28	366
1,0	удобрения	3,4	2,9 ± 0,15	21	365
2,0	контроль	3,8	2,6 ± 0,09	24	379
2,0	удобрения	3,8	2,6 ± 0,18	25	365
3,0	контроль	4,2	2,4 ± 0,08	24	374
3,0	удобр.+разреж.	4,0	2,5 ± 0,16	26	373
4,0	контроль	4,2	2,4 ± 0,10	23	371
4,0	удобр.+разреж	4,2	2,4 ± 0,15	24	370

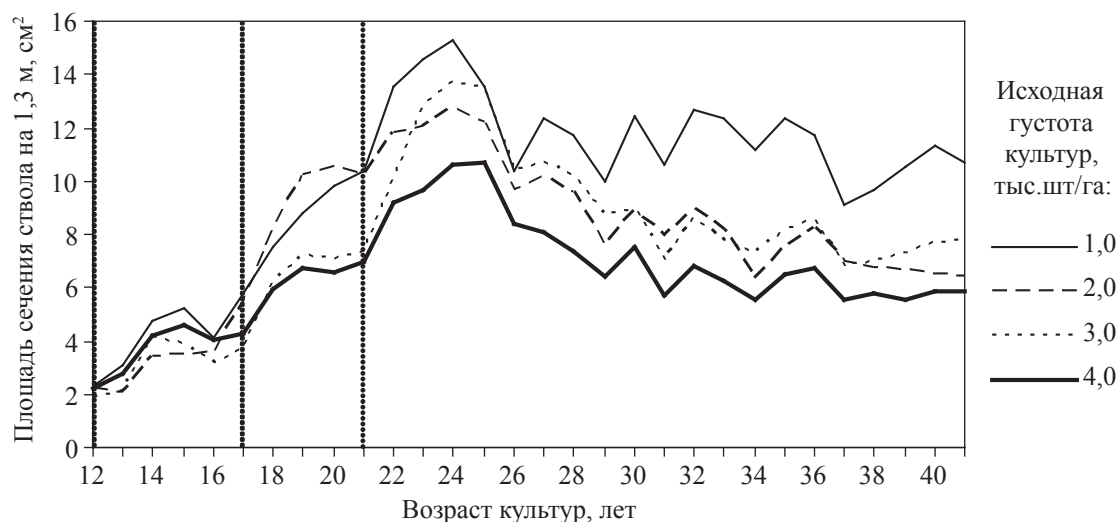


Рис. 2. Динамика прироста по площади сечения ствола на высоте 1,3 м в культурах ели разной густоты при ускоренном выращивании
 Fig. 2. The dynamics of growth on the cross-sectional area of a trunk at the height of 1.3 m in different density spruce crops

турах густотой 4,0 тыс. шт./га в 1,8–2,0 раза. Следует отметить, что комплексный уход во всех вариантах стимулировал прирост, но влияние густоты все же является определяющим фактором.

Снижение радиального прироста в последние полтора десятилетия является следствием того, что действие минеральных удобрений закончилось и без дополнительного воздействия извне, биологическая система стала приходить в соответствие с

продуктивностью условий местопроизрастания [5].

Качественные показатели древесины 41-летних культур ели зависели в значительной мере от первоначальной густоты культур (таблица). При одинаковой густоте в вариантах с уходом и без ухода (контроль) существенных различий по количеству годовичных слоев в 1 см древесины и их средней ширине не выявлено. Это объясняется уменьшением радиального прироста во всех вариантах с

комплексным уходом и внесением удобрений после завершения периода эффективно их действия, вследствие чего на момент исследования средние значения ширины годичных слоев были равны.

Внесение удобрений и разреживания в культурах ели с первоначальной густотой от 2 до 4 тыс. шт./га способствовало незначительному увеличению в древесине доли поздних зон на 1–2 % (табл.). Исключением являлись удобренные культуры с густотой посадки 1 тыс. шт./га, где процент поздней древесины снизился на 7 %, по сравнению с вариантом той же густоты без внесения удобрений. Тем не менее, в этом случае данный показатель и после снижения находился на уровне среднего значения для естественно произрастающих ельников европейской части России [3].

При исследовании базисной плотности древесины отмечено, что она после внесения минеральных удобрений и проведения разреживаний снижалась на 1–10 % в течение 4–7 лет после каждого приема ухода. В 41-летнем возрасте средняя плотность в вариантах с одинаковой первоначальной густотой не имела существенных отличий и вне зависимости от проведенных мероприятий достигала высоких значений (365–379 кг/м³). По данному показателю древесина культур ели соответствовала средним значениям естественно произрастающих еловых древостоев таежной зоны [3].

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Внесение минеральных удобрений и разреживания, проведенные в культурах ели, способствовали увеличению радиального прироста за период эффективного действия мероприятий в зависимости от густоты культур на 14–49 %. Комплексные ухода наилучшим образом отразились на ширине годичного слоя древесины культур с первоначальной густотой 3,0 тыс. шт./га, что связано с поступлением дополнительного света после разреживания, однако прирост по пло-

щади ствола был более значим в культурах с густотой 1,0 тыс. шт./га.

2. Культуры ели в 41-летнем возрасте имели следующие качественные характеристики прироста: количество годичных слоев в 1 см – 3,4–4,2 шт.; средняя ширина годичного слоя – 2,4–2,9 мм; процент поздней древесины – 21–28 %, плотность древесины – 365–379 кг/м³. Качество древесины при данных показателях можно оценить как высокое.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИЛ КарНЦ РАН.

Библиографический список

1. Нехайчук, О.Г. Влияние лесохозяйственных факторов на анатомическое строение древесины ели, сосны и лиственницы / О.Г. Нехайчук, В.Е. Москалева // Лесоведение. – 1979. – № 4. – С. 38–43.
2. Пеккоев, А.Н. Влияние лесоводственных уходов на рост культур сосны и качество древесины в подзоне средней тайги / А.Н. Пеккоев // Проблемы лесоведения и лесоводства: материалы Всероссийской конференции «Четвертые Мелеховские научные чтения, посвященные 105-летию со дня рождения И.С. Мелехова» (Архангельск, 10–12 ноября 2010 г.). – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2010. – С. 97–101.
3. Полубояринов, О.И. Плотность древесины / О.И. Полубояринов. – М.: Лесн. пром-сть, 1976. – 160 с.
4. Смирнов, А.А. Особенности влияния регулярного ухода за лесом на продуктивность древостоев и качество древесины ели: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук / А.А. Смирнов. – Архангельск, 2007. – 20 с.
5. Соколов, А.И. Ускоренное выращивание культур ели в среднетаежной подзоне Карелии / А.И. Соколов, А.Н. Пеккоев, В.А. Харитонов, Т.И. Кривенко // Лесной журнал. – 2013. – №5. – С. 96–105.
6. Чибисов, Г.А. Влияние коридорного ухода на качество древесины ели / Г.А. Чибисов // Лесной журнал. – 1968. – № 4. – С. 137–138.
7. Чибисов, Г.А. Влияние рубок ухода на технические свойства ели / Г.А. Чибисов, С.А. Москалева // Лесное хозяйство. – 1984. – № 4. – С. 12–14.
8. Чибисов, Г.А. Влияние комплексных уходов на анатомические свойства древесины сосны / Г.А. Чибисов, С.А. Москалева // Лесоводственно-экономические вопросы воспроизводства лесных ресурсов Европейского Севера. – Архангельск: СевНИИЛХ, 2000. – С. 74–82.
9. Штукин, С.С. Ускоренное выращивание сосны, ели и лиственницы на лесных плантациях / С.С. Штукин. – Минск: ИООО Право и экономика, 2004. – 242 с.
10. Шутов, И.В. Лесные плантации (ускоренное выращивание ели и сосны) / И.В. Шутов, Е.Л. Маслаков, И.А. Маркова и др. – М.: Лесная пром-сть, 1984. – 248 с.

THE WOOD QUALITY OF SPRUCE PLANTATION CROPS IN THE CONDITIONS OF THE MIDDLE TAIGA OF KARELIA

Pekkoev A.N., FRI KarRC RAS⁽¹⁾; Charitonov V.A., FRI KarRC RAS⁽¹⁾

pek-aleksei@list.ru, haritonov@krc.karelia.ru

⁽¹⁾ Forest Research Institute of Karelian Research Centre Russian Academy of Sciences (FRI KarRC RAS), 185910, Russia, Petrozavodsc, Pushkinskaja, 11.

The ripe softwood stocks in the Northwest of Russia are severely depleted because of the activity of large wood-processing enterprises. The intensification of forest management is necessary in these circumstances, particularly, through the establishment of forest plantations. The paper evaluated the wood quality for 41-year-old spruce plantation crops of different density in the growing conditions of spruce forests. It was established that the application of mineral fertilizers and cutting maintenance contributed to the increase in the annual ring width at 14–49 % during the period of the effective activities depending on the density of cultures. The comprehensive stand care had the best effect on the radial growth of crops with an initial density of 3.0 thousand. Pcs. / Ha. The wood of spruce cultures had the following qualitative characteristics: the number of annual rings – 1 cm – 3,4–4,2 pc.; the average width of an annual ring – 2,4–2,9 mm, the percentage of late wood – 21–28 %. It was noted that the smaller the density of crops without care was, the greater were the width of annual rings and the percentage of late wood. The decrease in the spruce wood density by 1–10 % is observed within 4-7 years after each care operation, i.e., the application of mineral fertilizers and thinning. The wood density in versions with the same initial density had no significant differences for the entire period of cultivation and reached high values (365–379 kg/m³), regardless of the measures. According to this indicator, the spruce wood cultures corresponded to the average values of naturally growing spruce forests of the taiga zone.

Keywords: spruce, plantation crops, thinning, mineral fertilizer, wood quality, density.

References

1. Nehaychuk O.G., Moskaleva V.E. *Vliyanie lesokhozyaystvennykh faktorov na anatomicheskoe stroenie drevesiny eli, sosny i listvennitsy* [Forestry effects on the anatomical structure of spruce, pine and larch wood]. *Lesovedenie* [Silviculture]. 1979. № 4. pp. 38-43. (in Russ.)
2. Pekkoev A.N. *Vliyanie lesovodstvennykh ukhodov na rost kul'tur sosny i kachestvo drevesiny v podzone sredney taygi* [Effects of silvicultural treatments on the growth of pine crops and timber quality in the middle taiga subzone]. *Problemy lesovedeniya i lesovodstva* [Challenges in Silvics and Silviculture: proceedings of the All-Russian Conference: Fourth Melekhov's Scientific Readings devoted to I.S. Melekhov's 105th anniversary (Arkhangelsk, November 10-12, 2010)]. Arkhangelsk: Severniy (Arkticheskiy) federalniy universitet; 2010. pp. 97-101. (in Russ.)
3. Poluboyarinov O.I. *Plotnost' drevesiny* [Wood density]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Timber industry]. 1976. 160 p. (in Russ.)
4. Smirnov A.A. *Osobennosti vliyaniya regul'yarnogo ukhoda za lesom na produktivnost' drevostoev i kachestvo drevesiny eli* [Specific effects of regular forest tending on stand productivity and timber quality in spruce]. Diss. ... kand. s.-h. nauk; [Diss. Ph.D. Agricultural Sci.]. Arkhangelsk. 2007. 20 p. (in Russ.)
5. Sokolov A.I., Pekkoev A.N., Haritonov V.A., Krivenko T.I. *Uskorennoe vyrashchivanie kul'tur eli v srednetayzhnoy podzone Karelii* [Short-rotation cultivation of spruce crops in the mid-taiga subzone of Karelia]. *IVUZ. «Lesnoi zhurnal»* [JHEI «Wood Magazine»]; 2013. № 5. pp. 96-105. (in Russ.)
6. Chibisov G.A. *Vliyanie koridornogo ukhoda na kachestvo drevesiny eli* [Effects of corridor thinning on spruce timber quality]. *IVUZ. «Lesnoi zhurnal»* [JHEI «Wood Magazine»]. 1968. № 4. pp. 137-138. (in Russ.)
7. Chibisov G.A., Moskaleva S.A. *Vliyanie rubok ukhoda na tekhnicheskie svoystva eli* [Effects of thinning of the technical properties of spruce] *Lesnoe hozyaystvo* [Forestry]; 1984. № 4. pp. 12–14. (in Russ.)
8. Chibisov G.A., Moskaleva S.A. *Vliyanie kompleksnykh ukhodov na anatomicheskie svoystva drevesiny sosny* [Effects of combined tending on the anatomical properties of pine wood]. *Lesovodstvenno-ekonomicheskie voprosy vosproizvodstva lesnykh resursov Evropeyskogo Severa* [Silvicultural-economic aspects of forest resource reproduction in the European North]. Arkhangelsk: SevNIILH. 2000. pp. 74-82. (in Russ.)
9. Shtukin S.S. *Uskorennoe vyrashchivanie sosny, eli i listvennitsy na lesnykh plantatsiyah* [Short-rotation cultivation of pine, spruce and larch in planted forests]. Minsk: IOOO Pravo i ekonomika. 2004. 242 p. (in Russ.)
10. Shutov I.V., Maslakov E.L., Markova I.A. *Lesnye plantatsii (uskorennoe vyrashchivanie eli i sosny)* [Planted forests (short-rotation cultivation of spruce and pine)]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' [Timber industry]. 1984. 248 p. (in Russ.)

УДК 674.047.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛАГОПРОВОДНОСТИ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ

И.В. САПОЖНИКОВ, доц., МГУЛ, канд. техн. наук⁽¹⁾,

Н.В. СКУРАТОВ, проф., МГУЛ, канд. техн. наук⁽¹⁾,

И.И. АЛЕКСЕЕВА, асп. МГУЛ⁽¹⁾,

Д.А. САМОЙЛЕНКО, асп. МГУЛ⁽¹⁾,

М.П. МАМОНТОВ, магистрант МГУЛ⁽¹⁾,

К.А. МАТВЕЕВА, магистрант МГУЛ⁽¹⁾

gosha@mgul.ac.ru, skuratov@mgul.ac.ru, alexeeva@mgul.ac.ru, samoylenko@mgul.ac.ru, mamontov@mgul.ac.ru, matveeva@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ

Особенности конвективной сушки древесины определяются, в основном, характером переноса воды. Внутреннее сопротивление переносу в древесине зависит от ее строения, температуры, влажности, направления потока воды и может характеризоваться коэффициентом влагопроводности. В данной работе эти коэффициенты определялись путем решения обратной задачи для уравнения влагопроводности. Распределения влажности в древесине определялись в процессе сушки методом послойной влажности, а также рентгеноскопии. После обработки результатов определения послойной влажности получена зависимость коэффициента влагопроводности древесины березы в радиальном направлении при температуре 65°C. Поля влажности в небольших образцах из древесины осины и сосны при их сушке в комнатных условиях были получены методом спектроскопии. Однако полученные данные позволили считать лишь средние значения коэффициентов влагопроводности в радиальном направлении. Они оказались равными $1,64 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ и $1,94 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ для древесины осины и сосны соответственно.

Ключевые слова: сушка древесины, влажность, послойный метод, рентгеноскопия, коэффициент влагопроводности.

Сушка древесины является важнейшим технологическим процессом в деревообработке, во многом определяющим качество изготавливаемой из древесины продукции. Режимы наиболее распространенной конвективной сушки древесины определяются, главным образом, особенностями переноса влаги. При низкотемпературной сушке перемещение воды в древесине осуществляется, в основном, в жидкой фазе и носит градиентный характер [1]. Перенос влаги в древесине является сложным физическим процессом, что и обуславливает зависимость коэффициента влагопроводности от многих факторов. К ним относятся, в первую очередь, направление потока, температура, плотность и влагосодержание древесины.

В научной литературе имеется достаточно большое количество аналитических зависимостей коэффициента влагопроводности различных пород древесины, обобщающие данные прямых и косвенных экспериментов как для стационарных [2–5], так и для нестационарных процессов переноса влаги [6–9].

Позднее появились методы определения коэффициентов влагопроводности, основанные на решении обратной коэффициентной задачи для уравнения влагопроводности [10–14].

Полученные разными исследователями данные по коэффициентам влагопроводности древесины для одних и тех же пород, как правило, заметно отличаются друг от друга. По-видимому, это связано с различием используемых методик и свойств экспериментальных образцов древесины.

При современном развитии вычислительной техники и численной математики достоверность расчетов математической модели определяется, в основном, точностью коэффициентов, входящих в модель. Поэтому надежные экспериментальные методы определения коэффициентов влагопроводности древесины по-прежнему остаются актуальными. Это в полной мере относится и к неразрушающим методам, реализация которых максимально приближена к условиям реальных процессов сушки.

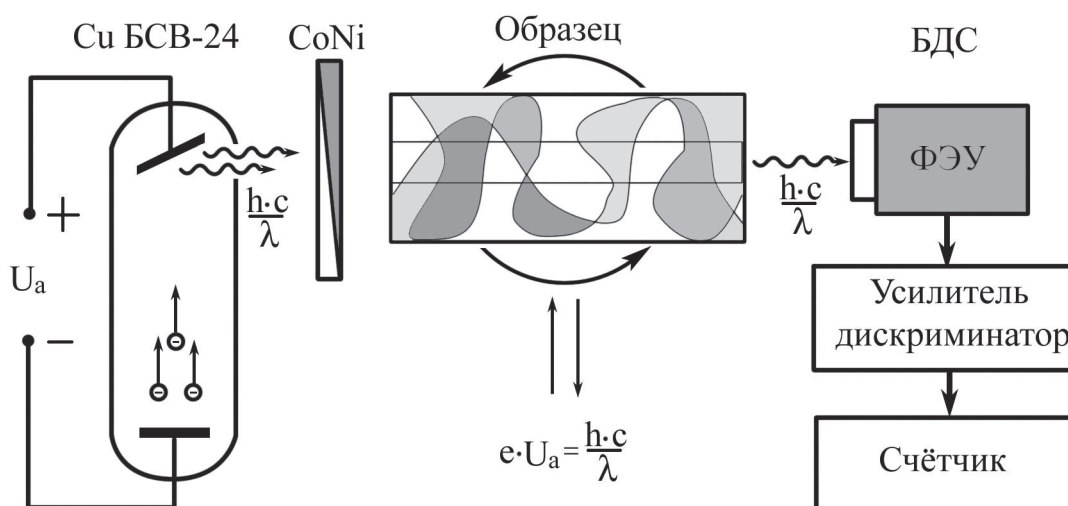


Рис. 1. Схема измерительного стенда для измерения локальной влажности в древесине и в материалах на ее основе

Fig. 1. The measuring bench scheme to measure local humidity in wood and wood-based materials

Цель данной работы состояла в определении коэффициентов влагопроводности по полученным на различных этапах сушки распределениям влажности в образцах древесины классическим весовым способом и неразрушающим методом рентгеноскопии.

Для определения послойной влажности в ходе конвективной сушки весовым способом из сырой древесины березы с базисной плотностью 510 кг/м³ было подготовлено шесть образцов размером 8×70×800 мм. Для предотвращения испарения воды с торцов и кромок образцов они покрывались силиконом. Экспериментальные сушки проводились в лабораторной сушильной камере при температуре 65 °С, относительной влажности 60 % и скорости движения воздуха 2 м/с. При проведении опытной сушки начальное распределение влажности по толщине образца определялось каждые 30 мин. С этой целью на расстоянии 50 мм от торца отпиливалась узкая секция шириной 5–6 мм, которая немедленно раскраивалась на 8–10 пластинок толщиной 0,8–1,0 мм. Пластинки взвешивались на электронных весах с точностью 0,001 г. Перед помещением образца обратно в сушильную камеру его торец вновь покрывался силиконом.

Одним из наиболее надежных и доступных методов неразрушающего контроля пространственного распределения плотности

и связанной с ней влажности в гигроскопичных материалах являются методы, основанные на измерении поглощения рентгеновского излучения [15]. Для проведения экспериментов на базе дифрактометра общего назначения ДРОН–3 был создан стенд, схема которого представлена на рис. 1. Стенд включает в себя источник рентгеновского излучения, состоящий из рентгеновской трубки БCB-24Cu и высоковольтного источника питания. Система регистрации рентгеновского излучения состоит из сцинтилляционного детектора на основе кристалла NaI, фотоэлектронного умножителя, усилителя-дискриминатора и счетчика импульсов. Блок детектора БДС преобразует рентгеновские кванты в электрические импульсы таким образом, что из квантов с большей энергией, а значит и с меньшей длиной волны, получают импульсы большей амплитуды. Это позволяет распределять рентгеновское излучение по длине волны и проводить спектральный анализ поглощения рентгеновского излучения. Согласованный Co–Ni–фильтр выделяет из общего спектра рентгеновской трубки медное характеристическое излучение CuK_α и совместно с дискриминатором позволяет получить монохроматизированное излучение с длиной волны $\lambda = 0,154$ нм.

Для опытов были подготовлены осиновые и сосновые образцы размером

8 – 12×40×100 мм. Перед испытанием все грани образцов, кроме одной, были влагоизолированы. Исследуемый образец помещался на стол гониометра ГУР–8 в координатное устройство, обеспечивающее его горизонтальное перемещение перпендикулярно лучу. Воздух с заданной температурой и влажностью поступал на неизолированную поверхность, создавая условия для односторонней сушки. Регистрация поглощенного рентгеновского излучения осуществлялась набором импульсов с экспозицией 20 с при дискретном перемещении образца с шагом 0,5 мм. Коллимация луча составляла 1 мм по высоте и 0,025 мм по ширине. Измерения осуществлялись каждые 2 ч в течение суток.

Оценка пространственного распределения влажности в образце производилась на основании закона Бэра. Если рассматривать влажную древесину как двухкомпонентную среду, система уравнений для расчета распределения влажности выглядит следующим образом

$$\begin{cases} g_b(x) \cdot \frac{\mu_b}{\rho_b} + g_w(x) \cdot \frac{\mu_w}{\rho_w} = \frac{1}{\rho(x) \cdot d} \ln \left(\frac{I_{0\lambda}}{I_\lambda(x)} \right); \\ g_b(x) + g_w(x) = 1, \end{cases} \quad (1)$$

где $g_b(x)$ и $g_w(x)$ – массовые доли воды и сухой древесины;

ρ_b и ρ_w – плотности воды и сухой древесины, г/см³;

μ_b и μ_w – массовые коэффициенты поглощения рентгеновских лучей для воды и древесины, см²/г;

d – длина образца, см.

Массовые коэффициенты поглощения для воды и древесины определялись предварительно перед экспериментом. Для длины волны $\lambda = 0,154$ нм они оказались равными 9,9 см²/г и 7,5 см²/г соответственно. Это позволило рассчитать пространственное распределение влажности в образцах в различные моменты времени.

Численная оценка функциональной зависимости коэффициента влагопроводности осуществлялась на базе решения обратной коэффициентной задачи для уравнения влаго-

проводности, математическая модель которой включает само уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a(u) \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right); \quad (2)$$

начальные условия

$$u(x,0) = u_n(x), \quad (3)$$

и условия на границе

$$\frac{\partial u(0,t)}{\partial x} = 0; \quad a(u) \cdot \frac{\partial u(l,t)}{\partial x} = \beta \cdot (u_s(T, \varphi) - u(l,t)). \quad (4)$$

В качестве функции цели выбиралась невязка отклонения решения задачи (2) – (4) от пространственного распределения влажности, полученного из эксперимента

$$\Phi(a) = \sum_i^l \int_0^l (u(x, t_i) - u_i^e(x))^2 dx \rightarrow \min. \quad (5)$$

Решение поставленной задачи осуществлялось с помощью интегрированного математического пакета Mathcad.

На рис. 2 представлены распределения влажности по толщине березовых образцов, полученные в различные моменты времени. Как видно из рисунка, в начальный момент времени вода по толщине образцов была распределена неравномерно и несимметрично. Однако со временем, благодаря одинаковым условиям влагообмена на пласть образцов, кривые распределения влажности становятся более симметричными и похожими на параболы.

Рассчитанные по полученным экспериментальным данным значения коэффициентов влагопроводности древесины березы, зависящие от ее влажности, представлены на рис. 3.

Как видно из полученной зависимости, повышение влажности древесины приводит к существенному росту коэффициента влагопроводности. Небольшое снижение коэффициента в начале диапазона связано, по-видимому, с неточностью определения локальной влажности.

Распределения влажности по толщине осинового и соснового образцов, полученные неразрушающим методом рентгеноскопии в процессе сушки при комнатных условиях, представлены на рис. 4 и рис. 5.

Полученные распределения влажности в осиновом и сосновом образцах наглядно

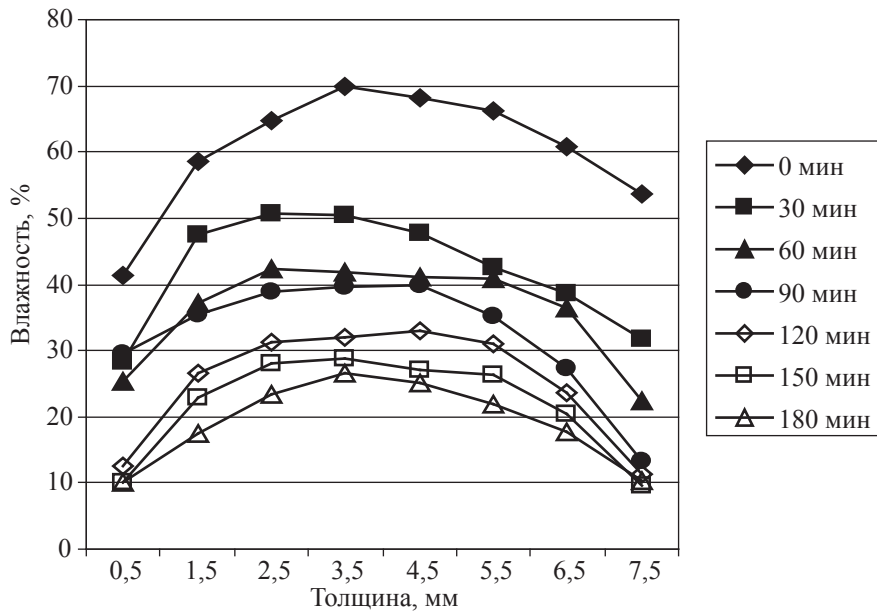


Рис. 2. Распределение послойной влажности по толщине березового образца
 Fig. 2. The distribution of layered humidity along the width of a birch sample

показывают, что разрешающая способность рентгеновского неразрушающего метода измерения локальной влажности существенно выше по сравнению с классическим весовым способом определения послойной влажности. Кроме того, только рентгеновский метод позволяет надежно измерять градиенты влажности в небольших объемах и тонких образцах. Используемый расчетный метод позволил вычислить средние коэффициенты влагопроводности в тангенциальном направлении при температуре 20°C для обоих образцов. Для древесины сосны коэффициент влагопроводности оказался равным $1,948 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, а для древесины осины – $1,064 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. В дальнейшем планируется получение коэффициентов влагопроводности древесины различных пород при повышенных температурах.

В заключение необходимо отметить, что полученные значения коэффициентов влагопроводности достаточно хорошо согласуются с данными, полученными другими исследователями для древесины тех же пород.

В качестве достоинства классического весового способа определения локальной влажности следует отметить его простоту. Для его реализации не требуется дорогостоящего оборудования и приборов. Но при этом метод является достаточно трудоемким и не позво-

ляет получать надежные данные о локальных значениях влажности в тонких образцах.

Неразрушающий рентгеновский метод измерения локальной влажности имеет высокую разрушающую способность и может быть успешно использован при исследовании тонких образцов. В то же время рентгеновская установка с ионизирующим излучением относится к группе сложного и дорогого оборудования, а ее эксплуатация требует квалифицированного обслуживания. Кроме того, для

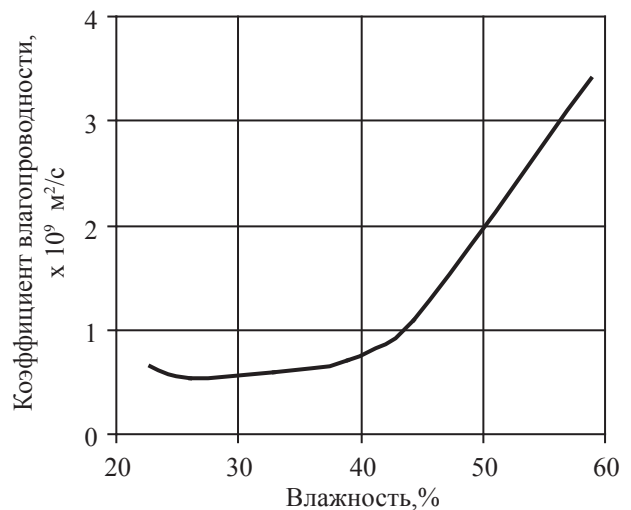


Рис. 3. Зависимость коэффициента влагопроводности древесины березы от влажности
 Fig. 3. The dependence of hydraulic conductivity of birch wood on moisture

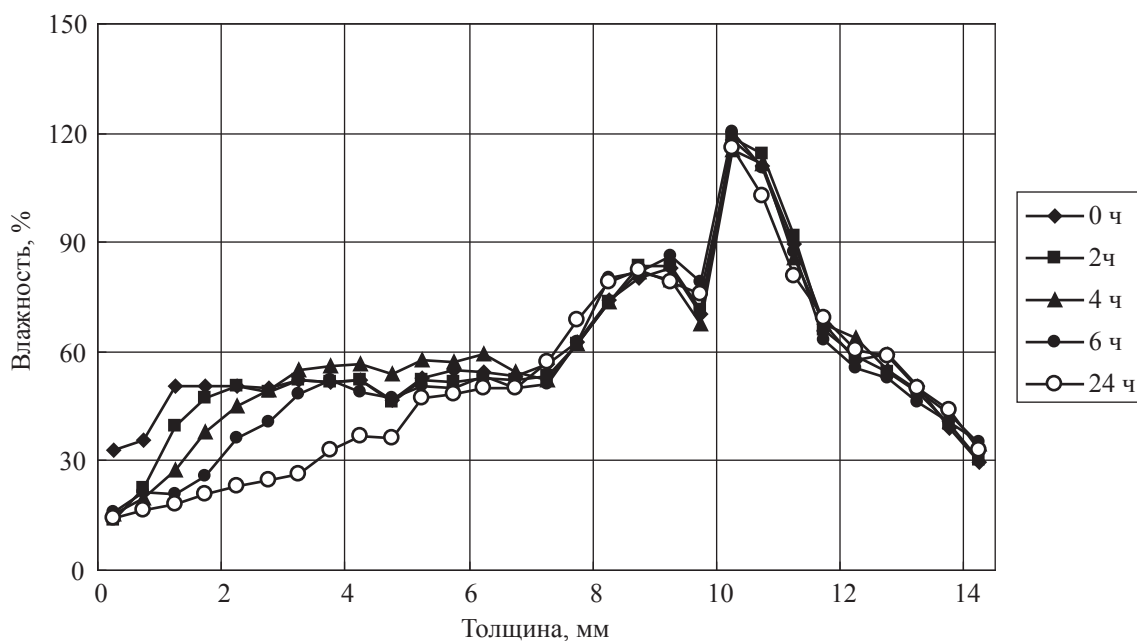


Рис. 4. Распределение влажности в образце осины
Fig. 4. The moisture distribution in an aspen sample

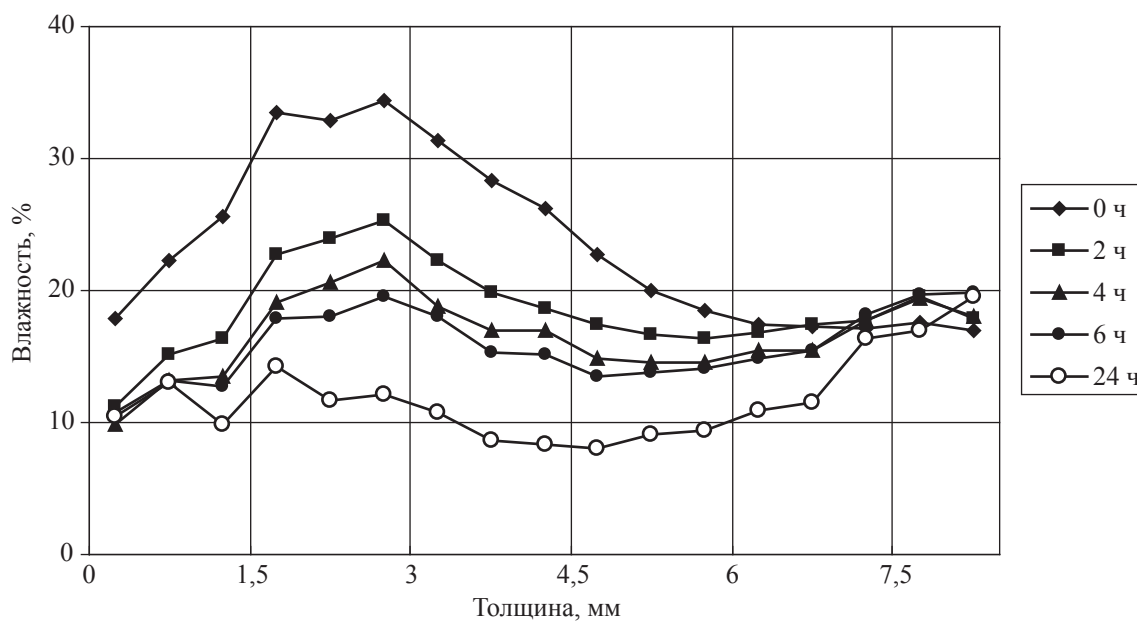


Рис. 5. Распределение влажности в образце сосны
Fig. 5. The moisture distribution in a pine sample

проведения исследований при повышенных температурах на установку необходимо установить специальную климатическую камеру.

Библиографический список

1. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: «Энергия», 1968. – 472 с.
2. Skaar, C. Analysis of methods for determining the coefficient of moisture diffusion in wood // Forest Products Journal. –1954.–Vol.4, N 12.–p. 403–410.
3. Choong, E.T. Diffusion coefficients of softwoods by steady-state and theoretical methods Forest Products Journal.– 1965.–Vol.15, N.1.– p. 21–27.
4. Siau, J.F. Transport processes in wood. – Berlin: Springer, 1984.
5. Lee, H.W. Moisture transmission in wood. Moisture transfer and velocity of moisture transmission in a steady state/ H.W. Lee, T. Okano, M.Ohta // Mokuzai Gakkaishi.– 1991.–Vol. 37, № 2.– p. 101–108.
6. Comstock, G. L. Moisture Diffusion Coefficients in Wood as Calculated from Adsorption, Desorption and Steady-State Data// Forest Products Journal.– 1963.–Vol. 13,N. 3.– p. 97–103.

7. Choong, E.T. Moisture movement in six wood species/ E.T. Choong, P.J. Fogg // *Forest Product Journal.*– 1968.– Vol. 13, No. 5.– p. 66–70.
8. Шубин, Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины / Г.С. Шубин. – М.: Лесная пром-сть, 1973.– 248 с.
9. Wadso, L. Studies of water vapor transport and sorption in wood. Doctoral Dissertation, Report TVBM–1013, Building Materials, Lund University, 1993.
10. Hukka, A. The Effective Diffusion Coefficient and Mass Transfer Coefficient of Nordic Softwoods as Calculated from Direct Drying Experiments// *Holzforschung.*– 1999.– Vol. 53, N.5.– p. 534–540.
11. Liu, J.Y. An Inverse Moisture Diffusion Algorithm for the Determination of Diffusion Coefficient/ J.Y. Liu, W.T. Simpson, S.P. Verrill // *Drying Technology.*– 2001.–Vol. 19, N. 8.– p. 1555–1568.
12. Olek, W. The inverse method for diffusion coefficient identification during water sorption in wood/ W. Olek, J. Weres / *Proceedings of the 3rd COST E15 Workshop on “Softwood drying to specific end–uses”.* Helsinki, Finland, Paper No 27.– 2001.
13. Weres, J. Inverse finite element analysis of technological processes of heat and mass transport in agricultural and forest products/ J. Weres, W. Olek // *Drying Technology.* – 2005.– Vol.23.– p. 1737–1750.
14. Zhou, Q. Zhang, X. Determination of moisture diffusion coefficient of larch board with finite difference method/ Q. Zhou, Y. Cai, Y. Xu // *Bioresources.*– 2011.–Vol. 6, N.2.– p. 1196–1203.
15. Сапожников, И.В. Рентгеноструктурный анализ напряженного состояния нагруженной древесины: дис...канд. техн. наук: 05.21.05: защищена 2.04.1993 / Сапожников Игорь Витальевич. – М., 1993.– 168 с.

DETERMINATION OF DEFFUSION COEFFICIENTS AT LOW TEMPERATURE WOOD DRYING

Sapozhnikov I.V., Assoc. Prof. MSFU, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾; Skuratov N.V., Prof. MSFU, Ph.D.⁽¹⁾; Alexeeva I.I., pg. MSFU⁽¹⁾; Samoylenko D.A., pg. MSFU⁽¹⁾; Mamontov M.P., MSFU⁽¹⁾; Matveeva K.A., MSFU⁽¹⁾

gosha@mgul.ac.ru, skuratov@mgul.ac.ru, alexeeva@mgul.ac.ru, samoylenko@mgul.ac.ru, mamontov@mgul.ac.ru, matveeva@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moskow reg., Russia

Specific features of convective wood drying are mainly determined by the character of the internal moisture transfer. The internal resistance depends on wood structure, its temperature, moisture content, moisture flux direction and it can be described by the diffusion coefficient. The modified method of the inverse determination of the diffusion coefficients was used in this paper. Measuring the moisture content distributions in wood during the process of drying was carried out using slicing and x-ray techniques. After processing the moisture distribution data obtained by the slicing technique, the dependence of the diffusion coefficient of birch on moisture content was established in the radial direction at 65°C. With the help of X-ray technique the moisture content profiles in small aspen and pine samples during drying in roomed conditions were obtained. However, the obtained data allowed us to calculate only the average values of the diffusion coefficients in the radial direction. They were equal to $1.64 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ and $1.94 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ for aspen and pine, respectively.

Key words: wood drying, moisture content, slicing technique, x-ray technique, diffusion coefficient.

References

1. Luikov A.V. *Teoriya Sushki* [Theory of Drying]. Moscow: *Energiya* [Energy], 1968, 472 p.
2. Skaar C. Analysis of methods for determining the coefficient of moisture diffusion in wood. *Forest Products Journal.* 1954. Vol. 4, № 12. pp. 403-410.
3. Choong E.T. Diffusion coefficients of softwoods by steady–state and theoretical methods *Forest Products Journal.* 1965. Vol. 15, № 1. pp. 21-27.
4. Siau J.F. *Transport processes in wood.* Berlin: Springer, 1984.
5. Lee H.W., Okano T., Ohta M. Moisture transmission in wood. Moisture transfer and velocity of moisture transmission in a steady state. *Mokuzai Gakkaishi.* 1991. Vol. 37, № 2. pp. 101-108.
6. Comstock G.L. Moisture Diffusion Coefficients in Wood as Calculated from Adsorption, Desorption and Steady–State Data. *Forest Products Journal.* 1963. Vol. 13, № 3. pp. 97-103.
7. Choong E.T., Fogg P.J. Moisture movement in six wood species. *Forest Product Journal.* 1968. Vol. 13, № 5. pp. 66-70.
8. Shubin G.S. *Fizicheskie osnovy i raschet protsessov sushki drevesiny* [Physical basis and calculation processes of drying wood]. Moscow: *Lesnaya promyshlennost'* [Forest industry], 1973, 248 p.
9. Wadso L. Studies of water vapor transport and sorption in wood. Doctoral Dissertation, Report TVBM–1013, Building Materials, Lund University, 1993.
10. Hukka A. The Effective Diffusion Coefficient and Mass Transfer Coefficient of Nordic Softwoods as Calculated from Direct Drying Experiments. *Holzforschung.* 1999. Vol. 53. № 5. pp. 534-540.
11. Liu J.Y., Simpson W.T., Verrill S.P. An Inverse Moisture Diffusion Algorithm for the Determination of Diffusion Coefficient. *Drying Technology.* 2001. Vol. 19, № 8. pp. 1555-1568.
12. Olek W., Weres J. The inverse method for diffusion coefficient identification during water sorption in wood. *Proceedings of the 3rd COST E15 Workshop on “Softwood drying to specific end–uses”.* Helsinki, Finland, № 27. 2001.
13. Weres J., Olek W. Inverse finite element analysis of technological processes of heat and mass transport in agricultural and forest products. *Drying Technology.* 2005. Vol.23. p. 1737-1750.
14. Zhou Q., Cai Y., Xu Y. Zhang, X. Determination of moisture diffusion coefficient of larch board with finite difference method. *Bioresources.* 2011. Vol. 6, № 2. pp. 1196-1203.
15. Sapozhnikov I.V. *Rentgenostrukturnyy analiz napryazhennogo sostoyaniya nagruzhennoy drevesiny* [X–ray diffraction analysis of the stress state of the loaded timber]: diss...kand. tekhn. nauk: 05.21.05: zashchishchena 2.04.1993. Moscow, 1993. 168 p.

УДК 674.816.3

АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СВОЙСТВ ДРЕВЕСНЫХ ПЛИТ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КЛЕЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

С.А. УГРЮМОВ, *проф., КГТУ, д-р техн. наук*⁽¹⁾,
А.В. ОСЕТРОВ, *асп. КГТУ*⁽¹⁾

ugr-s@yandex.ru, mtd@kstu.edu.ru

⁽¹⁾ФГБОУ ВО «Костромской государственной технологической университет»
156005, г. Кострома, ул. Дзержинского, д. 17, КГТУ

Предложено использование олигомеров фуранового ряда, обладающих повышенной водостойкостью, хорошей химической стойкостью, высокой теплостойкостью и удовлетворительными механическими и диэлектрическими свойствами, в качестве модификатора фенолформальдегидных смол при производстве древесно-стружечных плит с повышенными физико-механическими характеристиками. Исследованы основные технологические свойства клеевых композиций на основе фенолформальдегидной смолы марки СФЖ-3014 с добавкой в различном соотношении основного представителя фурановых олигомеров – фурфуролацетонового мономера ФА. Экспериментально установлено, что с увеличением доли фурфуролацетонового мономера повышается вязкость и снижается время желатинизации клеевого состава за счет уменьшения кислотности и начальных процессов отверждения. Представлены физико-механические свойства древесно-стружечных плит на основе модифицированных клеевых составов. Установлено значимое повышение прочности, снижение разбухания и водопоглощения плит при введении в фенолформальдегидный олигомер 2...4 масс. ч. фурфуролацетонового мономера ФА. Анализ результатов ИК-спектроскопии показал наличие изменений в структуре клея за счет введения фурфуролацетонового мономера ФА. В области высоких волновых чисел спектра происходит смещение максимумов в сторону большего значения волнового числа, характеризующего орто-пара-связи, образованные с участием фенольных структур в составе макромолекул, что свидетельствует об увеличении энергии связи молекул модифицированного связующего. Наряду с этим имеет место некоторое смещение максимумов в области малых волновых чисел спектра, характеризующих образование орто-орто-связи с участием фенольных структур, обусловленное перераспределением ОН-групп и увеличением внутримолекулярных связей, что приводит к увеличению молекулярной массы модифицированного связующего. Модификация приводит к ускорению процесса отверждения клея, повышению степени его отверждения, что приводит к повышению физико-механических характеристик готовых древесных плит.

Ключевые слова: фенолформальдегидная смола, фурфуролацетоновый мономер, модификация, ИК-спектроскопия, древесно-стружечная плита, физико-механические свойства.

Фенолформальдегидные олигомеры и клеи на их основе – один из перспективных и широко применяемых полимерных материалов для производства древесно-стружечных плит, эксплуатируемых в условиях с переменной влажностью. При относительно невысокой стоимости они позволяют формировать клеевые соединения высокой прочности и водостойкости, поэтому широко используются в производстве древесных плит конструкционного назначения [1–3]. Однако плиты на основе фенолоформальдегидных смол при длительной эксплуатации в переменных температурно-влажностных условиях разбухают по толщине, изменяют форму, теряют прочность, что приводит к нарушению целостности конструкций, изготовленных на их основе [4].

В деревообработке известны способы повышения физико-механических свойств клеевых соединений в структуре древесно-стружечных плит плит путем совмещения

основного связующего с более стойкими и реакционно способными олигомерами или модифицирующими добавками [5–7]. В качестве эффективного модификатора для клеев на основе фенолоформальдегидных олигомеров могут использоваться соединения фуранового ряда, например фурфуролацетоновый мономер ФА [8].

Известно, что фурановые олигомеры в отвержденном состоянии (состоянии конечного полимера) обладают повышенной водостойкостью, химической стойкостью, теплостойкостью, удовлетворительными механическими и диэлектрическими свойствами [9,10]. Представляет практический интерес оценка технологических свойств феноло-формальдегидных олигомеров, модифицированных фурановыми олигомерами, а также продуктов их отверждения применительно к производству древесных плит.

В экспериментальной части работы оценены некоторые технологические свойства

Основные технологические свойства модифицированных клеевых составов

The main technological properties of modified adhesives

Доля добавки фурфурол-ацетонового мономера, масс. ч.	Поверхностное натяжение клеевого состава, мН/м	Краевой угол смачивания, град.	Вязкость по ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм, с	Кислотность pH	Время желатинизации при 150°C, с
0	66	70°30'	91	8,06	70
2	57	70°00'	92	7,89	47
4	54	69°12'	108	7,84	35
6	53	64°00'	117	7,80	29
8	50	57°30'	127	7,77	24
10	49	56°06'	140	7,68	22

Т а б л и ц а 2

Физико-механические свойства полученных древесно-стружечных плит

Physical and mechanical properties of the chipboard

Доля добавки фурфурол-ацетонового мономера, масс. ч.	Предел прочности при статическом изгибе, МПа	Предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти, МПа	Разбухание по толщине, %	Объемное разбухание, %	Водопоглощение, %
0	19,02	0,67	32,87	36,61	62,35
2	23,67	0,71	24,10	26,93	52,09
4	26,81	0,72	23,15	25,87	48,03
6	23,18	0,69	27,56	32,06	55,54
8	21,20	0,68	28,74	32,53	58,10
10	20,22	0,68	29,07	32,97	59,23

тва модифицированных клеевых композиций на основе фенолоформальдегидной смолы марки СФЖ-3014 с добавкой в различном соотношении фурфуролацетонового мономера ФА (табл. 1). Установлено, что с увеличением доли фурфуролацетонового мономера повышается вязкость и снижается время желатинизации клеевого состава за счет уменьшения кислотности (рН среды) и начальных процессов отверждения при взаимодействии кислого фурфуролацетонового мономера со щелочным фенолоформальдегидным олигомером.

В работе оценены также физико-механические свойства древесно-стружечных плит, изготовленных на основе модифицированных клеев с расходом связующего 12 % от массы наполнителя (табл. 2).

Анализ полученных результатов показал, что наилучшие физико-механические свойства древесно-стружечных плит достигаются при введении 2–4 масс. ч. фурфуролацетонового мономера ФА в фенолофор-

мальдегидный олигомер, при этом значительно возрастает прочность, снижаются показатели разбухания и водопоглощения.

Для исследования химического состава и процесса отверждения модифицированного фенолоформальдегидного клея в структуре древесно-стружечных плит использовался ИК-спектрометр Avatar 360 FT-IR ESP, определяющий образование веществ в спектральном диапазоне 400-4000 см⁻¹ с получением соответствующих спектрограмм (рисунок).

Анализ полученных спектрограмм показал наличие изменений в структуре клея за счет введения фурфуролацетонового мономера ФА. Эти изменения проявились в области спектра 1100...1400 см⁻¹ и 1420...1730 см⁻¹. Так, в области спектра 1520...1430 см⁻¹ происходит смещение максимума в область более высоких частот.

Такое изменение в спектрах происходит в результате упрочнения связи между молекулами связующего, так как считается, что сме-

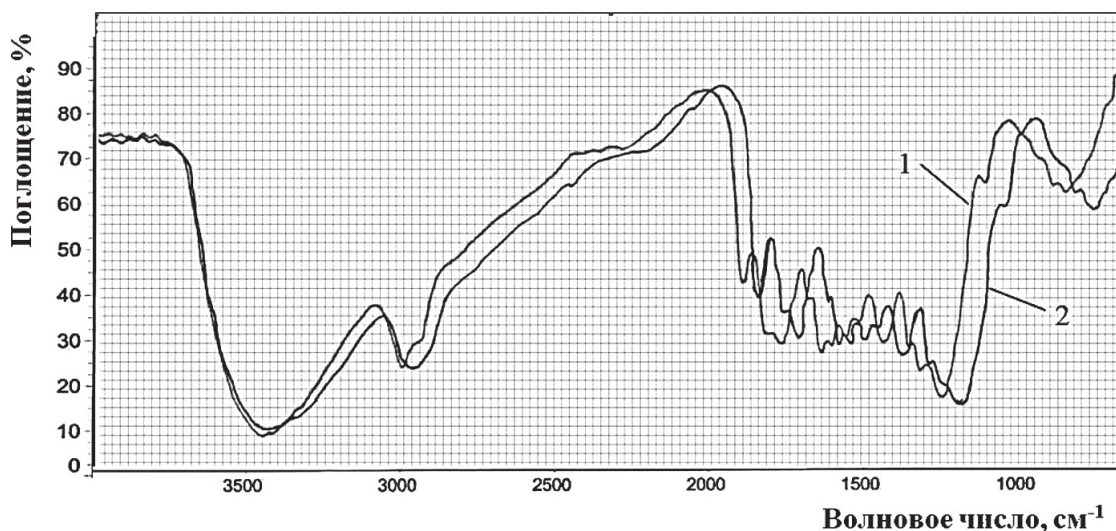


Рисунок. ИК-спектры древесно-стружечных плит: 1 – на основе смолы СФЖ-3014; 2 – на основе смолы СФЖ-3014 с добавкой 6 мас. ч. мономера ФА

Figure. IR spectra of chipboard: 1 – resin-based СФЖ-3014; 2 – resin СФЖ-3014 supplemented with 6 wt. h. ФА monomer

щение максимума до 15 см^{-1} соответствует увеличению энергии связи молекул связующего на $1,87 \cdot 10^3$ Дж/моль. В области спектра $3300\text{--}3500\text{ см}^{-1}$ происходит смещение максимума в сторону большего значения волнового числа, характеризующего орто-пара-связи, образованные с участием фенольных структур в составе макромолекул. Смещение максимума соответствует увеличению энергии связи молекул.

Наряду с этим имеет место некоторое смещение максимумов в области $500\text{--}1100\text{ см}^{-1}$, характеризующих образование орто-орто-связи с участием фенольных структур. Это смещение, по-видимому, обусловлено перераспределением ОН-групп и увеличением внутримолекулярных связей, что приводит к увеличению молекулярной массы полимера.

Кроме этого, в спектрах смолы марки СФЖ-3014 без модификатора была обнаружена полоса $1520\text{--}1580\text{ см}^{-1}$, которая может быть отнесена к валентным колебаниям =C-O- простой эфирной связи. Известно, что при нагревании фенолформальдегидные смолы резольного типа отверждаются, т. е. превращаются в полимеры пространственного строения вследствие образования метиленовых и метилэфирных мостиков между молекулами смолы, а при углублении процесса отверждения они начинают убывать. Исходя из этого можно сделать вывод о значимости

модифицирования фенолформальдегидной смолы мономером ФА, так как в спектрах древесно-стружечной плиты, изготовленной на совмещенном связующем, таких полос практически не наблюдается.

Таким образом, на основании выявленных изменений в структуре связующего, установлено, что при введении в фенолоформальдегидную смолу СФЖ-3014 фурфуролацетонного мономера ФА происходит ускорение процесса отверждения клея, а значит, и степени его отверждения, что приводит к повышению физико-механических характеристик готовых древесных плит.

Библиографический список

1. Кондратьев, В.П. Синтетические клеи для древесных материалов / В.П. Кондратьев, В.И. Кондращенко. – М.: Научный мир, 2004. – 520 с.
2. Азаров, В.И. Полимеры в производстве древесных материалов – 2-е изд. / В.И. Азаров, В.Е. Цветков. – М.: МГУЛ, 2006. – 236 с.
3. Азаров, В.И. Химия древесины и синтетических полимеров – 2-е изд., испр. / В.И. Азаров, А.В. Буров, А.В. Оболенская. – СПб.: Лань, 2010. – 624 с.
4. Угрюмов, С.А. Комплексные способы повышения физико-механических свойств древесно-стружечных плит / С.А. Угрюмов, А.А. Федотов, А.В. Осетров // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 1 (25). – С. 34–44.
5. Малышева, Г.В. Физическая химия адгезивных материалов / Г.В. Малышева // Материаловедение. – 2005. – № 6. – С. 38–40.

6. Угрюмов, С.А. Применение теории адгезии и смачивания для модификации фенолформальдегидного олигомера, используемого для осмоления костры / С.А. Угрюмов, В.Е. Цветков // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2008. – № 2. – С. 104–106.
7. Угрюмов, С.А. Модифицирование карбамидоформальдегидной смолы для производства костроплит / С.А. Угрюмов, В.Е. Цветков // Деревообрабатывающая промышленность. – 2008. – № 3. – С. 16–18.
8. Федотов, А.А. Исследование свойств древесно-стружечных плит на основе синтетических смол с различной долей добавки фурановой смолы // А.А. Федотов, С.А. Угрюмов // Клеи. Герметики. Технологии. – 2012. – № 12. – С. 16–19.
9. Маматов, Ю.М. Полимерные материалы на основе фурановых смол и их применение / Ю.М. Маматов. – М.: Химия, 1975. – 89 с.
10. Угрюмов, С.А. Фурановые смолы в производстве клееных древесных материалов / С.А. Угрюмов. – Кострома: КГТУ, 2012. – 142 с.

ANALYSIS OF CHEMICAL COMPOSITION AND PROPERTIES OF WOOD BOARDS
BASED ON MODIFIED ADHESIVE COMPOSITION

Ugryumov S.A., Prof. KSTU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Osetrov A.V., KSTU⁽¹⁾

ugr-s@yandex.ru, mtd@kstu.edu.ru

⁽¹⁾ FGBOU VO Kostroma state university of technology, 156005, Kostroma, Dzerzhinsky str., 17, KSTU.

It is proposed to use oligomers of furan series with a high water resistance, good chemical resistance, high heat resistance and satisfactory mechanical and dielectric properties, as a modifier of phenol-formaldehyde resins in the manufacture of wood particleboards with improved physical and mechanical characteristics. The basic technological properties of adhesive compositions based on phenol-formaldehyde resin of brand CFG-3014 with the additive in various ratios primary representative furan resin – furfuralcohol monomer FA have been studied. It was established experimentally that with the increase of the furfuralcohol monomer proportion the viscosity increases and the time of the adhesive composition gelation decreases by reducing pH and initial solidification processes. The article presents some physical-mechanical properties of chipboards produced on the basis of modified adhesive compositions. It is found that there is a significant increase in strength, a decrease of both swelling and water absorption of the plates when the furfuralcohol monomer FA has been introduced into phenol-formaldehyde oligomer 2..4 mass. h. . The analysis of the IR-spectrometry results showed certain changes in the structure of the adhesive due to the introduction of the furfuralcohol monomer FA. In the high wave numbers of the spectrum there is a shift of maxima towards larger values of the wave number characterizing ortho-pair-bonds formed with the participation of phenolic structures consisting of macromolecules, which indicates an increase in energy of the molecules of the modified binder. Along with this, there is a slight shift of the peaks in the region of small wave numbers of the spectrum characterizing the formation of ortho-ortho-linkages involving phenolic structures due to the redistribution of Oh-groups and an increase in intramolecular bonds, which results in an increase in molecular weight of modified binder. The modification brings about an acceleration of the curing process of the adhesive and enhances the degree of curing, which results in improving certain physical-mechanical characteristics of the finished wood panels.

Keywords: phenol-formaldehyde resin, furfuralcohol monomer, modification, IR-spectrometry, wood plates, physical-mechanical properties.

References

1. Kondrat'ev V.P., Kondrashenko V.I. *Sinteticheskie klei dlya drevesnykh materialov* [Synthetic adhesives for wood materials]. Moscow, Scientific world, 2004. 520 p.
2. Azarov V.I. *Polimery v proizvodstve drevesnykh materialov* [Polymers in the production of wood-based materials]. Moscow: MSFU, 2006. 236 p.
3. Azarov V. I. *Khimiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Chemistry of wood and synthetic polymers]. St. Petersburg, Lan', 2010. 624 p.
4. Ugryumov S.A., Fedotov A.A., Osetrov A.V. *Kompleksnye sposoby povysheniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv drevesno-struzhechnykh plit* [Complex methods of increasing the physico-mechanical properties of chipboard]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga state technological University. Series: Forest. Ecology. Management], 2015, no. 1 (25), pp. 34-44 (in Russian).
5. Malysheva G.V. *Fizicheskaya khimiya adgezivnykh materialov* [Physical chemistry of adhesive materials]. *Materialovedenie* [Materials Science], 2005, no 6, pp. 38-40 (in Russian).
6. Ugryumov S.A. Tsvetkov V.E. *Primenenie teorii adgezii i smachivaniya dlya modifikatsii fenolformal'degidnogo oligomera, ispol'zuemogo dlya osmoleniya kostry* [Application of the theory of adhesion and wetting to the modification of phenol-formaldehyde oligomer used for fires oiled]. Moscow State Forest University Bulletin – *Lesnoy vestnik*, 2008, № 2, pp. 104-106 (in Russian).
7. Ugryumov S.A., Tsvetkov V.E. *Modifitsirovanie karbamidoformal'degidnoy smoly dlya proizvodstva kostroplit* [Modification of urea-formaldehyde resins for the production of plates on the basis of fires flax]. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Woodworking industry], 2008, № 3, pp. 16-18 (in Russian).
8. Fedotov A. A., Ugryumov S.A. *Issledovanie svoystv drevesno-struzhechnykh plit na osnove sinteticheskikh smol s razlichnoy doley dobavki furanovoy smol* [Study of the properties of wood particleboards based on synthetic resins with various additives proportion of furan resin]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Klei. Sealants. Technology]. 2012, № 12, pp. 16-19 (in Russian).
9. Mamatov J. M. *Polimernye materialy na osnove furanovykh smol i ikh primenenie* [Polymeric materials based on furan resins and their applications]. Moscow, Chemistry, 1975. 89 p.
10. Ugryumov S.A. *Furanovye smoly v proizvodstve kleenykh drevesnykh materialov* [Furan resins in the manufacture of laminated wood materials]. Kostroma, KGTU, 2012, 142 p.

ОЦЕНКА СВОЙСТВ ФУРАНОВЫХ ОЛИГОМЕРОВ И ДРЕВЕСНЫХ ПЛИТ НА ИХ ОСНОВЕ

С.А. УГРЮМОВ, *проф., КГТУ, д-р техн. наук*⁽¹⁾,
Д.А. СМИРНОВ, *асп. КГТУ*⁽¹⁾

ugr-s@yandex.ru, mtd@kstu.edu.ru

⁽¹⁾ФГБОУ ВПО «Костромской государственный технологический университет»
156005, г. Кострома, ул. Дзержинского, д. 17, КГТУ

В статье представлены сравнительные результаты экспериментальной оценки свойств фуранового олигомера (фурфуролацетонового мономера ФА) и фенолоформальдегидной смолы, а также древесно-стружечных плит, изготовленных на их основе. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии определена энергия активации фенолоформальдегидной смолы марки СФЖ-3014 и клеевого состава на основе фурфуролацетонового мономера ФА в смеси с отвердителем (п-толуолсульфонокислотой). Установлено, что клеевой состав на основе фурфуролацетонового мономера ФА имеет более низкие значения энергии активации, что обусловлено присутствием отвердителя п-толуолсульфонокислоты, которая обеспечивает быстрое отверждение. Исследование кинетики отверждения показало, что фенолоформальдегидная смола при нагревании имеет максимальный тепловой эффект, гораздо меньший тепловой эффект имеет клеевой состав на основе фурфурол-ацетонового мономера ФА, что свидетельствует о повышенной скорости реакции в нем в процессе отверждения, то есть клеевой состав на основе фурфуролацетонового мономера ФА отверждается более быстро и полно, что способствует повышению физико-механических свойств древесно-стружечных плит, изготовленных на ее основе. Для подтверждения данного аспекта в работе оценены сравнительные свойства древесных плит на основе фенолоформальдегидного олигомера марки СФЖ-3014 и фурфуролацетонового мономера марки ФА. Полученные результаты показали, что плиты на основе фурановых олигомеров обладают повышенной прочностью и водостойкостью. Таким образом, применение фурановых олигомеров, например, фурфуролацетонового мономера ФА, позволяет получать древесно-стружечные плиты с повышенной прочностью и водостойкостью, что позволяет их эффективно использовать в строительстве и иных сферах в условиях с переменными температурно-влажностными воздействиями.

Ключевые слова: древесно-стружечная плита, фурановый олигомер, дифференциально-сканирующая калориметрия, отверждение, физико-механические свойства.

Мировое производство и потребление плит возрастают с каждым годом, находя новые сферы применения и вытесняя пиломатериалы и изделия из натуральной древесины. В качестве связующих при производстве плитных древесных материалов обычно используются карбамидоформальдегидные и фенолоформальдегидные олигомеры [1, 2]. Плиты, изготовленные с применением этих связующих, обладают множеством преимуществ, а именно, относительно малой стоимостью материала, достаточной прочностью, однородностью материала и т. д. В то же время основная часть плит имеет невысокую водостойкость, что приводит к деформациям от воздействия влаги или воды и ограничивает их применение [3].

Одним из способов повышения водостойкости и снижения токсичности древесных плит является применение при их изготовлении альтернативных клеев с высокими адгезионными свойствами, способных формировать надежные клеевые связи. Одним из

представителей альтернативных связующих являются олигомеры фуранового ряда [4]. В отвержденном состоянии фурановые олигомеры обладают повышенной прочностью и водостойкостью, поэтому эффективно используются при производстве пластрасформов, пластбетонных, при проведении футеровочных работ [5]. Растворы фурановых олигомеров относительно легко проникают в клеточные стенки древесины, повышая сопротивление возгоранию, водо- и влагостойкость, физико-механические характеристики [6]. Представляет практический интерес оценка свойств фуранового олигомера и древесных плит на его основе в сравнении с представителями широко применяемых водостойких клеев и плит.

Для оценки химической структуры и свойств методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [7,8] определена энергия активации фенолоформальдегидной смолы марки СФЖ-3014 и клеевого состава на основе фурфуролацетонового мо-

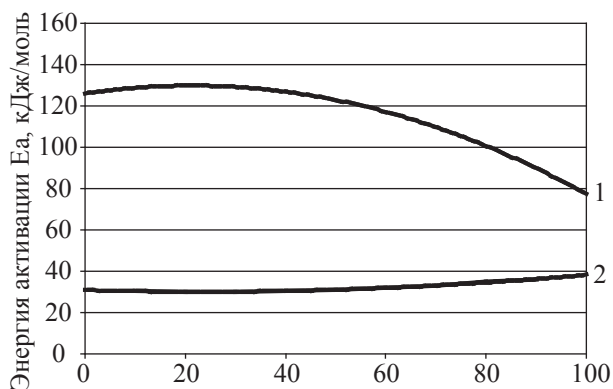


Рис. 1. Энергия активации от степени превращения:
1 – фенолоформальдегидная смола СФЖ-3014;
2 – клеевой состав на основе фурфурол-ацето-
нового мономера ФА

Fig. 1. The activation energy from the conversion:
1 – phenol-formaldehyde resin СФЖ-3014;
2 – adhesive composition based on monomer
furfural acetone– ФА

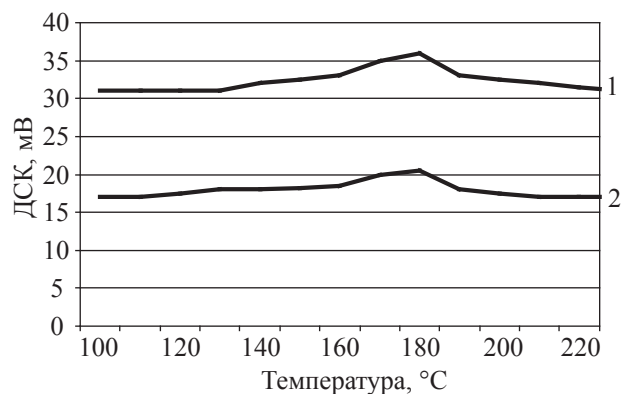


Рис. 2. Кривые ДСК отверждения смол: 1 – феноло-
формальдегидная смола СФЖ-3014; 2 – клеевой
состав на основе фурфурол-ацетонового моно-
мера ФА

Fig. 2. ДСК curves of curing resins: 1 – phenol-
formaldehyde resin СФЖ-3014; 2 – adhesive
composition based on monomer furfural
acetone– ФА

номера ФА в смеси с 5 масс. ч отвердителя (п-толуолсульфокислотой). Метод ДСК позволяет проанализировать переходные состояния полимеров. Энергия, которую необходимо затратить, чтобы привести систему в переходное состояние, называется энергией активации, при этом, чем больше энергия активации, тем медленнее протекает реакция, и наоборот, чем меньше энергия активации, тем быстрее при данной температуре будет протекать процесс [9].

Оценка энергии активации исследуемых смол проводилась на дифференциально-сканирующем калориметре производства Mettler Toledo (Швейцария). Анализ данных проводился по методу Вязовкина, который позволяет получить зависимость энергии активации от степени превращения смолы (α). На рис. 1 представлена зависимость энергии активации (E_a) от степени превращения (α) анализируемых клеев.

Как видно из рис. 1, клеевой состав на основе фурфурол-ацетонового мономера ФА имеет более низкие значения энергии активации, что обусловлено присутствием отвердителя п-толуолсульфокислоты, которая обеспечивает быстрое отверждение.

Метод ДСК является также продуктивным для исследования химических реакций получения и деструкции полимерных

материалов, прежде всего, по параметрам тепловых эффектов – экзотермических в случае отверждения фенолоформальдегидной и фурановой резольных смол. Теплота, выделяемая при нагревании образца в калориметре, при условии неизменности его массы в ходе опыта, является прямым отражением хода реакции [7, 8]. Поэтому было также проведено исследование кинетики отверждения фенолоформальдегидной смолы марки СФЖ-3014 и клеевого состава на основе фурфуролацетонового мономера ФА в смеси с 5 масс.ч отвердителя (п-толуолсульфокислотой).

Измерения исследуемых смол проводились в закрытых стальных тиглях, способных выдерживать давление паров до 15 МПа. Динамические ДСК измерения проводились при скорости нагрева 20 °С/мин в диапазоне температур от 25 до 350 °С. Масса навесок образцов была в пределах 5–10 мг. На рис. 2 представлена кинетика отверждения фенолоформальдегидной смолы СФЖ-3014 и клеевого состава на основе фурфуролацетонового мономера ФА.

На кривых ДСК виден экзотермический пик в температурной области 160–180 °С. При этом исходная фенолоформальдегидная смола при нагревании имеет максимальный тепловой эффект, гораздо меньший тепловой эффект имеет клеевой состав на основе фурфу-

рол-ацетонового мономера ФА, что свидетельствует о повышенной скорости реакции в нем в процессе отверждения. Предположительно тепловой эффект в температурной области 160–180 °С связан с выделением некоторого количества воды при реакции поликонденсации фенолоформальдегидной смолы [1, 10]. Скорость и количество образующейся воды возрастает с повышением температуры. Образование воды при поликонденсации мономера ФА обосновано реакциями взаимодействия карбонильных групп с метилольными группами или с α -водородом фуранового цикла [11].

В целом, клеевой состав на основе фурфуролацетонового мономера ФА отверждается более быстро и полно, что способствует повышению физико-механических свойств древесно-стружечных плит, изготовленных на ее основе. Для подтверждения данного аспекта в работе оценены также сравнительные свойства древесных плит на основе фенолоформальдегидного олигомера марки СФЖ-3014 и фурфуролацетонового мономера марки ФА. Для изготовления образцов использовалась специальная резаная стружка лиственных и хвойных пород древесины с отбором фракции 10/2. Изготовление плит проводилось в лабораторном гидравлическом прессе П100-400 при следующих постоянных факторах: толщина плит 16 мм, расчетная плотность плит 700 кг/м³, удельное давление прессования 2 МПа температура прессования 180 °С, продолжительность выдержки под давлением 8 мин, расход связующего 12 % от массы абсолютно сухой стружки.

Полученные результаты показали, что плиты на основе фурановых олигомеров обладают повышенными физико-механическими характеристиками. Так, древесно-стружечные плиты на основе фурфурол-ацетонового мономера ФА обладают повышенной прочностью – на основе стружки хвойных пород предел прочности при изгибе составляет 30,3 МПа, предел прочности при отрыве перпендикулярно к пласти 0,55 МПа. На основе стружки лиственных пород предел прочности при изгибе составляет 19,0 МПа, предел прочности при отрыве перпендикулярно к пласти 0,49 МПа. Данные прочностные показатели в

целом примерно на 30 % выше по сравнению с показателями плит на основе фенолформальдегидной смолы.

Разбухание плит на основе стружки хвойных пород и фурфуролацетонового мономера составляет 10,8 %, на основе стружки лиственных пород 16 %, водопоглощение не превышает 30 %. Данные показатели ниже примерно на 50–55 % по сравнению с аналогичными показателями плит на основе фенолформальдегидной смолы.

Таким образом, применение фурановых олигомеров, например, фурфуролацетонового мономера ФА, позволяет получать древесно-стружечные плиты с повышенной прочностью и водостойкостью, что позволят их эффективно использовать в строительстве и иных сферах в условиях с переменными температурно-влажностными воздействиями.

Библиографический список

1. Кондратьев, В.П. Синтетические клеи для древесных материалов / В.П. Кондратьев, В.И. Кондращенко. – М.: Научный мир, 2004. – 520 с.
2. Азаров, В.И. Полимеры в производстве древесных материалов – 2-е изд. / В.И. Азаров, В.Е. Цветков. – М.: МГУЛ, 2006. – 236 с.
3. Угрюмов, С.А. Комплексные способы повышения физико-механических свойств древесно-стружечных плит / С.А. Угрюмов, А.А. Федотов, А.В. Осетров // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование, 2015. – № 1(25). – С. 34–44.
4. Угрюмов, С.А. Фурановые смолы в производстве клеевых древесных материалов / С.А. Угрюмов. – Кострома: КГТУ, 2012. – 142 с.
5. Оробченко, Е.В. Фурановые смолы / Е.В. Оробченко, Н.Ю. Прянишникова. – Киев: Издательство технической литературы, 1963. – 166 с.
6. Маматов, Ю.М. Полимерные материалы на основе фурановых смол и их применение / Ю.М. Маматов. – М.: Химия, 1975. – 89 с.
7. Берштейн, В.А. Дифференциальная сканирующая калориметрия в физикохимии полимеров / В.А. Берштейн, В.М. Егоров. – Л.: Химия. 1990. – 256 с.
8. Чуднов, И.В. Особенности исследования свойств гибридных полимерных связующих методом дифференциально-сканирующей калориметрии / И.В. Чуднов, Э.Ш. Ахметова, Г.В. Малышева // Материаловедение. – 2013. – № 5. – С. 22–25.
9. Кудрявцев, А.А. Составление химических уравнений / А.А. Кудрявцев. – М.: Просвещение, 1968. – 359 с.
10. Малышева, Г.В. Физическая химия адгезивных материалов / Г.В. Малышева // Материаловедение. – 2005. – № 6. – С. 38–40.
11. Берчфилд, Г.П. Газовая хроматография в биохимии / Г.П. Берчфилд, Е.Е. Сторрс. – М.: Мир, 1964. – 620 с.

THE ASSESSMENT OF PROPERTIES OF FURAN OLIGOMERS
AND WOOD-BASED PANELS BASED ON THEM

Ugryumov S.A., Prof. KSTU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Smirnov D.A., KSTU⁽¹⁾

ugr-s@yandex.ru, mtd@kstu.edu.ru

⁽¹⁾ FGBOU VO Kostroma state university of technology, 156005, Kostroma, Dzerzhinsky str., 17, KSTU

The article presents the comparative results of experimental evaluation of properties of furan oligomer (furfuralcohol monomer FA) and phenol-formaldehyde resin, as well as chipboards based on them. By the method of differential scanning calorimetry energy of activation of a CFG-3014 phenol-formaldehyde resin and that of the adhesive composition on the basis of the furfuralcohol monomer (FA) in the mixture with the hardener (n-toluensulfonate) have been determined. It is found that the adhesive composition on the basis of the furfuralcohol monomer FA has lower values of activation energy due to the presence of hardener n-base, which provides fast curing. The study of curing kinetics showed that a phenol-formaldehyde resin, when heated, has a maximum heat effect, an adhesive composition based on a furfuralcohol monomer FA has a much less heat effect, which indicates the higher rate of reaction in the curing process, that is, the adhesive composition on the basis of the furfuralcohol monomer FA is cured more quickly and completely, which improves physical and mechanical properties of particleboards made on its basis. To confirm this conclusion the paper estimates the comparative properties of wood boards produced on the basis of CFG -3014 phenol-formaldehyde oligomer and those produced with the FA furfuralcohol monomer. The results showed that the boards produced with furan oligomers have higher strength and water resistance. Thus, the use of furan oligomers, for example, a FA furfuralcohol monomer, allows to produce particleboards with higher durability and resistance which makes it possible to apply them effectively in civil engineering and other industrial areas under conditions of variable temperatures and high humidity.

Keywords: wood chipboard, phenol-oligomer, furan oligomer, chemical composition, differential scanning calorimetry, the cure, physical-mechanical properties.

References

1. Kondrat'ev V.P., Kondrashenko V.I. *Sinteticheskie klei dlya drevesnykh materialov* [Synthetic adhesives for wood materials]. Moscow, Scientific world, 2004. 520 p.
2. Azarov V.I. *Polimery v proizvodstve drevesnykh materialov* [Polymers in the production of wood-based materials]. Moscow: MSFU, 2006. 236 p.
3. Ugryumov S.A., Fedotov A.A., Osetrov A.V. *Kompleksnye sposoby povysheniya fiziko-mekhanicheskikh svoystv drevesno-struzhechnykh plit* [Complex methods of increasing the physico-mechanical properties of chipboard]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga state technological University. Series: Forest. Ecology. Management], 2015, №. 1 (25), pp. 34-44 (in Russian).
4. Ugryumov S.A. *Furanovye smoly v proizvodstve kleenykh drevesnykh materialov* [Furan resins in the manufacture of laminated wood materials]. Kostroma: KGTU, 2012, 142 p.
5. Orobchenko E.V., Pryanishnikova N.Yu. *Furanovye smoly* [Furan no-bake resin]. Kiev: Publishing house of technical literature, 1963, 166 p.
6. Mamatov Yu.M. *Polimernye materialy na osnove furanovykh smol i ikh primeneniye* [Polymeric materials based on furan resins and their applications]. Moscow: Chemistry, 1975, 89 p.
7. Bershteyn V.A., Egorov V.M. *Differentsial'naya skaniruyushchaya kalorimetriya v fizikokhimii polimerov* [Differential scanning calorimetry in the physical chemistry of polymers]. Leningrad: Chemistry, 1990, 256 p.
8. Chudnov I.V., Akhmetov E.S., Malysheva G.V. *Osobennosti issledovaniya svoystv gibridnykh polimernykh svyazuyushchikh metodom differentsial'no-skaniruyushchey kalorimetrii* [Features of the study properties hybrid polymer binder by the method of differential scanning calorimetry]. *Materialovedenie* [Materials Science], 2013. № 5. pp. 22-25 (in Russian).
9. Kudryavtsev A.A. *Sostavlenie khimicheskikh uravneniy* [Compilation of chemical equations]. Moscow: Education, 1968, 359 p.
10. Malysheva G.V. *Fizicheskaya khimiya adgezivnykh materialov* [Physical chemistry of adhesive materials]. *Materialovedenie* [Materials Science], 2005, № 6. pp.38-40 (in Russian).
11. Berchfeld G.P., Storrs E.E. *Gazovaya khromatografiya v biokhimii* [Gas chromatography in biochemistry], Moscow: Mir, 1964, 620 p.

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО КАЧЕСТВА ДРЕВЕСИНЫ НА КОРНЮ

В.И. ФЕДЮКОВ, проф., ПГТУ, д-р. техн. наук⁽¹⁾,

Е.Ю. САЛДАЕВА, доц., ПГТУ⁽¹⁾,

Е.М. ЦВЕТКОВА, асп., ст. преподаватель, ПГТУ⁽¹⁾

fv48@mail.ru, saldaevaey@volgatech.net, tsvetkovaem@volgatech.net

⁽¹⁾ ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет
Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина д. 3

Рассмотрена актуальная для лесной отрасли проблема лесовыращивания с прогнозируемым техническим качеством древесины, включающем высокие физико-механические свойства. В работе предложен алгоритм комплексных исследований биофизических и акустических исследований древесины в стволовой части дерева, кроне и сеянцах с целью установления критериев прогнозирования технического качества привойного и посадочного материала, который разделен на два больших этапа: полевые и лабораторные исследования. Подробно изложены основные этапы исследований, выполняемые операции и приемы, а также предложены технические средства для реализации данных работ. В качестве критериев оценки используются макроструктурные показатели (средняя ширина годичного кольца, процент поздней древесины, количество годичных колец), прочность, динамический модуль упругости, низшая собственная частота колебаний образца консольного крепления. На основе теоретического исследования и анализа объективных методов и средств диагностики предложены новое устройство Резонанс-4 для неразрушающей ранней диагностики технического качества подростка, позволяющие оптимизировать процесс определения свойств древесины. Разработано новое устройство УНДПС-1 для неразрушающей диагностики физико-механических свойств древесины по величине сопротивления сверлению, непосредственно в лесных условиях без рубки дерева с одновременным извлечением керна для дальнейших исследований. Устройства выполнены на базе аккредитованной на техническую компетентность в системе ГОСТ Р лаборатории квалиметрии резонансной древесины Поволжского государственного технологического университета. Предложенный метод позволяет с наименьшими трудовыми и материальными затратами произвести предварительную техническую паспортизацию древостоя без рубки модельных деревьев, их трелевки, перевозки, распиловки на доски и изготовления из них стандартных образцов.

Ключевые слова: техническое качество древесины, физико-механические свойства, комплексные исследования, неразрушающая диагностика, критерии оценки.

В настоящее время в лесной отрасли особую актуальность приобрел вопрос квалиметрической оценки качества древесины с учетом возросших требований как потенциального сырья с необходимым набором физико-механических показателей, особенно на корню, причем, не только в технически зрелых древостоях, но в раннем возрасте в стадии подростка.

Однако реализация квалиметрического подхода затруднена по ряду причин. Во-первых, искусственное лесовозобновление сейчас ориентировано в основном на ускоренное получение большей биомассы, что часто формирует древесину с меньшей плотностью и пониженной жесткостью и прочностью. Во-вторых, практически не учитывается потенциальное техническое качество посадочного материала и привойного материала (кроне и сеянцах).

Под «техническим качеством» принято понимать физико-механические свойства древесины, которые в основном определяют-

ся с помощью разрушающих методов испытания на основе ГОСТ серии 16483, для чего требуется рубка дерева, изготовление стандартных образцов древесины, их калибровка и т. д. [1–5]. Отбор маточников, которые играют ключевую роль в повышении качества выращиваемой древесины, производится по визуально-морфологическим признакам, но внешний вид не всегда гарантирует, что древесина будет обладать высокими техническими характеристиками.

Для решения данного вопроса предлагается проведение комплексных биофизических и дендроакустических исследований древесины в стволовой части дерева, кроне и сеянцах с целью установления критериев прогнозирования технического качества привойного и посадочного материала. Алгоритм и перечень предлагаемых исследований, включающий проведение испытаний древесины в двух направлениях – полевых и лабораторных, представлен на рисунке и

Этапы проведения комплексного исследования
Stages of a comprehensive study

Этапы	Операции	Приемы	Оборудование
1. полевые исследования	1. изъятие образца древесины. 2. диагностика механических свойств древесины	1. изготовление образцов 2. калибровка и маркировка 3. анализ механических свойств по графикам	resistograph (резистограф) ундпс-1 пэвм
2. лабораторные исследования	2. определение физических показателей древесины	1. измерение геометрических размеров 2. определение массы и расчет плотности, влажности	штангенциркуль микрометр весы калькулятор
	3. определение макроструктурных показателей	1. определение ширины годовичных слоев 2. определение процента содержания поздней древесины	электронный дендрометр пэвм
	4. определение акустических показателей	1. установка образца в устройство 2. определение резонансной частоты	установка «резонанс-4» пэвм

в таблице. Для реализации комплексных исследований в лаборатории квалиметрии древесины ПГТУ разработаны соответствующие устройства, позволяющие в оперативном режиме с высокой точностью проводить испытания, сохраняя при этом жизнеспособность растущих деревьев [6–8].

Полевые исследования предусматривают определение качества древесины неразрушающим способом по прочности и макроструктурным показателям.

Полевые исследования заключаются в неразрушающей диагностике механических свойств древесины, которые определяются по величине сопротивления сверлению с одновременным извлечением из дерева керна с помощью устройства УНДПС-1 (рис. 1а). Устройство включает мерную вилку для фиксации на стволе, буровое устройство, рабочим органом которого является польный бурав, а также программно-аппаратный комплекс с источником питания. На данное устройство и способ подана заявка на патент.

Лабораторные исследования включают определение дендроакустических свойств древесины с помощью устройства Резонанс-4 (рис. 1б) и электронный дендрометр (рис. 1в) [9, 10].

Дендроакустические измерения с помощью устройства Резонанс-4 заключаются в

определении динамического модуля упругости по параметрам изгибных колебаний образца консольного крепления по формуле

$$E_{\text{дин.}} = 64\pi^2 l^4 \rho f_{\text{ист}}^2 / a_0^4 d^2,$$

где $E_{\text{дин.}}$ – динамический модуль упругости Юнга, МПа,

ρ – плотность образца, кг/м³

f – собственная (резонансная частота) образца, Гц,

a_0 – волновое число для основной моды колебаний, равное 1,875,

l – длина образца, м,

d – диаметр образца, м.

Полное описание методики проведения дендроакустических испытаний изложено в работах [3, 4].

Электронный дендрометр служит для определения макроструктурных анализов древесины в лабораторных условиях с максимальной автоматизацией процесса измерений и получения готовых обработанных результатов. Разработанная для дендрометра специальная ЭВМ-платформа позволяет одновременно получать информацию о следующих параметрах образца: средняя ширина годовичного кольца, процент поздней древесины, количество годовичных колец [5].

Предлагаемый комплексный подход является наиболее практичным, так как позволяет определить технические характе-

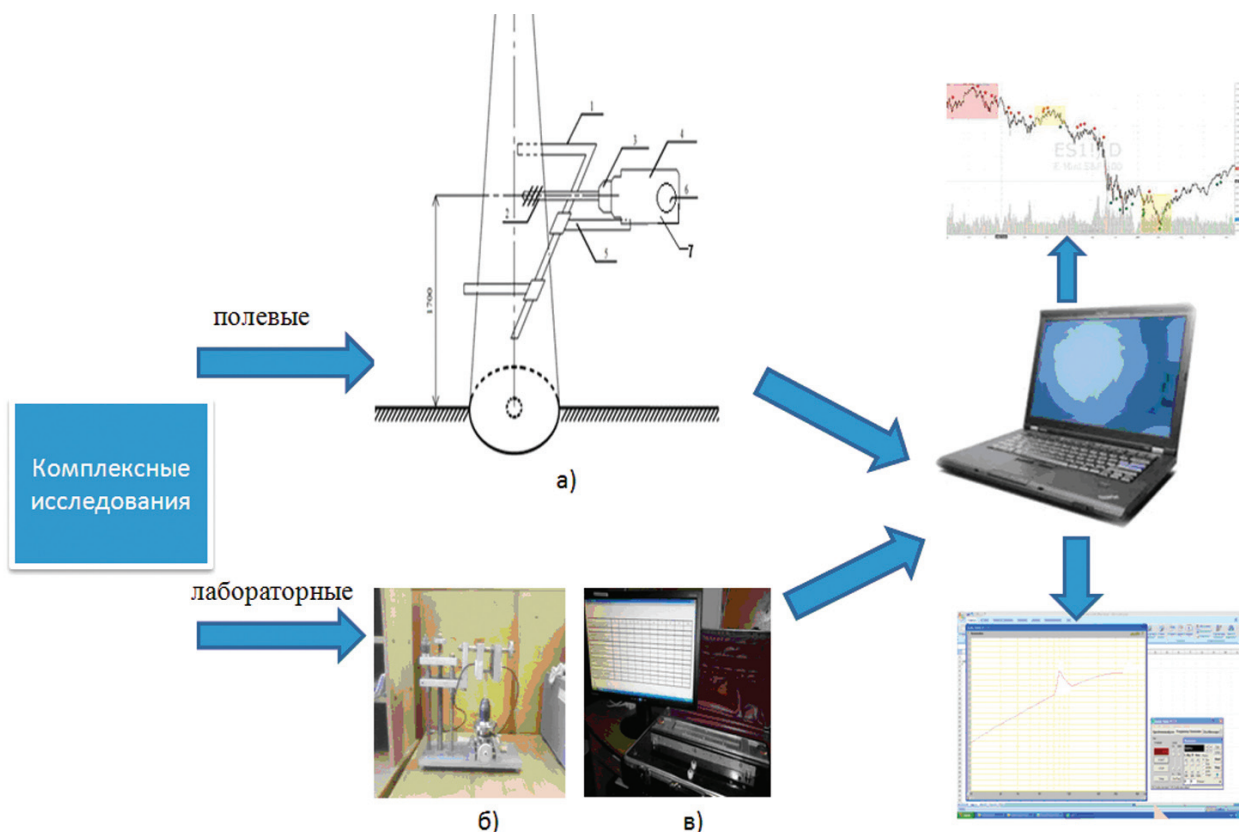


Рисунок. Структурная схема комплексных испытаний. а) устройство УНДПС-1 б) Установка Резонанс 4; в) Электронный дендрометр
 Figure. Block diagram of complex tests. а) The device UNDPS-1 б) Setting Resonance 4; в) E-dendrometr

ристики образцов разной формы и малого диаметра. Данный метод относится к неразрушающему и служит основой для установления и корректировки критериев прогнозирования технического качества привойного и посадочного материала. В настоящее время проводится апробация устройств и методик в полевых условиях на базе архивно-маточной плантации учебно-опытного лесхоза и ботанического сада Поволжского государственного технологического университета.

Первые результаты, полученные с помощью нового устройства, доказывают наличие достоверных взаимосвязей между физико-механическими и дендроакустическими показателями древесины в стволовой части и кроне дерева, что открывает новые возможности неразрушающей экспресс-диагностики технического качества и целевого отбора (выращиванию) древесины для получения сортиментов специального назначения.

Библиографический список

1. Федюков, В.И. Стандартизация резонансной древесины: необходимо совершенствование/ В.И. Федюков, Е.Ю. Салдаева, Е.М. Цветкова // Стандарты и качество. – 2014. – № 4 – С. 54–57.
2. Федюков, В.И. Состояние и перспектива ранней диагностики технических свойств подроста и молодняков / В.И. Федюков // Лесное хозяйство. – 2013. – № 1. – С. 18–20.
3. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения: Учебник для лесотехн. вузов 3–е издание, перераб. и доп. / Б.Н. Уголев. – М.: МГУЛ, 2001. – 340 с.
4. Федюков, В.И. Ранняя диагностика технического качества подроста как важный элемент интенсификации лесопользования в России / В.И. Федюков, Е.Ю. Салдаева, Е.М. Цветкова // Лесной журнал. – 2012. – № 6. – С. 16–23.
5. Шарапов, Е.С. Результаты экспериментальных исследований свойств древесины круглых лесоматериалов по радиусу ствола / Е.С. Шарапов, А.С. Торопов, В.Ю. Чернов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2012. – №2. – С. 162–167.
6. Yoshihara, H. Off-axis Young's modulus and off-axis shear modulus of wood measured by flexural vibration tests. Yoshihara H, *Holzforschung*. 2012. 66, №2. – p.207–213.
7. Салдаева, Е.Ю. Теоретическое обоснование способа оценки резонансных свойств древесины в раннем

- возрасте на корню / Е.Ю. Салдаева, Э.А. Анисимов, Е.М. Цветкова // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – №4. – С. 135–139.
8. Салдаева, Е.Ю. Предварительное диагностирование прочностных свойств древесины по показателю динамического модуля упругости вибрационным способом» / Е.Ю. Салдаева, Е.М. Цветкова // *Вестник ПГТУ. Сер.: «Лес. Экономика. Природопользование»*. – 2014. – №2. – С. 53–63.
9. Pavlovcs, Gunars. Relationship between the anatomical structure elements and physical properties in the trunk transverse and longitudinal direction for wood of Norway spruce growing in Latvia. Pavlovcs Gunars, Dolacis Janis, Antons Andis, Cirule Dace. *Ann.Warsaw Univ.Life Sci. Forest. and Wood Technol.*2010№72, p. 124–128.
10. Пат. 2439561 РФ. МПК А 01 G 33/46. Способ ранней диагностики резонансных свойств древесины /Федюков В.И., Салдаева Е.Ю.; заявитель и патентообладатель Марийский государственный технологический университет.–№2009111148:заяв. 26.03.09; опубл. 10.01.12 Бюл. №1– 5с.

INTEGRATED ASSESSMENT OF THE TECHNICAL QUALITY OF STANDING WOOD

Fedyukov V.I., Prof. VSUT, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Saldayeva E.Yu., Assoc. Prof. VSUT⁽¹⁾; Tsvetkova E.M., Senior Teacher VSUT⁽¹⁾

fiv48@mail.ru, saldaevaey@volgatech.net, tsvetkovaem@volgatech.net

⁽¹⁾ Volga State University of Technology Russian Federation, the Republic of Mari El, Yoshkar-Ola, pl. Lenina 3

The article deals with a relevant for the forest sector problem of growing forests with predictable technical wood quality, i.e., with high physical and mechanical properties. In this paper we propose an integrated algorithm of biophysical and acoustic studies of wood in the stem area of a tree crown and that of seedlings to establish criteria for predicting the technical quality of graft material and planting material; the research has been divided into two major stages: field and laboratory studies. The main stages of the research, i.e., operations and techniques, have been described in detail and certain technical means to carry out this work have also been proposed. The macro-structural indicators (the average growth ring width, the percentage of late wood, the density of annual rings), strength, dynamic modulus of elasticity, the lower natural frequency of a sample have been used as the evaluation criteria. On the basis of theoretical research and objective analysis of methods and means of diagnostics a new device Resonance-4 for non-destructive early diagnosis of the technical quality of undergrowth has been proposed to optimize the process of determining the wood properties. A new device UNDP5-1 has been developed to carry out non-destructive diagnostics of physical and mechanical wood properties by measuring the resistance to drilling, directly in the forest without felling a tree with simultaneous extraction of the core for further research. The device is made on the basis of accredited for technical competence in the GOST R system of the laboratory of Qualimetry resonant wood at Volga state technological University. The proposed method allows to produce advanced technical certification of forest without felling model trees, logging, transportation, sawing boards and making them standard samples with the lowest labor and material costs.

Keywords: technical quality of wood; physical and mechanical properties; complex research, non-invasive diagnostics; evaluation criteria.

References

1. Fedyukov V.I., Saldayeva E.Yu., Tsvetkova E.M. *Standartizatsiya rezonansnoy drevesiny: neobkhodimo sovershenstvovanie* [Standardization resonant wood: should be improved]. *Standarty i kachestvo*. [Standards and quality]. 2014. № 4. pp. 54-57.
2. Fedyukov V.I. *Sostoyaniye i perspektiva ranney diagnostiki tehnikeskikh svoystv podrosta i molodnyakov* [Status and prospects of early diagnosis of technical properties of juvenile and saplings]. *Lesnoye hozyaystvo* [Forestry]. 2013. № 1. pp. 18-20.
3. Ugolev B.N. *Drevesinovedeniye s osnovami lesnogo tovarovedeniya* [Wood–forest with the basics of merchandising]. Moscow: MGUL, 2001. pp. 340.
4. Fedyukov V.I., Saldayeva E.Yu., Cvetkova E.M. *Rannyyaya diagnostika tehnikeskogo kachestva podrosta kak vazhnyy yelement intensifikatsii lesopol'zovaniya v Rossii* [Early diagnosis of the technical quality of regrowth as an important element of the intensification of forest management in Russia]. *Lesnoy zhurnal* [Forest Magazine]. 2012. № 6. pp. 16-23.
5. Sharapov E.S., Toropov A.S., Chernov V.Yu. *Rezultaty yeksperimental'nykh issledovaniy svoystv drevesiny kruglykh lesomaterialov po radiusu stvola* [The results of experimental studies of the properties of wood round timber at the radius of the barrel]. *Moscow State Forest University bulletin – Lesnoy vestnik*. 2012. № 2. pp. 162-167.
6. Yoshihara H. Off-axis Young's modulus and off-axis shear modulus of wood measured by flexural vibration tests. *Yoshihara H, Holzforschung*.2012. 66, №2. pp.207-213.
7. Saldayeva E.Yu., Anisimov Ye.A., Cvetkova E.M. *Teoreticheskoye obosnovaniye sposoba ocenki rezonansnykh svoystv drevesiny v rannem vozraste na kornyu* [Theoretical substantiation of a method for evaluating the resonance properties of wood at a young age on the vine]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic research]. 2015. № 4. pp. 135-139.
8. Saldayeva E.Yu., Cvetkova E.M. *Predvaritel'noye diagnostirovaniye prochnostnykh svoystv drevesiny po pokazatelyu dinamicheskogo modulya uprugosti vibratsionnym sposobom* [A preliminary diagnosis of the strength properties of wood in terms of dynamic elastic modulus of the vibration method]. *Vestnik PGU «Les. Yekonomika. Prirodopol'zovaniye»* [PSTU Bulletin «Les. Economy. Nature»] 2014. № 2. pp. 53-63.
9. Pavlovcs Gunars. Relationship between the anatomical structure elements and physical properties in the trunk transverse and longitudinal direction for wood of Norway spruce growing in Latvia. Pavlovcs Gunars, Dolacis Yanis, Antons Andis, Cirule Dace. *Ann. Warsaw Univ.Life Sci.Forest. and Wood Technol.* 2010. №72, pp. 124-128.
10. Fedyukov V.I., Saldayeva E.Yu. *Sposob ranney diagnostiki rezonansnykh svoystv drevesiny* [The method early detection of the resonant properties of the wood]. Patent RF, № 2439561, 2012.

УДК 630.81; 674.025; 674.025

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ТОНКИМИ БУРОВЫМИ СВЕРЛАМИ

Е.С. ШАРАПОВ, доц., ПГТУ, канд. техн. наук⁽¹⁾,

В.Ю. ЧЕРНОВ, доц., ПГТУ, канд. техн. наук⁽¹⁾,

Е.В. СМЕРНОВА, асп. ПГТУ⁽¹⁾

sharapoves@volgatech.net, chernov.vas7936@yandex.ru, smirnovaev@volgatech.net

⁽¹⁾ Поволжский государственный технологический университет,
424000, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Российская Федерация, пл. Ленина д. 3

Одним из перспективных методов определения свойств древесины является метод, основанный на измерении усилия сопротивления древесины и древесных материалов просверливанию. При проектировании новых устройств для исследования свойств древесины сверлением, а также повышения точности измерений, достоверности получаемых результатов и износостойкости режущего инструмента первоначально необходимо остановиться на выборе рациональных скоростных характеристик, а процесс сверления следует рассматривать в кинематике. В работе представлены основные геометрические параметры используемых тонких буровых сверл, формулы определения угла движения при сверлении древесины. Основным критерием при выборе режимов процесса сверления древесины тонкими буровыми сверлами является положительный задний кинематический угол резания, который зависит от конструкции режущего инструмента, скоростей главного движения и подачи. В результате исследований получена математическая модель взаимосвязи скорости вращения тонкого бурового сверла, скорости подачи и расстояния от оси вращения сверла до точки на лезвии резцов с величиной кинематического заднего угла резания. С целью повышения точности измерений свойств древесины при использовании мобильного устройства для диагностики состояния древесины и древесных материалов сверлением, а также при увеличении скоростей подачи тонкого бурового сверла следует увеличить величину заднего контурного угла резания резцов до 20–30°. В работе также даны рекомендации по изменению конструкции тонкого бурового сверла для обеспечения высокой точности измерения свойств древесины сверлением с увеличением скорости подачи режущего инструмента.

Ключевые слова: неразрушающий контроль качества древесины, измерение сопротивления сверлению, углы резания, центровое сверло, резистограф; ResistYX.

Сверление является одним из наиболее сложных процессов механической обработки древесины. Лезвия сверла осуществляют сложные виды резания, зависящие от конструкции режущего инструмента и направления подачи относительно расположения волокон в древесине. В современной науке об обработке древесины резанием накоплен большой объем результатов теоретических и экспериментальных исследований, однако остается еще немало «белых пятен». В частности, слабо изучены процессы сверления древесины сверлами с диаметрами режущей головки менее 5 мм. Безусловно, инструмент с такими геометрическими параметрами не представляет существенного интереса для деревообрабатывающих производств и для исследователей. Однако практическое его использование только на первый взгляд кажется весьма ограниченным.

Древесина и древесные материалы, обладая уникальными свойствами, не теряют

популярности и сегодня. Совершенствуются методики и оборудование в таких областях, как неразрушающие методики определения свойств древесины, дендрохронология, экспертиза деревянных строительных конструкций [2, 3, 10, 11]. Результаты работ в этих направлениях представляют реальный интерес для лесного хозяйства, деревообработки, строительства и многих других направлений науки и производства.

Одним из современных методов определения свойств древесины является метод, основанный на измерении усилия сопротивления древесины просверливанию (мощности на сверление). Именно на процессе микросверления тонкими буровыми сверлами основана работа некоторых современных мобильных устройств для диагностики скрытых пороков в растущих деревьях, выявления дефектов и определения изменения свойств древесины по годичным слоям. Наиболее известными и востребованными на сегодня являются устройства Резистограф®

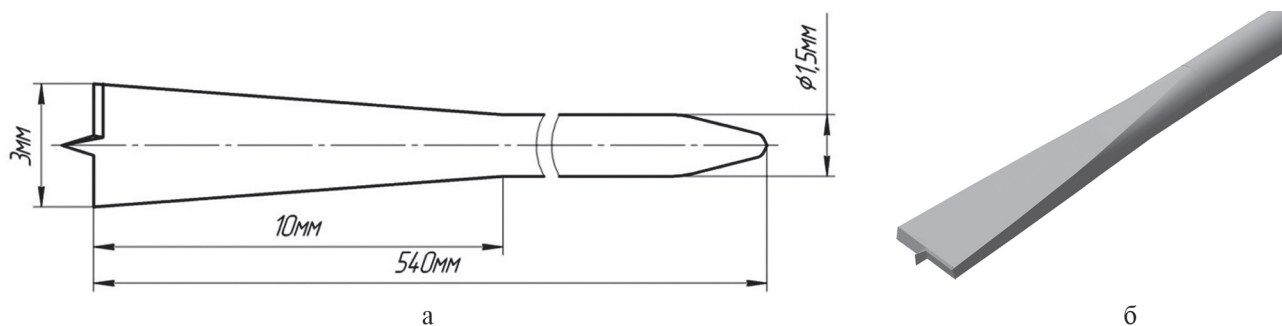


Рис. 1. Тонкое буровое сверло: а – основные размеры сверла; б – модель режущей головки тонкого бурового сверла

Fig. 1. A thin drill bit: a – the main dimensions of the drill; b – a model of the cutting head of a thin drill bit

(Rinntech, Хайдельберг, Германия) и IML-Resi (IML System GmbH, Вислох, Германия) [8–11]. Термин «микросверление» был принят зарубежными учеными в связи с использованием в данных устройствах тонких буровых сверл для получения отверстий диаметрами 2–3 мм с высокой частотой вращения режущего инструмента (до 5000 об./мин) и относительно невысокой скоростью подачи (до 1–1,5 м/мин) [7–11].

Авторский коллектив поставил перед собой задачи по разработке отечественного мобильного устройства для диагностики состояния древесины и проведению исследований в данном направлении. На сегодняшний день установлены контакты с ведущими фирмами-производителями оборудования в этой области, получен ряд патентов РФ на новые конструкции мобильных устройств для диагностики свойств древесины сверлением (№ 95128, 2448811, 2515342, 2515343), изготовлена лабораторная экспериментальная установка, проведен большой объем исследований (часть из них за рубежом), изготовлен коммерческий вариант мобильного устройства для диагностики растущих деревьев и деревянных строительных конструкций «ResistYX» (ООО «Новые лесные технологии», г. Йошкар-Ола, РФ) [4–6].

При разработке экспериментальной лабораторной установки важным этапом являлось определение рациональных скоростных характеристик процесса сверления. Правильно выбранные скоростные характеристики обеспечивают высокую точность измерения свойств древесины, достоверность получае-

мых результатов, способствуют повышению износостойкости режущего инструмента. Существует несколько вариантов конструкций режущих головок тонких буровых сверл, однако, на наш взгляд, наиболее совершенным является инструмент производства фирмы Rinntech (Хайдельберг, Германия), который и использовался для проведения представленных исследований.

Целью исследований, результаты которых представлены в данной работе, являлось определение влияния скоростных характеристик процесса сверления древесины на кинематические углы резания резцов тонкого бурового сверла.

Задачи, решаемые в данной работе:

1. Определить основные геометрические параметры тонкого бурового сверла.
2. Установить взаимодействие скоростных характеристик процесса сверления древесины с кинематическими углами резания резцов тонкого бурового сверла.
3. Определить рациональные скоростные характеристики процесса сверления древесины, обеспечивающие высокую точность измерений, быстродействие и износостойкость режущего инструмента.

Материалы и методы

Предмет исследований – тонкое буровое сверло (рис. 1), которое имеет плоскую режущую головку, направляющий центр и пару симметричных относительно оси резцов. По конструкции оно относится к центровым сверлам. Сверло изготовлено из стали, обладающей повышенным пределом упру-

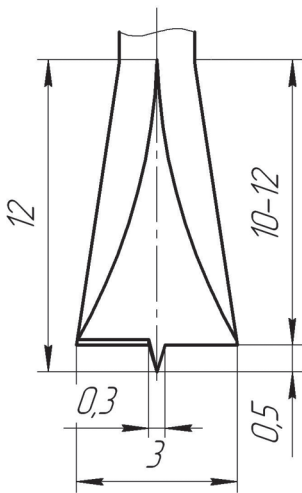


Рис. 2. Геометрические параметры режущей части сверла

Fig. 2. The geometrical parameters of the cutting part of a drill

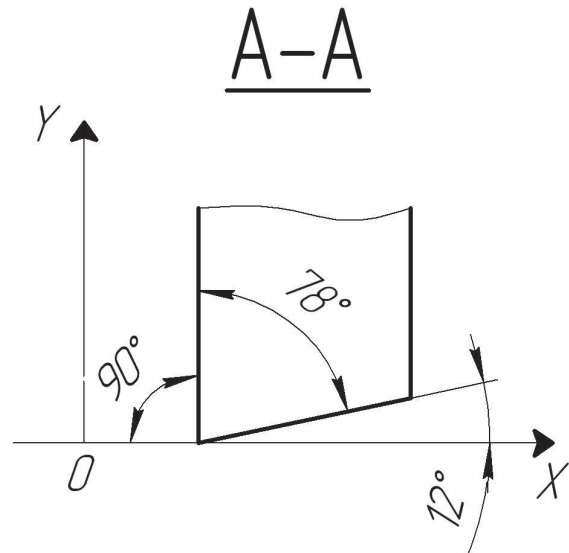


Рис. 3. Контурные углы резов сверла
Fig. 3. Contour angle cutters of a drill

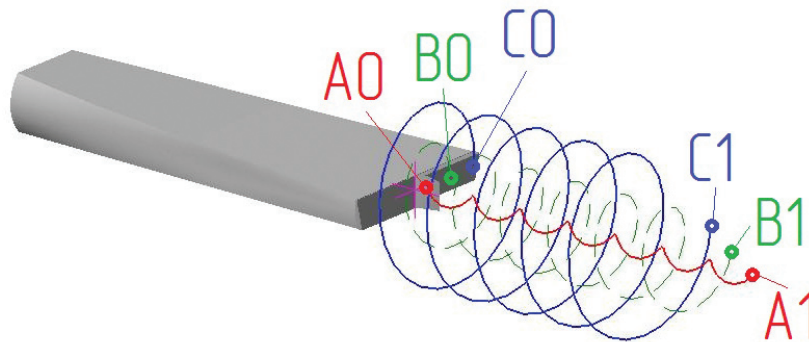


Рис. 4. Траектории движения точек, расположенных на лезвии сверла (A0-A1 – траектория точки, расположенной на лезвии у основания направляющего центра сверла; B0-B1 – траектория точки, расположенной на лезвии на расстоянии половины радиуса от оси сверла; C0-C1 – траектория точки, расположенной на лезвии на расстоянии радиуса от оси сверла)

Fig. 4. The trajectories of the points on the drill blade (A0, A1 – the trajectory of a point on the blade at the base of the pilot drill center; B0-B1 – the trajectory of a point on the blade at a distance of half the radius from the axis of the drill; C0-C1 – trajectory a point on the blade at the radius distance from the axis of the drill)

гости и прошедшей термическую обработку. Выбор материала тонкого бурового сверла основан на размерах и условиях его работы, длина просверливаемых отверстий достигает 500 мм. Данная конструкция и геометрические параметры тонкого бурового сверла наилучшим образом подходят для поперечного сверления древесины, лезвия сверла при этом совершают преимущественно продольно-поперечное резание.

Представленная конструкция позволяет повысить точность измерения свойств древесины по годичным слоям через опреде-

ление энергосиловых параметров процесса сверления.

В результате проведенных измерений и расчетов были определены основные геометрические параметры тонкого бурового сверла (рис. 2, 3), необходимые для расчета параметров процесса сверления.

Контурные углы резания тонкого бурового сверла (рис. 3): задний угол $\alpha = 12^\circ$; угол заострения $\beta = 78^\circ$; передний угол резания $\gamma \approx 0^\circ$.

В процессе сверления инструмент совершает круговые движения, а любая точка,

Варьируемые факторы и пределы их изменения
Variable factors and the limits of their change

Факторы	Уровни варьирования			Интервал варьирования
	-1	0	+1	
А – частота вращения тонкого бурового сверла n , об./мин	1000	5500	10000	4500
В – скорость подачи тонкого бурового сверла u , м/мин	0,05	0,525	1	0,475
С – расстояние от оси сверла до точки, расположенной на лезвии сверла r , мм	0,15	1,325	2,5	1,175

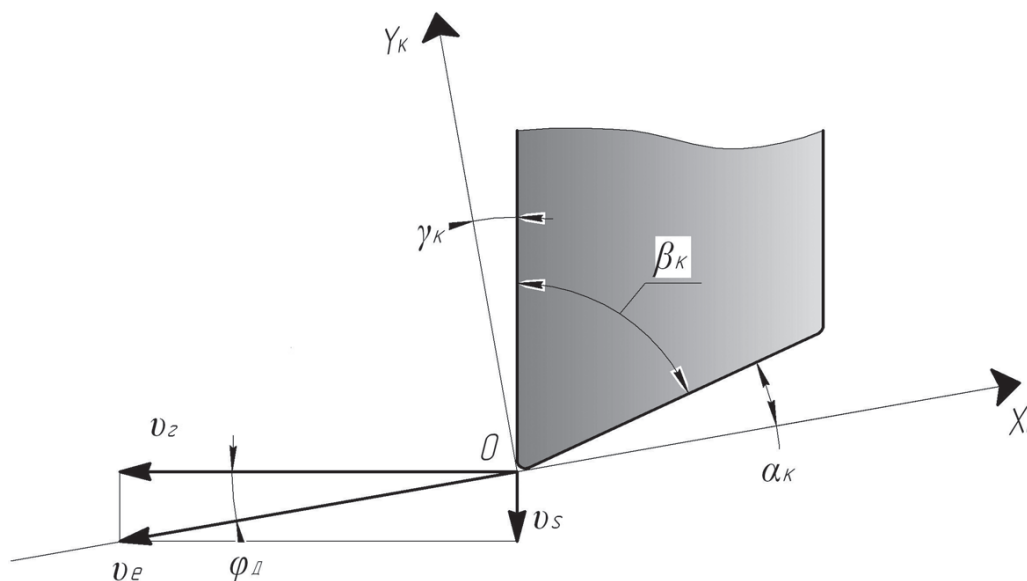


Рис. 5. Кинематические углы резания резцов в нормальном сечении и скорости: v_z – главного движения; v_s – подачи; v_e – результирующего движения резания

Fig. 5. Kinematic cutting angles of cutters in the normal section and speed: v_z – the main motion; v_s – feeding; v_e – the result of cutting motion

расположенная на его лезвиях, перемещается по цилиндрической винтовой линии. Радиус и угол наклона цилиндрической винтовой линии изменяются в зависимости от расстояния между рассматриваемой точкой на лезвии и осью вращения инструмента (рис. 4).

Скорость резания и кинематические углы резания также зависят от расстояния между рассматриваемой точкой на лезвии и осью вращения сверла, при этом изменяется угол движения φ_D (рис. 5) [1], достигая своего наибольшего значения вблизи оси вращения инструмента. Повышение величины угла движения отражается на увеличении трения задних поверхностей резцов сверла с плоскостью резания. Происходит увеличение мощности на сверление, и в ходе определения свойств древесины при сверлении снижается

точность измерений. Согласно выражениям (1, 2), величина угла движения зависит от скорости подачи и скорости резания, которую, в свою очередь, определяют исходя из частоты вращения и расстояния от оси вращения до точки на лезвии.

Для определения заднего кинематического угла резания необходимо найти угол движения [1]

$$\operatorname{tg} \varphi_D = \frac{v_s}{v_c} = \frac{1000 \cdot v_s}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r}, \quad (1)$$

где v_s – скорость подачи, м/мин,
 n – частота вращения тонкого бурового сверла, об./мин,
 r – расстояние от выбранной точки на лезвии резца до оси вращения инструмента (радиус резания), мм.

Факторный план исследований и выходная величина
Factorial design studies and the output value

№ п/п	Фактор А <i>n</i> , об./мин	Фактор В <i>u</i> , м/мин	Фактор С <i>r</i> , мм	Выходная величина α_k , град
1	1000	0,05	0,15	8,96
2	10000	0,525	1,325	11,647
3	5500	0,05	1,325	11,94
4	10000	0,05	0,15	11,7
5	5500	0,525	1,325	11,34
6	10000	1	0,15	5,94
7	5500	0,525	1,325	11,34
8	10000	1	2,5	11,64
9	1000	0,525	1,325	8,39
10	5500	0,525	0,15	6,21
11	5500	1	1,325	10,75
12	10000	0,05	2,5	11,98
13	1000	0,05	2,5	11,82
14	1000	1	0,15	-34,71
15	5500	0,525	2,5	11,65
16	1000	1	2,5	8,36
17	5500	0,525	1,325	11,34

Выразим из формулы (1) угол φ_D град

$$\varphi_D = \arctg\left(\frac{v_s}{v_z}\right) = \arctg\left(\frac{1000 \cdot v_s}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot r}\right). \quad (2)$$

При этом задний кинематический угол резания, град

$$\alpha_k = \alpha - \varphi_D, \quad (3)$$

где α – задний контурный угол резания, град.

Исходя из технических характеристик мобильного устройства для диагностики состояния древесины сверлением, геометрических параметров используемого тонкого бурового сверла и анализа факторов, влияющих на величину заднего кинематического угла резания, выбраны варьируемые факторы модели, а также пределы их изменения (табл. 1).

Для определения математической модели изменения величины заднего кинематического угла резания использовался центральный композиционный В-план второго порядка (ГОСТ 50.1.040-2002).

Результаты исследований

Разработка и анализ плана исследований осуществлялись в программе STATGRAPHICS Centurion XVI (Statpoint Technologies Inc., Уоррентон (VA), США), где

была составлена таблица плана эксперимента (табл. 2); значения отклика для каждого опыта были определены по формулам (2, 3).

Наибольшее влияние на величину заднего кинематического угла резания оказывают расстояние от оси вращения до точки на лезвии резца и скорость подачи бурового сверла. Регрессионная модель изменения заднего кинематического угла резания тонкого бурового сверла ($R^2 = 0,87$; скорректир. $R^2 = 0,69$; стандартная ошибка оценки регрессии = 6,15)

$$\begin{aligned} \alpha_k = & 2,64459 + 0,00249879 \cdot n - \\ & - 32,412 \cdot u + 11,7116 \cdot r - 1,26811 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + \\ & + 0,0023989 \cdot n \cdot u - 0,000943996 \cdot n \cdot r - \\ & - 5,49532 \cdot u^2 + 10,2141 \cdot u \cdot r - 2,64287 \cdot r^2. \end{aligned}$$

На основании результатов дисперсионного анализа (уровня значимости факторов) статистически значимые эффекты имеют все входные факторы и взаимодействие факторов В и С. Это подтверждает и карта Парето, где соответствующие им колонки пересекают вертикальную линию, представляющую 95 % доверительную вероятность.

Графическое представление результатов обработки данных отображено на примере поверхностей отклика выходной величины на рис. 6, 7 и контурного графика на рис. 8.

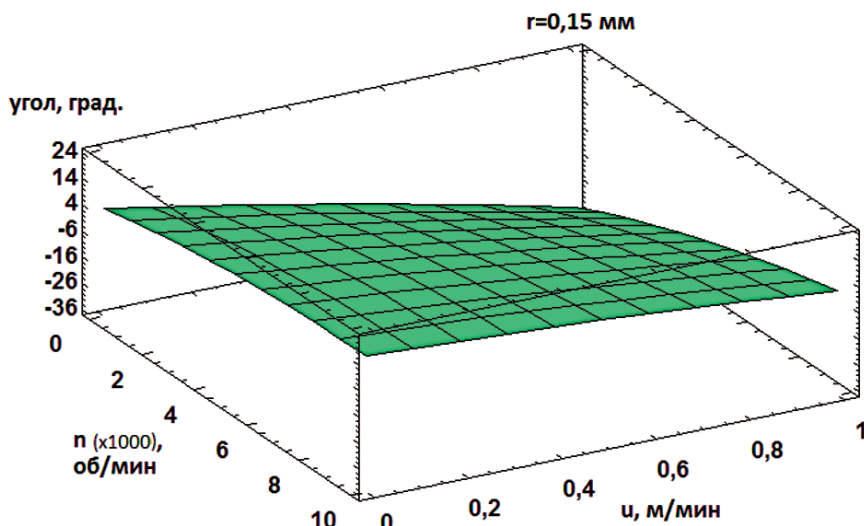


Рис. 6. График поверхности отклика выходной величины (расстояние от оси сверла до рассматриваемой точки на его лезвии 0,15 мм)

Fig. 6. Schedule of the response surface of the output variable (the distance from the axis of the drill to the point in question on its blade 0.15 mm)

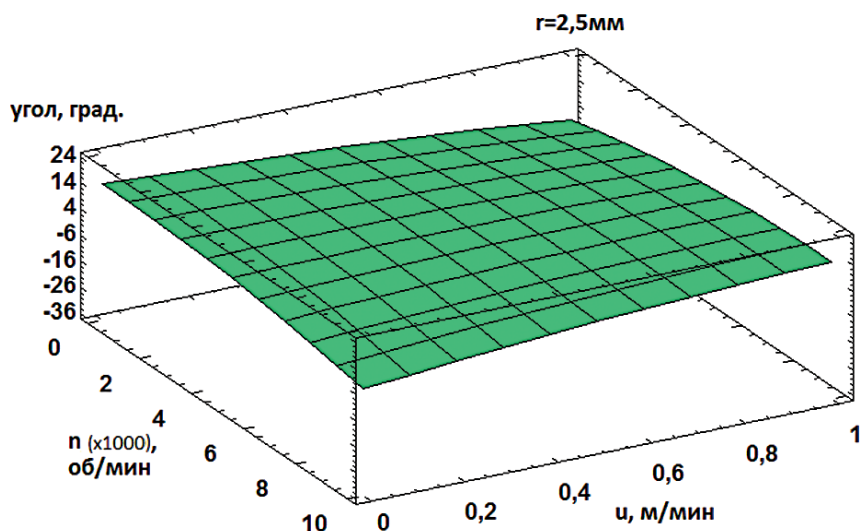


Рис. 7. График поверхности отклика выходной величины (расстояние от оси сверла до рассматриваемой точки на его лезвии 2,5 мм)

Fig. 7. Schedule the response surface of the output variable (the distance from the axis of the drill to the point in question on its blade 2,5 mm)

Разработанная экспериментальная лабораторная установка для диагностики состояния древесины сверлением оснащена электрическим двигателем привода резания с номинальной частотой вращения 4100 об./мин. Безусловно, повышение точности определения свойств древесины сверлением возможно при условии достижения положительных значений задних кинематических углов резцов тонкого бурового сверла. При исполь-

зовании разработанной экспериментальной установки рациональная скорость подачи находится в пределах 0,5 м/мин (рис. 8).

Выводы

Основным критерием при выборе режимов процесса сверления древесины тонкими буровыми сверлами является положительный задний кинематический угол резания, который зависит от конструкции

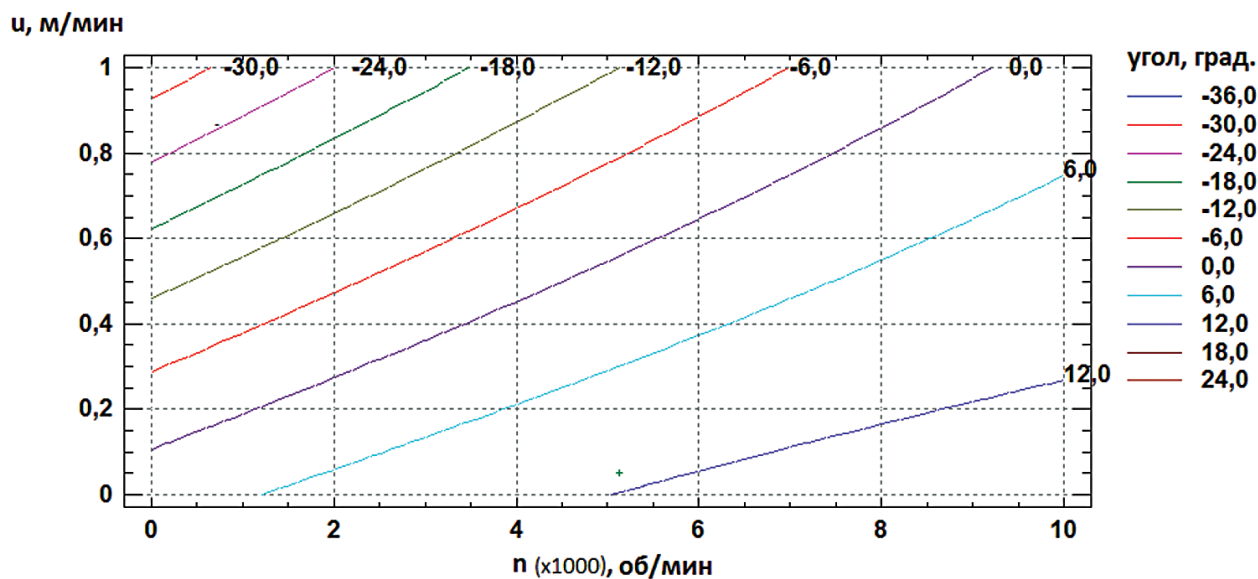


Рис. 8. Контурный график взаимодействия факторов (расстояние от оси сверла до рассматриваемой точки на его лезвии 0,15 мм)

Fig. 8. Contour graph interaction of factors (the distance from the axis of the drill to the point in question on its blade 0,15 mm)

режущего инструмента (контурных углов резания резцов), скоростей главного движения и подачи.

Полученная регрессионная зависимость и ее графические интерпретации (рис. 6–8) в пределах варьирования входных факторов позволяют определять рациональные скоростные режимы процесса сверления при определении свойств древесины и древесных материалов сверлением.

С целью повышения точности измерений свойств древесины при использовании мобильного устройства для диагностики состояния древесины и древесных материалов сверлением, а также при увеличении скоростей подачи тонкого бурового сверла следует увеличить величину заднего контурного угла резания резцов до 20–30°. Возможно использование конической заточки резцов, при этом величина заднего контурного угла резания резцов тонкого бурового сверла увеличивается при приближении к оси вращения инструмента.

Библиографический список

1. Любченко, В.И. Резание древесины и древесных материалов: учебное пособие для вузов / В.И. Любченко. – М.: Лесная пром-сть, 1986. – 296 с.
2. Полубояринов, О.И. Плотность древесины / О.И. Полубояринов. – М.: Лесная пром-сть, 1976. – 160 с.
3. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения: учебник для лесотехнических вузов / Б.Н. Уголев. – М.: МГУЛ, 2001. – 340 с.
4. Шарапов, Е.С. Исследование процесса сверления древесины с использованием устройства сбора данных NI USB 6008 / Е.С. Шарапов, В.Ю. Чернов // Изв. вузов. Лесн. журн. – 2012. – № 6. – С. 96–100.
5. Шарапов, Е.С. Обоснование конструкции устройства для исследования свойств древесины сверлением / Е.С. Шарапов, В.Ю. Чернов // Известия СПбГЛТА. – 2011. – № 195. – С. 134–142.
6. Шарапов, Е.С. Результаты экспериментальных исследований свойств древесины круглых лесоматериалов по радиусу ствола / Е.С. Шарапов, А.С. Торопов, В.Ю. Чернов // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2012. – №2. – С. 162–167.
7. Mattheck, C. VTA – Visual tree defect assessment / C. Mattheck, K. Betghe // Proc. 9th Int. Mett. Non-destructive testing, Madison, September 1993.
8. Rinn, F. Ein neues verfahren zur direkten messung der holzdichte bei Laub- und Nadelholzern / F. Rinn, B. Becker, B. Kromer // Dendrochronologia. 1990. № 7 P. 159-168.
9. Rinn F., Schweingruber F.H., Schar E. Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. Holzforschung. 1996. 50 (4), pp. 303-311.
10. Rinn, F. Resistographic visualization of tree-ring density variations / F. Rinn // Tree Rings, Environment and Humanity, Radiocarbon. 1996. P. 871-878.
11. Wang X., Wiedenbeck J., Ross R.J., Forsman J.W., Erickson J.R., Pilon C., Brashaw B.K. Nondestructive evaluation of incipient decay in hardwood logs. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-162. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. 2005. 11p.

KINEMATICS OF DRILLING PROCESS IN WOOD DRILLING RESISTANCE MEASUREMENTS

Sharapov E.S., Assoc. Prof. VSUT, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾; **Chernov V.Y.**, Assoc. Prof. VSUT, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾; **Smirnova E.V.**, pg. VSUT⁽¹⁾

sharapoves@volgatech.net, chernov.vas7936@yandex.ru, smirnovaev@volgatech.net

⁽¹⁾ Volga State University of Technology, 3 Lenin sq., Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, Russian Federation, 424000

One of the promising methods to determine both wood and wood-based material properties is a method based on measuring the drilling resistance. When designing new devices to study wood properties by drilling, as well as, to improve the measurement accuracy, the results reliability and the durability of a drilling tool, it is necessary, first of all, to focus on the rational choice of speed characteristics, and the drilling process should be considered through the kinematics. The paper presents some results of the basic geometrical parameters of boring drill bits used and the equation model to determine the movement angle during the drilling process. The main criterion to choose a mode of drilling process with boring drill bits is a positive clearance angle in kinematic, which depends on the design of the drill bit cutting head, cutting speed and feed rate. As a result of this research, we got a regression model of interaction between rotation speed of a drill bit, a feed rate and the distance from the axis of rotation of the drill bit to the point on the cutting edge with the clearance angle in kinematic. In order to improve the accuracy of wood properties' measurements with the use of the mobile device for wood and wood-based materials properties' evaluation by drilling, as well as by increasing the feed rates of the boring drill bits it is necessary to increase the clearance angle in static up to 20-30 degrees. Also, it can be recommended to change the design of a drill bit cutting head to achieve higher accuracy of wood properties' measurements by using conic sharpening of the cutting edges.

Keywords: non-destructive wood properties' evaluation; drilling resistance; cutting angles; spade-type drill bit Resistograph; ResistYX.

References

1. Lyubchenko V.I. *Rezanie drevesiny i drevesnyh materialov* [Wood and wood materials cutting]. Moscow, 1986. 296 p.
2. Poluboyarinov O.I. *Plotnost' drevesiny* [Wood density]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1976. 160 p.
3. Ugolev B.N. *Drevesinovedenie s osnovami lesnogo tovarovedeniya: Uchebnik dlya lesotekhnicheskikh vuzov* [The wood science with the basics timber merchandising]. Moscow, MGUL Publ., 2001. 340 p.
4. Sharapov E.S., Chernov V.Y. *Issledovanie processa sverleniya drevesiny s ispol'zovaniem ustroystva sbora dannyh NI USB 6008* [The research of wood drill process with using a data acquisition device NI USB 6008]. *Izv. vuzov. Lesn. Zhurn* [Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal], 2012, №. 6, pp. 96-100.
5. Sharapov E.S., Chernov V.Y. *Obosnovanie konstruksii ustroystva dlya issledovaniya svoystv drevesiny sverleniem* [Design of the drilling device for the wood properties researches substantiation]. *Izvestiya SPbGLTA*, 2011, №.195, pp. 134-142.
6. Sharapov E.S., Toropov A.S., Chernov V.Y. *Rezultaty eksperimental'nykh issledovaniy svoystv drevesiny kruglykh lesomaterialov po radiusu stvola* [Experimental researches results of wood properties along the round logs radius]. *Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik*, 2012, №. 2, pp. 162–167.
7. Mattheck C., Betghe K. VTA – Visual tree defect assessment. Proc. 9-th Int. Mett. non-destructive testing. Madison. September 1993.
8. Rinn F. et al. Ein neues Verfahren zur direkten Messung der Holzdichte bei Laub- und Nadelhölzern, *dendrochronologia* 7-1989. pp. 159-169.
9. Rinn F., Schweingruber F.H., Schar E. Resistograph and X-ray density charts of wood comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung*. 1996. 50 (4), pp. 303-311.
10. Rinn F. Resistographic visualization of tree-ring density variations. *Tree Rings. Environment and Humanity. Radiocarbon*. 1996. pp. 871-878.
11. Wang X., Wiedenbeck Y., Ross R.Y., Forsman Y.W., Erickson Y.R., Pilon C., Brashaw B.K. Nondestructive evaluation of incipient decay in hardwood logs. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-162. Madison. WI: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. 2005. 11 p.

ВЛИЯНИЕ ПОРОДЫ ДРЕВЕСИНЫ НА КАЧЕСТВО АКУСТИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ

С.В. ШЛЫЧКОВ, доц. ПГТУ, канд. техн. наук⁽¹⁾

shlychkovsv@volgatech.net

⁽¹⁾ Поволжский государственный технологический университет, 424000, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Российская Федерация, пл. Ленина д. 3

В работе рассматриваются тонкостенные конструкции из древесины. В случае их использования для корректировки звуковых полей они называются акустическими панелями. Считается, что для эффективной корректировки акустических параметров помещений необходимо создание такой конструкции, которая имела бы максимально плотный спектр до граничной частоты. На этой частоте длина изгибной волны становится равной длине звуковой волны, перпендикулярно падающей на панель. Происходит волновое совпадение, при котором интенсивность изгибных колебаний резко увеличивается. Начиная с этой частоты происходит эффективное звукоизлучение от самой панели, что может негативно повлиять на акустику помещений. С целью анализа динамических свойств акустических панелей разработана расчетная модель на базе метода конечных элементов. Для дискретизации пластины используются шестиузловые оболочечные конечные элементы с шестью степенями свободы в узле. Данный конечный элемент способен достаточно корректно учитывать анизотропию физико-механических свойств древесины. Задача на собственные значения решается методом итераций в подпространстве собственных векторов. Исследуется акустическая панель, изготовленная из дощечек древесины, склеенных между собой вдоль волокон. Доски уложены вдоль короткой стороны. Для описания упругих свойств древесины используется модель ортотропного тела. Рассмотрены четыре конструктивных варианта, собранных из пяти одинаковых дощечек древесины ели, сосны, березы и дуба. Варьируя физико-механические свойства древесины в зависимости от ее породы, получаем разные спектры колебаний. Анализ полученных результатов позволяет отметить, что панель, изготовленная из древесины дуба, содержит в два раза больше собственных частот в диапазоне до граничной частоты. Следовательно, данная панель будет более эффективна в качестве звукопоглощающей конструкции.

Ключевые слова: акустическая панель, спектр колебаний, граничная частота, конечный элемент.

Известно, что деревянные панели широко используются в отделке помещений. В случае их использования не только в качестве декоративных элементов отделки, но и в целях корректировки тембра издаваемых звуков подобные конструкции называют акустическими панелями. Использование акустических панелей улучшает такие качества музыкальных звуков, как полнота, мягкость и глубина звучания. В работе рассматривается панель, которая крепится к потолку или стенам помещений. Под действием звуковых волн панель начинает вибрировать, при этом максимальная интенсивность этих колебаний будет при совпадении собственных и вынужденных частот (явление резонанса). Вблизи панели при этом образуется звуковое поле, в котором происходит перераспределение энергии от одной полуволны колеблющейся конструкции к другой и обратно. В результате часть энергии звуковых волн не излучается в окружающее пространство, а остается «связанной» с панелью в виде кинетической энергии присоединенной массы некоторого объема воздушной среды, прилегающей к конструкции [1, 2]. Та-

ким образом осуществляется процесс звукопоглощения в диапазоне низших частот. Однако с некоторой граничной частоты может начаться достаточно эффективное звукоизлучение от самой панели, что может негативно повлиять на акустику помещений [3–5]. Следует отметить, что подобным образом действуют все резонансные звукопоглотители: вазы в античных театрах, голосники в церквях [4]. Величина этой частоты определяется формулой [1, 2]

$$f_{zp} = 0,55 \left(\frac{C_g^2}{hC_d} \right), \quad (1)$$

где C_g – скорость звука в воздухе,
 C_d – скорость звука в древесине панели,
 h – толщина панели.

На этой частоте длина изгибной волны становится равной длине звуковой волны, перпендикулярно падающей на панель, происходит волновое совпадение, при котором интенсивность изгибных колебаний резко увеличивается. С граничной частоты начинается достаточно эффективное звукоизлучение от самой панели, что может негативно

повлиять на акустику помещений. Известно, что скорость звука в древесине определяется формулой [2, 6]

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости,
 ρ – плотность древесины.

Таким образом, для эффективной корректировки акустической характеристики помещения в низкочастотном диапазоне необходимо создание такой конструкции, которая имела бы максимально большое количество собственных частот (плотный спектр), лежащих ниже граничной частоты (1). Это позволит наиболее эффективно поглощать энергию звуковых колебаний в области низших частот.

Расчетная динамическая модель [6–9] строится с помощью программного комплекса ANSYS. Для дискретизации пластины используются шестиузловые оболочечные конечные элементы Shell 93 с 6 степенями свободы в узле. Данный КЭ способен достаточно корректно учитывать анизотропию физико-механических свойств древесины [10]. Задача динамики решается методом конечных элементов (МКЭ) и описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = 0, \quad (3)$$

где $[M]$, $[K]$ – матрицы масс и жесткости конструкции,

$\{\ddot{q}\}$, $\{q\}$ – векторы обобщенных ускорений и перемещений соответственно.

Порядок матриц равняется числу степеней свободы (591). Для расчета двадцати низших собственных частот и форм колебаний используется метод итераций в подпространстве собственных векторов. Для дискретизации пластины используются восьмиузловые оболочечные конечные элементы (КЭ) с 6 степенями свободы в узле.

В работе исследуется прямоугольная тонкостенная панель, которая крепится к потолку или стенам помещений для создания условий максимально качественного прослушивания музыкальных звуков. В строительной акустике качество подобных систем принято оценивать двояко:

1. Исследование спектра собственных частот панели (рис. 1).
2. Исследование частотного спектра системы, состоящей из панели на основе от жесткого основания с учетом влияния акустического объема, заключенного между панелью и жестким основанием.

Для предварительной оценки динамических свойств конструкции остановимся на первом варианте. Рассмотрим режим свободных колебаний шарнирно-опертых акустических панелей (рисунок). Для описания упругих свойств использованы данные [10], которые представлены в табл. 1.

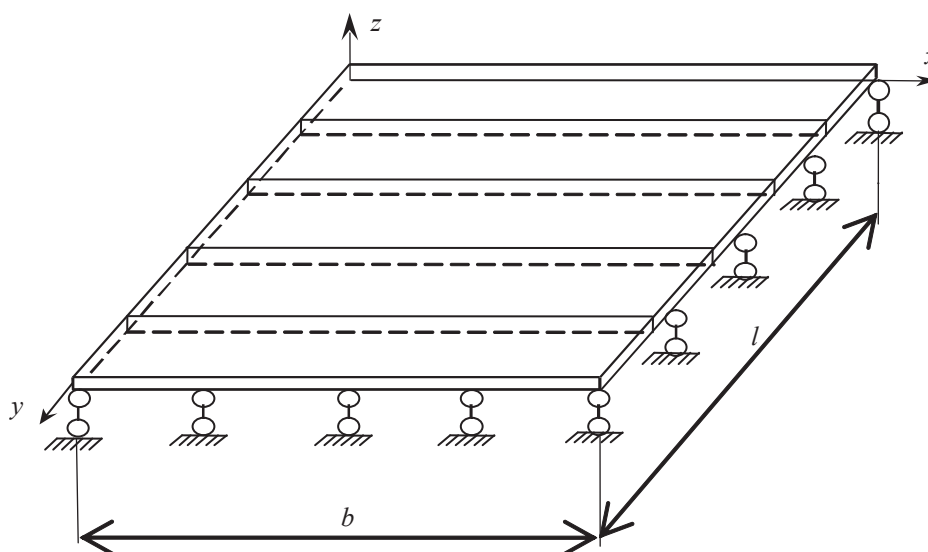


Рисунок. Акустическая панель
 Figure. An acoustic panel

Физико-механические характеристики сортиментов древесины

Physical and mechanical properties of wood assortments

Древесина	ρ , КГ/М ³	E_x , Па 10 ⁷	E_y , Па 10 ⁷	E_z , Па 10 ⁷	G_{xy} , Па 10 ⁷	G_{yz} , Па 10 ⁷	G_{xz} , Па 10 ⁷	μ_{xy}	μ_{yz}	μ_{xz}
Ель	500	1622,5	70,1	40	64,5	3,47	41,6	0,44	0,42	0,33
Сосна	590	1660	112,4	58,2	118	6,7	69	0,42	0,68	0,51
Береза	620	1666	112,6	62,9	109,5	19,2	104,3	0,49	0,78	0,43
Дуб	660	582	218,5	98,5	128,7	40,3	80	0,32	0,64	0,5

Собственные частоты акустических панелей

The natural frequencies of acoustic panels

№ Моды	Частота, Гц			
	ЕЛЬ	СОСНА	БЕРЕЗА	ДУБ
1	51,9	57,3	57,1	56,4
2	92,2	101	102	96,3
3	160	174	176	161
4	178	193	196	188
5	206	228	233	226
6	250	273	280	253
7	263	291	300	289
8	328	366	379	366
9	342	378	390	379
10	365	401	414	393
11	382	425	442	437
12	431	482	506	487
13	435	489	513	501
14	486	535	556	507
15	509	572	605	586
16	545	612	648	623
17	573	648	703	668
18	582	661	705	692
19	611	687	738	698
20	644	720	768	732

Исследуется панель, изготовленная из дощечек древесины, склеенных между собой вдоль волокон. Доски уложены вдоль короткой стороны. Толщина панели составляет 28 мм, длина $l = 1500$ мм, ширина $b = 800$ мм.

Созданы несколько расчетных моделей с разной степенью дискретизации. Модель состоит из оболочечных КЭ Shell 93 с 6 степенями свободы в узле. Рассмотрено четыре конструктивных варианта, собранных из пяти одинаковых дощечек древесины ели, сосны, березы и дуба.

Результаты решения задачи (3) на собственные значения сведены в табл.2. Жир-

ным шрифтом выделены частоты, находящиеся в акустически важном диапазоне низших частот до граничной частоты, определяемой формулой (1).

Анализ представленных в табл. 2 данных позволяет отметить, что панель, изготовленная из древесины дуба, содержит в два раза больше собственных частот в диапазоне до граничной частоты. Следовательно, данная панель будет более эффективна в качестве звукопоглощающей конструкции.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №13-01-97045 р_поволжье_a

Библиографический список

1. Борьба с шумом на производстве. Справочник / Е.Я. Юдин и др. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
2. Колесников, А.Е. Шум и вибрация: Учебник / А.Е. Колесников. – Л.: Судостроение, 1988. – 248 с.
3. Звукоизоляция и звукопоглощение: Учеб. Пособие для студентов вузов / Л. Г. Осипов и др. – М.: ООО Изд-во АСТ, 2004. – 450 с.
4. Рейхардт, В. Акустика общественных зданий / В. Рейхардт. – М.: Стройиздат, 1984. – 200 с.
5. Акустика: Справочник / А.П. Ефимов и др. – М.: Радио и связь, 1989. – 336 с.
6. Куликов, Ю.А. Механические колебания дек музыкальных инструментов: Научное издание / Ю.А. Куликов, С.В. Шлычков. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2006. – 188 с.
7. Шлычков, С.В. Исследование динамических процессов в задачах сопряженного типа / С.В. Шлычков // Ansys Advantage. Русская Редакция. – 2011. – № 2. – Вып. 16. – С. 43–49.
8. Шлычков, С.В. Исследование динамических свойств связанных систем / С.В. Шлычков // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4. – Ч. 4. – С. 1873–1875.
9. Шлычков, С.В. Исследование резонансных свойств акустических панелей / С.В. Шлычков // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6; URL: www.science-education.ru/113-11560
10. Ашкенази, Е.К. Анизотропия конструкционных материалов / Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 247 с.

THE DEPENDENCE OF THE ACOUSTIC PANEL QUALITY ON WOOD

Shlychkov S.V., Assoc. Prof. VSUT, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾

shlychkovsv@volgatech.net

⁽¹⁾ Volga State University of Technology, 3 Lenin sq., Yoshkar-Ola, Republic of Mari El, Russian Federation, 424000

In this work the thin-walled structures made of wood are studied. If they are used to adjust acoustic fields, they are called acoustic panels. It is believed that to provide the efficient adjustment of acoustic parameters of premises it is necessary to create such designs that would have the thickest acoustic spectrum up to the limit frequency. Within this frequency the flexural wave length becomes equal to the length of sound waves, perpendicular to the incident on the Panel. The wave convergence occurs and this makes the intensity of flexural vibrations increase sharply. Starting with this frequency, the effective sound emission occurs from the Panel that can adversely affect the acoustics of the space. To analyze the dynamic properties of acoustic panels the design model based on the finite element method has been developed. To discrete the plate, the six-node shell finite elements with six degrees of freedom per node have been used. The finite element is capable of correctly enough taking into account the anisotropy of physical and mechanical properties of wood. The task of the eigenvalues is solved using the method of iteration subspace eigenvectors. The acoustic Panel made of wood slats, which are glued along fibres, has been studied. Boards are stacked along the shortest side. To describe the elastic properties of wood, the orthotropic body model has been used. There are four constructive variants under consideration which are made from five identical plates of spruce, pine, birch and oak wood. By varying the physical and mechanical properties of wood, depending on its species, one can get different spectra. The analysis of the obtained results allows to note that the Panel made of oak wood contains twice as many as the eigenfrequencies within the range of the limit frequency. Therefore, this Panel will be more effective as a sound absorbing board.

Keywords: acoustic panel, spectrum of the vibrations, limit frequency, the finite element.

References

1. Yudin E.Ya. [i dr.] *Bor'ba s shumom na proizvodstve* [The fight against noise in the workplace]. Moscow: Mashinostroenie [Engineering], 1985. 400 p.
2. Kolesnikov, A.E. *Shum i vibratsiya* [Noise and vibration]. Leningrad: Sudostroenie [Shipbuilding], 1988. 248 p.
3. Osipov L.G. [i dr.] *Zvukoizolyatsiya i zvukopogloshchenie* [Sound insulation and sound absorption]. Moscow: AST [Publishing House Ltd. AST], 2004. 450 p.
4. Reykhardt V. *Akustika obshchestvennykh zdaniy* [Acoustics of public buildings]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 200 p.
5. Efimov A.P. [i dr.] *Akustika* [Acoustics]. Moscow: Radio i svyaz' [Radio and Communications], 1989. 336 p.
6. Kulikov Yu.A., Shlychkov S.V. *Mekhanicheskie kolebaniya dek muzykal'nykh instrumentov* [Mechanical vibrations of musical instruments]. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2006. 188 p.
7. Shlychkov S.V. *Issledovanie dinamicheskikh protsessov v zadachakh sopryazhennogo tipa* [The study of dynamic processes in problems such as conjugated]. Ansys Advantage. Russkaya Redaktsiya. 2011, № 2, V. 16. pp. 43-49.
8. Shlychkov S.V. *Issledovanie dinamicheskikh svoystv svyazannykh system* [A study of the dynamic properties of related systems]. Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo [Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky]. 2011, № 4, P. 4. pp. 1873-1875.
9. Shlychkov S.V. *Issledovanie rezonansnykh svoystv akusticheskikh paneley* [Investigation of Resonance Characteristics of acoustic panels]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013. № 6; URL: www.science-education.ru/113-11560
10. Ashkenazi E.K., Ganov E.V. *Anizotropiya konstruktsionnykh materialov* [Anisotropy of construction materials]. Leningrad: Mashinostroenie [Engineering], 1980. 247 p.

ДРЕВЕСНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА НЕОРГАНИЧЕСКОМ СВЯЗУЮЩЕМ

А.Н. ОБЛИВИН, *проф. МГУЛ, д-р техн. наук*⁽¹⁾,
М.В. ЛОПАТНИКОВ, *доц. МГУЛ, канд. техн. наук*⁽¹⁾,
С.М. ТАРАСОВ, *доц. МГУЛ, канд. техн. наук*⁽¹⁾

lopaticov@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ.

При решении задач, связанных с получением экологически чистых древесных композиционных материалов, возникает вопрос о возможности замены синтетического органического полимера как основного связующего компонента композита на более экологически чистые аналоги. Как частный случай авторы рассматривают возможность замены применяемых в производстве древесных композиционных материалов карбаминоформальдегидных смол на неорганическое связующее в виде жидкого стекла. Авторы отмечают, что при замене в технологии производства древесных композитов на основе синтетического органического полимера только на жидкое стекло, используемое в качестве связующего, не удастся получить древесные композиционные материалы, обладающие достаточной влагостойкостью и предлагают использовать в качестве связующего жидкое стекло на натриевой основе, а в качестве отвердителя жидкого стекла – полиоксиалюминат натрия, который значительно повышает связующую способность жидкого стекла и устраняет многие его недостатки, что является достаточно обоснованным технологическим решением поставленной задачи. Приведенный в работе подход к получению древесных композиционных материалов на неорганическом связующем позволяет разработать математическую модель, описывающую изменение его свойств в процессе изготовления.

Ключевые слова: древесные композиционные материалы, карбаминоформальдегидная смола, неорганическое связующее, жидкое стекло, полиоксиалюминат натрия.

При решении задач, связанных с получением экологически чистых древесных композиционных материалов, возникает вопрос о возможности замены синтетического органического полимера как основного связующего компонента древесного композита на более экологически чистые аналоги.

Так, при производстве древесно-стружечных плит в качестве связующего, в основном, используются карбаминоформальдегидные смолы, которые по окончании технологического процесса производства, находясь уже в отвержденном состоянии, достаточно продолжительное время выделяют в окружающую среду свободный формальдегид.

Достаточно перспективным направлением исследований для решения проблемы эмиссии свободного формальдегида при производстве и эксплуатации древесно-стружечных плит является замена карбаминоформальдегидных смол жидким стеклом на натриевой основе. Однако разработка технологических параметров производства такого древесного композиционного материала и изучение его свойств подразумевает проведение целого комплекса исследовательских работ.

В настоящий момент это направление изучено недостаточно, и проведение научных исследований в данной области позволило бы решить проблему, по крайней мере, для части применяемых на сегодняшний день плитных материалов на древесной основе в мебельном производстве и строительстве.

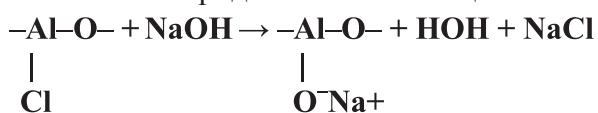
Проведя анализ литературы по данному направлению, мы на начальном этапе исследования предлагаем рассмотреть технологию производства древесных композиционных материалов на неорганическом связующем и провести численный эксперимент по предложенной математической модели, представленной в работе [1].

Технология производства древесных композиционных материалов на неорганическом связующем подразумевает подготовку древесины измельчением на рубительных машинах до щепы размеров: длина 10–60 мм, ширина 30 мм (толщина не нормируется) с дальнейшим измельчением с помощью центробежных стружечных станков с целью получения высококачественной плоской стружки и затем высушиванием её до конечной влажности 2–3 %.

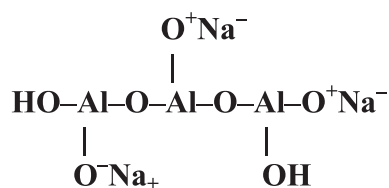
В производстве древесных композиционных материалов на неорганическом связующем, помимо использования в технологическом процессе неделовой древесины, возможно использование отходов лесопиления, которые образуются при разделке бревен на лесопильных рамах, при обрезке досок и их раскрое, отходы фанерного производства, представляющие собой карандаши и шпонрванину, отходы мебельного производства, включающие станочную стружку, опилки и пыль. Допускаемое содержание коры и гнили в сырье может составлять не более 5 % [2].

Для замены карбамидоформальдегидного связующего нами предлагается использовать жидкое стекло на натриевой основе в виде 55–60 %-го раствора с модулем 2,6–2,9 и плотностью 1460–1520 кг/м³, доведенное 45 %-ой концентрации смешением с водой при комнатной температуре.

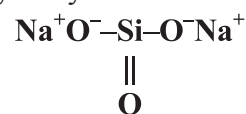
Одним из возможных отвердителей жидкого стекла (щелочного силиката натрия) в условиях прессования древесных композиционных материалов может выступить полиоксиалюминат натрия, пробные образцы которого были синтезированы нами. Есть несколько возможных путей получения этого продукта, но наиболее качественные продукты с преимущественно стабильными свойствами образуются при реакции промышленно выпускаемого полиоксихлорида алюминия со щелочью



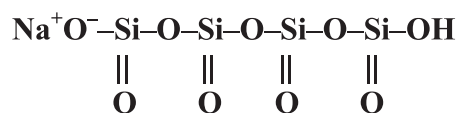
Степень поликонденсации образующегося продукта невысока и редко превышает 4. Большинство групп данного продукта ионизировано, однако реакцию его получения надо останавливать на той стадии, когда в молекуле полиоксиалюмината натрия еще имеются свободные гидроксилы, для чего при синтезе необходим контроль pH. Приблизительная формула конечного продукта в этом случае выглядит следующим образом



Промышленный силикат натрия для повышения устойчивости выпускается с большим содержанием свободной щелочи, поэтому гидроксильные группы в исходном продукте отсутствуют



В условиях смешивания с древесной стружкой и последующим прессованием неизбежно падение pH силиката натрия и образования производных коллоидной кремниевой кислоты (другие названия – активная кремниевая кислота, силиказоль, наносиликат). Данные процессы сопровождаются постепенной поликонденсацией силиката натрия с образованием продуктов подобно следующему:

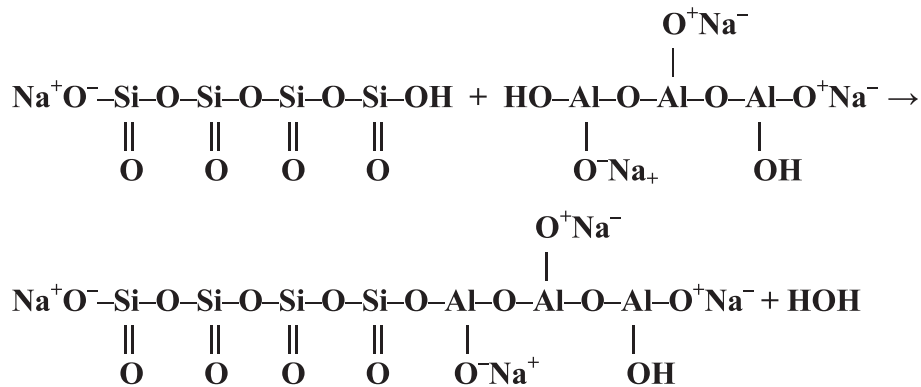


Активная кремниевая кислота обладает хорошими связующими свойствами, позволяющими использовать ее как в технологи целлюлозных, так и других материалов. Дальнейшее сшивание производных кремниевой кислоты приводит к образованию сшитых конденсированных продуктов, нерастворимых в воде и не обладающих связующими свойствами.

Наши исследования показывают, что на основе только одного жидкого стекла, используемого в качестве связующего, не удастся получить древесные композиционные материалы, обладающие достаточной влагостойкостью. Это можно объяснить тем, что силикат натрия в сильно щелочной среде практически не имеет функциональных групп, которые могли бы активно взаимодействовать с макромолекулами целлюлозы и другими компонентами древесины с образованием прочных связей между древесными частицами, не разрушаемыми впоследствии водой. Вероятно, адгезия молекул отвержденного силиката натрия по отношению к древесине носит характер электростатического взаимодействия и при этом практически не образуются ни координационные, ни тем более ковалентные связи.

Одной из задач нашего исследования был выбор отвердителя для силиката натрия, который позволил бы ему образовывать с компонентами древесины более прочные связи и более устойчивые к разрушению при взаимодействии с водой. Одним из отвердителей, предложенных нами, является вышеописанный полиоксиалюминат натрия. Выбор был обусловлен следующими его достоинствами: способностью к поликонденсации с силикатом натрия при определенных условиях; сильными комплексообразующими свойствами иона алюминия; наличием свободных гидроксиль-

ных групп, способных образовывать координационные и, возможно, ковалентные связи с функциональными группами компонентов древесины; щелочным характером полиоксиалюмината натрия, при смешении с силикатом натрия и древесными частицами, позволяющими предотвратить слишком быструю поликонденсацию неорганического связующего, ведущую к резкому падению связующих свойств. В очень упрощенном виде начало реакции поликонденсации производных силиката натрия с полиоксиалюминатом натрия можно представить следующим образом:

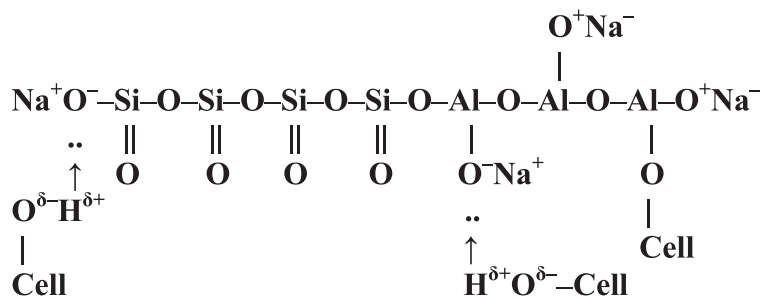


На более глубокой стадии реакции в условиях прессования древесных композиционных материалов число гидроксильных групп в образующемся неорганическом высокомолекулярном веществе увеличивается еще до начала образования коллоидных структур, так как происходит падение рН в системе в результате пропитки связующим древесины и началом его взаимодействия с компонентами древесины.

Координационное взаимодействие комплексных солей алюминия, в частности с гидроксильными группами целлюлозы, описанное в литературе, дополнительно исследовалось в наших более ранних публикациях и не нуждается в подробном разборе. Следует

только отметить, что помимо классических координационных (водородных) связей здесь могут образовываться ионно-ковалентные связи, водостойкость которых еще выше. Образующийся комплекс осаждается и закрепляется на целлюлозном волокне, в результате чего происходит связывание древесных частиц между собой [3].

При этом следует отметить, что ионизированный алюминат или силикат способен к образованию координационных связей с гидроксильными группами макромолекулы целлюлозы, а гидроксильные группы, находящиеся при атоме алюминия, способны к образованию ионно-ковалентных связей.



Таким образом, предложенный нами отвердитель значительно повышает связующую способность жидкого стекла и устраняет многие его недостатки. Разработка технологии получения древесных композиционных материалов по предложенному нами методу находится в данный момент на стадии исследования.

Как показал произведенный научный поиск по теме использования неорганических полимеров в качестве связующих для материалов различного рода, эта тема также разрабатывается в ведущих научно-исследовательских институтах всего мира. Однако, судя по публикациям в данной области, недостаточное внимание уделяется структурированным алюмосиликатам именно в качестве связующих, чаще всего предполагается рассматривать отвержденные алюмо- или обычные силикаты в виде грубодисперсной фазы в качестве носителей для других полимерных комплексов. В то же время, на наш взгляд, большое внимание в работах [4–10] уделяется неорганическим полимерам на основе редкоземельных металлов, которые достаточно дороги и широкое использование их в промышленности не представляется возможным, а также соединениям тяжелых комплексобразующих металлов кадмия, галлия, олова, меди, платины и др., которые не только дороги, но и токсичны для человека и окружающей среды. Предлагаемые же нами технология легко реализуема на экологически чистом и широко доступном сырье.

По предлагаемой нами технологии жидкое стекло и отвердитель необходимо перемешать до равномерной массы непосредственно перед смешиванием древесной стружки и жидкого стекла. После смешения древесно-клеевая масса направляется на формирование стружечного пакета и далее на горячее прессование. Температура прессования 160 °С, продолжительность прессования 1 мин/мм готового изделия, давление 2 МПа.

Проведенные предварительные опыты показали, что для изготовления древесных композиционных материалов на неорганическом связующем состав компонентов мо-

жет варьироваться в следующей пропорции (масс.%): древесные частицы 50–60 %; жидкое стекло 30–40%; отвердитель 5–10%. Для получения оптимального соотношения компонентов в композиции необходимо провести дополнительный комплекс натуральных испытаний.

При разработке математической модели, описывающей процесс изготовления древесного композиционного материала, необходимо учитывать химические реакции, возникающие при отверждении неорганического связующего, а также перемещение влаги в материале в составе парогазовой смеси. Необходимо отметить, что при наличии химических реакций может выделяться значительное количество неконденсирующихся газов, и поэтому необходим их учет при перемещении и взаимной диффузии с водяным паром. Основные подходы к моделированию процесса изготовления древесных композиционных материалов были описаны нами ранее в работе [1].

Для решения системы уравнений, приведенной в [1], для различных граничных условий необходимо экспериментально исследовать теплофизические характеристики древесного композиционного материала, коэффициенты переноса, а также определить коэффициенты, входящие в уравнение кинетики отверждения неорганического связующего.

Проведенный предварительный численный эксперимент показал, что замена карбомидоформальдегидных смол при производстве древесно-стружечных плит вполне возможна при соблюдении параметров технологических режимов, которые несколько отличаются от параметров производства древесно-стружечных плит на карбомидоформальдегидных связующих. После проведения натурального эксперимента можно будет ответить на вопрос о необходимости разработки нового оборудования или возможности осуществления предлагаемой технологии изготовления плит на действующих предприятиях при проведении необходимой модернизации существующего оборудования.

Библиографический список / References

1. Обливин, А.Н. Длительная прочность композиционных материалов / Обливин, А.Н., Лопатников М.В. // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2012. – № 7 – С. 19–25. Oblivin A.N., Lopatnikov M.V. *Dlitelnaya prochnost kompozitsionnykh materialov* [Long-term strength of composite materials]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik, 2012, № 7. pp 19-25.
2. Вьюнков, С.Н. Технология древесных плит с использованием связующего на основе жидкого стекла: дис. ... канд. техн. наук. – С-Пб., 1999. – 109 с. Vyunkov S.N. *Technologiya drevesnih plit s ispolzovaniem svyazuyushogo na osnove zhidkogo stekla: dis. ... kand. tehn. nauk* [The technology of wood-based panels with a binder based on water glass. Dis. ... kand. tehn. nauk]. S-Pb., 1999. 109 pp.
3. Тарасов, С.М. Полиоксихлорид алюминия в технологии целлюлозных композиционных материалов: дис. ... канд. техн. наук. Moscow: МГУЛ, 2004. – 163 с. Tarasov S.M. *Polioksihlorid alyuminiya v tekhnologii tsellyuloznykh kompozitsionnykh materialov: dis. ... kand. tekh. nauk* [Polyoxychloride of aluminium in technology of cellulose-content composite materials: Dis. ... kand. tehn. sci]. Moscow: MSFU, 2004. 163 pp.
4. Non-organic/polymer fiber composite and method of making same: United States Patent 5091252, 1992. –10 p.
5. Inorganic Polymers: © 2010 The Gale Group, Inc. All rights reserved. – 2 p.
6. Multifunctional Silver Nanoparticles-Decorated Silica Functionalized with Retinoic Acid with Anti-Proliferative and Antimicrobial Properties / Madalina Tudose and other // Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. – 2016. – pp. 1–10.
7. Investigation of Characterization and Mechanical Performances of Al₂O₃ and SiC Reinforced PA6 Hybrid Composites / S. Sathees Kumar, G. Kanagaraj // Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. – July 2016, Volume 26, Issue 4, pp 788-798.
8. Synthesis of an Organic-Inorganic Alq₃-Based Hybrid Material by Sol-Gel Method / Sina Modiri and other / Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. – July 2015, Volume 25, Issue 4, pp 680-686.
9. Synthesis of Multifunctional Silica Composites Encapsulating a Mixture Layer of Quantum Dots and Magnetic Nanoparticles / Wooyoung Park and other // Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. –January 2014, Volume 24, Issue 1, pp 78-86.
10. Synthesis and Characterization of Copper(II)-Cysteine/SiO₂-Al₂O₃ as an Efficient and Reusable Heterogeneous Catalyst for the Oxidation of Aromatic Alcohols / Farzad Zamani, Elham Izadi // Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials. –November 2013, Volume 23, Issue 6, pp 1501-1510.

WOOD COMPOSITE MATERIALS OF INORGANIC BINDERS

Oblivin A.N., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; **Lopatnikov M.V.**, Assoc. Prof. MSFU, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾; **Tarasov S.M.**, Assoc. Prof. MSFU, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾

lopatnikov@mgul.ac.ru

⁽¹⁾Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moscow reg., Russia

When solving problems related to obtaining eco-friendly wood composite materials, there arises a question about the possibility of replacing synthetic organic polymer used as a binder composite component with more environmentally-friendly counterparts. As a special case the authors consider the possibility of replacing urea-formaldehyde resins, used in the production of wood composite materials, with the inorganic binder in the form of liquid glass. The authors note that, when the synthetic organic polymer used in the wood composites production technology is replaced only with liquid glass applied as a binder, it is not possible to obtain wood composite materials with a sufficient moisture resistance; thus, they suggest using liquid sodium glass as a binder and poly-oxy sodium alluminate as a hardener of liquid glass, which significantly enhances the binding ability of liquid glass and eliminates many of its shortcomings; so, it becomes quite a reasonable technological solution of the problem. The approach to producing the wood composite materials with inorganic binders, considered in this article, allows us to develop a mathematical model describing the change of its properties during the manufacturing process.

Keywords: wood composite materials, urea-formaldehyde resin, an inorganic binder, liquid glass, poly-oxy sodium alluminate.

УДК 528.71

**МЕЖОТРАСЛЕВАЯ ЦЕЛЕВАЯ ПРОГРАММА УСКОРЕННОГО
ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЛЕСА С ВЫВОДОМ
ИХ НА ЛИДИРУЮЩИЕ ПОЗИЦИИ В МИРЕ И
ГИГАПРОЕКТ АЭРОКОСМОС-ЛЕС**

В.Г. САНАЕВ, *проф. МГУЛ, д-р. техн. наук*⁽¹⁾,
И.М. СТЕПАНОВ, *проф. МГУЛ, д-р. техн. наук*⁽¹⁾,
В.И. ЗАПРУДНОВ, *проф. МГУЛ, д-р. техн. наук*⁽¹⁾,
М.С. УСАЧЕВ, *доц. МГУЛ, канд. техн. наук*⁽¹⁾,
П.А. ТАРАСЕНКО, *доц. МГУЛ, канд. техн. наук*⁽¹⁾,
А.А. МАЛАШИН, *проф. МГУЛ, д-р. физ.-мат. наук*⁽¹⁾,
П.В. НЕФЕДОВ, *МГУЛ*⁽¹⁾,
Т.В. КОЛЕСНИК, *МГУЛ*⁽¹⁾

stepanim@mail.ru

⁽¹⁾ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ.

Показана необходимость и рассмотрены пути ускоренного инновационного развития технологий аэрокосмического мониторинга леса средствами российской космической системы ДЗЗ. Поставлена цель вывести эти технологии на лидирующие позиции в мире. Показано, что для достижения заявленной цели необходимо решить большой комплекс задач. В решении задач будут участвовать организации, представляющие различные отрасли (организации Роскосмоса и Рослесхоза, институты РАН, вузы). Для консолидации сил и ресурсов нескольких отраслей, для лучшей координации работ необходима Межотраслевая целевая программа. Полный комплект документов Межотраслевой целевой программы «Ускоренное инновационное развитие технологий аэрокосмического мониторинга леса и вывод их на лидирующие позиции в мире» разработан сотрудниками МГУЛ и выложен на сайте МГУЛ (Яндекс-адрес: АЭРОКОСМОС-ЛЕС).

Ключевые слова: аэрокосмический мониторинг леса, качество систем аэрокосмического мониторинга, потребительские качества систем аэрокосмического мониторинга.

**Необходимость и пути ускоренного
инновационного развития технологий
аэрокосмического мониторинга леса
средствами российской космической
системы ДЗЗ**

Новые технические идеи и решения, новые инженерные разработки становятся инновациями только после того, как они внедряются в практику и начинают давать реальный социально-экономический эффект. Это касается всех сфер деятельности. Поэтому к приоритетным направлениям развития относят те, которые могут принести большой реальный эффект в самое ближайшее время. Это относится к космической деятельности. Важность этого положения отмечена в документе: «Основы государственной политики в области использования результатов космической деятельности в

интересах модернизации экономики Российской Федерации и развития ее регионов на период до 2030 г. (Утв. Президентом РФ 14.01.2014)».

В «Основах» указано на необходимость обеспечения эффективного использования отечественного космического потенциала, отмечено, что эффективное использование результатов космической деятельности – задача государственного масштаба, имеющая межведомственный, межрегиональный, межотраслевой характер и затрагивающая интересы всех секторов экономики. В «Основах» обращено внимание на необходимость для решения поставленной задачи на основе единой государственной политики консолидировать усилия и ресурсы федеральных органов исполнительной власти и компаний с государственным участием, органов исполнительной власти

субъектов Российской Федерации, местного самоуправления, организаций различных форм собственности.

Дистанционное зондирование Земли является одним из важнейших направлений использования результатов космической деятельности в народном хозяйстве. В настоящее время в России успешно выполняется «Федеральная Космическая программа на период до 2015 г.», в том числе и в части развития российской космической системы ДЗЗ. В Государственной программе Российской Федерации «Космическая деятельность России на 2013–2020 гг.» отмечается: «...в части средств дистанционного зондирования Земли и гидрометеорологического наблюдения – увеличение до 24 космических аппаратов орбитальной группировки за счет развертывания принципиально новых космических систем, предназначенных для решения задач картографии, контроля состояния природной среды, оперативного мониторинга чрезвычайных ситуаций, инвентаризации природных ресурсов, обеспечения рационального ведения сельскохозяйственной, водной и других видов деятельности, мониторинга Арктического региона....».

Методы и средства дистанционного зондирования Земли для решения задач народного хозяйства используются уже достаточно давно и довольно широко как у нас в стране, так и за рубежом. Однако используются в основном космические снимки, получаемые с зарубежных космических аппаратов. Это объясняется тем, что технические характеристики отечественных аппаратов пока уступают зарубежным аналогам. Если учесть, что зарубежные космические системы ДЗЗ развиваются темпами, не уступающими темпам развития российской космической системы ДЗЗ, то к 2020 г. может сложиться ситуация, когда у отечественных потребителей космических снимков не будет острой потребности в приобретении снимков, полученных с отечественных космических аппаратов. Именно в этом состоит проблема. Невостребованность снимков приведет к огромным экономическим потерям.

Особую обеспокоенность вызывает уровень использования снимков с отечественных космических аппаратов в лесном хозяйстве. В общем числе задач народного хозяйства, которые эффективно решаются с использованием аэрокосмического мониторинга и которые отмечены в «Концепции развития российской космической системы ДЗЗ на период до 2025 г.», задачи лесного хозяйства самые многочисленные и составляют треть от общего числа задач. Однако подавляющее большинство работ по аэрокосмическому мониторингу леса выполняется с использованием космических снимков, полученных с зарубежных космических аппаратов.

Пути ускоренного инновационного развития

Переломить создавшуюся ситуацию, сделать высоко востребованными снимки, полученные российской космической системой ДЗЗ, можно, если добиться выполнения двух условий. Во-первых, необходимо кардинально улучшить технические показатели качества снимков (не ниже мирового уровня), а во-вторых, необходимо максимально повысить уровень потребительских качеств отечественных систем аэрокосмического мониторинга [1]. При этом необходимо будет научно обосновать и экспериментально подтвердить методами валидации полную пригодность космических снимков, полученных с российских космических аппаратов, для решения соответствующих задач аэрокосмического мониторинга леса.

Для инновационного развития технологий аэрокосмического мониторинга леса необходимо соответствующее ресурсное обеспечение:

- наличие гарантированного инвестирования в работы по развитию технологий;
- наличие гарантированных потребностей в результатах инновационной деятельности;
- наличие интеллектуального потенциала для разработки инновационных технологий;

– наличие развитой технической базы для инновационного развития технологий.

Все эти ресурсы у нас есть, необходимо только оптимальным образом их использовать.

Технологический процесс аэрокосмического мониторинга леса реализуется соответствующими сегментами: космическим, наземным, когнитивным, лесохозяйственным. Каждый сегмент по-своему влияет на качество технологий аэрокосмического мониторинга леса в целом.

Космический сегмент. Качество технологий аэрокосмического мониторинга леса зависит от качества космических снимков, от качества космических аппаратов, от качества сенсоров, от качества космических платформ ДЗЗ.

Наземный сегмент. Качество технологий аэрокосмического мониторинга леса зависит от точности измерений характеристик состояния леса на эталонных участках леса подспутниковых полигонов, от качества системы валидации, калибровки и сертификации технологий аэрокосмического мониторинга леса.

Когнитивный сегмент. Качество технологического процесса аэрокосмического мониторинга леса зависит от качества, от возможностей систем дешифрирования космических снимков, от уровня автоматизации процессов мониторинга.

Лесохозяйственный сегмент. Качество технологий аэрокосмического мониторинга леса во многом зависит и от эффективности использования этих технологий конечными пользователями.

Таким образом, качество технологий аэрокосмического мониторинга леса в целом зависит от качества (от уровня развития) каждого отдельного сегмента, а не только космических снимков.

Наиболее развит космический сегмент. Функционируют российские космические аппараты ДЗЗ: Ресурс-ДК, Ресурс-П (2 аппарата), Каноус-В, Электро-Л. Общая стратегия и основные направления развития космического сегмента системы дистанционного зондирования Земли в России

до 2030 г. рассмотрены в работах [2, 3]. В работе [4] отмечены их приоритеты. Новые возможности технологии аэрокосмического мониторинга Земли получают в результате создания спутника, работающего на высокой геосинхронной орбите [5]: появится возможность оперативного глобального обзора значительных территорий и возможность практически непрерывного длительного наблюдения интересующих объектов.

Фундаментальные работы в этом направлении показали возможность непрерывной инвентаризации лесов России на основе дистанционных методов [6]. Теперь предстоит выполнить большой объем работы для трансферта результатов этих фундаментальных работ в промышленные системы аэрокосмического мониторинга леса. Основную часть работ составят работы по развитию наземного, когнитивного и лесохозяйственного сегментов.

Основные цели и задачи ускоренного инновационного развития технологий аэрокосмического мониторинга леса

Комплекс целей. Главная цель заключается в создании высокоэффективной инновационной системы оценки состояния лесов на базе использования аэрокосмического мониторинга леса. Это позволит на основе объективных и полных знаний о состоянии лесов решать все задачи лесопользования с большей эффективностью, а лесной комплекс сделать высоко прибыльным.

Сопутствующая цель состоит в создании условий использования средств российской космической системы ДЗЗ в разрабатываемой системе мониторинга леса. Необходимо разработать конкурентоспособные технологии средствами российской системы ДЗЗ. Только в этом случае разрабатываемая российская космическая система ДЗЗ будет востребована и принесет соответствующую пользу.

Настоящая Программа преследует также глобальную цель, имеющую важное социально-политическое значение. Эта цель – вывести отечественные технологии аэрокосмического мониторинга Земли (и леса) в

лидеры на мировом рынке аналогичных технологий.

Основные задачи. Для достижения поставленных целей должны быть решены задачи технического, инвестиционного и организационно-образовательного характера. Сложность и масштабность задач, участие в их реализации организаций, представляющих различные отрасли промышленности, порождает целесообразность выполнения этих работ программно-целевым методом. Для этого предлагается Межотраслевая целевая программа ускоренного инновационного развития технологий аэрокосмического мониторинга леса с выводом их на лидирующие позиции в мире.

Комплекс задач технического характера Межотраслевой целевой программы

Большое число и разнообразие задач технического характера функционально разделено на две группы, на задачи развития базовых технологий и инфраструктуры систем аэрокосмического мониторинга леса.

Перманентное опережающее развитие базовых технологий аэрокосмического мониторинга леса в прорывных критических направлениях. Базовые элементы, составляющие основу технологий, должны постоянно развиваться. К ним относятся как средства получения космических снимков (космические аппараты, приборы-сенсоры), так и средства их обработки (системы дешифрирования космических снимков). Все системы аэрокосмического мониторинга леса должны быть построены на новейших базовых элементах и постоянно модернизироваться путем перевода этих систем на появляющиеся новые базовые элементы. В целях максимального ускорения процесса развития технологий, достижения при этом максимального социально-экономического эффекта и минимизации затрат, необходимых для получения ожидаемых результатов, все работы должны проводиться в прорывных критических направлениях развития технологий аэрокосмического мониторинга леса.

Как уже было отмечено, все системы состоят из сегментов: космического, наземного, природохозяйственного (лесохозяйственного) и когнитивного. В каждом сегменте есть «свои» приоритетные направления. Ниже перечислены работы в приоритетных направлениях развития каждого из сегментов.

Приоритетные работы по развитию космического сегмента:

- развитие перспективных космических приборов-сенсоров ДЗЗ (оптоэлектронных приборов сверхвысокого разрешения, гиперспектральных приборов, радиолокационных систем);
- создание системы микроспутников для высокооперативного обнаружения очагов лесных пожаров;
- развертывание экспериментов на Международной космической станции в интересах развития технологий аэрокосмического мониторинга леса;
- создание космических радиолокационных систем обнаружения целей из космоса в интересах аэрокосмического мониторинга леса (системы двойного назначения).

Приоритетные работы по развитию наземного сегмента:

- создание и развитие единой государственной автоматизированной системы валидации технологий аэрокосмического мониторинга леса;
- создание системы высокоточных измерений состояния леса на пробных (контрольных) площадках средствами малой авиации и беспилотных летательных аппаратов;
- использование гиперспектральных средств в системах измерений характеристик растительности на эталонных участках местности;
- создание и актуализация региональных баз данных аэрокосмических снимков и характеристик растительности на эталонных подспутниковых полигонах.

Приоритетные работы по развитию лесохозяйственного сегмента:

- оценка качества и эффективности разрабатываемых технологий аэрокосмического мониторинга леса;

- разработка требований к технологиям аэрокосмического мониторинга леса в целях их дальнейшего развития;

- освоение разработанных технологий аэрокосмического мониторинга леса;

- расширение использования разработанных технологий аэрокосмического мониторинга леса в лесном хозяйстве.

Приоритетные работы по развитию когнитивного сегмента:

- развитие собственно методов и средств дешифрирования космических снимков;

- работы технологического характера, позволяющие систематизировать, интенсифицировать, автоматизировать работы первого направления, что в целом позволяет повысить качество когнитивного сегмента;

- создание автоматизированных систем аэрокосмического мониторинга леса, в том числе и автоматизированной системы лесоинвентаризации.

Развитие инфраструктуры систем аэрокосмического мониторинга леса

Одним из обязательных условий ускоренного инновационного развития технологий аэрокосмического мониторинга леса является развитие индустрии аэрокосмического мониторинга Земли (и леса в том числе).

К настоящему времени уже функционирует Геопортал Роскосмоса – геоинформационный ресурс для доступа к единому банку космических снимков Федерального космического агентства России [7]. Это уникальный ресурс, который сочетает в себе средство просмотра космических снимков земной поверхности и поиска данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с российских и зарубежных спутников по наиболее полному в России каталогу. Отличительной особенностью Геопортала Роскосмоса является оперативная публикация данных, поступающих с космических аппаратов. Ежедневно в Геопортале размещается до 50 маршрутов съемки с российских спутников «Ресурс-ДК1», «Канопус-В» №1 и «Метеор-М» №1.

Свои геопорталы имеют СканЭкс, Совзонд и ряд других организаций. НПК РЕКОД (Роскосмос) создает центры космических услуг (ЦКУ) в организациях других отраслей. Таким образом, можно утверждать, что условие развития индустрии аэрокосмического мониторинга Земли (и леса в том числе) выполнено.

Создание единой отраслевой автоматизированной системы аэрокосмического мониторинга леса. Максимальный экономический эффект может быть получен при создании единой отраслевой автоматизированной системы аэрокосмического мониторинга леса. При этом система должна решать все возможные задачи, иметь много различных средств, расширяющих ее возможности, и одновременно должна быть простой и удобной для конечного пользователя. Такая автоматизированная система, названная Глобальной мониторинговой аэрокосмической системой леса (ГЛОМАС-ЛЕС), позволит регулярно и систематически в автоматизированном режиме использовать аэрокосмический мониторинг леса в лесном хозяйстве.

Инфраструктура Глобальной мониторинговой аэрокосмической системы леса (ГЛОМАС-ЛЕС) подробно рассмотрена в работах [8, 9]. Структурно она представляет собой единую отраслевую сеть связанных между собой через Интернет функциональных центров аэрокосмического мониторинга леса, Главного Центра и Региональных Центров в составе соответствующих региональных филиалов Рослесинфорга.

Каждый функциональный Центр состоит из технологических центров (приема/передачи снимков, первичной обработки, дешифрирования снимков, ГИС-картирования тематических карт, валидации и сертификации, архивирования снимков и результатов их дешифрирования). Глобальная мониторинговая аэрокосмическая система леса (ГЛОМАС-ЛЕС) будет получать космические снимки из Единой территориально распределенной информационной системы ДЗЗ РФ (ЕТРИС-ДЗЗ РФ).

Информация из Глобальной мониторинговой аэрокосмической системы леса

(ГЛОМАС-ЛЕС) будет передаваться в создаваемую Единую автоматизированную информационную систему лесного хозяйства (ЕАИС ЛХ).

Объединенная всеотраслевая Глобальная мониторинговая аэрокосмическая система (ГЛОМАС). Еще больший суммарный экономический эффект будет получен, если отраслевую Глобальную мониторинговую аэрокосмическую систему леса (ГЛОМАС-ЛЕС) создавать как часть всеотраслевой объединенной Глобальной мониторинговой аэрокосмической системы (ГЛОМАС). Структурно всеотраслевая Глобальная мониторинговая аэрокосмическая система (ГЛОМАС) представляет собой объединение всех отраслевых систем аэрокосмического мониторинга в единую систему. В эту систему должны будут войти отраслевые системы: ГЛОМАС-ЛЕС (лесное хозяйство), ГЛОМАС-АГРО (сельское хозяйство), ГЛОМАС-ЭКО (экология), ГЛОМАС-ЧС (чрезвычайные ситуации) и все другие.

Отраслевые системы аэрокосмического мониторинга унифицированы по программной платформе, по базовым математическим методам тематического дешифрирования, составляющим библиотеку программ. Все отраслевые мониторинговые аэрокосмические системы унифицированы по принципам построения, но специализированы по тематическим задачам. Общесистемная часть Глобальной мониторинговой аэрокосмической системы является общей для всех отраслевых аэрокосмических систем. Общесистемная часть осуществляет предобработку снимков, приводит их к виду, пригодному для последующего тематического дешифрирования.

Комплекс задач государственно-частного инвестирования в работы по реализации Межотраслевой целевой программы

Государственное инвестирование.

Возможны различные формы государственного инвестирования в работы по развитию технологий аэрокосмического мониторинга леса. Наиболее распространенными формами являются прямое субсидирование и

структурное инвестирование. На различных этапах выполнения работ в различных ситуациях необходимо выбирать наиболее эффективную форму инвестирования.

Прямые субсидии – это прямое финансирование программ, отраслей, предприятий. Например, финансирование фундаментальных научных исследований и опытно-конструкторских работ (гранты), внедрения в производство новой техники и переподготовки кадров. Прямые государственные субсидии работ по развитию технологий аэрокосмического мониторинга леса выгодны государству, так как использование результатов аэрокосмического мониторинга леса приносит значительный экономический эффект. Эти субсидии необходимо сделать в самом ближайшем будущем, в противном случае результаты работы развиваемой российской космической системы ДЗЗ не будут востребованы, что приведет к большим экономическим потерям.

Структурные формы государственного инвестирования в работы по развитию технологий аэрокосмического мониторинга леса решат задачу устойчивого перманентного инвестирования в развитие этих технологий. Структурное инвестирование заключается в реорганизации научно-производственных структур, создании новых структур, в объединении функционально-родственных подразделений организаций разных отраслей в единую структуру. Для получения максимального эффекта от государственного инвестирования в работы по развитию технологий аэрокосмического мониторинга леса это инвестирование должно быть максимально адресным как с точки зрения направленности и содержания работ, так и с точки зрения исполнителей работ. Структурное инвестирование решает эту задачу.

Межотраслевой объединенный национальный инновационный центр «Технологии аэрокосмического мониторинга леса». В настоящее время вопросами развития технологий аэрокосмического мониторинга природных ресурсов (и лесных в том числе) занимаются многие организации: институ-

ты РАН, организации Роскосмоса, НИИ и предприятия соответствующих отраслей и профильные вузы. Однако в каждой отрасли должна быть единственная главная организация, отвечающая за решение проблемы в целом, за организацию и координацию тех работ, реализация которых позволит решить поставленную задачу вывода отечественных технологий аэрокосмического мониторинга на лидирующие позиции на мировом рынке этих услуг и одновременно сделать эти технологии высокоэффективными. Такой организацией для лесной отрасли должен стать межотраслевой объединенный национальный инновационный центр «Технологии аэрокосмического мониторинга леса».

В работе [10] подробно рассмотрена структура центра «Технологии аэрокосмического мониторинга леса» (МОНИЦ ТАМЛ). В его состав должны входить четыре отделения: научно-исследовательское, опытно-конструкторское, инвестиционно-коммерческое и научно-образовательное. Структура и состав каждого отделения зависят от решаемых ими задач.

Создание центра «Технологии аэрокосмического мониторинга леса» решит задачу консолидации ресурсов при государственном инвестировании в технологии аэрокосмического мониторинга леса.

Основные виды источников средств государственных инвестиций в развитие технологий аэрокосмического мониторинга леса. Использование аэрокосмического мониторинга леса в лесном хозяйстве уже приносит большой экономический эффект. Прибыль от использования аэрокосмического мониторинга леса получается в результате решения следующих задач:

- более точно и оперативно оценивается состояние леса, что позволяет более эффективно решать задачи лесоустройства и лесопользования;

- определяются из космоса и пресекаются незаконные рубки леса;

- более точно оценивается качество леса при процедуре его «купли-продажи», что делает объективно обоснованной его фактическую рыночную стоимость;

- определение места (координат) пожароопасного состояния леса, что в ряде случаев помогает уменьшить убытки от пожаров в лесах.

Часть прибыли, полученной при этом, должна быть направлена государством на развитие технологий аэрокосмического мониторинга леса.

Главным источником средств формирования и накопления государственных инвестиций в развитие технологий аэрокосмического мониторинга леса должны стать отчисления от стоимости приоритетных инвестиционных проектов в области освоения лесов (Постановление Правительства РФ от 30.06.2007 N 419 (в ред. от 03.02.2010) «О приоритетных инвестиционных проектах в области освоения лесов»).

Коммерциализация НИОКР и развитие частного инвестирования

Коммерциализация НИОКР. Процесс развития технологий в любой отрасли требует больших инвестиций. Основных видов затрат при этом (не считая различных отчислений) всего два: оборудование и зарплата. Чем сложнее и масштабней разрабатываемый технологический процесс, тем дороже оборудование и тем более квалифицированные специалисты требуются для реализации соответствующих проектов, разработок.

Следует отметить, что сложные научные задачи, связанные с разработкой инновационных технологий, нельзя решить простым увеличением числа работающего персонала. Для решения всех задач инновационного характера требуются специалисты, обладающие способностью генерировать идеи. Необходимо всячески поощрять работу изобретателей. Повышение зарплаты непосредственным исполнителям сложных работ по реализации проектов в области инновационных технологий становится чрезвычайно выгодно, так как это является основным фактором, влияющим непосредственно на перманентное развитие технологий. Коммерциализация НИОКР – это один из способов решения за-

дачи заинтересовать экономически ученых и изобретателей в работе инновационного характера.

Создание инфраструктуры малого предпринимательства в области аэрокосмического мониторинга леса. Специально для решения задач коммерциализации НИОКР в области аэрокосмического мониторинга леса должна быть создана соответствующая структура. Подобное подразделение в виде бизнес-центра целесообразно создать в инвестиционно-коммерческом отделении предлагаемого межотраслевого объединенного национального инновационного центра «Технологии аэрокосмического мониторинга леса».

Главная задача бизнес-центра заключается в организации продажи услуг по аэрокосмическому мониторингу леса как государственным, так и коммерческим организациям, непосредственным потребителям этих услуг. Исполнителями работ по оказанию этих услуг являются малые предприятия соответствующего профиля, создаваемые и поддерживаемые бизнес-инкубатором, входящим в состав бизнес-центра. Средства от продажи этих услуг пойдут на развитие технологий аэрокосмического мониторинга леса.

Развитие инновационного бизнеса в области аэрокосмического мониторинга леса. Процессы рыночной экономики являются саморегулируемыми. Однако общество должно в определенной степени (сообразно национальным интересам) влиять на эти процессы и иметь для этого соответствующие экономические механизмы.

Для развития инновационного бизнеса необходимо развитие рынка (рынка спроса товаров и услуг; рынка предложений товаров; рынка предложений услуг). Другой важной составной частью инновационного бизнеса является система инвестирования в инновационный бизнес. Эту функцию выполняют инвестиционные организации.

Для организации, ведения и развития инновационного бизнеса необходимо наличие специалистов в области ведения бизне-

са. Подготовка таких специалистов должна быть выполнена экономическими факультетами технических университетов и экономическими вузами.

Создание ОАО «Мониторинговая информационная система ГЛОМАС-ЛЕС». Наиболее эффективной формой частного инвестирования в развитие технологий аэрокосмического мониторинга леса могло бы стать ОАО «Мониторинговая информационная система ГЛОМАС-ЛЕС» (ОАО МИС ГЛОМАС-ЛЕС). Эта организация будет решать все задачи коммерциализации НИОКР в области технологий аэрокосмического мониторинга леса. При создании ОАО «Мониторинговая информационная система ГЛОМАС-ЛЕС» (ОАО МИС ГЛОМАС-ЛЕС) целесообразно использовать опыт, полученный при создании ОАО «Навигационная информационная система ГЛОНАСС» (ОАО НИС ГЛОНАСС).

Создание межотраслевого ДЗЗ-технопарка в области аэрокосмического мониторинга. Уже имеющийся опыт создания в стране технопарков показал их положительное влияние на развитие инновационного бизнеса.

Подобный региональный ДЗЗ-технопарк аэрокосмического мониторинга леса целесообразно создать в Московской области, где расположены организации космической промышленности и лесной отрасли. Это создаст благоприятный экономический климат для привлечения дополнительных средств инвестирования в развитие технологий аэрокосмического мониторинга леса.

Создание благоприятных экономических условий для инновационного бизнеса. В определенные периоды развития экономики страны в целях создания благоприятных условий для прорывного развития отдельных отраслей, отдельных направлений государством устанавливаются льготные налоговые и правовые режимы.

Опыт введения таких режимов уже есть. Экономические и правовые льготы установлены для инновационного центра «Сколково». Особенности правового и налогового режима установлены отдельным

законом (налоговые таможенные льготы; упрощенные градостроительные процедуры; упрощенные правила технического регулирования; специальные санитарные правила и правила пожарной безопасности; облегченные условия взаимодействия с органами власти).

Подобные временные льготы целесообразно установить и для развития гражданских технологий аэрокосмического мониторинга Земли (и леса). Это ускорит инновационное социально-экономическое развитие страны в рассматриваемой области.

Комплекс задач подготовки специалистов с мировым уровнем компетенций в области технологий аэрокосмического мониторинга леса для реализации Межотраслевой целевой программы

Потребность в специалистах по аэрокосмическому мониторингу. Любая отрасль народного хозяйства для поддержания и развития требует наличия специалистов, а значит, и подготовки специалистов. Для развивающихся отраслей, отличающихся применением высоких технологий, требуются специалисты совершенно новых профилей. Это в полной мере относится к области аэрокосмического мониторинга Земли (и леса в том числе).

Состояние подготовки специалистов по аэрокосмическому мониторингу в российских вузах рассмотрено в обзоре, сделанном ГИС-Ассоциацией. Общее число вузов, ведущих подготовку специалистов по аэрокосмическому мониторингу природных ресурсов, составляет около 250, а число кафедр более 500 (согласно базе вузов на сайте <http://www.edu.ru>).

Профессионально подготовленные кадры являются ключевым фактором для устойчивого роста индустрии данных ДЗЗ и эффективного использования геопрозрачной информации в экономике в целом. Однако в настоящее время как у нас в стране, так и за рубежом отмечается нехватка хорошо подготовленных исполнителей и недостаток профессиональных на-

выков даже у тех из них, которые прошли курсы специального обучения. Технология аэрокосмического мониторинга леса сравнительно молодая, но в последнее время интенсивно развивается как у нас в стране, так и за рубежом. Специфика этой области знаний такова, что требует подготовки специалистов соответствующего профиля, а именно специалистов в области космического мониторинга леса.

Инновационные формы подготовки специалистов по аэрокосмическому мониторингу леса. Главная особенность предлагаемого образовательного проекта [11] состоит в том, что процесс обучения совмещен с производственным процессом. Это реализуется тем, что процесс обучения методам разработки инновационных технологий заключается в непосредственном участии обучаемых в процессе разработки и исследовании этих технологий и создаваемых на их основе систем. При этом студенты работают вместе со своими преподавателями, решая одну общую задачу создания новых, инновационных технологий. Знания, умения и опыт учителей передаются ученикам в процессе их совместной работы.

Ведущие специалисты из промышленности в области аэрокосмического мониторинга леса будут приглашены в качестве совместителей для участия в учебном процессе. На профильных предприятиях будут созданы базовые кафедры.

Изменение статуса и развитие вузовской науки. В университетах сконцентрирован большой научно-технический интеллектуальный потенциал страны. В университетах работают большие коллективы ученых и ведущих специалистов из промышленности. При этом в университетах работают ученые разных областей знаний. Такое сочетание специалистов помогает решать задачи, которые лежат на стыке различных областей знаний и требуют для своего решения наличие специалистов из разных областей науки и техники. Крупные университеты способны вести большие научно-технические разработки инновационного характера.

Однако в большинстве вузов организация образовательного процесса при практически полном отсутствии государственного инвестирования в вузовскую науку не стимулирует интенсивного занятия научной деятельностью. Форма конкурсного инвестирования в вузовскую науку пока не достаточно объективна.

Представляется более предпочтительной комплексная форма инвестирования в вузовскую науку, состоящая из двух частей, базовой и дополнительной. Базовая часть государственного инвестирования фиксирована, дополнительная часть – это то, что выигрывается по конкурсу. Но при этом суммарная нагрузка преподавателя складывается из обязательной оплачиваемой научной работы и из учебной работы. Меняется статус вузовской науки, все преподаватели неизбежно становятся исследователями.

Для вузовских структур такой принцип реализуется следующим образом. ВУЗы получают финансируемый госзаказ на выполнение вполне определенной НИОКР, в данном случае, это разработка глобальной мониторинговой аэрокосмической системы леса (ГЛОМАС-ЛЕС). В НИОКР участвуют и преподаватели, и студенты. Обучение и занятия студентов будут проходить в форме, которая связана непосредственно с выполнением конкретных работ проводимой НИОКР. Студенты в период своего обучения приобретают и опыт производственной работы по специальности. Магистранты, аспиранты и докторанты получают гарантированную возможность заниматься научными исследованиями, разработкой инновационных технологий, внедрять их в отрасль, в производство.

Создание мировой школы «Технологии аэрокосмического мониторинга леса». В целях ускорения разработки и внедрения инновационной системы подготовки специалистов с мировым уровнем компетенций в области аэрокосмического мониторинга леса предполагается создание мировой школы «Технологии аэрокосмического мониторинга леса» (МирШ ТАМЛ)» в составе мирово-

го научно-образовательного центра «Технологии аэрокосмического мониторинга леса» (МИРНОЦ ТАМЛ).

Подготовка специалистов со средним профессиональным образованием

в области аэрокосмического мониторинга леса. В любой отрасли народного хозяйства есть сложные работы, которые требуют наличия высшего образования у специалистов, и есть работы среднего уровня сложности, для выполнения которых не требуется наличия высшего образования, но необходимо наличие среднего профессионального образования. Для подготовки специалистов со средним профессиональным образованием в области аэрокосмического мониторинга леса планируется создание колледжа аэрокосмического мониторинга леса.

**Межотраслевая целевая программа
«Ускоренное инновационное развитие
технологий аэрокосмического
мониторинга леса и вывод их на
лидирующие позиции в мире»**

К настоящему времени накоплен большой научный материал в области технологий аэрокосмического мониторинга леса, получены навыки практического использования методов и средств аэрокосмического мониторинга в лесном хозяйстве. На конференции «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве» [12] было сделано более 100 докладов, в которых рассмотрены вопросы применения аэрокосмических методов и геоинформационных технологий в лесном хозяйстве.

Однако эти достижения в области технологий аэрокосмического мониторинга леса сами по себе не дадут никакого экономического эффекта до тех пор, пока не будут воплощены в реальные работающие системы. При этом максимальный эффект будет получен только при широкомасштабном (и в функциональном, и в территориальном смысле) использовании этих технологий. А такие системы предстоит еще создать. Чем раньше они будут созданы, тем скорей начнется отдача. Вот поэтому поставлена за-

дача ускоренного инновационного развития технологий аэрокосмического мониторинга леса.

Предстоит выполнить большой комплекс работ по анализу, обобщению и систематизации технологий аэрокосмического мониторинга леса и принципов построения реализующих их систем. Предстоит решить большой комплекс задач технического характера: разработка новых перспективных методов и средств аэрокосмического мониторинга леса, создание единой для отрасли Глобальной мониторинговой аэрокосмической системы леса ГЛОМАС-ЛЕС. Предстоит решить большой комплекс задач организационного характера: создание межотраслевого объединенного национального инновационного центра «Технологии аэрокосмического мониторинга леса», коммерциализация НИОКР и создание ОАО «Мониторинговая информационная система ГЛОМАС-ЛЕС». Предстоит решить большой комплекс задач по созданию инновационной системы подготовки специалистов с мировым уровнем компетенций в области технологий аэрокосмического мониторинга леса.

В решении перечисленных задач будут участвовать организации, представляющие различные отрасли (организации Роскосмоса и Рослесхоза, институты РАН, вузы). Для консолидации сил и ресурсов нескольких отраслей, для лучшей координации работ необходима межотраслевая целевая программа «Ускоренное инновационное развитие технологий аэрокосмического мониторинга леса и вывод их на лидирующие позиции в мире».

Максимальный эффект в масштабе всего народного хозяйства будет получен при развитии предлагаемой межотраслевой целевой программы и перерастании ее в отраслевую подпрограмму «Создание глобальной мониторинговой аэрокосмической системы леса (ГЛОМАС-ЛЕС)», которая станет частью единой для всех отраслей федеральной целевой программы «Создание глобальной мониторинговой аэрокосмической системы (ГЛОМАС)».

Библиографический список

1. Санаев, В.Г. Ускоренное инновационное развитие технологий аэрокосмического мониторинга леса средствами российской космической системы ДЗЗ и вывод их на лидирующие позиции в мире: решение проблемы / В.Г. Санаев, И.М. Степанов, В.И. Запруднов, В.И. Панферов, Ю.С. Галкин, В.Г. Бурков // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2012. – № 4(87) – С. 38–45.
2. Райкунов, Г.Г. Стратегия развития космического сегмента системы дистанционного зондирования Земли в России до 2030 г. / Г.Г. Райкунов, Ф.Н. Любченко, А.В. Карелин // Космонавтика и ракетостроение. ЦНИИМАШ. – 2012. – № 3 (68).
3. Райкунов, Г.Г. Вектора развития космической системы дистанционного зондирования земли в России / Г.Г. Райкунов, Ф.Н. Любченко, А.В. Карелин // Аэрокосмический курьер. – № 6. – 2012.
4. Урличич, Ю.М. О приоритетах практической реализации развития космической системы дистанционного зондирования Земли / Ю.М. Урличич, В.А. Селин; К.С. Емельянов // Аэрокосмический курьер. – № 6(78). – 2011. – Интернет-ресурс: www.gisa.ru/file/file2154.doc.
5. Лопота, В.А., Рыжков В.В., Вовк А.В., Улыбышев Ю.П., Донцов Г.А., Певцов С.Ф. Перспективные технологии выведут мониторинг поверхности Земли из космоса на совершенно новый уровень. // Геоматика. – №1. – 2013.
6. Возможности непрерывной инвентаризации лесов России на основе дистанционных методов. Е.А.Лупян, С.А. Барталев, Н.В. Лукина. (Совещание по вопросам использования возможностей спутникового мониторинга в решении задач Государственной инвентаризации лесов. Рослесхоз, 17 мая 2013 г. <http://www.rosleshoz.gov.ru/activity/inventory/news/0>).
7. Геопортал Роскосмоса. Сервис космических снимков. <http://geoportals.ntosmz.ru/index.php/welcome/about>).
8. Степанов, И.М. Глобальная сеть аэрокосмического мониторинга леса// Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2007. – №4 (53). – С. 157–161.
9. Санаев, В.Г., Степанов И.М., Запруднов В.И., Панферов В.И. Создание отраслевой Глобальной мониторинговой аэрокосмической системы леса (ГЛОМАС-ЛЕС) – прорывное направление критических технологий // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2014. – № 2(101).
10. Санаев, В.Г., Степанов И.М., Запруднов В.И., Панферов В.И., Третьяков А.Г., Манович В.Н. Межотраслевой объединенный национальный исследовательский центр «Технологии аэрокосмического мониторинга леса» – инновационная форма интеграции науки, производства и образования в целях ускоренного развития технологий аэрокосмического мониторинга леса // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2013. – № 2(94).
11. Инновационный образовательный проект в области аэрокосмического мониторинга леса. Степанов И.М., Галкин Ю.С., Корольков А.В., Костылев А.Г., Платонов А. А. (Доклад на 1-ой Международной конференции МАА – РАКЦ «Космос для человечества», 21–23 мая 2008, г. Королев, Моск. обл.).
12. Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве: Доклады V Всероссийской конференции, посвященной памяти выдающихся ученых-лесоводов В.И. Сухих и Г.Н. Коровина (Москва, 22-24 апреля 2013 г.) – М.: ЦЭПЛ РАН, 2013 г. 348 с.

THE INTERSECTORAL TARGET PROGRAM OF RAPID DEVELOPING THE INNOVATION TECHNOLOGIES OF AEROSPACE FORESTS MONITORING WITH BRINGING THEM TO THE WORLD LEADING POSITION AND “AEROCOSMOS-FOREST” MEGAPROJECT

Sanaev V.G., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Stepanov I.M., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Zaprudnov V.I., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Tech.)⁽¹⁾; Usachev M.S., Assoc. Prof. MSFU, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾; Tarasenko P.A., Assoc. Prof. MSFU, Ph.D. (Tech.)⁽¹⁾; Malashin A.A., Prof. MSFU, Dr. Sci. (Physics and Mathematics)⁽¹⁾; Nefedov P.V., MSFU⁽¹⁾; Kolesnik T.V., MSFU⁽¹⁾

stepanim@mail.ru

⁽¹⁾Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moscow reg., Russia

The article shows the necessity and the ways of the accelerated development of innovative technologies of aerospace forests resources monitoring by means of the Russian space remote sensing system. At the same time a goal to bring these technologies to the leading positions in the world is set. It is shown that in order to achieve the stated objective a large complex of tasks must be solved. Solving these problems will involve certain organizations representing various sectors (Roskosmos organization and the Federal Forestry Agency, Russian Academy of Sciences, some institutes and universities). To consolidate the efforts and resources of several branches and to coordinate better the work, the Intersectoral target program is necessary. A complete set of documents within the Intersectoral target program «Accelerated development of innovative aerospace forest monitoring technology and bringing them to a leading position in the world» has been developed by MSFU staff and posted on the website MSFU (Yandex address: **AEROCOSMOS–FOREST**)

Keywords: aerospace forest monitoring, technical qualities of aerospace monitoring systems, consumer qualities of aerospace monitoring systems.

References

1. Sanaev V.G., Stepanov I.M., Zaprudnov V.I., Panferov V.I., Galkin Y.S., Burkov V.D. *Uskorennoe innovacionnoe razvitiye tekhnologiy aehrokosmicheskogo monitoring lesa sredstvami rossiyskoy kosmicheskoy sistemy dzz I vyvod ih na lidiruyushchie pozicii v mire reshenie problemy* [Accelerated innovation development of technologies aerospace monitoring of forest by means of the russian space systems sensing and displays them on the world leader : solution of the problem]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoi Vestnik, 2011, № 4, pp.38-45.
2. Raikunov G.G., Lubchenco F.N., Karelin A.V. *Strategiya razvitiya kosmicheskogo segmenta sistemy distancionnogo zondirovaniya zemli v Rossii do-2030 goda* [Space Segment Development Strategy remote sensing system in Russia up to 2030], cosmonautics and rocket engineering, 2012, № 3 (68).
3. Raikunov G.G., Lubchenco F.N., Karelin A.V. *Vektora razvitiya kosmicheskoy sistemy distancionnogo zondirovaniya zemli v Rossii* [Vectors of space system of remote sensing in Russia], «Aerospace Courier», Moscow: 2012, № 6.
4. Urlichich Y.M., Čiline B., Emelyanov K.S. *O prioritetah prakticheskoy realizacii razvitiya kosmicheskoy sistemy distancionnogo zondirovaniya zemli* [On the priorities of the practical implementation of the development of space remote sensing system], Internet resource www.gisa.ru/file/file2154.doc.
5. Lopota V.A., Ryzhkov V.V., Vovk A.V., Ulybyshev Y.P., Dontsov G.A., Pevtsov S.F. *Perspektivnye tekhnologii vyvedut monitoring poverhnosti zemli iz kosmosa na sovershenno novyy uroven* [Advanced technologies will lead the monitoring of the Earth’s surface from space to a whole new level], Geomatics, Moscow, 2013, № 1.
6. Lupyan E.A., Bartalev S.A., Lukin N.V. *Vozможности nepreryvnoy inventarizacii lesov rossii na osnove distancionnyh metodov* [Features continuous inventory of forests of Russia on the basis of remote sensing methods]. Meeting on the use of satellite monitoring capabilities in solving the problems of the State forest inventory. The Forest Service, May 17, 2013. (Internet resource <http://www.rosleshoz.gov.ru/activity/inventory/news/0>).
7. *Geoportal roskosmosa. Servis kosmicheskikh snimkov* [Roscosmos Geoportal. Service space images], Internet resource <http://geoportal.ntsomz.ru/index.php/welcome/about>
8. Stepanov I.M. *Globalnaya set aehrokosmicheskogo monitoring lesa* [The global network of aerospace monitoring of forests], Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik, 2007, № 4, pp. 157-161.
9. Sanayev V.G., Stepanov I.M., Zaprudnov V.I., Panferov V.I. *Sozdanie otraslevoy globalnoy monitoringovoy aehrokosmicheskoy sistemy lesa glomas les proryvnoe napravlenie kriticheskikh tekhnologiy* [Creation of branch global monitoring space system of the wood (glomias-les) – the breakthrough direction of critical technologies]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik, 2014, № 2, pp. 140-147.
10. Sanaev V.G., Stepanov I.M., Zaprudnov V.I., Panferov V.I., Tretyakov A.G., Manovich V.N. *Mezhotraslevoy obedinenny nacionalny issledovatel'skiy centr tekhnologii aehrokosmicheskogo monitoring lesa – innovacionnaya forma integracii nauki proizvodstva I obrazovaniya v celyah uskorennoy razvitiya tekhnologiy aehrokosmicheskogo monitoring lesa* [Interbranch united «national research center «aerospace technology monitoring forest» – an innovative form of integration of science, production and education to enhance the development aerospace technology forest monitoring]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy vestnik, 2013, № 2, pp. 183-188.
11. Stepanov I.M., Galkin Y.S., Korol'kov A.V., Kostylev A.G., Platonov A.A. *Innovacionnyy obrazovatelnyy proekt v oblasti aehrokosmicheskogo monitoring lesa* [The innovative educational project in the field of aerospace monitoring of the forest]. Report on the 1st International Conference of the IAA – RACT «Space for Humanity», 21 – May 23 2008 Korolev.
12. *Aehrokosmicheskie metody I geoinformacionnye tekhnologii v lesovedenii I lesnom hozyaystve* [Aerospace methods and GIS technology in forestry and forestry], Report V All-Russian Conference dedicated to the memory of outstanding scientists foresters V.I. Suhii and G.N. Korovin (Moscow, 22-24 April 2013)]. Moscow: CEPF RAS, 2013 pp. 348.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЯ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В LUCENE.NET

М.В. ЖЕРДЕВА, *асп. ГБОУ ВО МО «Технологический университет»*⁽¹⁾,

В.М. АРТЮШЕНКО, *проф, ГБОУ ВО МО «Технологический университет», д-р техн наук*⁽¹⁾

masha8908@rambler.ru

⁽¹⁾ ГБОУ ВО МО «Технологический университет», 141070 Московская область, г. Королев, ул. Гагарина, д. 42

Рассматривается использование морфологического анализа в Lucene.Net. Актуальность данной статьи не вызывает сомнения, т.к. разработчик, реализующий какой-либо проект, сталкивается с потребностью реализовать поиск в своем веб-приложении. Автор рассматривает понятия стемминга и лемматизации. Выделена цель стемминга и лемматизации. Показано применение модуля морфологического анализа в Lucene.Net. Lucene.Net – это перенесенный с платформы Java поисковый движок в lucene. В lucene – это высокопроизводительная, масштабируемая библиотека для полнотекстового поиска. Полнотекстовый поиск документов относится к процессу поиска, информации в документах или метаданных о документах. В lucene позволяет добавлять возможности поиска в различные приложения. Главной особенностью библиотеки является то, что требуется малый объем памяти, наличие ранжированного поиска, возможность одновременного поиска и обновления индекса. Введение в настоящее время и на протяжении уже несколько лет является самой популярной свободной библиотекой полнотекстового поиска. Рассмотрены цели, которые нужно достичь при реализации операций, выполняемых модулем морфологического анализа. Предложена идея модификации модуля лемматизации Lucene.Net для быстрого и релевантного поиска ключевых слов.

Ключевые слова: полнотекстовый поиск, стемминг, лемматизация, лемма, стоп-слова, токен.

Lucene.Net – это перенесенный с платформы Java поисковый движок Lucene. Он поддерживает тот же API и те же классы, что и оригинальная версия. Это накладывает определённый отпечаток, а также делает индекс обратно совместимым для обеих платформ [17]. Стабильный релиз 3.0.3 от 26 октября 2012 г. может быть загружен из официального репозитория.

Lucene – это высокопроизводительная, масштабируемая библиотека для информационного поиска (ИП). ИП относится к процессу поиска документов, информации в документах или метаданных о документах. Lucene позволяет добавлять возможности поиска в различные приложения. Этот открытый проект реализован Apache Software Foundation и может быть использован на условиях лицензии Apache Software. Главной особенностью библиотеки является то, что требуется малый объем памяти, наличие ранжированного поиска, возможность одновременного поиска и обновления индекса, поиск, основанный на «полях» и т. д. Для другого движка нет такого количества портов на другие языки, как для Lucene. Одним из факторов такой популярности является то, что можно строить решения, работающие с индексом и производящие поиск, но не имеющие собственного индексатора.

Помимо основных модулей Lucene, существует большое количество дополнений, предлагающих полезные расширения функциональности. Некоторые из них являются жизненно необходимыми почти для всех приложений, например модуль проверки орфографии и подсветки результатов. используется в таких проектах, как StackOverflow, Twitter Loggly.com, Archive.org, Search.U.S.A. gov WhiteHouse.gov, Digg, MySpace LinkedIn, Fedex, Apple SalesForce.com, Encyclopedia Britannica CD-ROM/DVD, Eclipse IDE Atlassian (JIRA) и др. [3, 4, 8–10].

Таким образом, Lucene в настоящее время и на протяжении уже несколько лет является самой популярной свободной библиотекой для ИП.

Одним из полезных средств, используемых в механизмах полнотекстового поиска, является стемминг.

Стеммингом обычно называется приближенный эвристический процесс, в ходе которого от слов отбрасываются окончания в расчете на то, что в большинстве случаев это себя оправдывает. Стемминг основан на правилах морфологии языка и не требует хранения словаря всех слов. [6]

Таким образом, стемминг отсекает от слова окончания и суффиксы, чтобы остав-

шаяся часть была одинаковой для всех грамматических форм слова.

Более сложным подходом к решению проблемы определения основы слова является лемматизация.

Лемматизацией называется преобразование слова в словарный вид или лемму. Данный метод используется в алгоритмах поисковиков при индексировании интернет-страниц. Процесс дает возможность хранения данных страницы набором слов в индексе для удобной схематизации файлов. Это позволяет ускорить индексацию и сформировать более четкий ответ на поисковый запрос, так как сокращенную форму слова поисковик анализирует быстрее.

Лемма – это первоначальная, основная форма слова. Для существительных и прилагательных ею является форма единственного числа, именительного падежа. Для глаголов лемма является инфинитивом, неопределенной формой слова, отвечающей на вопрос в инфинитиве [4–6].

Лемматизатором называют программу или модуль программы, проводящий лемматизацию. Главной его задачей является то, что он улучшает релевантность поиска. Также лемматизатор уменьшает количество анализируемых слов.

Цель стемминга и лемматизации одна – привести словоформы и производные формы слова к общей основной форме.

В Lucene.Net в механизме полнотекстового поиска используется стемминг. Механизм стемминга основан на использовании алгоритма Портера.

Основная идея алгоритма Портера заключается в том, что существует ограниченное количество формо- и словообразующих суффиксов и основа слова преобразуется без использования каких-либо баз (словарей) основ: только множество существующих суффиксов (при этом сложные составные суффиксы разбиваются на простые) и вручную заданные правила. В алгоритме Портера была описана последовательность шагов, в каждом из которых при определенных правилах может происходить одно из определенных преобразований окончаний.

То, что алгоритм Портера не использует никаких словарей и баз основ, является плюсом для быстродействия и спектра применения (он неплохо справляется с несуществующими словами) и одновременно минусом с точки зрения точности выделения основы. Кроме того, к минусам алгоритма Портера часто относят человеческий фактор: то, что правила для проверки задаются вручную и иногда связаны с грамматическими особенностями языка, увеличивает вероятность ошибки.

Модуль морфологического анализа в Lucene.Net

В Lucene модуль морфологического анализа обычно выполняет преобразование множества всех слов языка во множество лемм – нормализованных форм слов. В литературе данный модуль поисковой системы называют модулем морфологического анализа, нормализатором слов, лемматизатором.

Операцию, выполняемую данным модулем можно представить, как отображение: $T \rightarrow L$, где T – множество всех терминов; L – множество всех лемм, при этом количество лемм меньше мощности множества всех терминов $|T| > |L|$.

Реализуя данное преобразование нужно стараться достичь следующих целей:

1. Увеличение полноты поиска: отбираются документы, которые содержат все формы слова, поэтому в результат поиска попадают не только документы со словом в совпадающей с запросом форме, но и другие документы, содержащие различные формы данного слова.

2. Увеличение точности поиска: при использовании статистических алгоритмов поиска и отбора в результат поиска нескольких документов, которые получили наибольший вес, очень важным становится получение частотных характеристик документов. Использование вместо частот слов частоты лемм может позволить получить больший вес для релевантных документов и тем самым поместить их во множество отобранных.

3. Уменьшение размера индексной информации и ускорение обработки запроса.

Лемматизация приводит к уменьшению размера индекса и увеличению скорости обработки запроса, т.к. количество лемм меньше количества слов. Развитие методов сжатия индексной информации и совершенствование алгоритмов поиска приводит к тому, что использование морфологической обработки для уменьшения размера индекса в настоящее время не является критически важным в большинстве случаев.

Заключение

Высокая скорость является критерием эффективного индексирования. Она зависит от количества форм слова — чем их меньше, тем раньше закончится схематизация документа.

Словарный лемматизатор, имеющийся в грамматическом словаре, позволяет с намного более высокой точностью находить базовую форму слова из любой грамматической. Если сравнивать результат лемматизации искомого ключевого слова и слов, читаемых из текста, то получается поиск текста с учетом морфологии.

Операция лемматизации позволяет увеличить полноту и точность информационного поиска, т.к. во время операции стемминга отсутствует морфологическая обработка, из-за чего часто в выборку попадают документы, не релевантные запросу, но содержащие совпадающие формы, в то время как в релевантных документах данные слова употребляются в другой форме.

Только с помощью лемматизации можно проводить эффективное индексирование. В этом случае под эффективностью подразумевают скорость индексирования, которая зависит от количества анализируемых слов и их форм. Процесс индексирования идет тем медленнее, чем больше слов приходится обрабатывать.

Благодаря этому возникает идея модифицировать модуль морфологического анализа, в основе которого лежит механизм стемминга. Вместо механизма стемминга использовать механизм лемматизации для быстрого и релевантного поиска ключевых слов.

В Lucene.Net модуль морфологического анализа RussianAnalyzer предназначен

для преобразования слов. Данный модуль используется для разбора, разбивки и индексирования данных, имеет встроенный стоп-лист, а также производит сравнение без учета регистра символов.

Стоп-слова — это слова, не несущие какой-либо самостоятельной смысловой нагрузки. В целях уменьшения базы данных системы не учитывают стоп-слова при индексировании, заменяя их специальным маркером. К ним относятся:

- союзы и союзные слова,
- местоимения,
- предлоги,
- частицы,
- междометия,
- указательные слова,
- цифры,
- знаки препинания,
- вводные слова,
- ряд некоторых существительных, глаголов, наречий (например, однако и др.)

Библиографический список

1. Нистратова, М.В. Алгоритмы поиска, используемые в Lucene.Net / М.В. Нистратова // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – № 6. – 2016. – Т. 19.
2. Нистратова, М.В. Алгоритмы поиска релевантной информации в полнотекстовых базах данных / М.В. Нистратова // Естественные и технические науки. – 2015. – № 10.
3. Нистратова, М.В., Кулагин В.Г. Оценка эффективности поиска документальной информации в системах единой авторизации / М.В. Нистратова, В.Г. Кулагин // Двойные технологии. – № 1. – 2016.
4. Полнотекстовый поиск в веб-проектах: Sphinx, Apache Lucene, Xapian. – Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/30594/>
5. Стемминг и лемматизация. – Режим доступа <http://delaem-krasivo.ru/programmirovanie/234-stemming-i-lemmatizaciya.html>
6. Стемминг. – Режим доступа: <http://gruzdoff.ru/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%B3>
7. Стратегии поиска и выдачи информации. – Режим доступа: <http://studall.org/all-130662.html>
8. Тихонов, В. Поисковые системы в сети Интернет / В. Тихонов. – Режим доступа: <http://www.citforum.ru/internet/search/searchsystems.shtml>
9. Шарапов, Р.В. Модели информационного поиска / Р.В. Шарапов, Е.В. Шарапова, Е.А. Саратовцева. – Режим доступа: <http://vuz.exponenta.ru/PDF/FOTO/kaz/Articles/sharapov1.pdf>.
10. Язык запросов Lucene.NET. – Режим доступа: <https://pavelbelousov.wordpress.com/2011/03/23/язык-запросов-lucene-net/>

USE OF THE MODULE OF THE MORPHOLOGICAL ANALYSIS IN LUCENE.NET

Zherdeva M.V., pg. «University of Technology»⁽¹⁾; Artyushenko V.M., Prof. «University of Technology», Dr Sci. (Tech.)⁽¹⁾

masha8908@rambler.ru,

⁽¹⁾«University of Technology», 141070 Moscow region, Korolev, ul. Gagarin, 42

In this article the use of the morphological analysis in Lucene.Net is considered. The relevance of this article doesn't raise any doubts since the developer realizing any project faces a need to carry out a search in the web application. In this article the author considers concepts of a stemming and a lemmatization. The purpose of a stemming and a lemmatization is selected. The use of the module of the morphological analysis is shown in Lucene.Net. Lucene.Net is the retrieval engine postponed from a platform Java in lucene. In lucene – it is high-performance, scalable library for full-text query search. Full-text query search for documents belongs to process of search, information in documents or meta data on documents. In lucene it is allowed to add a search capability in different applications. The principal feature of library is that the small memory size, the existence of the ranged search, a possibility of simultaneous search and up-dating of an index are required. An introduction now and throughout already several years has been the most popular free library of full-text query search. The purposes which need to be reached in case of implementation of the operations executed by the module of the morphological analysis are considered. The idea of modification of algorithm of full-text search Lucene.Net for quick and relevant keywords search engine has been suggested.

Keywords: a full text search, stemming, lemmatization, lemma, stopwords, a token.

References

1. Zherdeva M.V. *Algoritmy poiska, ispol'zuemye v Lucene.Net* [Search algorithms used in lucene.net]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik. № 6. 2016. T. 19.
2. Nistratova M.V. *Algoritmy poiska relevantnoy informacii v polnotekstovyyh bazah dannyh* [Search algorithm relevant information in the full-text databases]. Estestvennyye i tekhnicheskie nauki. 2015, № 10) [Natural and technical science], 2015, No. 10).
3. Nistratova M.V., Kulagin V.G. *Ocenka ehffektivnosti poiska dokumental'noy informacii v sistemah edinoy avtorizacii* [Оценка эффективности поиска документальной информации в системах единой авторизации]. Dvoynye tekhnologii [Двойные технологии]. № 1. 2016.
4. *Polnotekstovyy poisk v veb-proyektakh: Sfinks, Apache Lucene, Xapian* [Full-text search in web projects: Sphinx, Apache Lucene, Xapian.] Available at: <http://habrahabr.ru/post/30594/>
5. *Stemming i lemmatizaciya* [Stemming and lemmatization]. Available at: <http://delaem-krasivo.ru/programirovanie/234-stemming-i-lemmatizaciya.html>
6. *Stemming* [Stemming]. Available at: <http://gruzdoff.ru/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%B3>
7. *Strategii poiska i vydachi informacii* [Strategy of search and issue of information]. Available at: <http://studall.org/all-130662.html>
8. Tihonov V. *Poiskovyje sistemy v seti Internet* [Search engines on the Internet]. Available at: <http://www.citforum.ru/internet/search/searchsystems.shtml>
9. Sharapov R.V., Sharapova E.V., Saratovceva E.A. *Modeli informacionnogo poiska* [Models of information search]. Available at: <http://vuz.exponenta.ru/PDF/FOTO/kaz/Articles/sharapov1.pdf>
10. *Yazyk zaprosov Lucene.NET* [Language of inquiries Lucene.NET]. Available at: <https://pavelbelousov.wordpress.com/2011/03/23/yazyk-zaprosov-lucene-net/>

**О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНЫХ ПРИМЕНЕНИЯХ
НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ**

А.И. РУБИНШТЕЙН, *проф. МГУЛ, д-р ф.-м. наук⁽¹⁾*,
 О.М. ПОЛЕЩУК, *проф. МГУЛ, д-р ф.-м. наук⁽¹⁾*,
 Т.А. ГОРОДЕЦКАЯ, *ст. преподаватель МГУЛ⁽¹⁾*,
 Т.В. ЧЕРНОВА, *ст. преподаватель МГУЛ⁽¹⁾*

rubinshtein_aleksandr@mail.ru, caf-math@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса»
 141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ.

Многие математические модели реальных явлений таковы, что описывают реакцию детерминированного объекта на стороннее воздействие. При этом информация об этом стороннем воздействии оказывается неполной. Поэтому и о реакции приходится говорить как о не полностью определенной. Очевидным образом попадаем в сферу действия теории нечетких множеств. Таким образом, приходим к рассмотрению действия каких-то операторов на элемент известного пространства, заданного неточно (имеется в виду элемент). Если ничего не требовать от оператора, то задача оказывается неразрешимой. Однако, если рассматривать пространства числовых функций и ограничиться положительными операторами, то можно получить конкретные результаты. Напомним, что оператор, действующий в каком-то пространстве, элементами которого является функции, а образы элементов пространства – действительные числа, то положительным оператором называется оператор, сопоставляющий положительным функциям положительные числа. Такими операторами являются, например, ньютоновский потенциал поля тяготения, удовлетворяющий уравнению Пуассона; функция, являющаяся гармонической в круге с центром в начале координат (то есть являющаяся решением уравнения Лапласа); решение уравнения теплоемкости, непрерывное при неотрицательных значениях времени и принимающее в начальный момент положительные (неотрицательные) значения. Решение линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами и нулевыми начальными условиями, задаваемое интегралом Дюамеля также описывается положительным оператором. Положительные операторы часто встречаются в теории тригонометрических рядов. Таковыми являются операторы Фейера, Валле-Пуассена, Пуассона, Бернштейна. Положительны и операторы Э. Ландау и Вейерштрасса. С помощью операторов Вейерштрасса и Бернштейна можно доказать фундаментальную теорему Вейерштрасса о возможном приближении с любой степенью точности произвольной непрерывной на отрезке функции многочленом (высокой степени).

Ключевые слова: положительный оператор, дифференциальное уравнение, нечеткое множество.

Рассмотрим некоторые математические модели физических объектов, в которых исходные данные – имперические или экспериментальные – задаются с погрешностью. То есть мы имеем дело с простейшей задачей, рассматриваемой в теории «нечетких множеств».

1. Ньютоновский потенциал поля тяготения $u(x,y,z)$ объемно распределенной массы с плотностью $\rho(x,y,z)$ в шаре $x^2 + y^2 + z^2 \leq R^2$, как известно, удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -4\pi\rho(x,y,z).$$

Решение этого дифференциального уравнения по формуле Пуассона есть [1]

$$u(x,y,z) = \iiint_{x^2+y^2+z^2 \leq R^2} \frac{\rho(a,b,c)dadbdcdz}{\sqrt{(x-a)^2+(y-b)^2+(z-c)^2}},$$

то есть $u = A \cdot \rho$ – интегральный оператор с положительным ядром

$$\frac{1}{\sqrt{(x-a)^2+(y-b)^2+(z-c)^2}}.$$

Зная погрешность (в каком – либо функциональном пространстве) ρ , можно определить и погрешность образа оператора A – функции u .

2. Гармоническая в круге $x^2 + y^2 < R^2$, непрерывная вплоть до границы $x^2 + y^2 = R^2$ функция $u(x,y)$ такая, что

$$u(R\cos\theta, R\sin\theta) = f(\theta).$$

Задается (см. [1]) формулой Пуассона

$$u(x,y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \frac{R^2 - x^2 - y^2}{R^2 - 2R(x\cos\theta + y\sin\theta) + x^2 + y^2} d\theta$$

так же есть интегральный оператор от f с положительным ядром. Зная погрешность f можно определить погрешность $u(x,y)$.

3. Непрерывное при $t \geq 0$, ограниченное для $t > 0$ решение уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

задается формулой

$$u(x,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi t}} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\xi) e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4t}} d\xi$$

примем $u(x,0) = \varphi(x)$. Ядро этого интегрального оператора $e^{-\frac{(x-\xi)^2}{4t}} > 0$

4. В [2] в связи с точным вычислением нормы оператора рассматривалось линейное дифференциальное уравнение n -го порядка с постоянными коэффициентами

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} y' + a_n y = f(x)$$

с нулевыми начальными условиями

$$y(0) = y'(0) = \dots = y^{(n-1)}(0) = 0$$

(в случае $n = 2$ – уравнение колебаний), решение которого дается (см., например, [3]) интегралом Дюамеля

$$y(x) = \int_0^x g(x-\xi) f(\xi) d\xi$$

где

$$g^{(n)} + a_1 g^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} g' + a_n g = 0,$$

$$g(0) = yg'(0) = \dots = g^{(n-2)}(0) = 0, \quad g^{(n-1)}(0) = 1$$

($g(x)$ – функция Грина). В случае $g(x) \geq 0$ опять имеем интегральный оператор с положительным ядром.

Например, для уравнения

$$y'' + \omega^2 y = f(x)$$

– уравнения вынужденных гармонических колебаний без диссипации единичной точечной массы с нулевой начальной скоростью в нулевом положении равновесия

$$y(x) = \int_0^x \sin(x-\xi) f(\xi) d\xi.$$

На интервале $(0; \pi)$ ядро $\sin t$ положительно.

Если рассматривать линейные операторы вида

$$(Lf)(x) = \int_a^b f(\xi) \varphi(\xi, x) d\xi$$

с непрерывной по ξ при каждом фиксированном x функцией $\varphi(\xi, x)$, то (см. [4] стр.19) $(Lf)(x) > 0$ при $f(\xi) > 0$ для $\xi \in (a, b)$ при всех x , тогда и только тогда, когда $\varphi(\xi, x) > 0$ для $\xi \in (a, b)$ при всех x . Такие операторы называются положительными. Такими являются операторы Фейера

$$\sigma_n(f, x) = \frac{1}{2\pi(n+1)} \int_{-\pi}^{\pi} f(\xi) \left(\frac{\sin(n+1)\frac{\xi-x}{2}}{\sin\frac{\xi-x}{2}} \right)^2 d\xi;$$

операторы Валле-Пуссена $V_{n, 2n-1}(f; x)$ (см. [4] стр.157);

Пуассона

$$L_r(f, x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\xi) \frac{1-r^2}{1-2r \cos(\xi-x) + r^2} d\xi, \quad 0 \leq r < 1;$$

Вейерштрасса

$$W_n(f, x) = \left(\int_{a_1-b_1}^{b_1-a_1} e^{-n\xi^2} d\xi \right)^{-1} \int_{a_1}^{b_1} f(\xi) e^{-n(\xi-x)^2} d\xi,$$

где $a_1 = a + \delta$; $b_1 = b + \delta$, $\delta > 0$ и функция $f(\xi)$ непрерывна на $[a; b]$;

Э. Ландау

$$L_n(f, x) = \left(\int_{a_1-b_1}^{b_1-a_1} \left(\frac{c^2 - \xi^2}{c^2} \right)^n d\xi \right)^{-1} \int_{a_1}^{b_1} \left(\frac{c^2 - (\xi-x)^2}{c^2} \right)^n f(\xi) d\xi,$$

$$c_1 = b_1 - a_1;$$

Операторы Бернштейна

$$B_n(f, x) = \sum_{k=0}^n f\left(\frac{k}{n}\right) C_n^k x^k (1-x)^{n-k},$$

$$0 \leq x < 1$$

хотя не являются интегральными, также положительны.

Связь операторов Вейерштрасса и Бернштейна с теорией вероятностей очевидна. С их помощью доказывается фундаментальный факт – теорема Вейерштрасса о том, что любую непрерывную на отрезке функцию можно сколь угодно точно (равномерно) приблизить алгебраическим многочленом.

Заметим, что нормы всех операторов $(Lf)(x)$ из C в C равны единице.

Библиографический список/ References

1. Годунов, С.К. Уравнения математической физики / С.К. Годунов. – М., Наука, 1971.
Godunov S.K., *Upravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics], Moscow: Nauka, 1971.
2. Рубинштейн, А.И. Об одном случае точного вычисления нормы оператора / А.И. Рубинштейн // Вестник МГУЛ – Лесной Вестник. – № 2. – 2008. – С. 110–111.
Rubinstein, A. I., *Ob odnom sluchae tochnogo vychisleniya normy operatora* [On one occasion the accurate calculation of the norm of the operator]. Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik, № 2, 2008, pp. 110-111.
3. Понтрягин, Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения / Л.С. Понтрягин. – М., Наука, 1965.
Pontryagin L.S., *Obyknovennyye differentsial'nyye uravneniya* [Ordinary differential equations], Moscow: Nauka, 1965.
4. Коровкин, П.П. Линейные операторы и теория приближений / П.П. Коровкин. – М., Наука, 1959.
Korovkin P.P., *Lineynyye operatory i teoriya priblizheniy* [Linear operators and approximation theory], Moscow: Nauka, 1959.
5. Poleshchuk O., Komarov E. A nonlinear hybrid fuzzy least-squares regression model // Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society - NAFIPS 2011. С. 5751909.
6. Poleshchuk O. The determination of students' fuzzy rating points and qualification levels // International Journal of Industrial and Systems Engineering, 2011. -vol. 9, № 1, pp. 3-20.
7. Poleshchuk O., Komarov E. A fuzzy linear regression model for interval type-2 fuzzy sets // Proceedings of the 31st International Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society. - NAFIPS'2012- Berkeley, California, August 6-8, 2012.
8. Ashraf Darwish and Olga Poleshchuk Fuzzy Models for Educational Data Mining // Journal of Telecommunications.- 2012.- vol. 15, № 2, pp. 8-22.
9. Olga Poleshchuk and Ashraf Darwish New models for monitoring and clustering of the state of plant species based on semantic spaces // Journal of Intelligent and Fuzzy Systems.- 2014.- vol. 26, № 3, Pp. 1089–1094.
10. Poleshchuk O., Komarov E. A fuzzy nonlinear regression model for interval type-2 fuzzy sets // International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering, 2014, V. 8, № 6, Pp. 817 - 821.

ON SOME POSSIBLE APPLICATIONS OF FUZZY SETS THEORY

Rubinshtein A.I., Prof., MSFU, Dr. Sci. (Physics and Mathematics)⁽¹⁾; **Poleshchuk O.M.**, Prof., MSFU, Dr. Sci.(Tech.)⁽¹⁾; **Gorodetskaya N.A.**, MSFU⁽¹⁾; **Chernova T.V.**, MSFU⁽¹⁾

caf-math@mgul.ac.ru, rubinshtein_aleksandr@mail.ru,

⁽¹⁾ Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moscow reg., Russia

Many mathematical models of real phenomena are those that describe the response of a deterministic object on the side effect. The information about the exterior effects is not complete. Taking this into account, one has to speak about a response as not fully defined. So, one gets in touch with the theory of fuzzy sets. Thus, we come to the consideration of the action of some operators on an element of known space identified inaccurately (meaning element). If there is nothing to demand from the operator, then the problem is unsolvable. However, if we consider the space of numerical functions and get restricted to positive operators, we can obtain some concrete results. It must be kept in mind that if there is an operator acting in some space which contain some elements as a function, and the images of the elements of the space are real numbers, then a positive operator is the operator that maps positive functions to positive numbers. Such operators are, for example, the Newtonian potential of the gravitational field satisfying the Poisson equation; a function that is harmonic in the circle with center at the coordinates origin (that is, a solution to the Laplace equation); the solution of the equation of heat propagation, continuous with non-negative values of time, and which at the initial moment is a positive (nonnegative) value. Solution of linear differential equations with constant coefficients and zero initial conditions, set by the integral of Duhamel also describes a positive operator. Positive operators occur frequently in the theory of trigonometric series. These are operators of Fejér, Vallée-Poussin, Poisson, and Bernstein. Positive are operators of E. Landau and Weierstrass. With the help of Weierstrass and Bernstein operators it is possible to prove the fundamental theorem of Weierstrass about the possible approximation of an arbitrary continuous function on a random interval with a polynomial (of high degree) with any degree of accuracy .

Keywords: a positive operator, a differential equation, careless multitudes, fuzzy sets

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ИНТЕГРАЛА В СМЫСЛЕ ГЛАВНОГО ЗНАЧЕНИЯ И ВАРИАНТ СВЕДЕНИЯ ИНТЕГРАЛА ЛЕБЕГА-СТИЛТЬЕСА К ИНТЕГРАЛУ РИМАНА-СТИЛТЬЕСА

Н.В. ШИПОВ, доц., МГУЛ, канд. физ.-мат. наук⁽¹⁾,
О.М. ПОЛЕЩУК, проф., МГУЛ, д-р техн. наук⁽¹⁾,
А.В. ШМАКОВ, доц., МГУЛ, канд. физ.-мат. наук⁽¹⁾

rubinshtein_aleksandr@mail.ru, caf-math@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ.

Найдена в явном виде альтернативная формула представления функционала – обобщенной функции $P(1/x)$ (и всех его производных) в пространстве обобщенных функций медленного роста. Наиболее широким классом производящих функций для меры множеств в интеграле Лебега-Стилтьеса, а также производящих функций в интеграле Римана-Стилтьеса, является множество функций с ограниченной вариацией. Функции с ограниченной вариацией представляются, как известно, в виде разности двух монотонных неубывающих функций. Каждая из этих двух монотонных неубывающих функций является в общем случае разрывной функцией (разрывной как слева, так и справа). Для целей изложения свойств меры Лебега-Стилтьеса и соответствующих свойств интеграла Лебега-Стилтьеса удобно считать, что монотонная производящая функция является непрерывной слева (или непрерывной только справа). При использовании интеграла Лебега-Стилтьеса в ряде случаев предлагается переопределить, в случае необходимости, каждую из двух монотонных неубывающих функций так, чтобы они стали непрерывными слева, что снижает общность изложения и применения. Разрывная производящая функция с ограниченным изменением представлена на отрезке в виде суммы непрерывной функции с ограниченным изменением, непрерывной слева функции скачков и непрерывной справа функции скачков. Обусловленная этими тремя функциями мера Лебега-Стилтьеса множества, а также соответствующий интеграл Лебега-Стилтьеса для разрывной (как справа, так и слева) производящей функции представлены в виде суммы трех слагаемых, каждое из которых определяется одной из указанных выше функций. Исходный интеграл Лебега-Стилтьеса оказывается независимым от значений производящей функции в точках разрыва. В методическом плане проиллюстрировано, что из полученных разложений непосредственно следует, что если подынтегральная функция непрерывна на отрезке $[a, b]$, то интеграл Лебега-Стилтьеса по отрезку $[a, b]$ совпадает с соответствующим интегралом Римана-Стилтьеса по отрезку $[a, b]$. Ранее этот факт был доказан на полуинтервале $[a, b)$ для непрерывной слева производящей функции.

Ключевые слова: функционал обобщенная функция $P(1/x)$ функции скачков, интеграл Лебега-Стилтьеса, интеграл Римана-Стилтьеса.

В теории обобщенных функций функционал $P(1/x)$ возникает так же часто (например при преобразованиях Фурье), как и другие общеизвестные универсальные функции, такие как функция Хевисайда, дельта-функция $\delta(x)$, функция знака $\text{sign}(x)$ и ряд других [1-10]. В связи с этим представляется интересным более подробное изучение свойств функционала $P(1/x)$ в пространстве S' обобщенных функций медленного роста. Пространство S основных функций состоит из бесконечно дифференцируемых функций $\varphi(x)$, убывающих при $|x| \rightarrow \infty$ вместе со всеми производными быстрее любой степени $1/|x|^n$.

Функция

$$f(x) = \ln(x), \quad (1)$$

локально суммируема (интегрируема по Лебегу на любом ограниченном борелевском мно-

жестве), и на всей числовой оси для неё (при некотором $n \geq 0$) выполнено неравенство

$$\int |f(x)|(1+|x|)^{-n} dx < \infty. \quad (2)$$

Таким образом функция $\ln(x)$ определяет регулярную обобщенную функцию медленного роста (линейный непрерывный функционал на множестве S), причём из свойств этого функционала следует, что все производные этой функции (как обобщенные функции) существуют и непрерывны [2]. Для регулярных обобщенных функций, имеющих разрывы первого рода, существует универсальная формула, выражающая производную обобщенной функции через скачки в точках разрыва [2]. Для функций с разрывами второго рода универсальной формулы нет, так что вычисление производной от $\ln(x)$ проводим исходя из общего определения производной обобщенной функции

$$\begin{aligned}
 (\ln(x)', \varphi(x)) &= -(\ln|x|, \varphi'(x)) = \\
 &= \lim_{\delta \rightarrow 0, \varepsilon \rightarrow 0} (\varphi(\varepsilon) \ln \varepsilon - \varphi(-\delta) \ln \delta + \\
 &\quad + \int_{-\infty}^{-\delta} \frac{\varphi(x) dx}{x} + \int_{\varepsilon}^{\infty} \frac{\varphi(x) dx}{x}), \quad (3)
 \end{aligned}$$

где $\varepsilon > 0, \delta > 0$.

Поскольку функционал в левой части существует, то конечное значение в правой части возможно при $\delta = \varepsilon$. Отсюда получаем выражение

$$(\ln(x)', \varphi(x)) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\int_{-\infty}^{-\varepsilon} \frac{\varphi(x) dx}{x} + \int_{\varepsilon}^{\infty} \frac{\varphi(x) dx}{x} \right). \quad (4)$$

Выделяя на действительной оси симметричный интервал интегрирования $(-R, R)$, где $R > 0$, и переходя к пределу, получаем окончательное выражение

$$\begin{aligned}
 (P(1/x), \varphi(x)) &= (\ln(x)', \varphi(x)) = \\
 &= \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{-R}^R \frac{(\varphi(x) - \varphi(0)) dx}{x}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

Используя формулу (5), для производной $P'(1/x)$ имеем

$$\begin{aligned}
 (P'(1/x), \varphi) &= -(P(1/x), \varphi') = \\
 &= - \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{-R}^R \frac{(\varphi'(x) - \varphi'(0)) dx}{x}.
 \end{aligned}$$

Вводя функцию $\psi(x) = \varphi(x) - x\varphi'(0) - \varphi(0)$, после интегрирования по частям получаем

$$(P'(1/x), \varphi) = -(P(1/x^2), \varphi), \quad (6)$$

где

$$(P(1/x^2), \varphi) = \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{-R}^R \frac{(\varphi(x) - \varphi(0) - x\varphi'(0)) dx}{x^2}. \quad (7)$$

Аналогичным образом продолжая процесс, приходим к окончательному выражению для функционала производной порядка n ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$)

$$(P^{(n)}(1/x), \varphi) = (-1)^n n! (P(1/x^{n+1}), \varphi), \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 (P(1/x^n), \varphi(x)) &= \\
 &= \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{-R}^R \frac{(\varphi(x) - \varphi(0) - x\varphi'(0) - \dots - \frac{x^{n-1} \varphi^{(n-1)}(0)}{(n-1)!}) dx}{x^n}. \quad (9)
 \end{aligned}$$

Полученные выражения могут быть использованы в расчётах для оценок производных функционала, а также для установления и проверки различных соотношений между обобщёнными функциями в пространстве S' . Например, функционал (8) удовлетворяет в S' уравнению

$$x^n P(1/x^n) = 1, \quad (10)$$

поскольку все производные от функции $x^n \varphi(x)$ порядка не выше $n - 1$ обращаются в ноль при $x = 0$.

Ортонормальные функции Эрмита (волновые функции гармонического осциллятора) принадлежат пространству S и могут быть представлены в виде [5]

$$\begin{aligned}
 H_{2K+1}(x) &= \left(\frac{(2K+1)!}{2^{2K+1} \sqrt{\pi}} \right)^{\frac{1}{2}} \times \\
 &\times \sum_{M=0}^K \frac{(-1)^M (2x)^{2K-2M+1}}{M!(2K-2M+1)!} \exp(-x^2/2). \quad (11)
 \end{aligned}$$

Для произвольной обобщённой функции f из S' числа

$$A_n(f) = (f, H_n), \quad (12)$$

называются коэффициентами Фурье, а формальный ряд

$$\sum a_n(f) H_n(x), \quad (13)$$

называется рядом Фурье по ортонормальной системе функций Эрмита.

Для того, чтобы f принадлежала S' , необходимо и достаточно, чтобы её коэффициенты Фурье удовлетворяли условию: существуют числа $p \geq 0$ и C такие, что

$$|a_n(f)| \leq C (1+n)^p, \quad n = 0, 1, \dots \quad (14)$$

При этом ряд Фурье f единственен, сходится к f в S' (в смысле слабой сходимости) [2].

Как следует из формул (5), (12), при вычислении коэффициентов Фурье $a_{2K+1}(f)$ для функции $f(x) = P(1/x)$, только нечётные степени будут обеспечивать ненулевой вклад в интеграл по действительной оси. По этой причине в (11) приведены только нечётные функции Эрмита, содержащие конечное число нечетных степеней x . Опуская детали ин-

тегрирования, приведём окончательный результат

$$a_{2k+1}(P(1/x)) = ((2k + 1)! \pi^{1/2})^{1/2} \times \sum_{M=0}^K \frac{(-1)^M 2^{K-2M+1} (2K-2M-1)!!}{M!(2K-2M+1)!}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

где для унификации удобно считать $(-1)! = 1$.

Отметим, что число слагаемых в сумме для a_{2k+1} ограничено и не превышает индекс k .

Выражения (14), (15) могут быть использованы для вычисления коэффициентов Фурье по ортонормальной системе функций Эрмита для других обобщенных функций, связанных с $P(1/x)$, а также для установления принадлежности этих обобщенных функций пространству S' .

Далее кратко приведем другой вариант доказательства теоремы о независимости интеграла Римана-Стилтьеса от значений производящей функции (с ограниченным изменением) $F(x)$ в её точках разрыва, если интегрируемая функция $f(x)$ непрерывна на отрезке $[a, b]$ [1]. Для этого используем утверждение [1], о том, что $F(x)$ может быть представлена суммой функции скачков $\psi(x)$ и непрерывной функции $\varphi(x)$. Выразив константы функции $\psi(x)$ через скачки неубывающей $F(x)$ в точках разрыва справа и слева

$$h_i = F(x_{i+0}) - F(x_i), g_i = F(x_i) - F(x_i - 0), \quad (16)$$

$h_N = 0$ в точке $x_N = b$, $g_0 = 0$ в точке $x_0 = a$, приходим к следующему разложению

$$F(x) = \varphi(x) + h(x) + g(x), \quad (17)$$

где функции скачков

$$h(x) = \sum_{x_i < x} h_i, g(x) = \sum_{x_i \leq x} g_i, \quad (18)$$

будут неубывающими непрерывными соответственно слева и справа.

В случае монотонно возрастающей непрерывной слева $F(x)$ меры интервалов (отрезков) определены [1]

$$m(\alpha, \beta) = F(\beta) - F(\alpha + 0), \quad (19a)$$

$$m[\alpha, \beta] = F(\beta+0) - F(\alpha), \quad (19б)$$

$$m(\alpha, \beta] = F(\beta + 0) - F(\alpha + 0), \quad (19в)$$

$$m[\alpha, \beta) = F(\beta) - F(\alpha). \quad (19г)$$

Для неубывающей функции $F(x)$, непрерывной справа, меру определяем по формулам

$$m(\alpha, \beta) = F(\beta - 0) - F(\alpha), \quad (20д)$$

$$m[\alpha, \beta] = F(\beta) - F(\alpha - 0), \quad (20е)$$

$$m(\alpha, \beta) = F(\beta) - F(\alpha). \quad (20ж)$$

$$m[\alpha, \beta) = F(\beta - 0) - F(\alpha - 0). \quad (20з)$$

Таким образом интеграл Лебега-Стилтьеса по мере, определяемой каждым из трех слагаемых в (17), представляется в виде

$$\int_{[a,b]} f(x) dF(x) = \int_{[a,b]} f(x) d\varphi(x) + \sum_i f(x_i) h_i + \sum_i f(x_i) g_i, \quad (21)$$

где ряды предполагаются сходящимися абсолютно.

Объединяя ряды и оставляя скачки функции $F(x)$ в граничных точках a, b за знаком суммы ряда, приходим к окончательному выражению

$$\int_{[a,b]} f(x) dF(x) = \int_{[a,b]} f(x) d\varphi(x) + \sum_{x_i \in (a,b)} f(x_i) \times (F(x_{i+0}) - F(x_i - 0)) + F(a)(F(a + 0) - F(a)) + F(b)(F(b) - F(b - 0)). \quad (22)$$

Пусть теперь $F(x)$ функция с ограниченным изменением. Поэтому она может быть представлена в виде разности двух монотонных неубывающих функций, для каждой из которых справедлива формула (22). Объединяя множество точек разрыва этих двух функций в единое множество, приходим снова к формуле (22) для произвольной функции $F(x)$ с ограниченным изменением. Для этой функции скачки в формуле (22) могут быть разных знаков. Непрерывная функция $\varphi(x)$ с ограниченным изменением в (22) определяется по исходной функции $F(x)$ и также может быть представлена в виде разности монотонных, но уже непрерывных функций.

Поскольку интеграл Лебега-Стилтьеса в (22) не зависит от значений производящей

функции $F(x)$ в её точках разрыва, лежащих внутри интервала (a, b) , остается доказать, что для непрерывной функции $F(x)$ он совпадает с интегралом Римана-Стилтьеса. Существование обоих интегралов очевидно.

Для интеграла Римана-Стилтьеса достаточно для заданного ε выбрать такое δ , что в любом промежутке с длиной, меньшей δ , колебание ω функции $F(x)$ будет меньше $\varepsilon / [F(b) - F(a)]$ для монотонной $F(x)$. Пусть далее отрезок $[a, b]$ разбит на отрезки $[x_i, x_{i+1}]$ длиной меньше δ , где x_i – произвольная монотонно возрастающая последовательность из $n + 1$ точек. Тогда

$$\sum_i \omega_i [F(x_{i+1}) - F(x_i)] < \varepsilon, \quad (23)$$

откуда следует существование интеграла Римана-Стилтьеса для неубывающей функции $F(x)$, а значит и для функции $F(x)$ с ограниченным изменением [5].

Поскольку предел интегральной суммы (интеграла Римана-Стилтьеса при $\max \Delta x_i \rightarrow 0$)

$$\sum_{i=0}^{n-1} f(\xi_i) [F(x_{i+1}) - F(x_i)], \quad (24)$$

существует и не зависит от выбора промежуточных точек ξ_i [5], то можно считать $x_i \leq \xi_i < x_{i+1}$. Но тогда сумму (24) можно рассматривать как интеграл Лебега-Стилтьеса от простой ступенчатой функции

$$\psi_n(x) = F(\xi_i), \quad x_i \leq x < x_{i+1}, \quad (25)$$

где производящая функция $F(x)$ считается непрерывной слева, первые два слагаемые в (17). Мера полуинтервала $[x_i, x_{i+1})$ выражается формулой (19г). Функция (25) при $n \rightarrow \infty$ равномерно сходится к $F(x)$. Поэтому при переходе к пределу сумма (24) даёт интеграл Лебега-Стилтьеса от функции $F(x)$ по полуинтервалу $[a, b)$, то есть первые два слагаемых интеграла по отрезку $[a, b]$ в (21), поскольку $h_N = 0$ в точке b .

Третье слагаемое в (17) есть непрерывная справа функция скачков $g(x)$. Поскольку для неё интеграл Римана-Стилтьеса также существует, то справедливы предыдущие рассуждения, но уже для полуинтервала

$(x_i, x_{i+1}]$, для которого мера определяется формулой (20ж),

$$g(x_{i+1}) - g(x_i) = g(x_{i+1}) - g(x_{i+1} - 0) = g_{i+1}.$$

Переходя к пределу, получаем третье слагаемое в (21). После объединения рядов в (21) для интеграла Римана-Стилтьеса снова приходим к формуле (22), где все интегралы должны быть заменены на интегралы Римана-Стилтьеса, а функция $F(x)$ является функцией с ограниченным изменением.

Одновременное включение в производящую функцию $F(x)$ функций скачков, непрерывных отдельно справа и слева, позволяет исключить определения интеграла Римана-Стилтьеса по различным полуинтервалам [1] и использовать общее определение интеграла Римана-Стилтьеса по отрезку [5,6], в котором промежуточная точка ξ_i может принимать все значения из отрезка $[x_i, x_{i+1}]$.

Использование для производящей функции интеграла Римана-Стилтьеса упрощенной функции скачков ([11], с.119) приводит к тому, что функция $\varphi(x)$ в соответствующем разложении (3) оказывается разрывной (с устранимыми разрывами). Однако в случае непрерывности $F(x)$ интеграл Римана-Стилтьеса не зависит от значений производящей функции в точках её разрыва, так что окончательные выражения для интеграла Римана-Стилтьеса совпадают с (22).

Библиографический список

1. Колмогоров, А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. – М.: Физматлит, 2006. – 542 с.
2. Натансон, И.П. Теория функций действительной переменной / И.П. Натансон. – М.: Гостехиздат, 1957. – 552 с.
3. Свешников, А.Г., Альшин А.Б., Корпусов М.О. Нелинейный функциональный анализ и его приложения к уравнениям в частных производных / А.Г. Свешников, А.Б. Альшин, М.О. Корпусов. – М.: Научный мир, 2008. – 399 с.
4. Богачев, В.И. Основы теории меры. В 2 т. Т. 2 Основы теории меры / В.И. Богачев. – М.: Научный мир, 2003. – 520 с.
5. Фихтенгольц, Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 3 т. Т. 3. Курс дифференциального и интегрального исчисления / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Наука, 1970. – 656 с.
6. Никольский, С.М. Курс математического анализа. В 2 т. Т.2 Курс математического анализа / С.М. Никольский. – М.: Наука, 1973. – 391 с.

7. Никольский, С.М. Приближение функций многих переменных и теоремы вложения / С.М. Никольский. – М.: Наука, 1969. – 480 с.
8. Владимиров, В.С. Уравнения математической физики / В.С. Владимиров. – М.: Наука, 1971. – 512с.
9. Владимиров, В.С. Обобщенные функции в математической физике / В.С. Владимиров. – М.: Наука, 1971. – 318с.
10. Шипов, Н.В. О свойствах функционала $P(1/x)$ в пространстве обобщенных функций медленного роста / Н.В. Шипов // Вестник МГУЛ – Лесной Вестник. – 2010. – Т. 75. – Вып. 6. – С. 183–185.
11. Покорный, Ю.В. Осцилляционная теория Штурма-Лиувилля для импульсных задач / Ю.В. Покорный, М.Б. Зверев, С.А. Шабров // Успехи мат. наук. – 2008. – Т. 63. – Вып. 1. – С. 111–153.

ADDITIONAL PROPERTIES OF THE FUNCTIONAL $P(1/x)$ AND LEBESGUE–STIELTJES INTEGRAL CONNECTION WITH RIEMANN–STIELTJES INTEGRAL

Shipov N.V., Assoc. Prof., MSFU, Ph.D. (Physics and Mathematics)⁽¹⁾; **Poleshchuk O.M.**, Prof., MSFU, Dr. Sci.(Tech.)⁽¹⁾; **Shmakov A.V.**, Assoc. Prof., MSFU, Ph.D. (Physics and Mathematics)⁽¹⁾

caf-math@mgul.ac.ru, nvshi@mail.ru

⁽¹⁾ Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moscow reg., Russia

The functional $P(1/x)$ and its derivatives are represented in the alternative form. The most wide class of generating functions for the Lebesgue – Stieltjes measure of the set and for the Lebesgue – Stieltjes Integral is the class of bounded variation functions. It is known, that the function of bounded variation can be written in the form of difference of two discontinuous monotone nondecreasing functions. It is convenient to explain the properties of Lebesgue – Stieltjes Integral and the properties of Lebesgue – Stieltjes measure in the case, when the monotone nondecreasing generating function is continuous from the left. It is offered sometimes to overdetermine the discontinuous generating function (discontinuous from the left and discontinuous from the right). Then the resulting generating function is turned out to be continuous from the left. Discontinuous generating function of bounded variation over the segment $[a, b]$ is decomposed in the sum of continuous function of bounded variation, jump function (continuous from the left) and jump function (continuous from the right). Lebesgue – Stieltjes measure of the set with respect to these three functions and appropriate Lebesgue – Stieltjes Integral decomposition are represented by relevant three terms in the sum. Lebesgue – Stieltjes Integral does not depend on the values of generating function at the jump dots. It follows from these decompositions that if the function under integral is continuous over the segment $[a, b]$, then the appropriate Lebesgue – Stieltjes Integral over the segment $[a, b]$ is the same as the appropriate Riemann– Stieltjes Integral over the segment $[a, b]$, not only over the half–interval $[a, b)$.

Key words: Functional $P(1/x)$, Lebesgue – Stieltjes measure, Lebesgue – Stieltjes Integral, Riemann– Stieltjes Integral.

References

1. Kolmogorov A.N., Fomin S.V. *Elementy teorii funktsiy i funktsional'nogo Analiza*. [Elements of the theory of functions and functional analysis]. Moscow: Nauka Publ., 1976. 542 p.
2. Natanson I.P. *Teoriya funktsiy deystvitel'noy peremennoy* [Theory of functions of the valid variable]. Moscow: Gostekhizdat Publ., 1957. 552 p.
3. Sveshnikov A.G., Al'shin A.B., Korpusov M.O. *Nelineyny funktsional'nyy analiz i ego prilozheniya k uravneniyam v chastnykh proizvodnykh* [The nonlinear functional analysis and its annexes to the equations in private derivatives]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2008. 399 p.
4. Bogachev V.I. *Osnovy teorii mery. V 2 t. T. 2 Osnovy teorii mery. V.I. Bogachev* [Bases of the theory of a measure. In 2 t. T. 2 Bases of the theory of a measure. V.I. Bogachev], Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2003. 520 p.
5. Fikhtengol'ts G.M. *Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya. V 3 t. T. 3. Kurs differentsial'nogo i integral'nogo ischisleniya*. [Course of differential and integral calculus. In 3 t. T. 3. Course of differential and integral calculus]. Moscow, Nauka Publ., 1970. 656 p.
6. Nikol'skiy S.M. *Kurs matematicheskogo analiza. V 2 t. T.2 Kurs matematicheskogo analiza* [Course of the mathematical analysis. In 2 t. T.2 Course of the mathematical analysis]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 391 p.
7. Nikol'skiy S.M. *Priblizhenie funktsiy mnogikh peremennykh i teoremy vložheniya* [Approach of functions of many variables and theorem of an investment]. Moscow: Nauka Publ., 1969. 480 p.
8. Vladimirov V.S. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 512 p.
9. Vladimirov V.S. *Obobshchennyye funktsii v matematicheskoy fizike* [The generalized functions in mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 318 p.
10. Shipov N.V. *O svoystvakh funktsionala $P(1/x)$ v prostranstve obobshchennykh funktsiy medlennogo rosta*. [About properties of functionality of $P(1/x)$ in space of the generalized functions of slow growth] Moscow State Forest University Bulletin – Lesnoy Vestnik. 2010. Vol. 75, № 6. pp. 183 – 185.
11. Pokornyy Yu.V., Zverev M.B., Shabrov S.A. *Ostillyatsionnaya teoriya Shturma-Liuvillya dlya impul'snykh zadach* [The oscillation theory of Storm Liouville for pulse tasks]. *Usp. Mat. Nauk* [Achievements of Mathematical Sciences], 2008, vol. 63, № 1, pp. 111-153.

ПАМЯТИ ЗАСЛУЖЕННОГО ДЕЯТЕЛЯ НАУКИ РФ, ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОРА ВИКТОРА НИКОЛАЕВИЧА ХАРЧЕНКО

29 июля скончался на восьмидесятом году жизни после продолжительной тяжелой болезни Виктор Николаевич Харченко, известный ученый – теплофизик, заведовавший кафедрой физики МГУЛ более 35 лет, с 1977 по 2013 г.

Виктор Николаевич родился 18 октября 1936 г. в поселке Чалдовар, расположенном недалеко от города Фрунзе (ныне г. Бешкек) Киргизской ССР. Его отец Николай Александрович был учителем физики и математики, погиб на фронте Великой отечественной войны, мать Анна Ильинична была известным в республике полеводом, награждена рядом правительственных наград, избиралась депутатом Верховного Совета Киргизской ССР.

Виктор Николаевич окончил среднюю школу с золотой медалью в 1954 г. и поступил в МЛТИ на лесомеханический факультет. Выбор вуза в немалой степени определился тем, что он, в отличие от многих ведущих вузов Москвы, предоставлял общежитие, что для выпускника сельской школы было решающим.

Надо сказать, что в те годы в МЛТИ преподавал ряд известных ученых – педагогов. Достаточно назвать зав. кафедрой математики проф. Н.В. Ефимова, зав. кафедрой тяговых машин проф. М.И. Зайчика, зав. кафедрой теплотехники проф. П.Н. Романенко, зав. кафедрой электротехники проф. П.П. Пациору, проф. Г.А. Вильке, доцента В.О. Самуйло и др. Это и собственные способности позволили Виктору Николаевичу получить отличное высшее образование, что в значительной степени определило его дальнейшую судьбу.

После окончания с отличием МЛТИ в 1959 г. по специальности инженера-механика он был распределен в Крестецкий леспрмхоз ЦНИИМЭ, где успешно работал в конструкторском бюро под руководством известного специалиста в области лесных машин Г.К. Ступнева.

В 1960 г. декан лесомеханического факультета А.В. Морозов и зав. кафедрой теплотехники П.Н. Романенко пригласили его в аспирантуру кафедры теплотехники. На кафедре наряду с прикладными вопросами энергетики предприятий лесного комплекса развивалось теплофизическое направление по изучению процессов теплообмена. По этой проблеме кафедра сотрудничала с учеными ЭНИНА, МЭИ и других ведущих научных центров.

Тема диссертационной работы Виктора Николаевича «Теплообмен и трение при турбулентном обтекании воздухом проницаемой поверхности при вдуве инородных газов» касалась теоретических основ пористого охлаждения теплонапряженных поверхностей, имеющего приложение в двигателестроении, в авиационной и космической технике. Руководителем работы был проф. П.Н. Романенко, консультантом по вопросам теории пограничного слоя доц. А.И. Леонтьев (ныне академик РАН, лауреат премии «Глобальная энергия»). Работа была выполнена в срок и успешно защищена в 1963 г.

После защиты диссертации Виктор Николаевич в течение полутора десятков лет работал в ЦАГИ им. Жуковского в отделе аэродинамического нагрева и тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов. Хорошая общинженерная подготовка, полученная в студенческие годы, работа над диссертацией, сотрудничество с выдающимися учеными способствовали успешной работе в ЦАГИ, результатом которой была докторская диссертация, успешно защищенная в диссертационном совете Института теплофизики СО АН СССР в 1975 г.

Еще в период работы в ЦАГИ он начал сотрудничать с кафедрой физики МЛТИ и возглавил её после защиты докторской диссертации в 1977 г.

Виктор Николаевич руководил коллективом, в котором работали более 20 профессоров и более 50 доцентов. Это были и воспитанники кафедры, и специалисты, приглашенные из вузов и НИИ Москвы и Подмосковья.

Теплофизическое направление стало главным в эти годы и на кафедре физики. Упор был сделан на фундаментальные научные исследования. Были установлены хорошие контакты с ведущими научными центрами страны: Физический институт АН СССР (ФИАН), Институт общей физики АН СССР (ИОФАН), Институт высоких температур (ИВТАН), Институт космических исследований АН СССР (ИКИ), Институт атомной энергии им. Курчатова (ИАЭ), ЦАГИ, с рядом ведущих вузов – МГУ им. Ломоносова, МВТУ им. Баумана, МЭИ, МФТИ, продолжилось и расширилось научное сотрудничество с крупнейшими научными центрами ВПК.

За эти годы под руководством В.Н. Харченко был проведен ряд фундаментальных исследований по современным проблемам физики в рамках научного направления «Фундаментальные исследования в области теплофизики и физики низкотемпературной плазмы применительно к перспективной энергетике и критическим технологиям».

Совместно с ИОФАНом (руководитель – лауреат Нобелевской премии академик А.М. Прохоров) были разработаны, изготовлены и успешно испытаны серии охлаждаемых зеркал для мощных лазеров, обеспечивающие большой теплоотвод от зеркальной поверхности (до 1 КВт/см²) при минимальных термодформациях (около 1 мкм).

Большой объем исследований был выполнен по физике плазмы совместно с НПО «Астрофизика», ИАЭ им. Курчатова и др. Были разработаны и исследованы плазменные накопители энергии для запитки мощных импульсных энергетических устройств (импульсных лазеров). Получены рекордные по тем временам коэффициенты разделения в импульсной центрифуге за счет высоких скоростей вращения плазмы (десятки км/с) и высоких температур (до 1 млн. К). Была создана плазмохимическая установка СВЧ-ЭЦР, позволяющая получать чистую плазму высокой концентрации и с хорошей равномерностью по пространству. На этой установке отрабатываются современные критические субмикронные технологии травления, напыления, имплантации, используемые при производстве микросхем, полупроводниковых датчиков, элементов лазеров и других изделий микро- и нанoeлектроники.

Большое фундаментальное и прикладное значение имели разработки мощных импульсных индуктивных накопителей и коммутаторов энергии для импульсных лазеров. Образцы изделия прошли успешные испытания на предприятии.

В течение 1987–1992 гг. проводились исследования возможностей применения ВТСП материалов в качестве сильноточных элементов в коммутаторах, прерывателях и модуляторах.

Длительное время совместно с ПНИТИ, ИВТАНом и другими научными центрами проводились исследования теплофизических свойств высокотемпературных конструкционных и теплозащитных материалов. Разработанные методы и средства для совместного определения спектральных и интегральных излучательных характеристик поверхностей использованы в лаборатории ИВТАН для исследований перспективных теплозащитных материалов.

В рамках теплофизических исследований был разработан метод сушки композиционных пористых материалов прямым пропусканием электрического тока, разработка нашла свое применение в производстве строительных материалов.

В числе крупных научных направлений, развиваемых на кафедре под научным руководством профессора В.Н. Харченко, являлись фундаментальные исследования по физическим методам и средствам мониторинга лесных и урбо-экосистем. Большое теоретические и прикладное значение имели также проводимые на кафедре совместно с кафедрой физики Софийского Высшего ЛТИ и Ивантеевским лесопитомником исследования методов лазерной биостимуляции черенков лесных культур при их укоренении.

Совместно с ведущими центрами страны (ИОФ РАН, ИФЗ РАН, МГУ и др.) и с зарубежными коллегами из Германии, Австрии, США, Великобритании, Японии проводилась разработка дистанционных лазерных и радиокосмических методов и средств экологического мониторинга. Эти данные используются в радиотехнике и в методах предсказаний катастроф (землетрясений, тайфунов и др.) Развивались также научные направления, связанные с космическим мониторингом природных ресурсов. Была создана межфакультетская лаборатория, оснащенная современной радиофизической аппаратурой (GPS) и имеющая лицензию на проведение работ.

Совместно с ИМАН РАН им. Благонравова проводились исследования по упрочнению металло- и деревообрабатывающего инструмента воздействием электрического тока и электромагнитных полей.

По результатам этих исследований под руководством В.Н. Харченко было защищено 24 кандидатских и 7 докторских диссертаций. Многим молодым ученым Виктор Николаевич дал «путевку в жизнь».

Виктор Николаевич Харченко являлся автором более 200 научных работ и изобретений, он был награжден почетным знаком «Изобретатель СССР». Его работы опубликованы в центральных научных журналах, многократно докладывались на крупных научных конференциях в России и за рубежом (США, Англия, Германия, Япония, Китай, Индия, Швеция, Израиль, Италия, Бельгия, Югославия, Финляндия, Турция, Болгария, Австралия).

Виктор Николаевич был удостоен звания «Заслуженный деятель науки РФ», являлся членом Национального комитета РАН по тепломассообмену, членом НМС Минобрнауки РФ по физике и концепциям современного естествознания.

Виктор Николаевич всегда опирался на коллектив и в трудное время его главной целью было сохранение коллектива, вовлечение преподавателей в научную работу, привлечение для работы со студентами научных сотрудников из ведущих НИИ. Он считал физику самой интересной наукой, а главной задачей – передать молодежи свои знания.

Виктор Николаевич был хорошим семьянином, вместе с супругой Татьяной вырастили двух дочерей и сына, занявших достойное место в нашей жизни. Он был жизнерадостным человеком, любил жизнь во всех её проявлениях. В.Н. Харченко навсегда останется в памяти друзей, коллег и учеников.

Ректор МГУЛ, проф., д-р техн. наук В.Г. Санаев
Президент МГУЛ, проф., д-р техн. наук А.Н. Обливин
Профессор, д-р техн. наук Ю.П. Семёнов
Зав.кафедрой физики, проф., д-р техн. наук Н.П. Полуэктов