

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

---

# Лесной журнал

**Научный журнал**

Основан в 1833 г.  
Издается в серии ИВУЗ с 1958 г.  
Выходит 6 раз в год

5/347

2015

ИЗДАТЕЛЬ – СЕВЕРНЫЙ (АРКТИЧЕСКИЙ)  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**МЕЛЕХОВ В.И.** – гл. редактор, д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)  
**БАБИЧ Н.А.** – зам. гл. редактора, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)  
**БОГОЛИЦЫН К.Г.** – зам. гл. редактора, д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)  
**БЕЛЯКОВА Р.В.** – отв. секретарь, засл. работник культуры РФ (Россия, Архангельск)

## ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

**Бессчетнов В.П.**, д-р биол. наук, проф. (Россия, Нижний Новгород)  
**Ван Хайнинген А.**, д-р наук, проф. (США, Ороно)  
**Воронин А.В.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)  
**Гельфанд Е.Д.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)  
**Камусин А.А.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)  
**Кищенко И.Т.**, д-р биол. наук, проф. (Россия, Петрозаводск)  
**Кожухов Н.И.**, д-р экон. наук, проф., академик РАН (Россия, Москва)  
**Куров В.С.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)  
**Малыгин В.И.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Северодвинск)  
**Матвеева Р.Н.**, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Красноярск)  
**Мерзленко М.Д.**, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)  
**Нимц П.**, д-р наук, проф. (Швейцария, Цюрих)  
**Обливин А.Н.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)  
**Онегин В.И.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)  
**Памфилов Е.А.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Брянск)  
**Романов Е.М.**, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)  
**Рубцов М.В.**, д-р с.-х. наук, проф., чл.-корр. РАН (Россия, Москва)  
**Сакса Т.**, д-р с.-х. наук, ст. науч. сотр. (Финляндия, Хельсинки)  
**Санаев В.Г.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Москва)  
**Селиховкин А.В.**, д-р биол. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)  
**Сергеевичев В.В.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Санкт-Петербург)  
**Сёренсен У.Я.**, проф. (Норвегия, Стейнхьер)  
**Сигурдссон Б.Д.**, д-р наук, проф. (Исландия, Хваннейри)  
**Тараканов А.М.**, д-р с.-х. наук, гл. науч. сотр. (Россия, Архангельск)  
**Хакимова Ф.Х.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Пермь)  
**Холуша О.**, д-р наук, проф. (Чехия, Брно)  
**Черная Н.В.**, д-р техн. наук, проф. (Белоруссия, Минск)  
**Черных В.Л.**, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)  
**Ширнин Ю.А.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Йошкар-Ола)  
**Штукин С.С.**, д-р с.-х. наук, проф. (Белоруссия, Минск)  
**Энгельмани Х.-Д.**, проф., д-р инж. наук (Германия, Эмден)

## ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА:

**Бабич Н.А.** – председатель, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)  
**Билей П.В.**, д-р техн. наук, проф., акад. ЛАН Украины (Украина, Львов)  
**Залесов С.В.**, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Екатеринбург)  
**Мясищев Д.Г.**, д-р техн. наук, проф. (Россия, Архангельск)  
**Наквасина Е.Н.**, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Архангельск)  
**Уголев Б.Н.**, д-р с.-х. наук, проф. (Россия, Москва)  
**Хабаров Ю.Г.**, д-р хим. наук, проф. (Россия, Архангельск)

---

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION

---

NORTHERN (ARCTIC) FEDERAL UNIVERSITY  
NAMED AFTER M.V. LOMONOSOV

BULLETIN  
OF HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS

---

# Lesnoy Zhurnal

(Forestry journal)

**Scientific journal**

Established in 1833  
Issued as part of the  
“Bulletin of Higher Educational Institutions” since 1958  
Published 6 times a year

5/347

2015

PUBLISHER: NORTHERN (ARCTIC)  
FEDERAL UNIVERSITY NAMED AFTER M.V. LOMONOSOV

### **EDITORIAL STAFF:**

**MELEKHOV V.I.** – Editor-in-Chief, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)  
**BABICH N.A.** – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)  
**BOGOLITSYN K.G.** – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)  
**BELYAKOVA R.V.** – Executive Secretary, Honoured Culture Worker of the Russian Federation (Russia, Arkhangelsk)

### **MEMBERS OF THE EDITORIAL STAFF:**

**Besschetnov V.P.**, Doctor of Biology, Prof. (Russia, Nizhny Novgorod)  
**Van Heiningen A.**, PhD, Prof. (USA, Orono)  
**Voronin A.V.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Petrozavodsk)  
**Gelfand E.D.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)  
**Kamusin A.A.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)  
**Kishchenko I.T.**, Doctor of Biology, Prof. (Russia, Petrozavodsk)  
**Kozhukhov N.I.**, Doctor of Economics, Prof., Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)  
**Kurov V.S.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint-Petersburg)  
**Malygin V.I.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Severodvinsk)  
**Matveeva R.N.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Krasnoyarsk)  
**Merzlenko M.D.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Moscow)  
**Niemz P.**, PhD, Prof. (Switzerland, Zürich)  
**Oblivin A.N.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)  
**Onegin V.I.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint-Petersburg)  
**Pamfilov E.A.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Bryansk)  
**Romanov E.M.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)  
**Rubtsov M.V.**, Doctor of Agriculture, Prof., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (Russia, Moscow)  
**Saksa T.**, Doctor of Agriculture, Senior Researcher (Finland, Helsinki)  
**Sanaev V.G.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)  
**Selikhovkin A.V.**, Doctor of Biology, Prof. (Russia, Saint-Petersburg)  
**Sergeevichev V.V.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Saint-Petersburg)  
**Sørensen O.J.**, PhD, Prof. (Norway, Steinkjer)  
**Sigurðsson B.D.**, PhD, Prof. (Iceland, Hvanneyri)  
**Tarakanov A.M.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)  
**Khakimova F.Kh.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Perm)  
**Holuša O.**, PhD, Prof. (Czech Republic, Brno)  
**Chernaya N.V.**, Doctor of Engineering, Prof. (Belarus, Minsk)  
**Chernykh V.L.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)  
**Shirnin Yu.A.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Yoshkar-Ola)  
**Shtukin S.S.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Belarus, Minsk)  
**Engelmann H.-D.**, Doctor of Engineering, Prof. (Germany, Emden)

### **MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:**

**Babich N.A.** – Chairman, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)  
**Biley P.V.**, Doctor of Engineering, Prof., Member of the National Academy of Sciences of Ukraine (Ukraine, Lviv)  
**Zalesov S.V.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Yekaterinburg)  
**Myasishchev D.G.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Arkhangelsk)  
**Nakvasina E.N.**, Doctor of Agriculture, Prof. (Russia, Arkhangelsk)  
**Ugolev B.N.**, Doctor of Engineering, Prof. (Russia, Moscow)  
**Khbarov Yu.G.**, Doctor of Chemistry, Prof. (Russia, Arkhangelsk)

---



## СОДЕРЖАНИЕ

## ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

<i>М.В. Рубцов, А.А. Дерюгин.</i> Отпад деревьев после рубки древостоев березы с сохранением ели в южной тайге центральной части Русской равнины.....	9
<i>К.П. Рукомойников.</i> Обоснование эффективности функционирования комплектов агрегатов при пересадке подроста из-под полога леса.....	26
<i>О.В. Градов.</i> Хромато-ауксанометрия и хромато-масс-ауксанометрия в фенологическом стадийном мониторинге лесных пород на основе флейво- и газохимических принципов с автоматической динамической идентификацией паттернов.....	34
<i>Б.А. Мочалов, М.Л. Бунтина, С.В. Бобушкина.</i> Использование стимуляторов из водной вытяжки коропометного компоста и гетероуксина при пикировке семян сосны в контейнерах.....	67
<i>Н.М. Большаков, В.В. Жиделева, В.В. Пахучий.</i> Эколого-экономические основы организации лесного хозяйства в восточных районах Европейского Севера России.....	77
<i>Л.И. Аткина, У.А. Сафронова.</i> Характеристика формы и размеров горизонтальной проекции крон деревьев черемухи Маака в г. Екатеринбурге.....	92
<i>Е.Ф. Некипелова, В.В. Петрик, Ю.И. Поташева, А.Г. Куприянова.</i> Влияние рекреационной нагрузки на состояние древесных насаждений лесопарка «Дружба» (г. Владимир).....	100
<i>Л.И. Копий, О.И. Дерех.</i> Проблемы рекреационного использования лесов ополья Украины.....	111

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

<i>А.В. Сергеевичев.</i> Анализ разрушения абразивных зерен при шлифовании древесины и древесных материалов.....	117
<i>С.П. Агеев.</i> Линейная модель процесса электропотребления лесопильной рамы	126
<i>В.И. Мелехов, В.А. Шульгин.</i> Резонансные явления в процессе СВЧ-сушки древесины.....	135
<i>С.А. Черепанов, Д.А. Лужанский.</i> Анализ уровня шума при высокоскоростном фрезеровании древесины.....	146

## ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

<i>И.М. Озаркив, Р.А. Демчина, П.П. Грыджук, М.Ф. Федына, Б.М. Перетятко.</i> Усовершенствование технологии пропитки древесины способом «прогрев-холодная ванна» с использованием амидофосфата КМ.....	154
--	-----

<i>С.А. Гордейко, Н.В. Черная, Е.П. Шишаков.</i> Упрочнение макулатурных видов бумаги и картона, проклеенных в кислой, нейтральной и слабощелочной средах.....	165
<i>Л.А. Миловидова, Т.А. Королева, М.Е. Романов, Е.О. Окулова.</i> Особенности производства беленой лиственной сульфатной целлюлозы при использовании в качестве древесного сырья березы и осины в соотношении 70:30.....	174
<i>М.И. Кравченко.</i> Экспериментальное исследование процесса промывки целлюлозы.....	183

---

---



CONTENTS

FORESTRY

<i>M.V. Rubtsov, A.A. Deryugin.</i> Mortality of Trees after a Birch Cutting with Preservation of Spruce in Southern Taiga in the Centre of the Russian Plain.....	9
<i>K.P. Rukomoynikov.</i> Efficiency Substantiation of Functioning of Aggregates Complete Sets at Outplanting of Young Undergrowth from under the Forest Canopy	26
<i>O.V. Gradov.</i> Chromatography-Auxanometry and Chromate-Mass-Auxanometry in Forest Species Vegetation Phenological Monitoring Based on Gas and Flavor Chemical Principles with Patterns Automatic Identification.....	34
<i>B.A. Mochalov, M.L. Buntina, S.V. Bobushkina.</i> The Use of Stimulators Made of Aqueous Extract from Bark and Chicken Manure Compost and Heteroauxin When Pricking Out Containerized Pine Seedlings.....	67
<i>N.M. Bolshakov, V.V. Zhideleva, V.V. Pakhuchiy.</i> Ecological and Economical Basis of Forest Management in the Eastern Regions of the Russian European North under the Conditions of Climate Changes.....	77
<i>L.I. Atkina, U.A. Safronova.</i> Characteristic of the Shape and Size of the Horizontal Crown Projection of Cherry Maak ( <i>Padus Maackii</i> Rupr Kom) in Yekaterinburg	92
<i>E.F. Nekipelova, V.V. Petrik, Y.I. Potasheva, A.G. Kupriyanova.</i> Influence of Recreational Load on the State of Tree Plantations in Forest Park “Druzhba” in Vladimir	100
<i>L.I. Kopyi, O.I. Derekh.</i> The Problems of Recreational Use of the High Plains Forests in Ukraine.....	111

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>A.V. Sergeevichev.</i> The Analysis of Destruction of Abrasive Grains During the Grinding of Wood and Wood Materials.....	117
<i>S.P. Ageev.</i> Linear Model of the Electrical Energy Consumption Process of a Saw-Frame.....	126
<i>V.I. Melekhov, V.A. Shulgin.</i> Resonance Phenomena in the Process of Wood Microwave Drying.....	135
<i>S.A. Cherepanov, D.A. Luzhanskiy.</i> The Analysis of Noise Level at High-Speed Milling of Wood.....	146

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

<i>I.M. Ozarkiv, R.A. Demchina, P.P. Grydzhuk, M.F. Fedyna, B.M. Peretyatko.</i> Improvement of Technology of Wood Impregnation by Heat-Cold Bath with Amidophosphate KM as a Flame Retardant.....	154
<i>S.A. Gordeyko, N.V. Chernaya, E.P. Shishakov.</i> Reinforcement of Scrap Paper and Recycled Cardboard Sized in Acidic, Neutral and Weakly Alkaline Media.....	165

<i>L.A. Milovidova, T.A. Koroleva, M.E. Romanov, E.O. Okulova.</i> Features of the Bleached Sulfate Hardwood Pulp Production when Using the Birch and Aspen Wood Resources in the Ratio of Seventy-to-Thirty.....	174
<i>M.I. Kravchenko.</i> Experimental Study of Pulp Washing Process.....	183

---

---





УДК 630\*181.9:630\*182.2

### **ОТПАД ДЕРЕВЬЕВ ПОСЛЕ РУБКИ ДРЕВОСТОЕВ БЕРЕЗЫ С СОХРАНЕНИЕМ ЕЛИ В ЮЖНОЙ ТАЙГЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ РУССКОЙ РАВНИНЫ**

© **М.В. Рубцов**, д-р с.-х. наук, проф.

*А.А. Дерюгин, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.*

Институт лесоведения Российской академии наук, ул. Советская, д. 21,  
п/о Успенское, Московская обл., Россия, 143030; e-mail: mivlarub@mail.ru

По данным наблюдений на постоянных пробных площадях установлены тенденции отпада деревьев в начальный период (10 лет) и через 20...30 лет после сплошной рубки 45–75-летних древостоев березы с сохранением ели предварительной генерации. Рубки проведены в южно-таежных высокопроизводительных березняках кислично-черничной группы типов леса. Возобновление древесных пород происходит преимущественно между участками с елью предварительной генерации, в основном на волоках. В начальный период отмечен большой отпад осины (85 %), обильно восстанавливающейся корневыми отпрысками. Причина гибели – естественное изреживание и неоднократное повреждение осины лосем. Через 20...30 лет после рубки в последующем возобновлении мелколиственных пород, при значительном преобладании в нем березы, сохраняется большой отпад деревьев (в среднем 85 %). Главная причина – затенение верхним пологом древостоя. Возобновление ели происходит в основном на волоках. Через 20 лет после рубки древостоев березы количество деревьев ели последующей генерации (высотой более 0,1 м) изменялось от 2,0 до 11,3 тыс. шт./га. Отпад в следующие 10 лет составлял в среднем 55 %. Основная причина гибели деревьев – затенение верхним пологом древостоя. В начальный период (10 лет) отпад деревьев не превышал 20 %. В отпаде ель, неспособная адаптироваться к условиям вырубki и поврежденная в процессе рубки. С увеличением давности рубки отпад возрастает до 30...45 %, что обусловлено повышением напряженности конкурентных отношений. Главный лимитирующий фактор – дефицит светового ресурса, увеличивающийся с понижением высоты деревьев в пологе древостоя. Отмирает ослабленная и отстающая в росте ель. В отпаде преобладают деревья, имеющие относительную протяженность крон 0,5 и менее. Установлена прямая зависимость количества погибших деревьев от сомкнутости крон ели предварительной генерации. На объектах исследования основная роль в формировании ельников принадлежит ели, сохранившейся после рубки древостоев березы.

*Ключевые слова:* южная тайга, древостой березы, рубка с сохранением ели, отпад деревьев, определяющие факторы.

В таежной зоне европейской части России после сплошных рубок на значительной площади произошла смена хвойных древостоев на мелколиственные (в основном на березняки). Эффективный способ восстановления таежных ельников – сохранение ели предварительной генерации при рубке мелколиственных древостоев. Изучение формирования ельников после рубок производных древостоев началось давно и продолжается в настоящее время. Опубликовано очень много работ. Вместе с тем отпад деревьев в процессе формирования таких древостоев с учетом предварительного и последующего возобновления пород изучен слабо, особенно по данным детальных наблюдений на постоянных пробных площадях (ПП).

На Северной ЛОС Института лесоведения РАН (Ярославская обл.) на серии постоянных ПП проводятся комплексные исследования динамики лесных фитоценозов в березово-еловых насаждениях и после рубки древостоев березы с сохранением ели предварительной генерации. В настоящей статье рассматриваются тенденции отпада деревьев в южно-таежных насаждениях, формирующихся после рубки (разной давности) древостоев березы с сохранением подпологовой ели.

#### *Объекты и методика*

Сплошная рубка древостоев березы с сохранением ели предварительной генерации была проведена в 1978 г. и 1992 г. на трех участках, площадью 4,0...5,0 га (табл. 1). Объекты были подобраны сотрудниками института, ими же осуществлялся контроль за соблюдением правил рубки древостоев. Рубку проводили на лентах (средняя ширина пасек – 35 м, трелевочных волоков – 5...6 м). Деревья валили под углом примерно 35° к волоку, сучья обрубали и оставляли на пасечных участках (между волоками). Стволы трелевали за вершину без захода трактора на пасечные участки.

Таблица 1

#### **Общая характеристика объектов с проведенными рубками древостоев березы**

Название объекта (обозначение)	Площадь, га	Возраст рубки березы, лет	Год (сезон) рубки	Давность рубки в год закладки ПП, лет	Постоянные ПП		
					Номер	Год закладки	Тип леса
Косково-92 (П <sub>2</sub> )	5,0	55	1992 (лето)	2	14	1994	Е кис.
					15	1994	Е чер.
Нахта-77 (П <sub>20</sub> )	4,5	45	1978 (зима)	20	23	1998	Е чер.
Косково-79 (Т <sub>20</sub> )	4,0	75	1978 (зима)	19	20	1997	Е чер.
					21	1997	Е чер.-сф.
					22	1997	Е кис.

В составе вырубленных древостоев – береза (*Betula pendula* Roth) с участием (до 30 %) осины (*Populus tremula* L.). Древостои – высокопроизводительные (класс бонитета I), высокополнотные (полнота более 0,80).

В год рубки березы на объекте «Косково-79» в популяции ели (*Picea abies* L.) преобладали деревья второго яруса древостоя (далее они называются тонкомером), на остальных объектах – деревья подроста.

Постоянные ПП были заложены в 1994–1998 гг., через 2 и 20 лет после рубки древостоев березы (табл. 1). Объектам, где расположены ПП, были даны условные обозначения. В них прописными буквами обозначена принадлежность популяции ели к ярусу древостоя в год рубки березы: П или Т – соответственно преобладание ели в подросте или втором ярусе древостоя, подстроено к этим буквам цифрами обозначена давность рубки (ДР) древостоя березы в год закладки ПП.

Пробные площади размещены в характерных для региона исследований типах леса кислично-черничной группы, в местах, где ель сохранилась в большом количестве. Последнее было обусловлено необходимостью стационарного изучения изменения конкурентных отношений в связи с изреживанием древостоев, формирующихся после удаления верхнего полога березы. Рубки ухода не проводили. Исключением является объект П<sub>20</sub> (ПП-23), где через 6 лет после рубки березы были вырублены деревья мелколиственных пород.

На ПП картировали все деревья, измеряли параметры стволов и крон. Визуально определяли состояние каждой особи: нормальное, ослабленное, погибшее (отпад). К ослабленным относили особи со следующими признаками: зонтикообразная или односторонняя крона, степень охвоения кроны менее 50 %, отношение прироста центрального побега к приросту боковых побегов меньше 1. Возраст ели в подросте устанавливали по числу мутовок, у других – по числу годовичных колец на кернях, которые брали на высоте 0,3 м от поверхности почвы. При определении возраста дерева вносили поправку, которая была установлена по модельным деревьям. Она изменялась от 4 до 9 лет (в среднем составила 7 лет). В процессе обработки данных определяли сомкнутости крон и полога ели.

В древостоях, сформировавшихся после рубки березы, высотная дифференциация деревьев четко не выражена. Вместе с тем анализом установлены существенные различия в отпаде деревьев, имеющих разную высоту. В связи с этим в древостоях были условно выделены: первый ярус, включающий деревья высотой больше 13,0 м; второй ярус – 4,1...13,0 м; подрост – 0,1...4,0 м. Этому предшествовал анализ динамики структуры и роста древостоев, формирующихся после рубки березы.

На ПП состав древостоев не однороден, что обусловлено в основном различиями в сохранности деревьев и возобновлении древесных пород в период, определяемый давностью рубки. В начале этого периода (примерно 10 лет) в составе подроста доминируют мелколиственные породы (табл. 2, объект П<sub>2</sub>).

Таблица 2

## Характеристика древостоев в год закладки ПП

№ ПП	Ярус	Состав древостоев*, %	Количество деревьев, тыс. шт./га	Средние		Стволовый запас, м <sup>3</sup> /га
				возраст, лет	высота, м	
<i>Объект П<sub>2</sub></i>						
14	1	44Б44Ос12Е	0,11	56	14,4	27
	2	95Е5Б	1,22	38	6,2	19
	П	85Ос11Е4Б	20,04	6	0,9	–
15	1	75Б20Ос5Е	0,14	57	17,8	20
	2	67Е33Б	0,66	40	7,1	12
	П	88Ос12Е	39,91	5	1,0	–
<i>Объект П<sub>20</sub></i>						
23	1	93Е4Ос3Б	0,34	50	14,7	59
	2	98Е1Ос1Б	3,67	38	8,3	178
	П	74Е25Б1Ос	4,54	14	0,9	–
<i>Объект Т<sub>20</sub></i>						
20	1	58Е25Ос14Б	0,21	75	16,3	66
	2	88Е8Ос4Б	1,82	29	7,2	31
	П	65Е25Б10Ос	12,52	11	0,9	–
21	1	54Б24Е15С7Ос	0,23	64	17,6	54
	2	83Е10Ос7Б	2,54	27	7,0	40
	П	62Е32Б5Ос1С	18,15	13	1,1	–
22	1	46Е44Б10Ос	0,48	63	17,8	134
	2	66Е28Ос6Б	1,44	27	8,8	29
	П	98Е1Б1Ос	12,80	11	0,4	–

\*Состав подроста (П) определен по представленности пород в общем количестве деревьев, состав первого (1) и второго (2) ярусов – по доле пород в стволовом запасе.

Преобладание в подросте осины или березы определяется долей их в составе вырубленного древостоя и размещением относительно прогалов в пологе или участков с небольшой густотой сохранившейся ели. В течение двух лет после рубки мелколиственного древостоя появляются в большом количестве корневые отпрыски осины, в основном на волоках. Береза восстанавливается семенным путем и порослью у пня. В первые 2...3 года после рубки березняков количество березы меньше, и растет она медленнее осины, что определяет доминирование последней в подросте. При небольшом участии осины в составе вырубленного древостоя и ее удаленности от хорошо освещенных участков в начальный период после рубки древостоев в подросте доминирует береза. Во втором ярусе древостоев преобладает ель. Доля мелколиственных пород в первом и втором ярусах обусловлена количеством оставленных при рубке тонкомерных деревьев березы и осины.

Через 10 лет после закладки ПП был проведен повторный мониторинг с выполнением всего комплекса учетных и измерительных работ. Это дало возможность выявить тенденции в отпаде деревьев ели и мелколиственных пород предварительной и последующей генераций на объектах с разной давностью рубки древостоев березы.

## Результаты и обсуждение

В первый год после рубки древостоев березы начинается массовое возобновление осины корневыми отпрысками, в основном на волоках. Через 2 года численность ее достигала 35,0 тыс. шт./га (табл. 3, ПП-15).

В течение 10 лет погибло 85 % особей. Причины такого интенсивного отпада – изреживание в сомкнутых группах осины и неоднократное повреждение осины лосем. На объектах с 20-летней давностью рубки численность осины последующей генерации относительно невелика – от 0,3 до 1,5 тыс. шт./га. Однако и здесь в течение 10 лет погибло от 50 (ПП-23) до 90 % (ПП-20) деревьев осины. Основная причина – повреждение лосем и поражение стволовой гнилью.

Таблица 3

## Отпад деревьев мелколиственных пород

№ ПП	Порода	Генерация							
		предварительная				последующая			
		$N_1$ , тыс. шт./га	$N^0$		$N_2$ , тыс. шт./га	$N_1$ , тыс. шт./га	$N^0$		$N_2$ , тыс. шт./га
	тыс. шт./га	%			тыс. шт./га	%			
<i>Объект П<sub>2</sub></i>									
14	Береза	0,11	0,04	36	0,07	–	–	–	–
	Осина	0,02	0,01	50	0,01	16,95	14,23	84	2,72
	<i>Итого</i>	0,13	0,05	38	0,08	16,95	14,23	84	2,72
15	Береза	0,37	0,13	35	0,24	–	–	–	–
	Осина	0,02	0,01	50	0,01	35,23	30,02	85	5,20
	<i>Итого</i>	0,39	0,14	36	0,25	35,23	30,02	85	5,20
<i>Объект П<sub>20</sub></i>									
23	Береза	0,02	–	–	0,02	1,20	1,14	95	0,06
	Осина	–	–	–	–	0,28	0,14	50	0,14
	<i>Итого</i>	0,02	–	–	0,02	1,48	1,28	86	0,20
<i>Объект Т<sub>20</sub></i>									
20	Береза	0,18	0,04	22	0,14	3,39	3,09	91	0,30
	Осина	0,09	0,01	11	0,08	1,47	1,34	91	0,13
	<i>Итого</i>	0,27	0,05	18	0,22	4,86	4,43	91	0,43
21	Береза	0,16	0,01	6	0,15	5,33	4,78	90	0,55
	Осина	0,01	–	–	0,01	1,11	0,93	84	0,18
	<i>Итого</i>	0,17	0,01	6	0,16	6,44	5,71	87	0,73
22	Береза	0,18	0,01	6	0,17	0,20	0,18	90	0,02
	Осина	0,06	0,02	33	0,04	0,78	0,54	69	0,24
	<i>Итого</i>	0,24	0,03	12	0,21	0,98	0,72	73	0,26

Примечание. Здесь и далее, в табл. 4, 5, имеем  $N_1$  – количество деревьев, растущих в первый учет (в год закладки ПП);  $N^0$  – в отпаде (погибших за 10 лет);  $N_2$  – сохранившихся (растущих) через 10 лет.

На объекте  $P_2$  массовое возобновление березы началось через 2 года после рубки, т. е. после закладки пробных площадей. Поэтому при 10-летнем межучетном периоде проследить процесс отпада не представляется возможным. На объектах  $P_{20}$  и  $T_{20}$  (ДР = 20...30 лет) доля погибших за 10 лет деревьев березы последующей генерации была очень высокой (90 %). Главная причина – затенение березы верхним пологом древостоя.

Деревья мелколиственных пород предварительной генерации, оставленные после рубки, мало представлены на объектах. Максимальное их количество (0,4 тыс. шт./га) было на ПП-15. За 10-летний период погибло 35 % деревьев. На объекте  $T_{20}$  количество деревьев мелколиственных пород предварительной генерации было меньше и изменялось от 0,17 до 0,27 тыс. шт./га. Отпад их не превышал 33 %.

На объекте  $P_2$  пробные площади были заложены через 2 года после рубки. За это время самосев ели не достиг учетной высоты (10 см). Поэтому отпад ели последующей генерации при принятом межучетном периоде здесь определить невозможно.

В табл. 4 приведен отпад деревьев ели последующей генерации за 10-летний период (ДР = 20...30 лет) на объектах  $P_{20}$  и  $T_{20}$ .

Количество особей ели последующей генерации на ПП-20...23 изменялось значительно – от 2,0 до 11,3 тыс. шт./га. Они расположены в прогалах между участками с елью предварительной генерации, в основном на волоках. Под пологом ельников, формирующихся из сохранившихся подроста и тонкомера, выживает очень небольшое количество особей ели последующей генерации, преобладающая часть которых имеет ослабленное состояние. Средняя высота ели последующей генерации не превышала 0,7 м. За 10-летний период (ДР = 20...30 лет) отпад деревьев ели на ПП существенно различался – от 1,5 до 6,6 тыс. шт./га. Доля погибших деревьев изменялась от 31 до 76 % (в среднем – 35 %). Высота ели в отпаде в среднем 0,3 м.

На объекте  $T_{20}$  через 10 лет (ДР = 20...30 лет) сохранилось (в основном на волоках), от 3,1 до 5,8 тыс. шт./га деревьев ели последующей генерации (табл. 4). Это более чем в 7 раз превосходит количество сохранившихся деревьев мелколиственных пород последующей генерации.

Таблица 4

Отпад деревьев ели последующей генерации

№ ПП	$N_1$ , тыс. шт./га	$N^0$		$N_2$ , тыс. шт./га
		тыс. шт./га	%	
		<i>Объект <math>P_{20}</math></i>		
23	2,01	1,52	76	0,49
		<i>Объект <math>T_{20}</math></i>		
20	6,36	3,28	52	3,08
21	8,41	2,63	31	5,78
22	11,33	6,62	58	4,71

На пасечных участках (между волоками) формируются ельники. Здесь после рубки березы сохранилось большое количество деревьев ели предварительной генерации: до 5,1 тыс. шт./га (в среднем – 3,9 тыс. шт./га). В первый учет средняя высота деревьев зависела от доли подроста в генерации ели и давности рубки и изменялась от 2,3 (П<sub>2</sub>) до 7,0 м (П<sub>20</sub>). На объекте П<sub>2</sub> под пологом 55-летнего березняка сформировался подрост ели в возрасте до 50 лет [6]. В начальный 10-летний период после рубки возрастная структура сохранившихся деревьев ели была схожа со структурой популяции ели под пологом березняков [7]. Изменение условий (в основном увеличение освещенности) после удаления верхнего полога березы способствует увеличению интенсивности роста ели [1, 8, 9]. Адаптация ее к измененным условиям и соответственно рост неоднозначны и существенно зависят от состояния и высоты сохранившихся деревьев [2–5]. На объекте П<sub>2</sub> через 2 года после рубки древостоя березы на ПП 14 и 15 сохранилось 3,4 и 5,1 тыс. шт./га деревьев ели, сомкнутость полога была небольшой и составляла соответственно 0,5 и 0,4. Значительно преобладал подрост ели, средняя высота которой составляла 1,5 м. За 10-летний период (ДР = 2...12 лет) после рубки отпад ели не превышал 21 % (табл. 5). В отпаде преобладали (78 %) ослабленные, не способные адаптироваться к условиям вырубki, а также поврежденные в процессе рубки деревья. В ближайшей перспективе отпад деревьев будет происходить в подросте.

С увеличением давности рубки древостоя березы до 20...30 лет тенденция отпада деревьев ели существенно изменяется. Примером тому являются объекты П<sub>20</sub> и Т<sub>20</sub>.

По данным А.Я. Орлова на объекте П<sub>20</sub> под пологом березняка образовался густой подрост ели. Его плотность была около 10,0 тыс. шт./га, высота – 1,0...1,5 м [4]. После рубки древостоя березы сохранилось около 8,0 тыс. шт./га деревьев. По нашим данным, через 20 лет густота ели предварительной генерации составляла 5,1 тыс. шт./га. За 20-летний период существенно изменилось вертикальное строение елового древостоя. В нем преобладали (до 70 %) деревья второго яруса, средняя высота которых равна 8,2 м. За 10-летний период (ДР = 20...30 лет) отпад был большим и составлял 45 % от количества деревьев ели предварительной генерации в первый учет (табл. 5). При этом отпад ели во втором ярусе и в подросте как по количеству погибших деревьев, так и по их доле в генерации существенно не различался. Вместе с тем доля погибших деревьев в подросте была максимальной (87 %), несмотря на сравнительно небольшую (26 %) представленность его в предварительной генерации ели. В перспективе отпад ели будет происходить в основном во втором ярусе древостоя. На объекте П<sub>20</sub> отпад деревьев в основном обусловлен изреживанием густого древостоя ели в процессе дифференциации ее по росту и развитию.

Таблица 5

## Отпад деревьев ели предварительной генерации

№ ПП	Ярус	N <sub>1</sub> , тыс. шт./га	N°				N <sub>2</sub> , тыс. шт./га
			тыс. шт./га	% от всех деревьев			
				яруса	погибших	генерации	
<i>Объект П<sub>2</sub></i>							
14	1	0,02	0,01	50	–	–	0,01
	2	1,17	0,20	27	28	6	0,97
	П	2,25	0,52	23	71	15	0,73
	1+2+П	3,44	0,73	–	100	21	2,71
15	1	0,01	–	–	–	–	0,01
	2	0,46	0,12	26	24	2	0,34
	П	4,62	0,37	8	76	7	4,25
	1+2+П	5,09	0,49	–	100	9	4,60
<i>Объект П<sub>20</sub></i>							
23	1	0,30	0,02	7	1	–	0,28
	2	3,48	1,19	34	51	23	2,29
	П	1,31	1,14	87	48	22	0,17
	1+2+П	5,09	2,35	–	100	45	2,74
<i>Объект Т<sub>20</sub></i>							
20	1	0,16	–	–	–	–	0,16
	2	1,29	0,16	12	14	5	1,13
	П	1,81	0,97	54	86	30	0,84
	1+2+П	3,26	1,13	–	100	35	2,13
21	1	0,06	–	–	–	–	0,06
	2	1,74	0,20	11	16	5	1,54
	П	2,38	1,05	44	84	25	1,33
	1+2+П	4,18	1,25	–	100	30	2,93
22	1	0,29	–	–	–	–	0,29
	2	0,68	0,12	18	16	6	0,56
	П	1,21	0,64	53	84	29	0,57
	1+2+П	2,18	0,76	–	100	35	1,42

Иначе происходил отпад деревьев на объекте Т<sub>20</sub>, что обусловлено структурой подпологовой популяции ели. Здесь в 75-летнем березняке сформировался второй ярус ели. Рубка была направлена на сохранение тонкомера. Однако преобладающая часть его погибла. Через 20 лет после рубки на ПП сохранилось в среднем 70 деревьев на 1 га. Причиной гибели тонкомера явились ветровал, бурелом, повреждения, вызванные падением оставленных деревьев мелколиственных пород. Этому способствовало поражение ели гнилью. Отметим, что гнилевая пораженность деревьев ели второго яруса распространенное явление под пологом березняков [10]. Этому способствует повреждение коры лосем.



На объекте  $T_{20}$  формирование ельника обусловлено в основном возобновлением ели под пологом березняков, обеспеченным семеношением деревьев во втором еловом ярусе. В период рубки древостоя березы было большое количество самосева ели в возрасте до 10 лет. Обычно в березняках с елью во втором ярусе самосев отмирает. Выживанию его способствовали удаление верхнего полога березы и гибель сохраненного тонкомера ели. Через 20 лет после рубки древостоев березы на ПП 20–22 сохранилось от 2,2 до 4,2 тыс. шт./га деревьев ели предварительной генерации. Преобладал (56 %) подрост ели, средняя высота ее – 1,8 м. За 10-летний период (ДР = 20...30 лет) отпад деревьев составлял 30...35 % от количества елей предварительной генерации в первый учет и происходил в основном в подросте (табл. 5).

На рис. 1 показано распределение растущих (в начале 10-летнего периода) и погибших за 10 лет деревьев ели предварительной генерации по возрасту и высоте. В отпаде преобладают деревья, которые изначально были наиболее представлены в возрастном и высотном распределениях. Вместе с тем имелись различия, обусловленные особенностями строения ельников и давностью рубки древостоев березы. Как отмечено выше, на объекте  $P_2$  (ДР = 12 лет) отпад на ПП был относительно небольшим (до 21 %) и происходил в основном в подросте. Это хорошо видно при сравнении кривых распределения растущих и погибших деревьев. Диапазоны высоты этих деревьев существенно не отличались, разница составляла всего 2 м.

На объекте  $P_{20}$  в ельниках значительно (75 %) преобладали деревья высотой больше 4 м (во втором и первом ярусах древостоя). Этим объясняется более компактное, чем на других объектах, распределение деревьев по возрасту и высоте. Пологая вершина кривой распределения свидетельствует об отпаде деревьев как в подросте, так и втором ярусе древостоя.

Ельники на объекте  $T_{20}$  (ДР = 20...30 лет) по структуре отпада деревьев существенно отличаются от других объектов. Это обусловлено сравнительно небольшой разницей в представленности деревьев подроста (56 %) и верхних ярусов в древостое. Отпад деревьев происходил в основном в подросте ели, средний возраст которой 30 лет. Диапазоны высот растущих и погибших деревьев существенно отличаются, у последних диапазон меньше на 11 м (рис. 1).

Приведенный анализ дает представление о распределении погибших деревьев в популяции ели в целом по возрасту и высоте. Кроме этого, был определен периодический отпад за 10 лет в возрастных и высотных группах с интервалом соответственно 10 лет и 2 м. Периодический отпад в каждой группе определяется долей (процентом) погибших за 10-летний (межучетный) период в количестве растущих деревьев в начале этого периода.

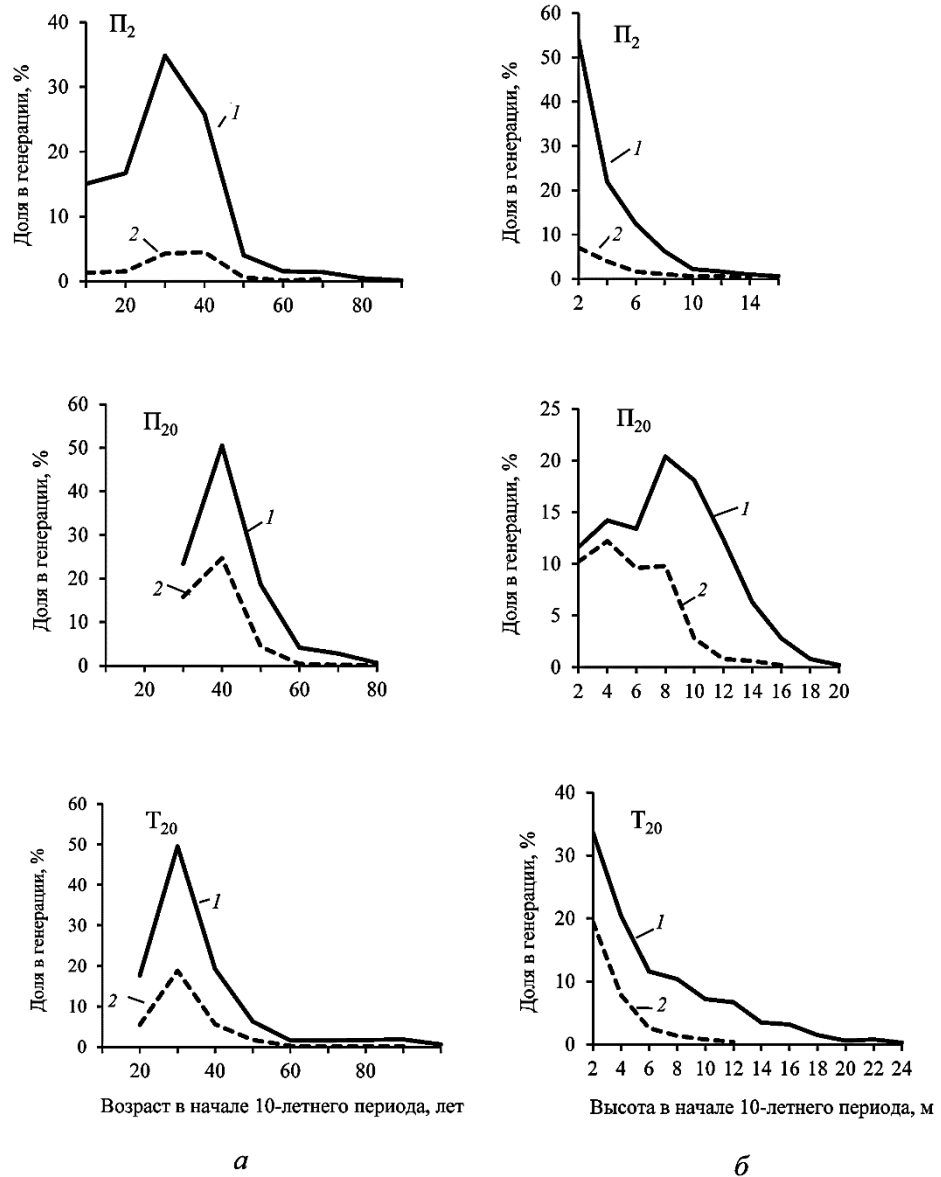


Рис. 1. Распределение по возрасту (а) и высоте (б) деревьев ели предварительной генерации, растущих в начале 10-летнего периода (1) и погибших за 10 лет (2), на объектах с давностью рубки древостоев березы 2...12 ( $\Pi_2$ ) и 20...30 лет ( $\Pi_{20}$ ,  $T_{20}$ )

По возрастной динамике периодического отпада деревьев выделяется объект  $\Pi_2$  (ДР до 12 лет). Здесь в течение десяти лет доля погибших деревьев увеличивалась с повышением возраста ели. В возрастном интервале 61...70 лет отпад составлял 27 % (рис. 2, а). В интервале до 40 лет это значение изменялось

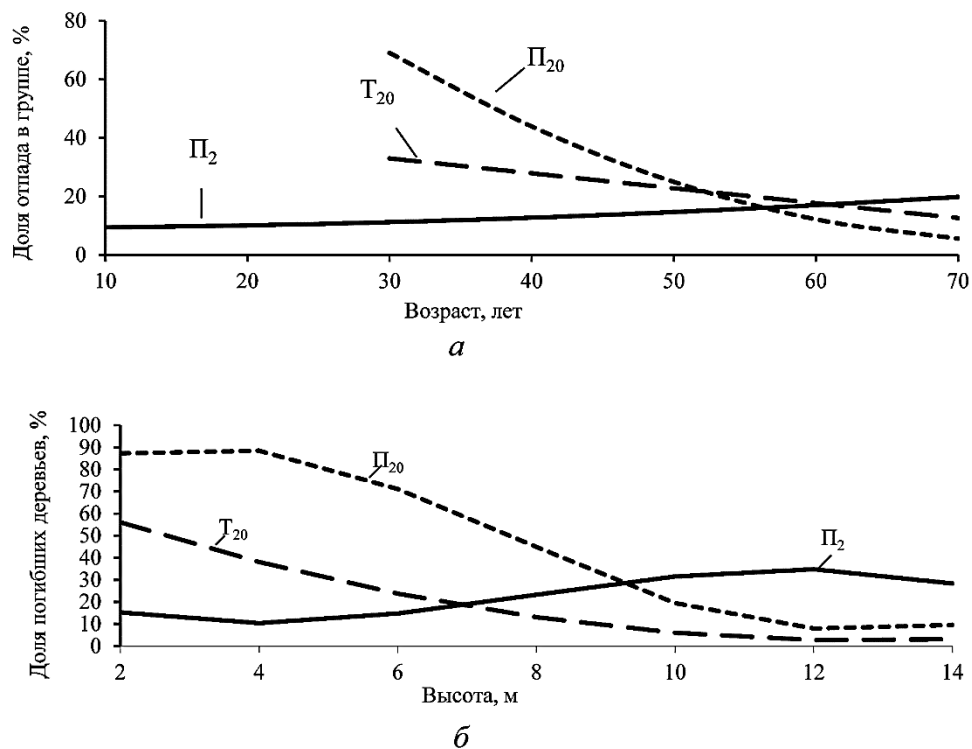


Рис. 2. Связь периодического (за 10 лет) отпада деревьев ели при давности рубки древостоев березы 2...12 лет (П<sub>2</sub>) и 20...30 лет (П<sub>20</sub>, Т<sub>20</sub>): а – с возрастом, б – с высотой

от 9 до 17 %. На объектах П<sub>20</sub> и Т<sub>20</sub> наблюдается обратная тенденция: периодический отпад уменьшается с повышением возраста ели. Подобная тенденция отмечена и в отношении изменения периодического отпада в связи с высотой деревьев: на объекте П<sub>2</sub> он возрастает с увеличением высоты деревьев, на других объектах – уменьшается (рис. 2, б). Зависимости характеризуются умеренной и сильной степенями связи, коэффициенты детерминации  $R^2 = 0,6...0,9$ . Сходство направлений изменения периодического отпада в возрастных и высотных группах деревьев определяется зависимостью высоты от возраста ели, коэффициент корреляции равен 0,6.

При давности рубки древостоев березы до 10 лет увеличение периодического отпада с повышением возраста и высоты ели обусловлено главным образом повреждением деревьев при проведении лесосечных работ. Чем старше и соответственно выше деревья, тем больше вероятность их повреждения. Доля поврежденных деревьев изменялась от 30 (в возрастном интервале 21...40 лет) до 82 % (41...70 лет). На объектах П<sub>20</sub> и Т<sub>20</sub> в этих возрастных интервалах такого существенного различия (52 %) не наблюдалось, разница не превышала 11 %.

Подобная тенденция отмечена и в отношении деревьев разных высотных групп. На объекте П<sub>2</sub> доля поврежденных деревьев увеличивается с 58 (в высотном интервале 4...7 м) до 79 % (в интервале 7...12 м). На объектах П<sub>20</sub> и Т<sub>20</sub> эта разница не превышала 8 %. При этом здесь, в отличие от П<sub>2</sub>, гибель деревьев была в основном обусловлена падением деревьев мелколиственных пород, оставленных при рубке древостоев.

Таким образом, в начальный период после рубки древостоев березы динамика периодического отпада ели определяется повреждением (в процессе лесосечных работ) деревьев старшего возраста, имеющих высоту более 7 м. В целом же доля таких деревьев в общем количестве погибших за 10 лет деревьев невелика (см. рис. 1, П<sub>2</sub>). Поэтому отпад деревьев здесь обусловлен в основном особенностями адаптации ели к условиям среды, изменившимся после рубки древостоев березы. На объекте П<sub>2</sub> (ДР до 12 лет) около 50 % изначально ослабленных деревьев ели через 10 лет имели нормальное состояние, обратное отмечено в 25 % случаев. На объектах П<sub>20</sub> и Т<sub>20</sub> (ДР = 20...30 лет) такая динамика не прослеживалась, часть деревьев (около 20 %), изначально имевших нормальное состояние, через 10 лет перешли в категорию ослабленных. Напряженность конкурентных отношений, существенно обуславливающая отпад ели, отражает показатель сомкнутости крон деревьев (*Ск*), равный отношению суммы площадей горизонтальной проекции крон всех деревьев к площади ПП. На пробных площадях значения этого показателя были определены по выделенным ярусам древостоя ели. Он не всегда зависит от густоты популяции ели. Так, на ПП-15 (ДР = 2 года) значение *Ск* было минимальным (0,5) при большой густоте подроста ели (4,6 тыс. шт./га), значительном преобладании его в популяции (90 %) и средней высоте ели 1,2 м. Отпад деревьев в подросте был минимальным и составлял 8 % (табл. 5). При небольшой сомкнутости крон, что часто наблюдается в начальный период после рубки древостоев березы, конкуренция между особями не выражена и не является главной причиной отпада деревьев. При давности рубки более 10 лет, вследствие высоких темпов роста ели, сомкнутость крон повышается и зависит от густоты ели предварительной генерации и вертикального строения древостоя. Так, на объектах П<sub>20</sub> и Т<sub>20</sub> (ДР = 20 лет) с увеличением густоты (в 1-й учет) соответственно от 3,2 до 5,1 тыс. шт./га и доли деревьев первого и второго ярусов от 44 до 74 % общая сомкнутость крон повышается от 1,0 до 1,4, в том числе сомкнутость крон деревьев этих ярусов – от 0,7 до 1,3. Для сравнения отметим, что сомкнутость крон превышала сомкнутость полога в 1,6 (ПП-22) и в 2 раза (ПП-23). Во втором ярусе образуется «экран», через который прямой солнечный свет не проникает. По средней высоте деревьев этот ярус превышает подрост в 3–5 раз, что определяет сильное затенение и большой отпад ели в последнем. Примерно через 10 лет после рубки древостоев березы отпад деревьев в ельниках обусловлен в основном напряженностью конкурентных отношений в популяции ели. Главный лимитирующий фактор – дефицит светового ресурса, который возрастает от верхнего яруса древостоя к нижнему.

Влияние сомкнутости крон на отпад деревьев ели в предварительной генерации подтверждается следующими зависимостями:

количество погибших деревьев подроста ( $N_{\Pi}^0$ ) от сомкнутости крон всех елей в генерации ( $Ck$ ):

$$N_{\Pi}^0 = -0,14 + 0,98Ck; R^2 = 0,8; F = 23,4 > F_{0,05} = 6,9;$$

количество погибших деревьев первого и второго ярусов ( $N_V^0$ , тыс. шт./га) от сомкнутости крон елей этих ярусов ( $Ck_V$ ):

$$N_V^0 = 0,16 + 0,7 Ck_V^{0,79}, R^2 = 0,9, F = 184,9 > F_{0,05} = 6,9.$$

Приведенные зависимости показывают, что с увеличением сомкнутости крон в рассматриваемых вариантах отпад деревьев ели предварительной генерации возрастает.

В целях выбора показателя для оценки вероятности отпада ели предварительной генерации был проведен корреляционный анализ между следующими характеристиками деревьев: высотой ( $H$ ), возрастом ( $A$ ), радиусом ( $Rk$ ), площадью горизонтальной проекции ( $Sk$ ) и относительной протяженностью ( $Lk_0$ ) крон. Последний ( $Lk_0$ ) определялся отношением протяженности крон к  $H$ . Анализ выполнен для двух высотных градаций деревьев: менее 4,1 м (подрост) и 4,1...13,0 м (второй ярус). В него включены данные измерений указанных параметров соответственно у 3444 и 2436 деревьев, не имеющих существенных повреждений ствола и крон. Результаты приведены в табл. 6: в нижней части (от значений **1,00**) – для подроста, в верхней части – для второго яруса ели.

Таблица 6

Корреляционная матрица связи характеристик деревьев

Характеристики деревьев	$H$	$A$	$Rk$	$Sk$	$Lk_0$
$H$	<b>1,00</b>	0,62	0,72	0,71	0,13
$A$	0,57	<b>1,00</b>	0,53	0,56	-0,25
$Rk$	0,84	0,56	<b>1,00</b>	0,97	0,34
$Sk$	0,78	0,48	0,96	<b>1,00</b>	0,28
$Lk_0$	0,29	-0,27	0,34	0,34	<b>1,00</b>

Из приведенных данных следует, что характеристики, имеющие абсолютные значения ( $H, A, Rk, Sk$ ), взаимно связаны ( $r = 0,48...0,90$ ). По силе связи с ними отличается относительный показатель  $Lk_0$ . Значения коэффициентов корреляции (0,34 и менее) свидетельствуют об очень слабой связи его с другими характеристиками. Показатель  $Lk_0$  был использован в анализе отпада деревьев ели предварительной генерации.

На рис. 3 показано изменение периодического отпада деревьев ели в связи с относительной протяженностью крон деревьев ели.

Установлено, что на всех объектах периодический отпад деревьев ели предварительной генерации снижается по мере увеличения относительной протяженности крон ели. Наиболее четко это выражено на объектах  $\Pi_{20}$  и  $T_{20}$ , где отмирание ели обусловлено высокой сомкнутостью крон (1,0...1,4). На объекте  $\Pi_2$  с увеличением  $Lk_0$  периодический отпад уменьшается постепенно.

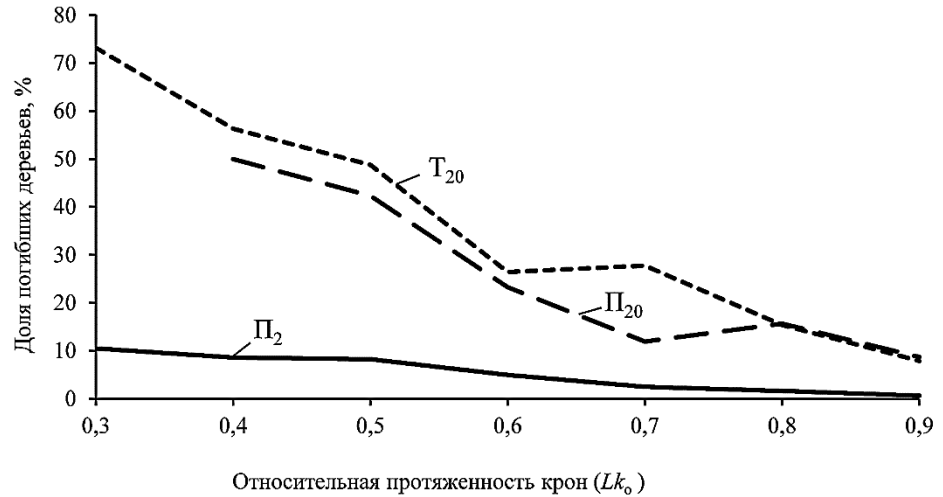


Рис. 3. Связь периодического (за 10 лет) отпада деревьев, имеющих изначально нормальное состояние, с относительной протяженностью крон ели при давности рубки древостоев березы 2...12 ( $\Pi_2$ ) и 20...30 лет ( $\Pi_{20}$ ,  $T_{20}$ )

Такая динамика отпада объясняется относительно небольшой сомкнутостью крон ели в начальный период после рубки березы и постепенным увеличением параметров крон после адаптации ели к измененным условиям среды. В целом анализ показал, что значительная часть деревьев с относительной протяженностью кроны 0,5 и менее отмирает в течение 10 лет. Изначально эти деревья имели нормальное состояние.

#### Выводы

1. Отпад деревьев в насаждениях, формирующихся после рубки древостоев березы с сохранением ели предварительной генерации, обусловлен комплексом взаимодействующих абиотических и биотических факторов, изменяющихся после удаления верхнего полога мелколиственного древостоя. Влияние этих факторов на отпад деревьев проявляется неоднозначно в разные периоды, определяемые давностью рубки древостоев березы.

2. В начальный 10-летний период отпад главным образом определяется особенностью адаптации ели предварительной генерации к условиям вырубki и повреждением ее при рубке древостоев березы, а также гибелью особей в последующей генерации древесных пород. Это обусловлено в основном следующими факторами: густотой, вертикальным строением и пространственной структурой популяции ели под пологом вырубаемого березняка, количеством, состоянием и размещением деревьев ели и мелколиственных пород, сохранившихся после рубки древостоя березы. При давности рубки более 10 лет отпад деревьев ели предварительной генерации зависит главным образом от повышения напряженности конкурентных отношений. Это определяется интенсивным ростом ели, повышением сомкнутости крон и, как следствие, увеличением темпа дифференциации деревьев по росту и развитию.

3. В кислично-черничной группе типов леса в течение 20 лет после сплошной рубки древостоев березы преобладающая часть оставленных тонкомерных деревьев ели погибает. Главная роль в формировании ельников на пасечных участках (между волоками) принадлежит подросту ели, при сохранении не менее 3 тыс. шт./га деревьев и их относительно равномерном размещении. Последующее возобновление ели происходит в основном на волоках. Гибель ее за 10 лет значительная (не менее 50 %). Здесь в перспективе возможно естественное восстановление лиственнично-еловых и елово-лиственничных древостоев.

4. Для повышения доли ели в составе насаждений целесообразно через 5 лет после рубки древостоев березы удалять деревья мелколиственных пород.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дерюгин А.А., Рубцов М.В., Серяков А.Д. Рост ели после рубки березняков в южной тайге // Лесн. хоз-во. 2000. № 5. С. 30–31.
2. Дерюгин А.А., Серяков А.Д. Адаптация подпологовой ели к условиям выруб-ки в подзоне южной тайги // Лесохозяйственная информация. 2002. № 8. С. 12–17.
3. Орлов А.Я., Ильющенко А.Ф. Состояние подроста ели на сплошных вырубках в березняках южной тайги // Лесоведение. 1982. № 1. С. 18–25.
4. Орлов А.Я. Почвенно-экологические основы лесоводства в южной тайге. М.: Наука, 1991. 104 с.
5. Орлов А.Я., Серяков А.Д. Формирование еловых древостоев из подроста на вырубках мелколиственных лесов // Лесн. хоз-во. 1991. № 1. С. 23–25.
6. Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Динамика возрастной структуры популяции ели под пологом южно-таежных березняков Русской равнины // Хвойные бореальной зоны. 2013. Т. XXXI, № 1-2. С. 9–14.
7. Рубцов М.В., Дерюгин А.А., Никитин А.П., Серяков А.Д. Возрастная структура популяции ели на вырубках с сохраненным еловым подростом // Лесоведение. 2001. № 5. С. 68–71.
8. Рубцов М.В., Дерюгин А.А. Рост ели под пологом южно-таежных березняков и после рубки их с сохранением подроста // Лесн. журн. 2007. № 2. С. 19–27. (Изв. высш. учеб. заведений).
9. Рубцов М.В., Дерюгин А.А., Серяков А.Д. Закономерности роста ели после рубки верхнего яруса березы // Лесоведение. 2005. № 6. С. 44–53.
10. Рубцов М.В., Никитин А.П., Дерюгин А.А. Поражение гнилью ели в процес-се формирования ее популяции под пологом южно-таежных березняков // Строение, свойства и качество древесины: тр. IV Междунар. симпозиума. СПб., 2004. Т. II. С. 456–457.

Поступила 21.04.2015

UDC 630\*181.9:630\*182.2

**Mortality of Trees after a Birch Cutting with Preservation of Spruce in Southern Taiga in the Centre of the Russian Plain**

**M.V. Rubtsov**, *Doctor of Agriculture, Professor*

**A.A. Deryugin**, *Candidate of Agriculture, Senior Research Officer*

Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences, Sovetskaya, str. 21, Uspenskoe, Moscow Region, 143030, Russia; e-mail: mivlarub@mail.ru

Long-term observations on the permanent experimental surfaces have been established trends of trees mortality in initial period (10 years) and after 20...30 years since clearcutting of 45...75 years old birch forests with preservation of spruce with preliminary generation. Cuttings were held in high productive southern-taiga birch forests of oxalidosum-myrtillosum group. Trees renewal occurs mainly on skidding tracks between lots of spruce of preliminary generation. Aspen abundantly restores by root suckers after a cutting and soon dies (85 %) because of natural thinning and repeated damages by elks. Regeneration of small-leaved trees in 20...30 years after cutting accounts and mostly is represented by birch. In this generation, there is a high mortality rate (85 %) due to shading by upper trees. Spruce renewal mainly occurs on skidding tracks. Over 20 years after cutting the amount of spruces (higher than 0.1 m) has changed from 2.0 to 11.3 thsnd. pcs. ha<sup>-1</sup>. In next 10 years mortality of spruce averaged 55 %. The main reason of death was shading by upper trees. In initial period after birch cutting a mortality among them did not exceed 20 % (mainly spruce, unable to adapt to new conditions and damaged). Later, mortality increases till 30...45 % due to the competition for light resource: tree feels deficiency of light more heavily than it lower within canopy. Weakened, stunted spruce, mainly with relative length of crown – not more than 0.5, dies. Quantity of died spruces directly depends on the canopy density of spruce of preliminary generation. Spruces left after cutting of birch stands play the main role in formation of the future forests.

*Keywords:* southern taiga, birch forest, cutting with preservation of spruce, trees mortality, main inputs.

REFERENCES

1. Deryugin A.A., Rubtsov M.V., Seryakov A.D. Rost eli posle rubki bereznyakov v yuzhnoy tayge [Growth of Spruce After Cutting of Birch Forests in Southern Taiga]. *Lesnoe khozyastvo*, 2000, no. 5, pp. 30–31.
2. Deryugin A.A., Seryakov A.D. Adaptatsiya podpologovoy eli k usloviyam vyrubki v podzone yuzhnoy taygi [Adaptation of Subordinate Spruce to Felling Conditions in Southern Taiga]. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya*, 2002, no. 8, pp. 12–17.
3. Orlov A.Ya., Il'yushenko A.F. Sostoyanie podrosta eli na sploshnykh vyrubkakh v bereznyakakh yuzhnoy taygi [State of Spruce Renewal on Clear Felled Areas in Birch Forests of Southern Taiga]. *Lesovedenie*, 1982, no. 1, pp. 18–25.
4. Orlov A.Ya. *Pochvenno-ekologicheskie osnovy lesovodstva v yuzhnoy tayge* [Soil-Ecology Bases of Forestry in Southern Taiga]. Moscow, 1991. 104 p.
5. Orlov A.Ya., Seryakov A.D. Formirovanie elovykh drevostoev iz podrosta na vyrubkakh melkolistvennykh lesov [Formation of Spruce Forests from Renewal After Cutting of Small-Leaved Forests]. *Lesnoe khozyastvo*, 1991, no. 1, pp. 23–25.



6. Rubtsov M.V., Deryugin A.A. Dinamika vozrastnoy struktury populyatsii eli pod pologom yuzhno-taezhnykh bereznyakov Russkoy ravniny [Dynamics of Age Structure of Spruce Population Under the Canopy of Southern Taiga Birch Fores of the Russian Plain]. *Khvoynye boreal'noy zony*, 2013, Vol. XXXI, no. 1–2, pp. 9–14.

7. Rubtsov M.V., Deryugin A.A., Nikitin A.P., Seryakov A.D. Vozrastnaya struktura populyatsii eli na vyrbkakh s sokhrannym elovym podrostom [Age Structure of Spruce Population on Felled Areas with Saved Spruce Young Growth]. *Lesovedenie*, 2001, no. 5, pp. 68–71.

8. Rubtsov M.V., Deryugin A.A. Rost eli pod pologom yuzhno-taezhnykh bereznyakov i posle rubki ikh s sokhraneniem podrosta [The Growth of Spruces Under a Canopy of Southern-Taiga Birch Forests and After their Cutting with the Regrowth Preservation]. *Lesnoy zhurnal*, 2007, no. 2, pp. 19–27.

9. Rubtsov M.V., Deryugin A.A., Seryakov A.D. Zakonomernosti rosta eli posle rubki verkhnego yarusa berezy [Regularity of Spruce Growth After Cutting of the Upper Conopy of Birch]. *Lesovedenie*, 2005, no. 6, pp. 44–53.

10. Rubtsov M.V., Nikitin A.P., Deryugin A.A. Porazhenie gnil'yu eli v protsesse formirovaniya ee populyatsii pod pologom yuzhno-taezhnykh bereznyakov [Rot Damage of Spruce During Formation of Population Under the Canopy of Birch Forests in Southern Taiga]. *Stroenie, svoystva i kachestvo drevesiny – Tr. IV Mezhdun. simpoziuma* [Construction, Features and Quantity of Wood. Proc. IV Int. Symposium]. Saint Petersburg, 2004, vol. II, pp. 456–457.

Received on April 21, 2015

DOI:10.17238/issn0536-1036.2015.5.9

УДК 631.336.6

**ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
КОМПЛЕКТОВ АГРЕГАТОВ ПРИ ПЕРЕСАДКЕ ПОДРОСТА  
ИЗ-ПОД ПОЛОГА ЛЕСА\***

© *К.П. Рукомойников, канд. техн. наук, доц.*

Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, д. 3,  
г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия, 424000;  
e-mail: RukomojnikovKP@marstu.net

Рассмотрен способ совмещенного лесовосстановления, при котором предлагается совмещение рубок и лесовосстановительных операций. Подрост выкапывается с площадей его гарантированного уничтожения и высаживается на безопасных участках. Отмечено, что в настоящее время отсутствует методика обоснования производительности комплектов агрегатов, задействованных на операциях совмещенного лесовосстановления. Даны рекомендации по формированию комплектов агрегатов, проведен анализ их функционирования в различных производственных условиях. Предложены математические зависимости для расчета производительности агрегатов, задействованных на различных операциях технологического процесса пересадки подростка с учетом их взаимосогласованной работы. Даны рекомендации к осуществлению технологического процесса пересадки подростка с минимальными простоями машин и механизмов. Предложенная методика расчета комплексной выработки позволяет обосновать эффективность функционирования комплектов агрегатов под пологом леса в любых производственных условиях с учетом разнообразных природно-производственных факторов.

*Ключевые слова:* лесной квартал, лесовосстановление, пересадка подростка, лесозаготовка, полог леса.

Исследования по использованию елового подростка естественного происхождения в качестве культур на вырубках малой площади ведутся с 1992 г. в Поволжском государственном технологическом университете совместно с учеными Московского государственного университета леса. Среди них А.К. Редкин, Ю.А. Ширнин [1], Г.М. Гаджиев [2], А.В. Лазарев [3] и др. В настоящее время разработаны и прошли экспериментальную проверку рабочие органы для пересадки подростка с закрытой корневой системой [4, 6]. Доказана эффективность концентрации работ по пересадке подростка в пределах лесного квартала [5, 10]. Доказано [7] и подтверждено исследованиями зарубежных авторов [8, 9], что приживаемость, качество будущих насаждений, устойчивость к болезням и вредителям гораздо выше, чем у созданных из посадочного материала, выращенного в питомниках.

---

\*Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской работы № 1 базовой части государственного задания ФГБОУ ВПО Поволжского государственного технологического университета.

Достоверность исследований основана на периодических производственных испытаниях новой технологии, в рамках которых предложенное технологическое оборудование прошло неоднократную экспериментальную проверку и подтвердило свою работоспособность в реальных производственных условиях с использованием тракторов МТЗ-80 [2, 3] и форвардера «Валмет-862». Проведенные совместные многолетние теоретические и экспериментальные исследования научных коллективов двух вузов по комплексному освоению участков лесного фонда показали хорошую приживаемость (96 %) пересаживаемого елового подроста с закрытой корневой системой и перспективность данного направления развития техники и технологии лесосечно-лесовосстановительных процессов. Экспериментально определены характеристики елового подроста, который может быть пересажен из-под полога леса с закрытой корневой системой, и оптимальные почвенные условия для его успешной приживаемости [2].

Следующим этапом исследования является разработка методических рекомендаций к расчету комплексной выработки задействованных на этих операциях машин и механизмов.

Согласно предложенной технологии подрост выкапывается лишь с площадей его гарантированного уничтожения в ходе проведения лесосечных работ и высаживается на безопасных участках. За счет разности в возрасте пересаживаемого подроста формируется разновозрастный древостой сложного улучшенного состава, обеспечивающего рост молодняков и приспевающего леса.

При выполнении технологических процессов, связанных с пересадкой подроста, присутствуют различные виды операций: ВИ – выкопка подроста индивидуальная; ВЯ – выкопка ямок для посадки подроста; ДТС – доставка подроста в транспортное средство; ДТСК – доставка подроста в транспортное средство с одновременным контейнерованием прикорневой глыбки; ВОП – выгрузка с одновременной посадкой; ТП – транспортировка подроста.

Одним из вариантов сочетания операций, взятым в качестве примера для расчета производительности комплектов при пересадке подроста, является использование не одного (ВИ→ ДТС(ДТСК)), а двух агрегатов на операциях (ТП→ВЯ→ВОП). Как показывают расчеты, выполненные по методике, предложенной в [3], данный вариант наиболее приемлем при расстоянии транспортировки подроста около 750 м, так как при этом производительность агрегата на выкопке подроста будет примерно равна суммарной производительности агрегатов при посадке подроста. Но на практике среднее расстояние транспортировки подроста редко соответствует рекомендуемому. Отклонение от оптимальных значений, позволяющих обеспечить согласованную работу агрегатов, может быть частично скомпенсировано за счет использования агрегатов, задействованных на менее трудоемких операциях в помощь агрегатам, задействованным на более трудоемких операциях.

При этом возможны следующие ситуации:

$$1.1. T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} / A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} > T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)} / A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)};$$

$$1.2. T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} / A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} < T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)} / A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)},$$

где  $T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}$  – время, затрачиваемое на выкопку единицы подроста и укладку его в тележку агрегатом (ВИ → ДТС(ДТСК)), с;

$A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}, A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}$  – количество агрегатов, задействованных соответственно на операциях выкопки подроста и его транспортировки с последующей посадкой, шт.;

$T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}$  – время цикла работы агрегата (ТП → ВЯ → ВОП), с.

В ситуации 1.1. в целях сокращения простоев агрегата (ТП → ВЯ → ВОП) рекомендуется его частичное использование на операциях (ВИ → ДТС(ДТСК)). В результате чего может быть достигнуто равенство трудозатрат при выполнении различных циклов технологического процесса:

$$\frac{T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.1.}}{A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}} = \frac{T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{сиг.1.1.}}{A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}},$$

где  $T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.1.}$  – время, затрачиваемое на выкопку единицы подроста, с учетом применения агрегата (ВИ → ДТС(ДТСК)) и частичного использования на этой операции агрегата (ТП → ВЯ → ВОП), с,

$$T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.1.} = T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} - T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} \cdot p^{сиг.1.1.};$$

$T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}$  – время, цикла работы агрегата (ТП → ВЯ → ВОП), затрачиваемое на его частичное использование на операциях (ВИ → ДТС(ДТСК)), с;

$p^{сиг.1.1.}$  – коэффициент, характеризующий различия по времени цикла выкопки подроста агрегатом (ВИ → ДТС(ДТСК)) и частично задействованным на этой операции агрегатом (ТП → ВЯ → ВОП);

$T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{сиг.1.1.}$  – время, цикла работы агрегата (ТП → ВЯ → ВОП) при его частичном использовании на выкопке подроста из-под полога леса, с,

$$T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{сиг.1.1.} = T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)} + T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))};$$

$$T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} = \frac{T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} \cdot A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)} - T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)} \cdot A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}}{A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} + A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)} \cdot p^{сиг.1.2.}}.$$

Определим среднее количество подроста, которое должно быть выкопано агрегатом (ТП → ВЯ → ВОП) при его частичном использовании на операциях (ВИ → ДТС(ДТСК)):

$$n_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} = \Pi_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.1} - \Pi_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} = \frac{3600 \cdot m \cdot \varphi \cdot (T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.1} - T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.1})}{T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.1} \cdot T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}}$$

где  $\Pi_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.1}$ ,  $\Pi_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}$  – производительность агрегата (ВИ → ДТС(ДТСК)) соответственно с учетом взаимодействия агрегатов и без него, шт.

Комплексная выработка может быть рассчитана по следующей формуле:

$$K_{в} = \Pi_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} \cdot A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} + n_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} \cdot A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}$$

Комплексная выработка на одну машину:

$$K_{в1} = \frac{K_{в}}{A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} + A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}}$$

В ситуации 1.2. в целях сокращения простоев агрегата (ВИ → ДТС(ДТСК)) возможно перемещение агрегата в направлении транспортировки подроста и организация пункта замены транспортной тележки не в зоне выкопки подроста, а на некотором расстоянии от нее. При этом целесообразно достижение равенства трудозатрат при работе обоих агрегатов:

$$\frac{T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.2}}{A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}} = \frac{T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{сиг.1.2}}{A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}}$$

где  $T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{сиг.1.2}$ ,  $T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.2}$  – соответственно время цикла работы агрегатов (ТП → ВЯ → ВОП) и (ВИ → ДТС(ДТСК)) при частичном использовании агрегата (ВИ → ДТС(ДТСК)) на транспортировке подроста в направлении к месту его посадки, с,

$$T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{сиг.1.2} = T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)} - \frac{2 \cdot l_m^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}}{\vartheta_T \cdot N};$$

$$T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.2} = T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} + \frac{2 \cdot l_m^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}}{\vartheta_T^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} \cdot N};$$

$l_m^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}$  – среднее расстояние, проходимое агрегатом (ВИ → ДТС(ДТСК)) от места посадки до пункта замены транспортной тележки, м;

$\vartheta_T^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}$  – средняя скорость перемещения агрегата (ВИ → ДТС(ДТСК)) при транспортировке транспортной тележки, м/с.

Следовательно, рациональное среднее расстояние транспортировки подростка агрегатом (ВИ→ДТС(ДТСК)) до пункта замены транспортной тележки

$$\ell_m^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} = \frac{N \cdot \vartheta_r \cdot \vartheta_r^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} \cdot \left( \frac{T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}}{A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}} - \frac{T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}}{A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}} \right)}{2 \cdot \left( \frac{\vartheta_r^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}}{A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}} + \frac{\vartheta_r}{A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}} \right)}$$

рациональное среднее расстояние транспортировки подростка агрегатом (ТП→ВЯ→ВОП) от пункта замены тележки к месту посадки:

$$\ell_m^{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)} = \ell_m - \ell_m^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}$$

Тогда производительность агрегата (ТП→ВЯ→ВОП) при смещении пункта замены транспортной тележки в сторону участка посадки подростка в целях сбалансированности трудозатрат при работе агрегатов различного технологического назначения, входящих в комплект:

$$\Pi_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{сиг.1.2} = \frac{3600 \cdot m \cdot \varphi_1}{T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)} - \left( \frac{\vartheta_r^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} \cdot \left( \frac{T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}}{A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}} - \frac{T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}}{A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}} \right)}{\frac{\vartheta_r^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}}{A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}} + \frac{\vartheta_r}{A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}}} \right)}$$

производительность агрегата (ВИ→ДТС(ДТСК)):

$$\Pi_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.2} = \frac{3600 \cdot m \cdot \varphi_1}{T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} + \left( \frac{\vartheta_r \cdot \left( \frac{T_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}}{A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}} - \frac{T_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}}{A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}} \right)}{\frac{\vartheta_r^{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}}{A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}} + \frac{\vartheta_r}{A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}}} \right)}$$

Таким образом, комплексная выработка агрегатов в данной ситуации:

$$K_B = \Pi_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}^{сиг.1.2} \cdot A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))}$$

или

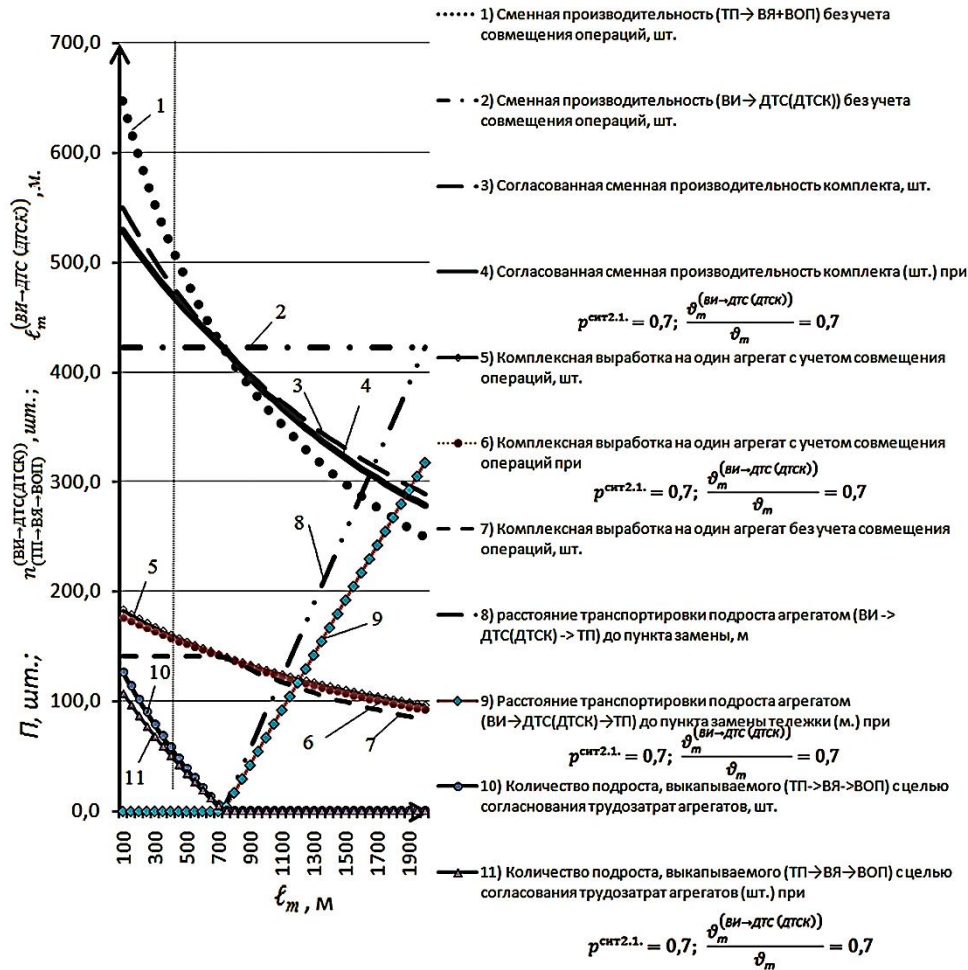
$$K_B = \Pi_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}^{сиг.1.2} \cdot A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}$$

Комплексная выработка на одну машину:

$$K_{B1} = \frac{K_B}{A_{(ВИ \rightarrow ДТС(ДТСК))} + A_{(ТП \rightarrow ВЯ \rightarrow ВОП)}}$$

Рисунок демонстрирует эффективность согласованной работы агрегатов с учетом частичной их взаимозаменяемости на смежных операциях на примере комплекта: 1 агрегат (ВИ→ДТС(ДТСК)) + 2 агрегата (ТП→ВЯ→ВОП).

Например, при среднем расстоянии транспортировки подростка, равном 400 м, теоретическая выработка агрегата (ВИ→ДТС(ДТСК)) примерно равна 420 шт. (линия 2), двух агрегатов (ТП→ВЯ→ВОП) – 510 шт. (линия 1). За счет частичного использования агрегатов (ТП→ВЯ→ВОП) на смежных



Анализ функционирования комплекта: 1 агрегат (ВИ→ДТС(ДТСК)) + 2 агрегата (ТП→ВЯ→ВОП)

операциях можно повысить выработку комплекта, ограниченную линией 2, свидетельствующей о низкой (по сравнению с теоретической выработкой двух агрегатов (ТП→ВЯ→ВОП)) производительности агрегата (ВИ→ДТС(ДТСК)).

При согласовании производительности агрегатов возможно повышение комплексной сменной выработки комплекта до 470 шт. подроста (линии 3, 4). При этом два агрегата (ТП→ВЯ→ВОП) по прибытии к месту выкопки частично используются на выкопке подроста из-под полога леса, производительность за смену около 50 шт. подроста (линии 10, 11), средняя комплексная выработка на один агрегат в смену увеличивается примерно со 145 (линия 7) до 160 шт. подроста (линии 5, 6).

Предложенная методика позволяет обосновать эффективность функционирования комплектов агрегатов под пологом леса в любых производственных условиях с учетом разнообразных природно-производственных факторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 1797788, СССР МКИ А 010 23/00. Способ заготовки древесного сырья и лесовозобновления / Ширнин Ю.А., Редькин А.К., Успенский Е.И., Захариков В.М. № 4842725/15; заявл. 21.06.90; опубл. 28.02.93, Бюл. № 8. 2 с.
2. Гаджиев Г.М. Обоснование параметров устройства для выкопки посадочного материала с прикорневой глыбкой: дис ... канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 1999. 161 с.
3. Лазарев А.В. Обоснование технологии и комплекта машин для пересадки подроста: дис ... канд. техн. наук. Йошкар-Ола, 1999. 138 с.
4. Пат. № 2155473 РФ, МКИ<sup>7</sup> А 01G 23/04. Рабочий орган для выкопки подроста/ Ширнин Ю.А., Шестаков Я.И. Гаджиев Г.М. № 99113548/13; заявл. 21.06.99; опубл. 10.09.2000, Бюл. № 25. 4 с.
5. Рукомойников К.П. Разработка алгоритма выбора вариантов прокладки транспортных путей при проведении комплекса лесосечных работ с совмещенным лесовосстановлением // Лесн. вестн. 2010. № 6(75). С. 101–106.
6. Рукомойников К.П. Совершенствование технологического оборудования для пересадки подроста с закрытой корневой системой // Лесн. журн. 2014. № 2(338). С. 9–17.
7. Ширнин Ю.А., Редькин А.К., Лазарев А.В., Гаджиев Г.М., Рукомойников К.П. Технология машинной пересадки подроста в процессе лесозаготовок. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. 152 с.
8. Brissette J.C. Barnett J.P. Comparing first-year growth of bare-root and container plantings of shortleaf pine half-sib families // Proceedings of the 20th So Forest Tree Improvement Conf. Pub. June 26th–30th, Charleston SC. 1989. N 42. pp. 354–361.
9. Gwaze D, Melick R, Studyvin C., Hoss G. Survival and growth of container and bareroot shortleaf pine seedlings in Missouri // Proceedings of the Forest and Conservation Nursery Associations. USA: USDA For Serv Gen Tech Rep RMRS-P-43. 2006. pp. 123–126.
10. Rukomojnikov K.P. Technical and technological aspects of progressive cutting forest compartment with combined reforestation // World Applied Sciences Journal. 2013. Vol. 24. Iss. 11. pp. 1429–1434.

Поступила 17.10.14

UDC 631.336.6

#### **Efficiency Substantiation of Functioning of Aggregates Complete Sets at Outplanting of Young Undergrowth from under the Forest Canopy**

*K.P. Rukomojnikov, Candidate of Engineering, Associate Professor*

Volga State University of Technology, Lenina pl., 3, Yoshkar-Ola, 424000, Russia; e-mail: RukomojnikovKP@marstu.net

The paper considers the way of combined reforestation which offers the combination of forest of harvesting and reforestation operations. The undergrowth is dug out from the areas of its guaranteed destruction and planted out on safe sites. It is marked, that now there is no technique of a substantiation of productivity of complete sets of the units involved in the



operations of combined reforestation. The recommendations for formation of complete sets of aggregates are given, the analysis of their functioning in various industrial conditions is carried out. The mathematical dependences for account of productivity of aggregates, involved in various operations of technological process of transplanting of young undergrowth, in view of their coordinated work are offered. The recommendations to realize the technological process of outplanting of undergrowth with the minimal machines downtime are given. The offered design procedure of complete performance allows to prove efficiency of functioning of complete sets of units under the forest canopy in any industrial conditions and a variety of natural and production factors.

*Keywords:* forest compartment, reforestation, outplanting of young undergrowth, timber harvesting, canopy.

#### REFERENCES

1. Shirnin Yu.A., Red'kin A.K., Uspenskiy E.I., Zakharikov V.M. *A.S.1797788 SSSR Sposob zagotovki drevesnogo syr'ya i lesovozobnovleniya* [A.S.1797788 USSR. Method of Harvesting of Wood Raw Material and Reforestation].
2. Gadzhiev G.M. *Obosnovanie parametrov ustroystva dlya vykopki posadochnogo materiala s prikornevoy glybkoy*: dis ... kand. tekhn. nauk [Justification of Device Parameters for Planting Material Digging with the Root Clumps: Diss. Cand. Eng. Sci.]. Yoshkar-Ola, 1999. 161 p.
3. Lazarev A.V. *Obosnovanie tekhnologii i komplekta mashin dlya peresadki podrosta*: dis ... kand. tekhn. nauk [Substantiation of Technology and a Set of Machines for Young Growth Outplantation: Cand. Eng. Sci. Diss.]. Yoshkar-Ola, 1999. 138 p.
4. Shirnin Yu.A., Shestakov Ya.I. Gadzhiev G.M. *Rabochiy organ dlya vykopki podrosta* [The Executive Device for Undergrowth Digging]. Patent RF no 2155473, 1999.
5. Rukomoynikov K.P. *Razrabotka algoritma vybora variantov prokladki transportnykh putey pri provedenii kompleksa lesosechnykh rabot s sovmeshchennym lesovosstanovleniem* [Development of Routing Choices Algorithm During Complex Logging Operations with a Combined Reforestation]. *Lesnoy vestnik*, 2010, no. 6 (75), pp.101–106.
6. Rukomoynikov K.P. *Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo oborudovaniya dlya peresadki podrosta s zakrytoy kornevoy sistemoy* [Improving the Process Equipment for Containerized Undergrowth Replanting]. *Lesnoy zhurnal*, 2014, no. 2 (338), pp.9–17.
7. Shirnin Yu.A., Red'kin A.K., Lazarev A.V., Gadzhiev G.M., Rukomoynikov K.P. *Tekhnologiya mashinnoy peresadki podrosta v protsesse lesozagotovok* [Machine Technology of Outplant of Young Growth During Logging]. Yoshkar-Ola, 2003. 152 p.
8. Brissette J.C. Barnett J.P. Comparing First-Year Growth of Bare-Root and Container Plantings of Shortleaf Pine Half-Sib Families. In: Schroeder RA, Ed. *Proceedings of the 20th So Forest Tree Improvement Conf. Pub. No. 42. June 26th-30th*. Charleston SC, 1989, pp. 354–61.
9. Gwaze D., Melick R., Studyvin C., Hoss G. Survival and Growth of Container and Bareroot Shortleaf Pine Seedlings in Missouri. Eds. *Proceedings of the Forest and Conservation Nursery Associations*. USA, 2006, pp. 123–126.
10. Rukomoynikov K.P. Technical and Technological Aspects of Progressive Cutting Forest Compartment with Combined Reforestation. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 24, iss. 11, pp. 1429–1434.

Received on October 17, 2014

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.26

УДК 58.02+58.056+58.055+58.03+58.087+58.084

**ХРОМАТО-АУКСАНОМЕТРИЯ  
И ХРОМАТО-МАСС-АУКСАНОМЕТРИЯ  
В ФЕНОЛОГИЧЕСКОМ СТАДИЙНОМ МОНИТОРИНГЕ  
ЛЕСНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ ФЛЕЙВО- И ГАЗОХИМИЧЕСКИХ  
ПРИНЦИПОВ С АВТОМАТИЧЕСКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ  
ИДЕНТИФИКАЦИЕЙ ПАТТЕРНОВ\***

© *О.В. Градов, мл. науч. сотр., вед. инж.*

Институт энергетических проблем химической физики РАН, Ленинский пр-т, д. 38, корп. 2, Москва В-334, Россия, 119334; e-mail: o.v.gradov@gmail.com

Предложена новая идеология объективных ауксанометрических измерений, позволяющая анализировать динамику роста с дифференциацией по стадиям развития. В основу нового типа измерений заложен длительный мониторинг с привлечением методов оптического анализа, «прямой» масс-спектрометрии и газовой хроматографии. Предложено, опираясь на известные одорологические различия запахов цветущих растений на разных точках фенологического мониторинга и используя флейво- и газохимические подходы, различать стадийную динамику различных видов и групп растений, анализировать и автоматически классифицировать древесные растения в модельных фитосообществах на феноритмотипы/фенологические группы на основе данных указанных методов и в рамках данного подхода с привлечением машинного распознавания образов и автоматического фингерпринтинга. Возможно феноспектральное ранжирование полученных данных при поиске зависимостей роста и фенологии стадийного развития от факторов среды. На практике данный метод является внутреннеюстируемым, так как одновременно базируется на нескольких отличных источниках измерений, что позволяет использовать его как в лабораторных условиях или климатических камерах, так и в естественных полевых условиях при эргономичном размещении аппаратуры аналогично средствам метеоролого-климатического мониторинга, монтируемым в метеобудке. Предложено принципиально отличная от известных в ботанической и лесотехнической практике ауксанометрическая система, которая позволяет наблюдать за первичным ростом лесных пород в контексте развития за счет того, что индикатором динамики является не количественный (как в обычной ауксанометрии, где единственным критерием роста является удлинение проростка), а комплексно-качественный критерий, складывающийся из взаимно-однозначного сопоставления результатов аналитико-химического анализа молекулярной эмиссии растений и вариаций характеристик среды, что позволяет анализировать обратные связи роста/развития растения и деформаций параметрики внешней среды. В ходе

---

\* Автор выражает благодарность сотрудникам Отдела метрологии средств измерений ГЕОХИ РАН и Лаборатории высокотемпературной кинетики и газовой динамики ИХФ РАН за доступ к технике в процессе написания работы. Выражается общая благодарность всем студентам-практикантам ИХФ РАН, участвовавшим в сборке установки, публикация материалов о которой с их участием предполагается в ближайшее время, а также коллегам из США и Китая, с которыми поддерживалась переписка на момент написания обзора.

работы в различных режимах посредством обучения распознаванию образов с пополнением базы данных можно исследовать и моделировать не только один паттерн развития растения, но и экспериментальный отклик экологической структуры признаков на изменение параметров среды, т. е. по мере необходимости переходить к фенологическому, модельно-биогеографическому, биометеорологическому, био-климатологическому, эколого-физиологическому подходам (если таковые позволяют параметры биотрона, климатической камеры, оранжереи, в которых производится выгонка проростков лесных пород), занося спектральные и хроматографические данные в виде корреляционных паттернов в базы данных для последующего сличения. Феноспектральная экспериментальная выгонка позволяет программировать и с помощью обратной связи регулировать температуру, четко прогнозируя начало вегетации посредством суммирования эффективных температур или выявления их тренда, позволяющего реконструировать последовательность всхода или вегетации отдельных растительных форм в корреляции с характеристическими параметрами искусственного климата, автоматически классифицировать по комплексу характеристик на феноритмотипы или фенологические группы древесные растения в модельных фито-сообществах по более шкалированной градации, чем в устаревшей системе Морозовой, выделявшей только два феноритмотипа у древесных растений (вечнозеленые и листопадные), позволяет работать в режиме регуляции параметрики климатической камеры путем регистрации обратной связи растений за счет использования детекторов и датчиков их молекулярной эмиссии в контролируемом физическом окружении, т. е. сами параметры, регистрируемые детектирующей частью установки, могут представлять собой сигнал для изменения режима ее функционирования.

*Ключевые слова:* флейвохимия, газохимия, оптическая спектроскопия, ауксанометрия, газовая хроматография, газовая хромато-масс-спектрометрия, феномониторинг.

#### *Историко-технический экскурс*

Как известно, классическим и стандартным принципом измерения роста проростков древесных пород является ауксанометрия с использованием различных ауксанометров или их аналогов с автоматической записью – ауксанографов\*. Простейшие регистрирующие ауксанометры были разработаны в конце XIX в. [11, 25, 57, 136] и впервые усовершенствованы в первой четверти XX в. [19, 20, 98]. Новейшие по тем временам конструкции уже обладали чувствительностью порядка микрон и допускали использование для корреляционных измерений ростовых характеристик в сопоставлении с изменениями состава атмосферы. За указанное время, начиная с 1884 г., журнал «*Österreichische botanische Zeitschrift*» неоднократно публиковал отчеты, в которых упоминалось об использовании подобных приборов в конкретных организациях

---

\* Тем не менее, методы регистрации с использованием ауксанографов также называются ауксанометрией, а не ауксанографией, так как ауксанографией в биологии называют биохимические методы в микробиологии, связанные с использованием ауксотрофных мутантов при определении действия различных препаратов или выявлении оптимальных сред для культивации микроорганизмов.

или публикациях [27, 52, 97, 114]. Высокотехнологичную по меркам начала XX в. модель хронографического ауксанометра можно, в частности, обнаружить во втором томе (1903 г.) классической «Физиологии растений» Пфеффера (рис. 1, *а*). Данная конструкция, не считая хронографической части, работала по принципу весов с противовесом, уровень которого изменялся при росте растения. Менее известный прецизионный ауксанометр Бови (рис. 2 *а, б*) отличался от нее по устройству так же, как безмен от весов с противовесом, но фактически не отличался по принципу измерений. На том же «гравиметрическом» подходе основывались конструкции распространенного в начале XX в. студенческого ауксанометра системы Харкута, выпускавшиеся фирмой Кнотта в Бостоне (рис. 2, *в*) и представлявшего собой разновидность дугового ауксанометра (см. рис. 1, *з*), а также ботанического записывающего измерителя фирмы Пальмера 30-х гг. (рис. 2, *г*).

Данные принципы устройства сохранялись практически неизменными до 1950-х гг., когда в Европе и США стал набирать силу тренд на автоматизацию лабораторного оборудования и применение электроники и оптоэлектронных и морфометрических способов детектирования роста.

Рис. 1. Устаревшие ауксанометрические конструкции: *а* – конструкция из монографии Пфеффера (1903 г.), *б* – ауксанометр/ауксанограф из статей БСЭ (1950 г. и 1970 г.), *в* – ауксанометр, аналогичный прибору Пфеффера, *з* – дуговой ауксанометр

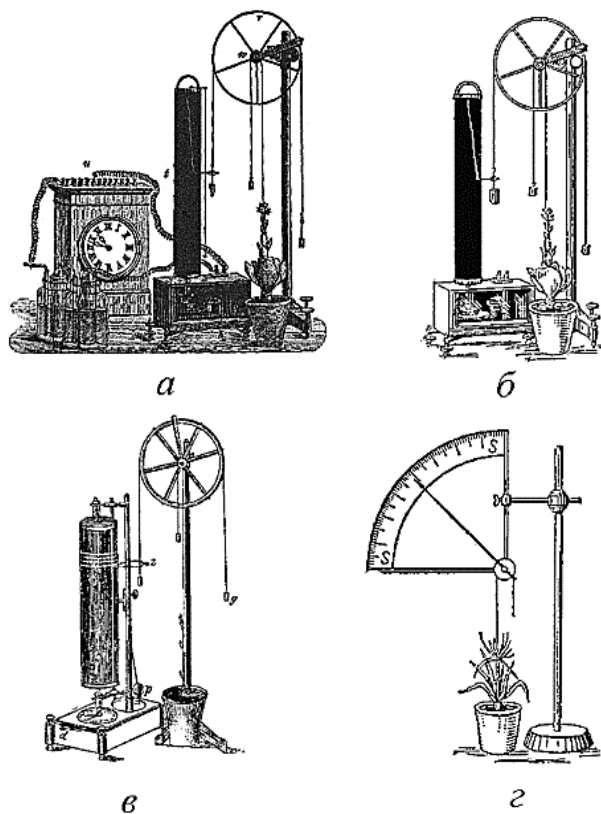
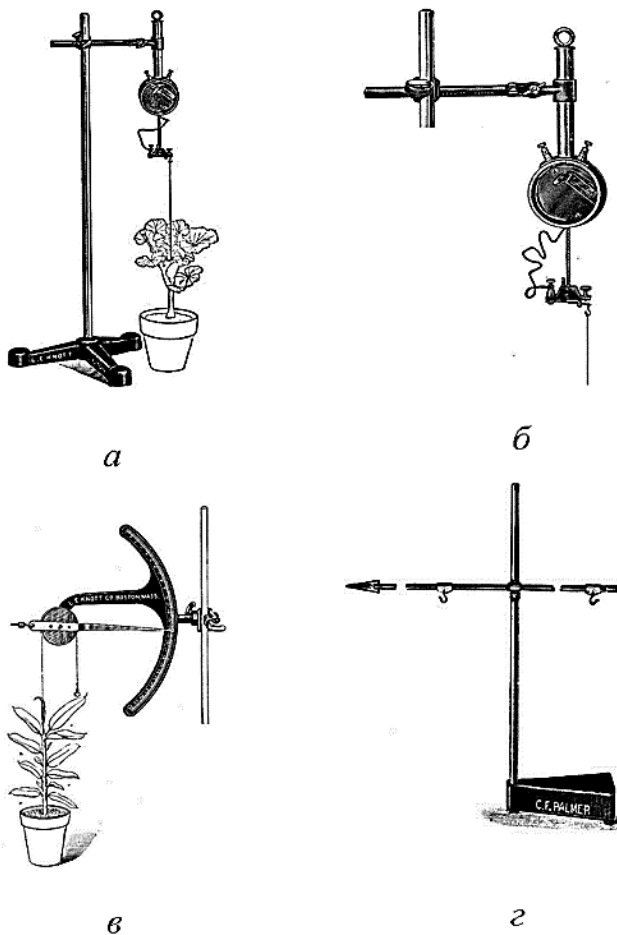


Рис. 2. Ауксанометры начала/первой половины XX в.: *а*, *б* – прецизионный ауксанометр Бови (Bovie Precision Auxanometer) по каталогу «Knott Apparatus Company: Scientific Instruments, Catalogue 26» (1921 г.); *в* – учебный/студенческий ауксанометр Харкута, выпускавшийся фирмой Кнотта в Бостоне (тот же каталог); *г* – Botanical Recording Lever (по каталогу «Palmer Research and Students' Apparatus for Physiology, Pharmacology, Psychology, Bacteriology, Phonetics, Botany etc.» (1934 г.)



Однако в отечественную практику этот тренд пришел значительно позднее. Для сравнения (см. рис. 1, *б*) приведен пример внешнего вида ауксанометра из 3-го тома Большой советской энциклопедии (1950 г.). Можно видеть, что он практически эквивалентен или даже упрощен по отношению к аппарату Пфедфера. Однако точно такая же конструкция была воспроизведена впоследствии во 2-м томе за 1970 г., поскольку конструкция применявшихся в отечественной практике ауксанометров до последней четверти XX в. фактически не отличалась от зарубежных прототипов начала века. Если еще в конце XIX в., когда подобные приборы в России называли авксанометрами, поставившиеся или конструировавшиеся по аналогии приборы оснащались циферблатами или метрическими шкалами (пример такого устройства с нижней циферблатной шкалой, заимствованный из 1-го тома (1890 г.) Энциклопедического словаря Брокгауза и Ефрона (рис. 1, *в*), то впоследствии большинство описывавшихся в отечественных работах аппаратов не дотягивало по степени механизации и прецизионности до многих устаревших зарубежных приборов

[19, 20], являясь зачастую не ауксанографами, как дефинировались аппараты, показанные на рис. 1, в, а модифицированными рутинными ауксанометрами. И если к ряду первых микрометрических ауксанометров пристраивался горизонтально располагаемый микроскоп, то по отношению к упрощаемым модификациям его использование не было метрологически целесообразным, так как точность графической регистрации динамики роста на дуге диска или барабане с регистрирующей бумагой, достигаемая посредством использования ауксанометрического рычага, подобного рычажку Энгельмана, зачастую до сих пор используемому в распространенных в отечественной практике кимографах, не могла быть сопоставимой с точностью микрометрических измерений. Однако многие отечественные исследователи того времени предлагали модификации ауксанометров и конструировали ауксанометрические приборы на альтернативных принципах. Так, в 20-х гг. XIX в. русский эмигрант В.В. Лепешкин описал применимость ауксанометрии к *Thallophytes* в работе [91], а советский биолог и основатель фитогормональной теории тропизмов Н.Г. Холодный разработал ауксанометр для анализа роли воды (т. е. роли тургора, гуттации и транспирации) в росте и тропизмах высших растений, названный им микропотометром [31] (этот прибор использовался в ключевых экспериментах Н.Г. Холодного по воздействию растительных гормонов на тропизмы). Впоследствии Вент – второй создатель фитогормональной теории тропизмов, известной в настоящее время за рубежом как теория Вента–Холодного, также апеллировал к ауксанометрии в своей более поздней статье (1933 г.) [145].

Следует отметить, что впоследствии конструкции гидрометрических ауксанометров неоднократно применялись в ирригационно-лесоводческих и прикладных ботанических работах [43, 87, 105, 133], связанных с гидратацией/дегидратацией и гуттацией растительных форм в природе, но, как правило, за редким исключением, ссылки на первую статью Холодного в них отсутствуют. Иногда в качестве среднего контроля в полевой ауксанометрии в подобных работах использовали лизиметры, что позволяло говорить о «корреляционной ауксанометрии», т. е. о переходе от выявления цитофизиологических механизмов роста отдельного растения к эколого-климатическим и фенологическим методам мониторинга в масштабных полевых условиях, однако этот подход был слишком трудоемок для внедрения компьютерных сетей сбора данных и поэтому не применялся на практике. В связи с этим временные масштабы ауксанометрических измерений до конца XX в. были также относительно малы и позволяли наблюдать только рост, но не развитие растений, а также не могли быть использованы для анализа периодизации вегетации, фенологических фаз и стадий роста в корреляции с условиями внешней среды.

Начиная с 70-х гг. XX в. в работах, апеллирующих к ауксанометрии, постоянно увеличивался физиолого-экологический тренд на выявление реактивности роста к данным условиям среды. Это было связано с появлением расширенных возможностей измерений в этой среде за счет появления доступных датчиков и приборов регистрации физических и химических параметров.

Так, в работе [125] был поставлен вопрос о субституировании (частичном) функций ауксинов стимуляцией ионами водорода (pH) и углекислым газом, концентрация которого, как и pH, характеризует редокс-баланс в геобиологических системах. В работе [71] произведен анализ механической реактивности и адаптивной компенсации трибологического воздействия на рост проростка; обнаруженный механизм получил название «thigmomorphogenesis». В работе [102] произведен сравнительный анализ непосредственного воздействия раствора кислоты и индуцирующего закисление плазмы клетки (за счет гиперсекреции H<sup>+</sup>) синтетического агента – фузикокина, дающего так называемое FC-индуцированное удлинение. Впоследствии появились дополнительные данные в пользу гипотезы о воздействии гормон-индуцированной модификации pH при клеточной стенке на кинетику роста [44]. Затем эти результаты были скоррелированы с данными о функции электрогенных ионных помп [77]; тем самым было в общем доказано единство процессов проведения электрического сигнала (биоэлектрогенеза) и роста/морфогенеза растений. Так как применение цейтрафферной регистрации [109] с тайм-кодом позволяло взаимно однозначно сопоставить каждому положению роста или тропизма проростка состояние того или иного физико-химического параметра, можно было составить комплексную картину мультипараметрической кинетики роста для каждого вида, сорта или породы древесных растений, но ввиду отсутствия доступной компьютерной аналитической техники на тот момент это не было сделано.

В 90-х гг. XX в. на смену ауксанометрам устаревших конструкций пришли электронные системы с высоким временным разрешением – видеодигитайзеры [45] на базе цифровых ПЗС\*-камер [32, 135] и прецизионные механо-электрические измерители с использованием угловых преобразователей [34]. На конец 1990-х – начало 2000-х гг. приходится и развитие в высшей степени прогрессивного метода – лазерной интерференционной ауксанометрии [22, 23] (впервые дуплексная лазерная оптическая система в ауксанометрии при разных параметрах pH и удельной электропроводности среды, осмотически воздействующей на клетки, была использована в 1979 г. [137]). Уже в 90-х гг. целевая направленность установок и систем автоматизированной ауксанометрии сместилась к измерению роста в корреляции с условиями среды [47, 69]. Новый ренессанс ауксанометрии с применением расширенного компьютерного анализа изображений [132] позволяет взаимно однозначно сопоставлять (так называемые one-to-one mapping) зоны реактивности к различным факторам и зоны различной интенсивности роста в присутствии этих факторов, создавая тем самым мультимодальный подход к анализу ростовых данных. В частности, можно производить спектрозональные колориметрические измерения поверхности растений, анализировать фурье-спектры изображений на предмет анизотропии, картировать усвоение излучения по изофотам и с помощью картирования градиента или ASCII-преобразования пиксельных

---

\* Прибор с зарядовой связью.

данных строить векторные поля динамики растений по технологии motion compensation. Таким образом, новый мощный инструмент отчасти способен заменить биохимические принципы анализа ростовых свойств, распространенные в 80–90-х гг. XX в. [46, 80, 111], методами неразрушающего контроля, функциональными и при мониторинге в режиме реального времени *in vivo* или *in situ*. Однако перекрыть необходимый критический диапазон средств биохимического анализа цифровая фотография, даже при расширении ее динамического и спектрального диапазона до ультрафиолетовой и инфракрасной областей, не в состоянии. В результате возникает опасность одностороннего анализа и односторонней интерпретации физиолого-биохимических/биофизических данных, детерминированных дефицитом источников исходной информации.

Отклоняясь от темы, следует отметить, что особенно страдают униmodalностью и, как следствие, низкой репрезентативностью отечественные и постсоветские работы по новым методам ауксанометрии. Несмотря на появление первых русскоязычных статей по электронной ауксанометрии в XXI в. [8], они еще весьма далеко отстоят от европейских и североамериканских разработок начала 90-х гг. XX в. Не помогают при этом и модернизация или реконструкция ранних ауксанометрических аппаратов (например, ауксанометр КТП Лаборатории экспериментальной ботаники Новгородского университета), поскольку физические принципы измерения остаются прежними и часто изменяется только форма регистрации без конструктивной переработки и внедрения в его конструкцию новых датчиков. Даже о банальном соединении принципов цейттраферной съемки с анализом кинетики и механизмов сигнализации и с применением впоследствии методов молекулярной биологии (что характерно для зарубежных работ того же периода [16]) речь в отечественных публикациях не идет. Фактически размыта граница между учебными ауксанометрами, достаточными для студенческого практикума или школьной практики в классе с биологическим уклоном, и серьезными аналитическими установками, причем уклон имеет место в сторону упрощения исследовательской техники, а не синтеза новых прогрессивных конструкций, внедряемых в вузы и школы, на базе прецизионной аналитической техники. Иными словами, как писалось в первой половине XX в. об одной из основательниц общедоступной экспериментальной ботаники Лилиан Кларк [33], "a time when science was still the Cinderella of the curriculum" (т.е., дословно: «время, когда наука являлась Золушкой образования») [143]. Эта ситуация требует категориального изменения. В противном случае неизбежно появление упрощенных, неполных по репрезентативности характеристических критериев моделей в статьях, апеллирующих к ауксанометрии как к верификационным данным [4].

#### *Принципы нового ауксанометрического подхода*

Из изложенного выше материала следует, что требуется разработка технологии или, корректнее, новой идеологии ауксанометрии, позволяющей объединить физиологический мониторинг, анализ наиболее характеристических



биохимических данных, получаемых в ходе неразрушающего контроля (т. е. не препятствующих проведению эксперимента), измерения роста с временным разрешением и длительностью, достаточной для проведения фенологической периодизации и анализа стадийности развития растений. Переход от анализа роста (ауксанометрии) к анализу развития должен производиться при учете фенофаз, свойственных тем или иным породам, а в масштабах лесных сообществ и их лабораторных моделей, создаваемых в климатических камерах с учетом естественных метеоролого-климатических условий имитируемой местности, сопровождаться синтезом феноспектров, взаимно однозначно коррелирующих с биохимической спектроскопией/спектрометрией, регистрируемой с временным разрешением в соответствии с указанным выше комплексным подходом. Это очевидно, так как феноспектр, демонстрирующий, по Сукачеву и Гаме, переходы между фенофазами и стадии вегетации, цветения и т. д. вплоть до листопада, однозначно соответствует физиолого-биохимическим изменениям растения на этих стадиях, которые могут быть проанализированы вышеозначенным путем. Так как феноспектры древесных пород распространены в лесных хозяйствах СНГ и постсоветской России (там, где они еще сохранились), сделать дополнительно географическую привязку этих данных с геоботаническим картированием также не представляет серьезного труда.

Рассмотрим детально возможности предлагаемой феноспектральной ауксанометрии. Общеизвестно, что основными фенофазами растений считаются сокодвижение, появление листы, цветение, плодоношение и листопад. Очевидно, что сокодвижение сопровождается изменением интенсивности транспирации и гидродинамических коэффициентов восходящего и нисходящего тока; появление листы сопровождается фотосинтетической эмиссией кислорода и изменением эффективности транспирации вследствие увеличения функциональной удельной поверхности; цветение сопровождается эмиссией характерных с точки зрения химического анализа молекул ароматических структур, зависящих от фазы эмиссии, т. е. от времени взятия пробы; эта эмиссионная характеристика изменяется в переходе к плодоношению (хотя первые ароматические профили можно регистрировать и на стадии появления листы); листопад сопровождается эмиссией продуктов разложения листы и пигментного распада и т.д. Все продукты и аддукты физиологической эмиссии химически определимы с использованием неразрушающих по отношению к растению – эмиттеру методов атмосферного спектрального анализа и газовой хроматографии среды.

Рассмотрим, что можно зарегистрировать с использованием газовой хроматографии и интерпретировать как характеристические детерминанты тех или иных стадий развития растений и модельных растительных сообществ.

Во-первых, речь, вполне очевидно, идет о газах. С точки зрения физиологической экологии лесных растений [85], представляющей собой кооперативное расширение общей физиологии лесных растений [86], эмиссия кислорода не является единственным «газохимическим» критерием для фитосообщества, так как следует учитывать экологические обратные связи, детерминирующие физиологию эмиссионного массива в целом. Так, в частности, сравнительно недавно было обнаружено, что растения различных климатических зон

способны к метаногенезу [78], после чего во многих странах (в том числе и в России [5, 6]) развернулись исследования форм метаногенной активности древесных растений. Стало известно также, что растения способны к эмиссии NO в количествах, достаточных для измерения методами газовой хроматографии (GC) и газовой хромато-масс-спектрометрии (GC-MS) [7]. Кроме того, следует учитывать связи почва–лес в анализе газовой эмиссии, так как увеличение концентрации углекислого газа, понижающее регулирующий эффект растительности, влечет увеличение эмиссии других парниковых газов (закиси азота и метана) из почвы [38, 81, 141], причем неблагоприятные по отношению к растениям климатические факторы стимулируют их собственную эмиссию парниковых газов [121]. В отличие от некоторых представителей фитопланктона [68], для которых увеличение концентрации углекислого газа влечет увеличение продуктивности, для лесных массивов этот принцип не действует, поэтому необходимо строго относиться к выявлению корректных обратных связей в физиолого-экологических процессах в лесном сообществе (для чего, в частности, можно использовать предлагаемый феноспектральный подход).

Во-вторых, речь идет о мониторинге транспирации. Это отчасти коррелирует с газодинамическим мониторингом, так как климатическая конвекция, регулирующая фазы осцилляций содержания углекислоты в атмосфере, регулирует также и температуру масс воздуха, что воздействует на испарение/транспирацию растений, с позиций гидравлики листа [14, 21, 103]. Элементный состав выделяемого при транспирации исследуется методами хроматографии как в случае транспирационных потоков на поверхности, так и в случае транспирации корней в конденсированной среде [95, 96, 101, 108]. Идеализация при решении соответствующей модельной задачи *in vitro* в герметизированных условиях может быть в терминологии зарубежной газовой хроматографии означена как отношение между *sample phase* и *headspace* (*gas phase*), где роль *headspace* выполняет атмосфера или экспериментальная среда климатической камеры, а *sample phase* – жидкостная поверхность транспирации (по аналогии с [83]). Поэтому, если создать герметичную климатическую камеру с подведенными каналами газового хроматографа и соответствующей ей системой забора газовых проб, то можно осуществить аналог «static headspace – gas chromatography» с временным разрешением в нативной среде. Это позволит одновременно анализировать транспирацию и изменения газового состава стандартизированной климатической среды, делая выводы об основных обменных процессах между биомассой растений и модельной окружающей средой с точки зрения физиологической экологии лесных насаждений [85].

В-третьих, газовая хроматография\*, включая GC-MS и вышеуказанный Headspace Method, может быть использована для анализа и идентификации

---

\* Это целесообразно осуществлять с использованием сорбционных трубок для сбора летучих органических веществ и термодесорбера при отборе ячейкой FLEC (Field and Laboratory Emission Cell) или, что логично в случае лабораторной прогонки метода, любыми методами с подачей из климатической камеры.

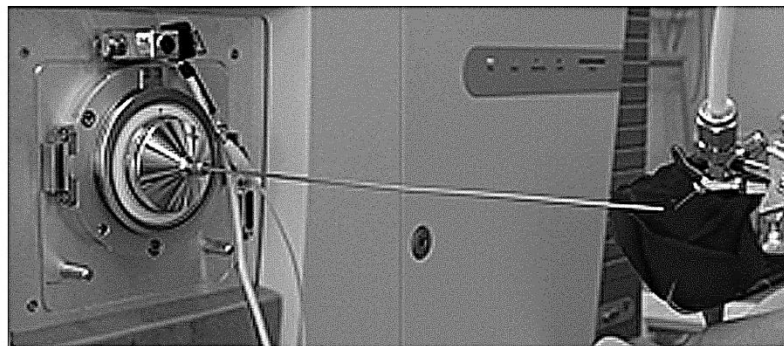
по компьютерным базам данных запахов, источаемых лесными растениями [64, 72, 146]. Как известно, лесные деревья и ярусные растения, входящие в поддерживающие их фитосообщества, производят эмиссию характерных ароматических веществ в достаточных для органолептического определения количествах как на стадии цветения, так и на стадии плодоношения [48, 60, 140]. Помимо их, деревья зачастую выделяют фитонциды [92], стандартно определяемые методами газовой хроматографии [3]. Фитонцидная активность эмиссии максимальна во время световой фазы фотосинтеза, минимальна ночью – во время темновой фазы, причем интенсивность генерации фитонцидов корреляционно связана с интенсивностью дыхания, температурой воздуха и др. При этом, что характерно для предлагаемого метода в лесной практике, высшая активирующая деятельность фитонцидов свойственна лесам, а не городским насаждениям [93, 94]. При определении летучих органических веществ в климатических камерах можно применять достаточно крупные по объемным характеристикам боксы, так как радиус действия тех же фитонцидов составляет 3...5 м (по ингибированию микроорганизмов в микробиотестерах). Современные методы анализа и биопроессинга запахов [49, 50] позволяют определять достаточно тонкие композиции не в словарно-дефинитивном [39], а в точном аналитическом смысле, так как развитие технологий автоматического количественного определения запахов [147] (в частности, постоянно совершенствуемых и уже внедренных в практику в ряде зарубежных организаций технологий типа «electronic nose» [40, 73, 117, 126]) дает возможность не апеллировать к человеческому восприятию при классификации ароматов, определяемых машинным путем. Необходимость анализа запахов в фенологическом виде можно объяснить тем, что микроклиматические и фенологические факторы воздействуют на химический состав их носителей [88], семиохимические характеристики растительных сигналов к насекомым-опылителям и функционально-обратных химически-отпугивающих факторов меняются в зависимости от времени [128], палинологические паттерны сезонов цветения у разных видов растений различны в зависимости от климатических факторов и географических параметров, определяющих фенологию данного вида или сообщества, а следовательно, и их одорологические характеристики меняются синхронно или же коррелятивно к первым [120]. Таким образом, машинный (т. е. не субъективный одорологический, а корректный флейвохимический – хроматографический) анализ источников запаха растений неизбежен. Поскольку в исследовании эмиссии летучих соединений с лиственной поверхности часто применяют газовую хромато-масс-спектрометрию [51], можно не ограничивать детектирование обычной газовой хроматографией\*, а ставить на выходе

---

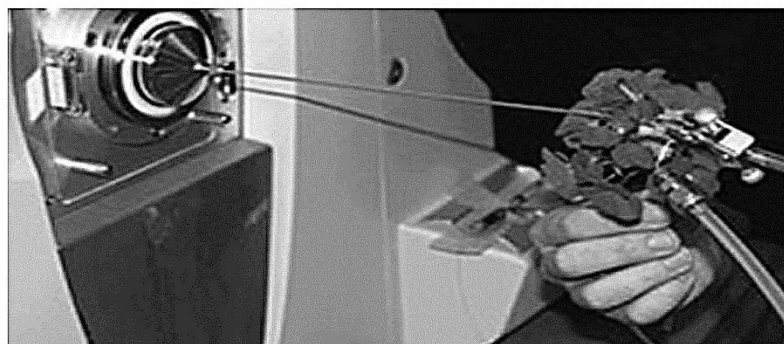
\* Газово-биохимические исследования, несмотря на очевидное отнесение большинства биохимических агентов к частично упорядоченным, жидким и конденсированным средам, не должны рассматриваться в данном методе как экзотика, поскольку еще в 80-е гг. XX в. за рубежом проводились работы газово-биохимической направленности и конференции по различным подобластям этой направленности (например, газовой энзимологии [53]).

вышеуказанной хромато-ауксанометрической установки масс-спектрометр, переходя тем самым от метода хромато-ауксанометрии к хромато-масс-ауксанометрии.

В настоящее время уже существуют проекты «флейвохимического носа» для анализа цветочных запахов при атмосферном давлении на основе DE-SI-MS (десорбционный электроспрей или, что эквивалентно, десорбционная ионизация распылением в электрическом поле) в рамках подходов DART (Direct Analysis in Real Time – прямого анализа в режиме реального времени). Пример использования подобной системы для флейвохимического различения приведен на рис. 3.



*а*



*б*

Рис. 3. Десорбционная ионизация распылением в электрическом поле как способ анализа в режиме реального времени для исследования и химической систематизации цветения разных видов цветковых растений: *а* – <http://www.sciencedaily.com/>; *б* – <http://news.sciencemag.org/>; (разработчик метода З. Такац)

Так как фенология форм растений зависит от потоков углерода, влажности сред, суточного температурного диапазона и поверхностного энергетического баланса [61], необходимо сопоставлять в базах данных управляющего программного обеспечения установки данные хроматографии или хромато-

масс-спектрометрии данным измерений параметров внешних сред, при которых производилось измерение в каждый момент времени мониторинга. Надо отметить, что частично на многие из этих параметров будет воздействовать и микрофауна, так как газообмен в фотосинтезе [54] противен газообмену в респирации микрофауны [100], что сказывается и на уровне их взаимодействия в рамках физиологической экологии [85]. Необходимо либо предусмотреть отсутствие микрофауны (беспозвоночных) в почве и на растениях в форме карантина проростков или саженцев на стадии их подготовки к экспериментальной работе/мониторингу, либо найти способы их эколого-физиологического учета в математической модели, описывающей воздействие их молекулярной эмиссии на равновесие системы с учетом множественных обратных связей [131]. Вышеуказанные примеры абиотических и биотических факторов, способных вносить искажения в процесс наблюдения за описанной локализованной моделью лесоразведения, приводятся в целях демонстрации аэрохимической комплексности системы, следствием которой неизбежно является необходимость внедрения дополнительных способов анализа и сбора данных.

Как правило, в компьютерной идентификации органических соединений используют не одну методику, а комплекс методов, определяющих и количественные, и качественные особенности исследуемого аналита с позиций различных молекулярных дескрипторов [139] в соответствии с измеримыми аппаратными методами характеристиками. В отечественной практике рекомендуется не ограничиваться спектроскопическими методами, а применять также хроматографию и масс-спектрометрию при компьютерной идентификации по базам данных [1]. Поскольку в случае предлагаемой идеологии разработки/программирования установки система будет подавать сигналы в режиме реального времени, регулироваться и допускать определение комплексной параметрики через диагностику своего внутреннего состояния по всем источникам сигнала, речь идет, в сущности, о разработке экспертной химической системы [63] с функцией мультисенсорного синтеза потоков данных [59, 106, 124] и комплексной идентификации, соответствующей сбору сигналов с множества источников. Так как издавна с ауксанометрами (начиная с 30-х гг. XX в.), гибридовали монохроматоры и спектрографы-монохроматоры\* [15], логично использование в качестве дополнения к газовому хроматографу, как минимум, оптического спектрального анализа (что соответствует [90]). Так как с позиций нелинейной физики экосистем [104], динамика экстремумов спектров во времени вегетации и при переходах от состояния к состоянию при чередовании фаз будет иметь нелинейный характер, соответствующий биофизической кинетике указанного процесса, а в большинстве самосогласованных моделей лесной динамики [18, 26, 119] имеется нелинейность и соответствующие ей обратные связи, очевидно, что идентификационные свойства эксперименталь-

---

\*Это можно связать также с методами лазерной ауксиметрии при использовании монохроматического (по определению) лазерного излучения [22, 23].

ного объема как динамической системы [70] интерпретируемы как параметры комплексной системной динамики [55] для нелинейной идентификации [112] процессов в комплексных сетях [12], каковыми являются экологические системы с позиций синтеза мультисенсорной информации (в частности, в системах дистанционного зондирования [90]). С позиций ММА-подхода (Mixed Methods Approaches – гибридизация отличных методов в целях верификации и установления фальсифицируемости каждого из них и общего массива данных, полученных с их помощью) [35] только сравнение данных газовой хроматографии, оптической спектроскопии и климатического мониторинга может дать достаточно качественную и однозначную картину процессов, идущих в установке на различных уровнях энд(о)экологической и экзэкологической связности в ней, вследствие чего невозможно ставить вопрос об систематической идентификации и фингерпринтинге индивидуальных видовых фенофаз без обеспечения контролируемых условий среды. Так как в той же газовой хроматографии для решения таких сложных, неразрешимых в рамках обычных методических подходов, проблем используют программное обеспечение для хемометрики со сложным математическим анализом [36] (многомерные методы – Multivariate Methods), причем многомерная хемометрика может быть соотнесена с методами определения структурных корреляций отдельных биохимических свойств [99] в рамках подхода QSAR (Quantitative Structure Activity Relationships), это актуально для идеологии конструирования настоящего типа установок, так как методы QSAR широко используются при моделировании отклика окружающей среды на внешние воздействия [113], причем давно созданы компьютерные методы подбора отклика по физическим свойствам молекулярных агентов [24]. Подход такого рода верен и в обратных задачах, вследствие чего можно использовать его и в ходе моделирования при мониторинге молекулярной эмиссии лесных растений и их сообществ (например, в описываемой установке или установках типа БИОТРОН, ФИТОТРОН с системой сбора, адекватной описываемой для настоящей установки)\*. Обычно мультимодальные и мультипараметрические системы сбора дистанционной информации используются только в гибридизации с географическими информационными системами (GIS) для глобального мониторинга [127], однако для фитофизиологической прогонки лесных систем возможно отчасти заменить аппроксимацию глобальной динамики (с интерполяцией на достаточно локальные области) фитотронной прогонкой с мультипараметрической

---

\*Надо отметить, что QSAR плотно вошел в практику автоматизированной интерпретации данных газовой хроматографии ароматических соединений [41, 76] и соединений, входящих в ароматические композиции растений [42, 138], поэтому использование QSAR-подхода во флейвохимическом фингерпринтинге лесных экосистем и их моделей в описываемой установке имеет веские основания к применению. В то же время, в теоретической химии существуют работы по квантово-химическим дескрипторам в GLPC [65], что дает возможность для простых газов, применяемых в фотосинтезе и дыхании, также использовать идеи QSASR.

регистрацией при варьировании экспериментальных условий среды в установках/аппаратах, конструктивно подобных предлагаемым в настоящей работе (вплоть до апробации зимней регистрации витальных параметров при морозостойкой выгонке лесных пород [144]) в моделирующем соответствующие географические области искусственном микроклимате, индуцирующем соответствующие ему количественно-определимые физиологические реакции [74]\*.

В мультипараметрических системах дистанционного зондирования, как правило, для детектирования растительности используют принципы гиперспектрального картирования [66, 67] и лидарные методы, в частности, с использованием лазерной лидарной техники [62] (не считая ресурсоемких методов, требующих использования интерференционно-поляриметрической техники [89]), поэтому использование монохроматоров или лазерной техники сканирующего считывания в хромато-ауксиметрических установках для полной репрезентативности к GIS-прототипу логично совмещать со спектральным картированием поверхности растений. Эта задача не является избыточной, так как известно, что в разных условиях среды спектрально-рефлектометрические характеристики могут иметь градиент даже у одного растения, что может быть обусловлено различной доступностью излучения фотосинтетического диапазона листу и коррелирующим с этим изменением пигментной концентрации [56], изменением пигментного состава листа при биогенезе пластид в ходе перехода от пропластид к зрелым и, в дальнейшем, геронтопластам [17], стрессом листа [107] (который, как указывалось ранее, приводит и к изменению молекулярной эмиссии газов растением), изменением содержания воды и соотношения воды и окисляемых форм в составе растения [37], градиентом содержания хлорофилла [30], различием стадийных форм растения и соответствующей этим формам дефинитивной структурой листа [130] до его некральных изменений [118], сопровождающихся молекулярной газовой эмиссией в той мере, которая позволяет сопоставить отражательным спектрам листа хроматограммы или масс-спектры выделений, зарегистрированных «в линию» одновременно со спектрами отражения по многоканальной системе. Спектральное картирование можно производить в поточном порядке в режиме реального времени с использованием цифровых охлаждаемых (в идеальном случае, но не обязательно) камер и дальнейшей математической обработки при параллельной классификации результатов на мэйнфреймах [28, 29] с последующей 3D-визуализацией [79].

---

\* Это может быть особенно применимо для моделирования лесного хозяйства РФ, так как в соответствии с климатической классификацией по Кёппену [84, 116] большая часть РФ относится к зонам субарктической принадлежности Dw и Df с преобладанием Dfc и Dfd, где индекс «с» означает минорный температурный диапазон от  $-25$  до  $-10$  °C, а индекс «d» – от  $-40$  до  $-25$  °C (в ряде нотаций читающийся как «мучительно холодно»).

При использовании многопроцессорных/многоядерных машин для обсчета данных ауксанометрической установки с гибридизацией физических принципов измерений можно использовать пакет STATA/MP, так как он допускает не только обработку рядов динамики (временных рядов) [13], получаемых с установки, но и определение степени их правдоподобности [58], многомерное моделирование, соответствующее многофакторной стратегии сбора данных [122, 123], а также выявление причинно-следственных связей при использовании структурных уравнений [9], не считая обычного регрессионного анализа [82]. Таким образом, к задачам распознавания образов спектров [129] (в частности, IR-спектров [148], так как допустима мультиспектральная/гиперспектральная съемка в ИК-диапазоне [142], способная демонстрировать тепловые свойства листвы в климатической камере), решаемым программным путем в рамках интерпретации данных спектрального мониторинга как паттернов, характеристических с точки зрения биоинформатики [115], в случае гиперспектральной фотографической регистрации добавляются задачи multispectral pattern recognition [110] во всех спектральных диапазонах в духе техники ISODATA [10], причем в динамике к ним еще прибавляется новый уровень спектральных данных – продукт оконной спектральной обработки вариаций параметров физиологии во временных циклах, обусловленных циркадными и фенологическими ритмами [134]. В таком случае к обычным оптическим и прочим данным, получаемым в ходе дистанционного зондирования растительности в рамках стандартных физических принципов, реализуемых при невозможности фиксирования движущегося детектора на отдельных элементах флоры во время мониторинга [75], при стационарном расположении детекторов в ауксанометре прибавляется возможность анализа фенологической или феноспектральной динамики этих факторов и индикаторов физиологического отклика (к которой, собственно, и применяют методы нелинейного экологического анализа [134], в том числе в рамках физиологической экологии древесных растений [85]). Таким образом, гибридизация оптической, хроматографической и мультиспектральной фотографической информации требует весьма больших вычислительных ресурсов на выходе установки, однако результаты полновесной компьютерной обработки подобного рода полностью оправдываются предсказательными свойствами формируемой модели, способной быть использованной в ходе лесоразведения в прагматических целях. Иными словами, вместо ауксанометрии как мониторинга прошедших коэффициентов роста (определимых также через конформные преобразования [2] морфометрическим путем) саженца/сеянца лесной породы таким образом получаем качественную идентификацию фаз развития и многопараметрическую эквивалент-модель, обладающую предсказательной силой (на ограниченном временном промежутке), в том числе и для программируемых изменений параметризуемых свойств окружающей среды.

#### *Выводы*

1. Предложенная инновационная ауксанометрическая система, позволяющая наблюдать за первичным ростом лесных пород в контексте развития



за счет того, что индикатором динамики является не количественный (как в обычной ауксанометрии, где единственным критерием роста является удлинение проростка), а комплексно-качественный критерий, складывающийся из взаимно-однозначного сопоставления результатов аналитико-химического анализа молекулярной эмиссии растений и вариаций характеристик среды, что позволяет анализировать обратные связи роста/развития растения и деформаций параметрики внешней среды.

2. В ходе работы в различных режимах посредством обучения распознаванию образов с пополнением базы данных она позволяет исследовать и моделировать не только один паттерн развития растения, свойственный некоторому стандартному пространству признаков, но и исследовать экспериментальный отклик экологической структуры признаков на изменение параметров среды, т. е. переходить к фенологическому, модельно-биогеографическому, биометеорологическому, биоклиматологическому, эколого-физиологическому подходам по мере исследовательской необходимости (если таковые позволяют параметры биотрона, климатической камеры, оранжереи, в которых производится выгонка проростков лесных пород), заносая спектральные и хроматографические данные в виде корреляционных паттернов в базы данных для последующего сличения.

3. При феноспектральной экспериментальной выгонке модель позволяет программировать и с помощью обратной связи регулировать температуру, четко прогнозируя начало вегетации посредством суммирования эффективных температур или выявления их тренда, позволяющего реконструировать последовательность всхода или вегетации отдельных растительных форм в корреляции с характеристическими параметрами искусственного климата.

4. Автоматически классифицирует по комплексу характеристик на феноритмотипы или фенологические группы древесные растения в модельных фитосообществах по более шкалированной градации, чем в устаревшей системе Морозовой, выделявшей только два феноритмотипа у древесных растений (вечнозеленые и листопадные).

5. Позволяет работать в режиме регуляции параметрики климатической камеры путем регистрации обратной связи растений за счет использования детекторов и датчиков их молекулярной эмиссии в контролируемом физическом окружении, т. е. сами параметры, регистрируемые детектирующей частью установки могут представлять собой сигнал для изменения режима ее функционирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вершинин В.И., Дерендяев Б.Г., Лебедев К.С.* Компьютерная идентификация органических соединений. М.: Академкнига, 2002. 197 с.
2. *Градов О.В., Нотченко А.В.* Полуавтоматическая дендрохронография для исследования морфогенеза и тератоморфозов на спилах высших растений // Лесотехн. журн. 2012. № 4(8). С. 47–57.

3. *Дмитриев М.Т., Мицихин В.А., Степанов Е.В.* Газохроматографическое определение фитонцидов в воздухе. Гигиена и санитария, М.: Медицина, 1983. № 7. С. 43–45.
4. *Михайленко И.М.* Математическое моделирование роста растений на основе экспериментальных данных // Сельскохозяйственная биология. 2007. № 1. С. 103–111.
5. *Мухин В.А., Воронин П.Ю.* Метаногенная активность в древесных растениях // Физиология растений, 2009. Т. 56. С. 152–154.
6. *Мухин В.А., Воронин П.Ю.* Выделение метана из древесины живых деревьев // Физиология растений, 2011. Т. 58, № 2. С. 283–289.
7. *Полесская О.Г.* Растительная клетка и активные формы кислорода. М.: Университет, 2007. 140 с.
8. *Рассадина В.А., Яронская Е.Б., Вершиловская И.В., Егоров В.М., Аверина Н.Г.* Электронная ауксанометрия – новый способ регистрации ростовых реакций растений // Земляробства і ахова раслін: наукова-практична часопис. 2007. № 2. С. 19–20.
9. *Acock A.C.* Discovering Structural Equation Modeling Using Stata. Stata Press, College Station, Texas, 2013. 304 p.
10. *Ball G.H., Hall D.J.* Isodata: a method of data analysis and pattern classification, Stanford Research Institute. Office of Naval Research. Information Sciences Branch, Menlo Park, California, 1965. 79 p.
11. *Barnes C.R.* A Registering Auxanometer // Botanical Gazette. 1887. Vol. 12, No 7. P. 150–152.
12. *Barrat A., Barthélemy M., Vespignani A.* Dynamical Processes on Complex Networks. Cambridge University Press, 2012. 361 p.
13. *Beckett S.* Introduction to Time Series using Stata. Stata Press, College Station, Texas, 2013. 741 p.
14. *Beerling D.J., Franks P.J.* Plant science: The hidden cost of transpiration // Nature. 2010. Vol. 464. P. 495–496.
15. *Bergann F.* Untersuchungen über Lichtwachstum, Lichtkrümmung und Lichtabfall bei *Avena sativa* mit Hilfe monochromatischen Lichtes // Planta. 1930. Vol. 10, No 4. P. 666–743.
16. *Binder B.M.* Rapid Kinetic Analysis of Ethylene Growth Responses in Seedlings: New Insights into Ethylene Signal Transduction // Journal of Plant Growth Regulation. 2007. Vol. 26, No 2. P. 131–142.
17. *Biswal U.C., Biswal B., Raval M.K.* Chloroplast Biogenesis: From Proplastid to Gerontoplast. Kluwer Academic, Dordrecht–Boston–London, 2003. 380 p.
18. *Botkin D.B.* Forest Dynamics: An Ecological Model. Oxford University Press. Oxford–New York, 1993. 328 p.
19. *Bovie W.T.* A Precision Auxanometer // Botanical Gazette. 1912. Vol. 53, No 6. P. 504–509.
20. *Bovie W.T.* A Simplified Precision Auxanometer // American Journal of Botany. 1915. Vol. 2, No 2. P. 95–99.
21. *Brodribb T.J., Feild T.S.* Leaf hydraulic evolution led a surge in leaf photosynthetic capacity during early angiosperm diversification // Ecology Letters. 2010. Vol. 13. P. 175–183.
22. *Budagovskaya N.V., Guliaev V.I.* Effect of calcium channel blocker on the growth dynamics of plants studied by laser interference auxanometry // Developments in Plant and Soil Sciences. 2002. Vol. 92. P. 204–205.

23. *Budagovskaya N.V., Guliaev V.I.* Rapid and Slow Response Reactions of Plants on Effect of Antioxidant Ambiol. In: *Advanced Research on Plant Lipids (Proceedings of the 15th International Symposium on Plant Lipids)*. Springer, Dordrecht, 2003. P. 323–326.
24. *Bumble S.* Computer Generated Physical Properties. CRC Press, Boca Raton, 1999. 288 p.
25. *Bumpus H.C.* A Simple and Inexpensive Self-Registering Auxanometer // *Botanical Gazette*. 1887. Vol. 12, No 7. P. 149–150.
26. *Buongiorno J., Zhu S., Zhang D., Turner J., Tomberlin D.* The Global Forest Products Model: Structure, Estimation, and Applications. Academic Press, Amsterdam–Boston–London–New York–Oxford–Paris–San Diego–San Francisco–Singapore–Sydney–Tokyo, 2003. 300 p.
27. *Burgerstein A.* Das pflanzenphysiologische Institut der K.K. Wiener Universität von 1873–1884 // *Österreichische botanische Zeitschrift*. 1884. Vol. 34, No 12. P. 418–422.
28. *Chang C.-I.* Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis. Wiley, Hoboken, 2013. 1164 p.
29. *Chang C.-I.* Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification. Kluwer Academic - Plenum Publishers, New York, 2003. 367 p.
30. *Chen J.-C., Chen C.-T.* Correlation Analysis Between Indices of Tree Leaf Spectral Reflectance and Chlorophyll Content // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII, Part B7. 2008. P. 231–238.
31. *Cholodny N.* Über das Wachstum des vertikal und horizontal orientierten Stengels in Zusammenhang mit der Frage nach der hormonalen Natur der Tropismen // *Planta*. 1929. Vol. 7, No 5. P. 702–719.
32. *Christian M., Lüthen H.* New methods to analyze auxin-induced growth I: Classical auxinology goes *Arabidopsis* // *Plant Growth Regulation*. 2000. Vol. 32, No 2-3. P. 107–114.
33. *Clarke L.J.* Botany As An Experimental Science – In *Laboratory And Garden*. Oxford University Press, Milton, 1935. 138 p.
34. *Claussen M., Lüthe H., Blatt M., Böttger M.* Auxin-induced growth and its linkage to potassium channels // *Planta*. 1997. Vol. 201, No 2. P. 227–234.
35. *Creswell J.W.* Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. SAGE Publications Inc., Los Angeles–London–New Delhi–Singapore–Washington, 2013. 304 p.
36. *Cserhati T.* Multivariate Methods in Chromatography: A Practical Guide. Wiley, Hoboken – Chichester, 2008. 352 p.
37. *Dasgupta S.* Remote Sensing of Vegetation Water and Fire Risk: Selected Research Topics. VDM, Saarbrücken, 2009. 176 p.
38. *Davidson E.A., Keller M., Erickson H.E., Verchot L.V., Veldkamp E.* Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides // *BioScience*. 2000. Vol. 50. P. 667–680.
39. *De Rovira D.* Dictionary of Flavors. Wiley-Blackwell, Ames, Iowa, 2004. 736 p.
40. *Degenhardt D.C., Greene J.K., Khalilian A.* Temporal Dynamics and Electronic Nose Detection of Stink Bug-Induced Volatile Emissions from Cotton Bolls // *Psyche*. 2012. Vol. 2012. ID 236762. P. 1–9.
41. *Drosos J.C., Viola-Rhenals M., Vivas-Reyes R.* Quantitative structure-retention relationships of polycyclic aromatic hydrocarbons gas-chromatographic retention indices // *J. Chromatogr. A*. 2010. Vol. 1217, No 26. P. 4411–4421.

42. Du H., Wang J., Hu Z., Yao X. Quantitative Structure Retention relationship study of the constituents of saffron aroma in SPME-GC-MS based on the projection pursuit regression method // *Talanta*. 2008. Vol. 77, No 1. P. 360–365.
43. Engel H., Heimann M. Weitere Untersuchungen über periodische Guttation // *Planta*. 1949. Vol. 37, No 3. P. 437–450.
44. Evans M.L., Mulkey T.J., Vesper M.J. Auxin action on proton influx in corn roots and its correlation with growth // *Planta*. 1980. Vol. 148, No 5. P. 510–512.
45. Evans M.L., Ishikawa H., Estelle M.A. Responses of *Arabidopsis* roots to auxin studied with high temporal resolution: Comparison of wild type and auxin-response mutants // *Planta*. 1994. Vol. 194, No 2. P. 215–222.
46. Evans M.L. Functions of Hormones at the Cellular Level of Organization // *Encyclopedia of Plant Physiology*. 1984. Vol. 10. P. 23–79.
47. Fernandez S.R., Wagner E. A New Method of Measurement and Analysis of the Stem Extension Growth Rate to Demonstrate Complete Synchronization of *Chenopodium rubrum* Plants by Environmental Conditions // *Journal of Plant Physiology*. 1994. Vol. 144, No 3. P. 362–369.
48. Flavor and Health Benefits of Small Fruits (ACS Symposium Series). Ed. by M. Qian, A. Rimando. American Chemical Society, Washington, 2010. 336 p.
49. Flavor, Fragrance, and Odor Analysis. Ed. by R. Marsili. CRC Press, Boca Raton, 2011. 280 p.
50. Flavours and Fragrances: Chemistry, Bioprocessing and Sustainability. Ed. by R.G. Berger. Springer, Berlin–Heidelberg–New York, 2007. 664 p.
51. Fredrickson E.L., Estel R.E., Remmenga M.D. Volatile compounds on the leaf surface of intact and regrowth tarbush (*Flourensia cernua* DC) canopies // *J. Chem. Ecol.* 2007. Vol. 33, No 10. P. 1867–1875.
52. Fritsch K. Akademien, Botanische Gesellschaften, Vereine, Kongresse etc. // *Österreichische botanische Zeitschrift*. 1905. Vol. 55, No 6. P. 245–251.
53. Gas Enzymology. Ed. by H. Degn, R.P. Cox, H. Toftlund. Proceedings of a Symposium held at Odense University, Denmark, 1984. Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, 1985. 264 p.
54. Geider R. Algal Photosynthesis: The Measurement of Algal Gas Exchange. Springer, 1992. 256 p.
55. Giantomassi A. Modeling estimation and identification of complex system dynamics: issues and solutions. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2012. 136 p.
56. Gitelson A.A., Gritz Y., Merzlyak M.N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves // *Journ. Plant Physiol.* 2003. Vol. 160. P. 271–282.
57. Golden K.E. An Auxanometer for the Registration of Growth of Stems in Thickness // *Botanical Gazette*. 1894. Vol. 19, No 3. P. 113–116.
58. Gould W., Pitblado J., Poi B. Maximum Likelihood Estimation with Stata. Stata Press, College Station, Texas, 2010. 352 p.
59. Hall D.L., McMullen S.A.H. Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion. Artech House, Boston–London, 2004. 466 p.
60. Handbook of Fruit and Vegetable Flavors. Ed. by Y.H. Hui. Wiley, Hoboken, 2010. 1095 p.
61. Hanes J.M. Spring leaf phenology and the diurnal temperature range in a temperate maple forest // *International Journal of Biometeorology*. 2013. Vol. 58, No 2. P. 103–108.
62. Helt M.F. Vegetation Identification With LIDAR. Thes. Naval Postgraduate School. Monterey, California, 2005. 83 p.

63. Hemmer M.C. Expert Systems in Chemistry Research. CRC Press, Boca Raton, 2007. 416 p.
64. Heydanek M.G., McGorin R.J. Gas chromatography-mass spectroscopy investigations on the flavor chemistry of oat groats // J. Agric. Food Chem. 1981. Vol. 29, No 5. P. 950–954.
65. Hoffmann E.A., Fekete Z.A., Rajkó R., Pálinkó I., Körtvélyesi T. Theoretical characterization of gas-liquid chromatographic stationary phases with quantum chemical descriptors // Journ. Chromatogr. A. 2009. Vol. 1216, No 12. P. 2540–2547.
66. Hyperspectral Remote Sensing of Tropical and Sub-Tropical Forests. Ed. by M. Kalacska, G.A. Sanchez-Azofeifa. CRC Press, Boca Raton - London - New York, 2008. 352 p.
67. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. Ed. by P.S. Thenkabail, J.G. Lyon, A. Huete. CRC Press, Boca Raton, 2011. 781 p.
68. Iglesias-Rodriguez M.D., Halloran P., Rickaby R.E.M., Hall I.R., Colmenero-Hidalgo E., Gittins J.R., Green D.R.H., Tyrrell T., Gibbs S.J., Dassow P., Rehm E., Armbrust E.V., Boessenkool K.P. Phytoplankton Calcification in a High-CO<sub>2</sub> World // Science. 2008. Vol. 320. P. 336–340.
69. Inman-Bamber N.G. Automatic plant extension measurement in sugarcane in relation to temperature and soil moisture // Field Crops Research. 1995. Vol. 42, No 2-3. P. 135–142.
70. Isermann R., Münchhof M. Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications. Springer, Heidelberg–Dordrecht–London–New York, 2011. 730 p.
71. Jaffe M.J. Thigmomorphogenesis: The response of plant growth and development to mechanical stimulation // Planta. 1973. Vol. 114, No 2. P. 143–157.
72. Jennings W. Qualitative Analysis of Flavor and Fragrance Volatiles by Glass Capillary Gas Chromatography. Academic Press, New York–London–Sydney–Toronto–San Francisco, 1980. 472 p.
73. Jin H.J., Lee S.H., Kim T.H., Park J., Song H.S., Park T.H., Hong S. Nanovesicle-based bioelectronic nose platform mimicking human olfactory signal transduction // Biosensors and Bioelectronics, 2012. Vol. 35, No 1. P. 335–341.
74. Jones H.G. Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology. Cambridge University Press, Cambridge–New York–Melbourne, 1992. 456 p.
75. Jones H.G., Vaughan R.A. Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications. Oxford University Press, Oxford–New York, 2010. 400 p.
76. Jönsson S., Eriksson L.A., van Bavel B. Multivariate characterization and quantitative structure-property relationship modeling of nitroaromatic compounds // Anal. Chim. Acta. 2008. Vol. 621, No 2. P. 155–162.
77. Katou K., Ichino K. Effects of carbon dioxide on the spatially separate electrogenic ion pumps and the growth rate in the hypocotyl of *Vigna sesquipedalis* // Planta. 1982. Vol. 155, No 6. P. 486–492.
78. Keppler F., Hamilton J.T., Brass M., Rockmann T. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions // Nature. 2006. Vol. 439. P. 187–191.
79. Kim K.S. 3D Visualization of an Invariant Display Strategy for Hyperspectral Imagery. Thes. Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002. 67 p.
80. Kim S.Y., Mulkey T.J. Effect of ethylene antagonists on auxin-induced inhibition of intact primary root elongation in maize (*Zeamays L.*) // Journal of Plant Biology. 1997. Vol. 40, No 4. P. 256–260.
81. Knohl A., Veldkamp E. Global change: Indirect feedbacks to rising CO<sub>2</sub> // Nature. 2011. Vol. 475. P. 177–178.
82. Kohler U., Kreuter F. Data Analysis Using Stata. Stata Press, College Station, Texas, 2012. 497 p.

83. Kolb B., Ettre L.S. Static Headspace-Gas Chromatography: Theory and Practice. Wiley, Hoboken, 2006. 350 p.
84. Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World Map of the Köppen–Geiger climate classification updated // Meteorol. Z. 2006. Vol. 15, No 3. P. 259–263.
85. Kozłowski T.T. The Physiological Ecology of Woody Plants. Academic Press, San Diego–New York–Boston–London–Sidney–Tokyo–Toronto, 1990. 678 p.
86. Kozłowski T.T., Pallardy S.G. Physiology of Woody Plants. Academic Press, San Diego–London–Boston–New York–Sidney–Tokyo–Toronto, 1996. 411 p.
87. Kunkel R., Gardner W.H. Potato tuber hydration and its effect on blackspot of Russet Burbank potatoes in the Columbia Basin of Washington // American Potato Journal. 1965. Vol. 42, No 5. P. 109–124.
88. Lago J.H.G., Favero O.A., Romoff P. Microclimatic Factors and Phenology Influences in the Chemical Composition of the Essential Oils from *Pittosporum undulatum* Vent. Leaves // Journ. Braz. Chem. Soc. 2006. Vol. 17, No 7. P. 1334–1338.
89. Lavallo M. Remote Sensing of Vegetation by Polarimetric Space Interferometers: Models and Methods. Lambert Academic Publishing, Saarbrücken, 2012. 220 p.
90. Lee M.J., Jeon S.W., Song W.K. Designation for an Ecological Network using Remote Sensing: Focusing on the North-East Asia. Lambert Academic Publishing, 2013. 64 p.
91. Lepeschkin W. Beschreibung und Erklärung der Wachstumserscheinungen. In: Lehrbuch der Pflanzenphysiologie Auf Physikalisch-Chemischer Grundlage. Verlag Von Julius Springer, Berlin, 1925. P. 191–242.
92. Li Q., Nakadai A., Matsushima H., Miyazaki Y., Krensky A.M., Kawada T., Morimoto K. Phytoncides (wood essential oils) induce human natural killer cell activity // Immunopharmacol. Immunotoxicol. 2006. Vol. 28, No 2. P. 319–333.
93. Li Q., Morimoto K., Kobayashi M., Inagaki H., Katsumata M., Hirata Y., Hirata K., Shimizu T., Li Y.J., Wakayama Y., Kawada T., Ohira T., Takayama N., Kagawa T., Miyazaki Y. A forest bathing trip increases human natural killer activity and expression of anti-cancer proteins in female subjects // Journ. Biol. Regul. Homeost. Agents. 2008. Vol. 22, No 1. P. 45–55.
94. Li Q., Morimoto K., Kobayashi M., Inagaki H., Katsumata M., Hirata Y., Hirata K., Suzuki H., Li Y.J., Wakayama Y., Kawada T., Park B.J., Ohira T., Matsui N., Kagawa T., Miyazaki Y., Krensky A.M. Visiting a forest, but not a city, increases human natural killer activity and expression of anti-cancer proteins // Int. J. Immunopathol. Pharmacol. 2008. Vol. 21, No 1. P. 117–127.
95. Liao Y.C., Chang Chien S.W., Wang M.C., Shen Y., Sessaiah K. Relationship between lead uptake by lettuce and water-soluble low-molecular-weight organic acids in rhizosphere as influenced by transpiration // J. Agric. Food Chem. 2007. Vol. 17, No 55. P. 8640–8649.
96. Liao Y.C., Chien S.W., Wang M.C., Shen Y., Hung P.L., Das B. Effect of transpiration on Pb uptake by lettuce and on water soluble low molecular weight organic acids in rhizosphere // Chemosphere. 2006. Vol. 65, No 2. P. 343–351.
97. Literatur-Übersicht // Österreichische botanische Zeitschrift. 1907. Vol. 57, No 2. P. 74–85.
98. Lloyd F.E. A New and Cheap Form of Auxanometer // Torreya. 1903. Vol. 3, No 7. P. 97–100.
99. Mager P.P. Multivariate Chemometrics in QSAR: A Dialogue. Wiley, New York–Chichester–Toronto–Brisbane–Singapore, 1988, 345 p.
100. Maina J.N. The Gas Exchangers: Structure, Function, and Evolution of the Respiratory Processes. Springer, Berlin, 1998. 498 p.

101. *Malone M., Herron M., Morales M.A.* Continuous measurement of macronutrient ions in the transpiration stream of intact plants using the meadow spittlebug coupled with ion chromatography // *Plant Physiology*. 2002. Vol. 130, No 3. P. 1436–1442.
102. *McBride R., Evans M.L.* Auxin inhibition of acid-and fusicoccin-induced elongation in lentil roots // *Planta*. 1977. Vol. 136, No 2. P. 97–102.
103. *McKown A.D., Cochard H., Sack L.* Decoding leaf hydraulics with a spatially explicit model: principles of venation architecture and implications for its evolution // *American Naturalist*. 2010. Vol. 175. P. 447–460.
104. *Meron E.* *Nonlinear Physics of Ecosystems*. CRC Press, Boca Raton, 2013. 350 p.
105. *Meyer W.S., Green G.C.* Plant indicators of wheat and soybean crop water stress // *Irrigation Science*. 1981. Vol. 2, No 3. P. 167–176.
106. *Mitchell H.B.* *Multi-Sensor Data Fusion: An Introduction*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. 296 p.
107. *Mohammed G.H., Noland T.L., Irving D., Sampson P.H., Zarco-Tejada P.J., Miller J.R.* Natural and stress-induced effects on leaf spectral reflectance in Ontario species // *Forest Research Report*. 2000. No 156. 34 p.
108. *Monje O., Bugbee B.* Characterizing photosynthesis and transpiration of plant communities in controlled environments // *Acta Hort.* 1996. Vol. 40. P. 123–128.
109. *Mulkey T.J., Evans M.L., Kuzmanoff K.M.* The kinetics of abscisic acid action on root growth and gravitropism // *Planta*. 1983. Vol. 157, No 2. P. 150–157.
110. *Multispectral Image Processing and Pattern Recognition (Series in Machine Perception and Artificial Intelligence, 44)*. Ed. by *J. Shen, P.S.P. Wang, T. Zhang*. World Scientific Pub. Co Inc., Singapore–New Jersey–London–Hong Kong, 2001. 130 p.
111. *Mutaftshiev S., Prat R., Pierron M., Devilliers G., Goldberg R.* Relationships between cell-wall  $\beta$ -1,3-endoglucanase activity and auxin-induced elongation in mung bean hypocotyl segments // *Protoplasma*. 1997. Vol. 199, No 1-2. P. 49–56.
112. *Nelles O.* *Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models*. Springer, Berlin–Heidelberg–New York, 2001. 785 p.
113. *Nendza M.* *Structure-Activity Relationships in Environmental Sciences*. Chapman and Hall, London, 1998. 288 p.
114. *Nestler A.* *Das pflanzenphysiologische Institut der k. k. deutschen Universität in Prag // Österreichische botanische Zeitschrift*. 1909. Vol. 59, No 2. P. 54–62.
115. *Parida L.* *Pattern Discovery in Bioinformatics: Theory & Algorithms*. Chapman and Hall / CRC, Boca raton–London–New York, 2007. 512 p.
116. *Peel M. C., Finlayson B. L., McMahon T. A.* Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2007. Vol. 11. P. 1633–1644.
117. *Persaud K., Dodd G.* Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose // *Nature*. 1982. Vol. 299, No 5881. P. 352–355.
118. *Plant Cell Death Processes*. Ed. by *L.D. Nooden*. Academic Press, Amsterdam–Boston–Heidelberg–London–New York–Oxford–Paris–San Diego–San Francisco–Singapore–Sydney–Tokyo, 2003. 392 p.
119. *Pretzsch H.* *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*. Springer, Heidelberg–Dordrecht–London–New York, 2010. 683 p.
120. *Puc M., Kasprzyk I.* The patterns of *Corylus* and *Alnus* pollen seasons and pollination periods in two Polish cities located in different climatic regions // *Aerobiologia*. 2013. Vol. 29, No 4. P. 495–511.

121. *Qaderi M.M., Reid D.M.* Methane emissions from six crop species exposed to three components of global climate change: temperature, ultraviolet-B radiation and water stress // *Physiologia Plantarum*. 2009. Vol. 137, No 2. P. 139–147.
122. *Rabe-Hesketh S., Skrondal A.* Multilevel and Longitudinal Modeling Using Stata, Vol.1. Stata Press, College Station, Texas, 2012. 497 p.
123. *Rabe-Hesketh S., Skrondal A.* Multilevel and Longitudinal Modeling Using Stata, Vol. 2. Stata Press, College Station, Texas, 2012. 477 p.
124. *Raol J.R.* Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB. CRC Press, Boca Raton, 2009. 568 p.
125. *Rayle D.L., Cleland R.* Rapid Growth Responses in the Avena Coleoptile: A Comparison of the Action of Hydrogen Ions, CO<sub>2</sub>, and Auxin // *Proceedings of the 7th International Conference on Plant Growth Substances / Australia, 1972*. P. 44–51.
126. *Röck F., Barsan N., Weimar U.* Electronic Nose: Current Status and Future Trends // *Chemical Reviews*. 2008. Vol. 108, No 2. P. 705–725.
127. *Rodriguez-Bachiller A., Glasson J.* Expert Systems and Geographic Information Systems for Impact Assessment. Taylor & Francis, London–New York, 2004. 408 p.
128. *Schwarz J., Gries R., Hillier K., Vickers N., Gries G.* Phenology of semiochemical-mediated host foraging by the western boxelder bug, *Boisea rubrolineata*, an aposematic seed predator // *J. Chem. Ecol.* 2009. Vol. 35, No 1. P. 58–70.
129. *Siddiqui K.J., Eastwood D.L., Liu Y-H.* Spectral pattern recognition: the methodology // *SPIE Proceedings*. 1999. Vol. 3854. P. 84–97.
130. *Sims D.A., Gamon J.A.* Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // *Remote Sensing of Environment*. 2002. Vol. 81. P. 337–354.
131. *Skogestad S., Postlethwaite I.* Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. Wiley, Chichester–New York–Brisbane–Toronto–Singapore, 2005. 592 p.
132. *Spalding E.P., Miller N.D.* Image analysis is driving a renaissance in growth measurement // *Current Opinion in Plant Biology*. 2013. Vol. 16, No 1. P. 100–104.
133. *Sparks W.C.* A review of abnormalities in the potato due to water uptake and translocation // *American Potato Journal*. 1958. Vol. 35, No 3. P. 430–436.
134. *Spectral Theory And Nonlinear Analysis With Applications to Spatial Ecology*. Ed. by *Cano-Casanova S., Lopez-Gomez J., Mora-Corral C.* World Scientific Pub. Co Inc., New Jersey–London–Singapore–Beijing–Shanghai–Hong Kong–Taipei–Chennai, 2005. 276 p.
135. *Steffens B., Lüthen H.* New methods to analyse auxin-induced growth II: The swelling reaction of protoplasts – a model system for the analysis of auxin signal transduction? // *Plant Growth Regulation*. 2000. Vol. 32, No 2-3. P. 115–122.
136. *Stone G.E.* A Simple Self-Registering Auxanometer // *Botanical Gazette*. 1892. Vol. 17, No 4. P. 105–107.
137. *Taiz L., Métraux J.-P.* The kinetics of bidirectional growth of stem sections from etiolated pea seedlings in response to acid, auxin and fusicoccin // *Planta*. 1979. Vol. 146. No 2, P. 171–178.
138. *Tan Y., Siebert K.J.* Modeling bovine serum albumin binding of flavor compounds (alcohols, aldehydes, esters, and ketones) as a function of molecular properties // *Journ. Food Sci.* 2008. Vol. 73, No 1. P. 56–63.
139. *Todeschini R., Consonni V.* Molecular Descriptors for Chemoinformatics (Methods and Principles in Medicinal Chemistry). Wiley-VCH, Weinheim, 2009. 1257 p.
140. *Tucker A.O., De Baggio T.* The Encyclopedia of Herbs: A Comprehensive Reference to Herbs of Flavor and Fragrance. Timber Press, Portland - London, 2009. 604 p.



141. *van Groenigen K.J., Osenberg C.W., Hungate B.A.* Increased soil emissions of potent greenhouse gases under increased atmospheric CO<sub>2</sub> // *Nature*. 2011. Vol. 475. P. 214–216.
142. *Vollmer M., Möllmann K.-P.* Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications. Wiley-VCH, Weinheim, 2010. 612 p.
143. *W.E.B.* Botany as an Experimental Science in Laboratory and Garden // *Nature*. 1935. Vol. 136. P. 890.
144. *Warnock C.* Backyard Winter Gardening: Vegetables Fresh and Simple, In Any Climate without Artificial Heat or Electricity the Way It's Been Done for 2,000 Years. Cedar Fort, Inc. Springville, 2013. 176 p.
145. *Went F.A.F.C.* Die Bedeutung des Wuchsstoffes (Auxin) für Wachstum, photo- und geotropische Krümmungen // *Naturwissenschaften*. 1933. Vol. 21, No 1. P. 1–7.
146. *Werkhoff P., Guntert M., Krammer G., Sommer H., Kaulen J.* Vacuum Head-space Method in Aroma Research: Flavor Chemistry of Yellow Passion Fruits // *J. Agric. Food Chem.* 1998. Vol. 46. P. 1076–1093.
147. *Wise P.M., Olsson M.J., Cain W.S.* Quantification of Odor Quality // *Chemical Senses*. 2000. Vol. 25, No 4. P. 429–443.
148. *Zachor A.S.* Spectral pattern recognition in IR remote sensing // *Applied Optics*. 1983. Vol. 22, No 17. P. 2699–2703.

Поступила 06.10.14

UDC 58.02+58.056+58.055+58.03+58.087+58.084

**Chromatography-Auxanometry and Chromate-Mass-Auxanometry  
in Forest Species Vegetation Phenological Monitoring Based on Gas and Flavor  
Chemical Principles with Patterns Automatic Identification**

*O.V. Gradov, Research Assistant, Principal Engineer*

Institute of Energy Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Leninskiy pr., 38/2, Moscow, 119334, Russia; e-mail: o.v.gradov@gmail.com

A new ideology for direct auxanometric measurements is proposed, which allows to analyze growth dynamics at different developmental stages. The above measurements include long-term monitoring using optical analysis with direct mass spectroscopic and gas chromatographic detection. Based on the known flavor differences of blooming plants at various phenological stages, we propose to distinguish phenological stage dynamics of various plant species and groups according to modern trends in flavor chemistry. It is possible to perform a simultaneous chemical analysis and automatic classification of forest plants in model plant communities according to their phenorhythm types and phenological groups with the approach described using automatic pattern recognition and fingerprinting. The novel method can also provide phenospectral data ranging useful for establishing the dependence of plant growth and developmental stage phenology on the environmental factors. Since the method is based on combination of several different measurement sources, it possesses a wide application in laboratory climatic chambers as well as in natural field conditions with the equipment placed in meteorological instrument shelter like the abundant tools for meteo-climatic monitoring. In this paper we propose a novel auxanometric system which is fundamentally different from all the previously known analogues, as it allows a simultaneous monitoring of forest plant species growth together with plant development stages. Unlike the quantitative approach in standard

auxanometric measurement techniques with the shoot elongation, our system implements a comprehensive qualitative growth dynamics criterion including one-to-one correspondence between the chemical analysis of plant molecular emission and the environmental conditions variations, that allows to analyze the feedback between the plant growth/development and the environmental parameter variation. This is provided by the fact that the automatic system during operation in different modes after pattern recognition learning (with the subsequent completion of the database) allows us to investigate and simulate not only a single plant development pattern characteristic of a certain standard feature space, but also to study experimentally the response of the ecological feature structure upon the changing of external factors. The above strategy leads to the emergence of phenological, simulating-biogeographical, biometeorological, bioclimatological and ecology-physiological approaches in auxanometry. The system proposed parameter variation in the course of the germination/elongation process monitoring as needed (if it is possible within the biotron, climatic chamber or the greenhouse used for germination/elongation of forest plant species), with the following addition of the spectral and chromatographic data in the form of correlation patterns into the database for subsequent comparison. In the case of experimental phenological spectral plant germination/elongation with the described system it is possible to program and control the temperature using a feedback and thus to predict vegetation initiation accurately. This can be implemented by summing the effective temperatures or their trend detection, which allows to reconstruct the sequence of germination or vegetation of individual plant forms in correlation with the characteristic parameters of the artificial climate (for example, if known that for maple (*g. Acer*) the sum of effective temperatures is 156.2 °C, and for linden (*g. Tilia*) – 739 °C, it is obvious that in the thermal ranking database the linden will be behind the maple). Due to this fact the auxanometric described system allows automatic classification of forest plants in the model plant communities on a set of characteristics according to the phenorhythm types or phenological groups using a more scaled classification than in outdated systems. The same fact allows monitoring in a climate chamber parameter regulation mode by the plant feedback registration using their molecular emission sensors in a controlled physical environment, i.e. the registered parameters from the detector can be considered as a signal changing the chamber operation mode. The described system operates in a wide range of conditions and possesses an amount of different application fields, so it is worth being recommended for implementation in both field and laboratory practice of forest engineering.

*Keywords:* flavor chemistry, gas chemistry, optical spectroscopy, auxanometry, gas chromatography, gas chromatography-mass-spectrometry, phenological monitoring.

#### REFERENCES

1. Bumpus H.C. A Simple and Inexpensive Self-Registering Auxanometer. *Botanical Gazette*, 1887, vol. 12, no 7, pp. 149–150.
2. Barnes C.R. A Registering Auxanometer. *Botanical Gazette*, 1887, vol. 12, no. 7, pp. 150–152.
3. Stone G.E. A Simple Self-Registering Auxanometer. *Botanical Gazette*, 1892, vol. 17, no. 4, pp. 105–107.
4. Golden K.E. An Auxanometer for the Registration of Growth of Stems in Thickness. *Botanical Gazette*, 1894, vol. 19, no 3, pp. 113–116.
5. Lloyd F. E. A New and Cheap Form of Auxanometer. *Torreya*, 1903, vol. 3, no 7, pp. 97–100.

6. Bovie W.T. A Precision Auxanometer. *Botanical Gazette*, 1912, vol. 53, no 6, pp. 504–509.
7. Bovie W.T. A Simplified Precision Auxanometer. *American Journal of Botany*, 1915, vol. 2, no 2, pp. 95–99.
8. Burgerstein A. Das pflanzenphysiologische Institut der K.K. Wiener Universität von 1873-1884. *Österreichische botanische Zeitschrift*, 1884, vol. 34, no 12, pp. 418–422.
9. Fritsch K. Akademien, Botanische Gesellschaften, Vereine, Kongresse etc. *Österreichische botanische Zeitschrift*, 1905, vol. 55, no 6, pp. 245–251.
10. Literatur-Übersicht. *Österreichische botanische Zeitschrift*, 1907, vol. 57, no 2, pp. 74–85.
11. Nestler A. Das pflanzenphysiologische Institut der k. k. deutschen Universität in Prag. *Österreichische botanische Zeitschrift*, 1909, vol. 59, no 2, pp. 54–62.
12. Lepeschkin W. Lehrbuch der Pflanzenphysiologie auf Physikalisch-Chemischer Grundlage. *Beschreibung und Erklärung der Wachstumserscheinungen*, 1925, pp. 191–242.
13. Cholodny N. Über das Wachstum des vertikal und horizontal orientierten Stengels in Zusammenhang mit der Frage nach der hormonalen Natur der Tropismen. *Planta*, 1929, vol. 7, no 5, pp. 702–719.
14. Went F.A.F.C. Die Bedeutung des Wuchsstoffes (Auxin) für Wachstum, photo- und geotropische Krümmungen. *Naturwissenschaften*, 1933, vol. 21, no 1, pp. 1–7.
15. Engel H., Heimann M. Weitere Untersuchungen über periodische Guttation. *Planta*, 1949, vol. 37, no 3, pp. 437–450.
16. Sparks W.C. A review of Abnormalities in the Potato due to Water Uptake and Translocation. *American Potato Journal*, 1958, vol. 35, no 3, pp. 430–436.
17. Kunkel R., Gardner W.H. Potato Tuber Hydration and its Effect on Blackspot of Russet Burbank Potatoes in the Columbia Basin of Washington. *American Potato Journal*, 1965, vol. 42, no 5, pp. 109–124.
18. Meyer W.S., Green G.C. Plant Indicators of Wheat and Soybean Crop Water Stress. *Irrigation Science*, 1981, vol. 2, no 3, pp. 167–176.
19. Rayle D.L., Cleland R. Rapid Growth Responses in the Avena Coleoptile: A Comparison of the Action of Hydrogen Ions, CO<sub>2</sub>, and Auxin. *Proc. the 7th Int. Conf. on Plant Growth Substances*. Australia, 1972, pp. 44–51.
20. Jaffe M.J. Thigmomorphogenesis: The Response of Plant Growth and Development to Mechanical Stimulation. *Planta*, 1973, vol. 114, no 2, pp. 143–157.
21. McBride R., Evans M.L. Auxin Inhibition of Acid- and Fusicoccin-Induced Elongation in Lentil Roots. *Planta*, 1977, vol. 136, no. 2, pp. 97–102.
22. Evans M.L., Mulkey T.J., Vesper M.J. Auxin Action on Proton Influx in Corn Roots and its Correlation with Growth. *Planta*, 1980, vol. 148, no 5, pp. 510–512.
23. Katou K., Ichino K. Effects of Carbon Dioxide on the Spatially Separate Electrogenic Ion Pumps and the Growth Rate in the Hypocotyl of *Vigna Sesquipedalis*. *Planta*, 1982, vol. 155, no 6, pp. 486–492.
24. Mulkey T.J., Evans M.L., Kuzmanoff K.M. The Kinetics of Abscisic Acid Action on Root Growth and Gravitropism. *Planta*, 1983, vol. 157, no 2, pp. 150–157.
25. Evans M.L., Ishikawa H., Estelle M.A. Responses of Arabidopsis Roots to Auxin Studied with High Temporal Resolution: Comparison of Wild Type and Auxin-Response Mutants. *Planta*, 1994, vol. 194, no 2, pp. 215–222.
26. Christian M., Lüthen H. New Methods to Analyse Auxin-Induced Growth I: Classical Auxinology Goes Arabidopsis. *Plant Growth Regulation*, 2000, vol. 32, no 2-3, pp. 107–114.

27. Steffens B., Lüthen H. New Methods to Analyse Auxin-Induced Growth II: The Swelling Reaction of Protoplasts – a Model System for the Analysis of Auxin Signal Transduction? *Plant Growth Regulation*, 2000, vol. 32, no 2-3, pp. 115–122.
28. Claussen M., Lütke H., Blatt M., Böttger M. Auxin-Induced Growth and its Linkage To Potassium Channels. *Planta*, 1997, vol. 201, no. 2, pp. 227–234.
29. Budagovskaya N.V., Guliaev V.I. Effect of Calcium Channel Blocker on the Growth Dynamics of Plants Studied by Laser Interference Auxanometry. *Developments in Plant and Soil Sciences*, 2002, vol. 92, pp. 204–205.
30. Budagovskaya N.V., Guliaev V.I. Rapid and Slow Response Reactions of Plants on Effect of Antioxidant Ambiol. *Advanced Research on Plant Lipids*, 2003, pp. 323–326.
31. Taiz L., Métraux J.-P. The Kinetics of Bidirectional Growth of Stem Sections from Etiolated Pea Seedlings in Response to Acid, Auxin and Fusicoccin. *Planta*, 1979, vol. 146, no 2, pp. 171–178.
32. Fernandez S.R., Wagner E.A. New Method of Measurement and Analysis of the Stem Extension Growth Rate to Demonstrate Complete Synchronisation of *Chenopodium Rubrum* Plants by Environmental Conditions. *Journal of Plant Physiology*, 1994, vol. 144, no 3, pp. 362–369.
33. Inman-Bamber N.G. Automatic Plant Extension Measurement in Sugarcane in Relation to Temperature and Soil Moisture. *Field Crops Research*, 1995, vol. 42, no 2-3, pp. 135–142.
34. Spalding E.P., Miller N.D. Image Analysis is Driving a Renaissance in Growth Measurement. *Current Opinion in Plant Biology*, 2013, vol. 16, no 1, pp. 100–104.
35. Evans M.L. Functions of Hormones at the Cellular Level of Organization. *Encyclopedia of Plant Physiology*, 1984, vol. 10, pp. 23–79.
36. Mutaftschiev S., Prat R., Pierron M., Devilliers G., Goldberg R. Relationships between Cell-Wall  $\beta$ -1,3-Endoglucanase Activity and Auxin-Induced Elongation in Mung Bean Hypocotyl Segments. *Protoplasma*, 1997, vol. 199, no 1-2, pp. 49–56.
37. Kim S.Y., Mulkey T.J. Effect of Ethylene Antagonists on Auxin-Induced Inhibition of Intact Primary Root Elongation in Maize (*Zeamays L.*). *Journal of Plant Biology*, 1997, vol. 40, no 4, pp. 256–260.
38. Rassadina V.A., Yaronskaya E.B., Vershilovskaya I.V., Egorov V.M., Averina N.G. Elektronnaya auksanometriya - novyy sposob registratsii rostovykh reaktsiy rasteniy [Electronic Auxanometry – is a New Method of Registration of Plant Growth Reaction]. *Zemljarobstva i ahova raslin: navukova-praktychny chasopis*, 2007, no 2, pp. 19–20.
39. Binder B.M. Rapid Kinetic Analysis of Ethylene Growth Responses in Seedlings: New Insights into Ethylene Signal Transduction. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2007, vol. 26, no 2, pp. 131–142.
40. Clarke L.J. *Botany as an Experimental Science – in Laboratory and Garden*. Oxford University Press, Milton, 1935. 138 p.
41. W.E.B. Botany as an Experimental Science in Laboratory and Garden. *Nature*, 1935, vol. 136, p. 890.
42. Mikhaylenko I.M. Matematicheskoe modelirovanie rosta rasteniy na osnove eksperimental'nykh dannykh [Mathematical Modeling of Plant Growth Based on Experimental Data]. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2007, no 1, pp. 103–111.
43. Kozlowski T.T. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. San Diego–New York–Boston–London–Sidney–Tokyo–Toronto, 1990. 678 p.
44. Kozlowski T.T., Pallardy S.G. *Physiology of Woody Plants*. San Diego–London–Boston–New York–Sidney–Tokyo–Toronto, 1996. 411 p.

45. Keppeler F. et al. Methane Emissions from Terrestrial Plants under Aerobic Conditions. *Nature*, 2006, vol. 439, pp. 187–191.
46. Mukhin V.A., Voronin P.Yu. Vydelenie metana iz drevesiny zhivykh derev'ev [Methane Emanation from Living Tree Wood]. *Fiziologiya rasteniy*, 2011, vol. 58, no. 2, pp. 283–289.
47. Mukhin V.A., Voronin P.Yu. Metanogennaya Aktivnost' v Drevesnykh Rastenyakh. [Methanogenic Activity in Wood Plants]. *Fiziologiya rasteniy*, 2009, vol. 56, pp. 152–154.
48. Poleskaya O.G. *Rastitel'naya kletka i aktivnye formy kisloroda* [Vegetative Cell and Oxygen Active Forms]. Moscow, 2007. 140 p.
49. Kees Jan van Groenigen, Craig W. Osenberg, Bruce A. Hungate. Increased Soil Emissions of Potent Greenhouse Gases under Increased Atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature*, 2011, vol. 475, pp. 214–216.
50. Knohl A., Veldkamp E. Global Change: Indirect Feedbacks to Rising CO<sub>2</sub>. *Nature*, 2011, vol. 475, pp. 177–178.
51. Davidson E.A., Keller M., Erickson H.E. et al. Testing a Conceptual Model of Soil Emissions of Nitrous and Nitric Oxides. *BioScience*, 2000, vol. 50, pp. 667–680.
52. Qaderi M.M., Reid D.M. Methane Emissions from Six Crop Species Exposed to Three Components of Global Climate Change: Temperature, Ultraviolet-B Radiation and Water Stress. *Physiologia Plantarum*, 2009, vol. 137, no 2, pp. 139–147.
53. Iglesias-Rodriguez M.D. et al. Phytoplankton Calcification in a High-CO<sub>2</sub> World. *Science*, 2008, vol. 320, pp. 336–340.
54. Beerling D.J., Franks P.J. Plant science: The hidden Cost of Transpiration. *Nature*, 2010, vol. 464, pp. 495–496.
55. McKown A.D., Cochard H., Sack L. Decoding Leaf Hydraulics with a Spatially Explicit Model: Principles of Venation Architecture and Implications for its Evolution. *American Naturalist*, 2010, vol. 175, pp. 447–460.
56. Brodribb T.J., Feild T.S. Leaf Hydraulic Evolution Led a Surge in Leaf Photosynthetic Capacity During Early Angiosperm Diversification. *Ecology Letters*, 2010, vol. 13, pp. 175–183.
57. Malone M., Herron M., Morales M.A. Continuous Measurement of Macronutrient Ions in the Transpiration Stream of Intact Plants using the Meadow Spittlebug Coupled with Ion Chromatography. *Plant Physiology*, 2002, vol. 130, no 3, pp. 1436–1442.
58. Monje O., Bugbee B. Characterizing Photosynthesis and Transpiration of Plant Communities in Controlled Environments. *Acta Horti*, 1996, vol. 40, pp. 123–128.
59. Liao Y.C., Chang Chien S.W., Wang M.C., Shen Y., Seshaiiah K. Relationship between Lead Uptake by Lettuce and Water-Soluble Low-Molecular-Weight Organic Acids in Rhizosphere as Influenced by Transpiration. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, vol. 17, no 55, pp. 8640–8649.
60. Liao Y.C., Chien S.W., Wang M.C., Shen Y., Hung P.L., Das B. Effect of Transpiration on Pb Uptake by Lettuce and on Water Soluble Low Molecular Weight Organic Acids in Rhizosphere. *Chemosphere*, 2006, vol. 65, no. 2, pp. 343–351.
61. Kolb B., Ettre L.S. *Static Headspace-Gas Chromatography: Theory and Practice*. Wiley, Hoboken, 2006. 350 p.
62. Jennings W. *Qualitative Analysis of Flavor and Fragrance Volatiles by Glass Capillary Gas Chromatography*. New York–London–Sydney–Toronto–San Francisco, 1980. 472 p.

63. Heydanek M.G., McGorin R.J. Gas Chromatography-Mass Spectroscopy Investigations on the Flavor Chemistry of Oat Groats. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1981, vol. 29, no 5, pp. 950–954.
64. Werkhoff P., Guntert M., Krammer G., Sommer H., Kaulen J. Vacuum Headspace Method in Aroma Research: Flavor Chemistry of Yellow Passion Fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1998, vol. 46, pp. 1076–1093.
65. Tucker A.O., DeBaggio T. *The Encyclopedia of Herbs: A Comprehensive Reference to Herbs of Flavor and Fragrance*. Portland–London, 2009. 604 p.
66. *Handbook of Fruit and Vegetable Flavors*. Ed. by Y. H. Hui. Wiley, Hoboken, 2010. 1095 p.
67. *Flavor and Health Benefits of Small Fruits* (ACS Symposium Series). Ed. by M. Qian, A. Rimando. Washington, 2010. 336 p.
68. Li Q., Nakadai A., Matsushima H., Miyazaki Y., Krensky A.M., Kawada T., Morimoto K. Phytoncides (Wood Essential Oils) Induce Human Natural Killer Cell Activity. *Immunopharmacol. Immunotoxicol.*, 2006, vol. 28, no 2, pp. 319–333.
69. Dmitriev M.T., Mishchikhin V.A., Stepanov E.V. Gazokhromatograficheskoe opredelenie fitontsidov v vozdukh[e] [Gas and Chromatography Fitocyd Definition in the Air]. *Gigiena i sanitariya*, 1983, no 7, pp. 43–45.
70. *Flavor, Fragrance, and Odor Analysis*. Ed. by R. Marsili. Boca Raton, 2011. 280 p.
71. *Flavours and Fragrances: Chemistry, Bioprocessing and Sustainability*. Ed. by R. G. Berger. Berlin–Heidelberg–New York, 2007. 664 p.
72. De Rovira D. *Dictionary of Flavors*. Wiley-Blackwell, Ames, Iowa, 2004. 736 p.
73. Wise P.M., Olsson M.J., Cain W.S. Quantification of Odor Quality. *Chemical Senses*, 2000, vol. 25, no 4, pp. 429–43.
74. Persaud K., Dodd G. Analysis of Discrimination Mechanisms in the Mammalian Olfactory System Using a Model Nose. *Nature*, 1982, vol. 299, no 5881, pp. 352–355.
75. Jin H.J., Lee S.H., Kim T.H., Park J., Song H.S., Park T.H., Hong S. Nanovesicle-Based Bioelectronic Nose Platform Mimicking Human Olfactory Signal Transduction. *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, vol. 35, no 1, pp. 335–341.
76. Röck F., Barsan N., Weimar U. Electronic Nose: Current Status and Future Trends. *Chemical Reviews*, 2008, vol. 108, no 2, pp. 705–725.
77. Degenhardt D. C., Greene J. K., Khalilian A. Temporal Dynamics and Electronic Nose Detection of Stink Bug-Induced Volatile Emissions from Cotton Bolls. *Psyche*, 2012, vol. 2012, ID 236762, pp. 1–9.
78. Li Q., Morimoto K., Kobayashi M., Inagaki H., Katsumata M., Hirata Y., Hirata K., Shimizu T., Li Y.J., Wakayama Y., Kawada T., Ohira T., Takayama N., Kagawa T., Miyazaki Y. A Forest Bathing Trip Increases Human Natural Killer Activity and Expression of Anti-Cancer Proteins in Female Subjects. *Journal of Biological Regulators & Homeostatic Agents*, 2008, vol. 22, no 1, pp. 45–55.
79. Li Q., Morimoto K., Kobayashi M., Inagaki H., Katsumata M., Hirata Y., Hirata K., Suzuki H., Li Y.J., Wakayama Y., Kawada T., Park B.J., Ohira T., Matsui N., Kagawa T., Miyazaki Y., Krensky A.M. Visiting a Forest, but not a City, Increases Human Natural Killer Activity and Expression of Anti-Cancer Proteins. *International Journal of Immunopathology and Pharmacology*, 2008, vol. 21, no 1, pp. 117–27.
80. Lago J.H.G., Favero O.A., Romoff P. Microclimatic Factors and Phenology Influences in the Chemical Composition of the Essential Oils from *Pittosporum undulatum* Vent. Leaves. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 2006, vol. 17, no 7, pp. 1334–1338.

81. Schwarz J., Gries R., Hillier K., Vickers N., Gries G. Phenology of Semiochemical-Mediated Host Foraging by the Western Boxelder Bug, *Boisea rubrolineata*, an Aposematic Seed Predator. *Journal of Chemical Ecology*, 2009, vol. 35, no 1, pp. 58–70.
82. Puc M., Kasprzyk I. The Patterns of *Corylus* and *Alnus* Pollen Seasons and Pollination Periods in Two Polish Cities Located in Different Climatic Regions. *Aerobiologia*, 2013, vol. 29, no 4, pp. 495–511.
83. Fredrickson E.L., Estell R.E., Remmenga M.D. Volatile Compounds on the Leaf Surface of Intact and Regrowth Tarbush (*Flourensia cernua* DC) Canopies. *Journal of Chemical Ecology*, 2007, vol. 33, no 10, pp. 1867–1875.
84. Gas Enzymology. Ed. by H. Degn, R.P. Cox, H. Toftlund. *Proceedings of a Symposium Held at Odense University, Denmark, 1984*. Dordrecht, 1985. 264 p.
85. Hanes J.M. Spring Leaf Phenology and the Diurnal Temperature Range in a Temperate Maple Forest. *International Journal of Biometeorology*, 2013. 10.1007/s00484-012-0603-1.
86. Geider R. *Algal Photosynthesis: The Measurement of Algal Gas Exchange*. New York, 1992. 256 p.
87. Maina J.N. *The Gas Exchangers: Structure, Function, and Evolution of the Respiratory Processes*. Berlin, 1998. 498 p.
88. Skogestad S., Postlethwaite I. *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. Wiley, Chichester–New York–Brisbane–Toronto–Singapore, 2005. 592 p.
89. Todeschini R., Consonni V. *Molecular Descriptors for Chemoinformatics (Methods and Principles in Medicinal Chemistry)*. Weinheim, 2009. 1257 p.
90. Vershinin V.I., Derendyaev B.G., Lebedev K.S. *Komp'yuternaya identifikatsiya organicheskikh soedineniy* [Computer Identification of Organic Compounds]. Moscow, 2002. 197 p.
91. Hemmer M.C. *Expert Systems in Chemistry Research*. Boca Raton, 2007. 416 p.
92. Mitchell H.B. *Multi-Sensor Data Fusion: An Introduction*. Berlin, Heidelberg, 2010. 296 p.
93. D.L. Hall, McMullen S.A.H. *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*. Boston – London, 2004. 466 p.
94. Raol J. R. *Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB*. Boca Raton, 2009. 568 p.
95. Bergann F. Untersuchungen über Lichtwachstum, Lichtkrümmung und Lichtabfall bei *Avena sativa* mit Hilfe monochromatischen Lichtes. *Planta*, 1930, vol. 10, no 4, pp. 666–743.
96. Meron E. *Nonlinear Physics of Ecosystems*. Boca Raton, 2013. 350 p.
97. Botkin D. B. *Forest Dynamics: An Ecological Model*. Oxford–New York, 1993. 328 p.
98. Buongiorno J., Zhu S., Zhang D., Turner J., Tomberlin D. *The Global Forest Products Model: Structure, Estimation, and Applications*. Amsterdam–Boston–London–New York–Oxford–Paris–San Diego–San Francisco–Singapore–Sydney–Tokyo, 2003. 300 p.
99. Pretzsch H. *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*. Heidelberg–Dordrecht–London–New York, 2010. 683 p.
100. Isermann R., Münchhof M. *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*. Heidelberg–Dordrecht–London–New York, 2011. 730 p.
101. Giantomassi A. *Modeling Estimation and Identification of Complex System Dynamics: Issues and Solutions*. Saarbrücken, 2012. 136 p.
102. Nelles O. *Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks and Fuzzy Models*. Berlin–Heidelberg–New York, 2001. 785 p.

103. A. Barrat, M. Barthélemy, A. Vespignani. *Dynamical Processes on Complex Networks*. Cambridge University Press, 2012. 361 p.
104. Lee M.J., Jeon S.W., Song W.K. *Designation for an Ecological Network using Remote Sensing: Focusing on the North-East Asia*. USA, 2013. 64 p.
105. Creswell J.W. *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. Los Angeles–London–New Delhi–Singapore–Washington, 2013. 304 p.
106. Cserhati T. *Multivariate Methods in Chromatography: a Practical Guide*. Wiley, Hoboken–Chichester, 2008. 352 p.
107. Mager P.P. *Multivariate Chemometrics in QSAR: a dialogue*. New York–Chichester–Toronto–Brisbane–Singapore, 1988. 345 p.
108. Nendza M. *Structure-Activity Relationships in Environmental Sciences*. London, 1998. 288 p.
109. Bumble S. *Computer Generated Physical Properties*. Boca Raton, 1999. 288 p.
110. Drosos J.C., Viola-Rhenals M., Vivas-Reyes R. Quantitative Structure-Retention Relationships of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Gas-Chromatographic Retention Indices. *Journal of Chromatography A*, 2010, vol. 1217, no 26, pp. 4411–4421.
111. Jönsson S., Eriksson L.A., van Bavel B. Multivariate Characterisation and Quantitative Structure-Property Relationship Modelling of Nitroaromatic Compounds. *Analytica Chimica Acta*, 2008, vol. 621, no 2, pp. 155–62.
112. Du H., Wang J., Hu Z., Yao X. Quantitative Structure-Retention Relationship Study of the Constituents of Saffron Aroma in SPME-GC-MS Based on the Projection Pursuit Regression Method. *Talanta*, 2008, vol. 77, no 1, pp. 360–365.
113. Tan Y., Siebert K.J. Modeling Bovine Serum Albumin Binding of Flavor Compounds (Alcohols, Aldehydes, Esters, and Ketones) as a Function of Molecular Properties. *Journal of Food Science*, 2008, vol. 73, no 1, pp. 56–63.
114. Hoffmann E.A., Fekete Z.A., Rajkó R., Pálinkó I., Körtvélyesi T. Theoretical Characterization of Gas-Liquid Chromatographic Stationary Phases with Quantum Chemical Descriptors. *Journal of Chromatography A*, 2009, vol. 1216, no 12, pp. 2540–2547.
115. Rodriguez-Bachiller A., Glasson J. *Expert Systems and Geographic Information Systems for Impact Assessment*. London–New York, 2004. 408 p.
116. Warnock C. *Backyard Winter Gardening: Vegetables Fresh and Simple, In Any Climate without Artificial Heat or Electricity the Way It's Been Done for 2,000 Years*. Springville, 2013. 176 p.
117. Jones H.G. *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Cambridge–New York–Melbourne, 1992. 456 p.
118. Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World Map of the Köppen–Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, vol. 15, no 3, pp. 259–263.
119. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated World Map of the Köppen–Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, vol. 11, pp. 1633–1644.
120. *Hyperspectral Remote Sensing of Tropical and Sub-Tropical Forests*. Ed. by M. Kalacska, G.A. Sanchez-Azofeifa. Boca Raton–London–New York, 2008. 352 p.
121. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. Ed. by P.S. Thenkabail, J.G. Lyon, A. Huete. Boca Raton, 2011. 781 p.
122. Helt M.F. *Vegetation Identification With LIDAR*. Thes. Naval Postgraduate School. Monterey, California, 2005, 83 p.



123. Lavalle M. *Remote Sensing of Vegetation by Polarimetric Space Interferometers: Models and Methods*. Saarbrücken, 2012. 220 p.
124. Gitelson A.A., Gritz Y., Merzlyak M.N. Relationships Between Leaf Chlorophyll Content and Spectral Reflectance and Algorithms for Non-Destructive Chlorophyll Assessment in Higher Plant Leaves. *Journal of Plant Physiology*, 2003, vol. 160, pp. 271–282.
125. Biswal U.C., Biswal B., Raval M.K. *Chloroplast Biogenesis: From Proplastid to Gerontoplast*. Dordrecht–Boston–London, 2003. 380 p.
126. Mohammed G.H., Noland T.L., Irving D., Sampson P.H., Zarco-Tejada P.J., Miller J.R. Natural and Stress-Induced Effects on Leaf Spectral Reflectance in Ontario Species. *Forest Research Report*, no 156, 2000. 34 p.
127. Dasgupta S. *Remote Sensing of Vegetation Water and Fire Risk: Selected Research Topics*. Saarbrücken, 2009. 176 p.
128. Chen J.-C., Chen C.-T. Correlation Analysis Between Indices of Tree Leaf Spectral Reflectance and Chlorophyll Content. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVII, part B7, 2008, pp. 231–238.
129. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships Between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance Across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 81, pp. 337–354.
130. *Plant Cell Death Processes*. Ed. by L.D. Nooden. Amsterdam–Boston–Heidelberg–London–New York–Oxford–Paris–San Diego–San Francisco–Singapore–Sydney–Tokyo, 2003. 392 p.
131. Chang C.-I. *Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis*. Hoboken, 2013. 1164 p.
132. Chang C.-I. *Hyperspectral Imaging: Techniques for Spectral Detection and Classification*. New York, 2003. 367 p.
133. Kim K.S. *3D Visualization of an Invariant Display Strategy for Hyperspectral Imagery*. Thes. Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2002. 67 p.
134. Beckett S. *Introduction to Time Series using Stata*. Texas, 2013. 741 p.
135. Gould W., Pitblado J., Poi B. *Maximum Likelihood Estimation with Stata*. Texas, 2010. 352 p.
136. Rabe-Hesketh S., Skrondal A. *Multilevel and Longitudinal Modeling Using Stata*. Texas, 2012, Vol. 1, 497 p.
137. Rabe-Hesketh S., Skrondal A. *Multilevel and Longitudinal Modeling Using Stata*. Texas, 2012, Vol. 2, 477 p.
138. Acock A.C. *Discovering Structural Equation Modeling Using Stata*. Texas, 2013. 304 p.
139. Kohler U., Kreuter F. *Data Analysis Using Stata*. Texas, 2012. 497 p.
140. Siddiqui K.J., Eastwood D.L., Liu Y.-H. Spectral Pattern Recognition: the Methodology. *SPIE Proceedings*, 1999, vol. 3854, pp. 84–97.
141. Zachor A.S. Spectral Pattern Recognition in IR Remote Sensing. *Applied Optics*, 1983, vol. 22, no 17, pp. 2699–2703.
142. Vollmer M., Möllmann K.-P. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. Weinheim, 2010. 612 p.
143. Parida L. *Pattern Discovery in Bioinformatics: Theory & Algorithms*. Boca Raton–London–New York, 2007. 512 p.
144. *Multispectral Image Processing and Pattern Recognition* (Series in Machine Perception and Artificial Intelligence, 44). Ed. by J. Shen, P. S. P. Wang, T. Zhang. Singapore–New Jersey–London–Hong Kong, 2001. 130 p.

145. Ball G.H., Hall D.J. *Isodata: a Method of Data Analysis and Pattern Classification*, California, 1965. 79 p.

146. *Spectral Theory and Nonlinear Analysis with Applications to Spatial Ecology*. Ed. by Cano-Casanova S., Lopez-Gomez J., Mora-Corral C. New Jersey–London–Singapore–Beijing–Shanghai–Hong Kong–Taipei–Chennai, 2005. 276 p.

147. Jones H.G., Vaughan R.A. *Remote Sensing of Vegetation: Principles, Techniques, and Applications*. Oxford–New York, 2010. 400 p.

148. Gradov O.V., Notchenko A.V. Poluavtomaticheskaya Dendrokronografiya Dlya Issledovaniya Morfogeneza i Teratomorfozov na Spilakh Vysshikh Rasteniy [Semi-Automatic Dendrochronology for the Study of Morphogenesis and Teratomorphosis on Sawings on the Highest Plants]. *Lesotekhnicheskiy zhurnal*, 2012, no 4(8), pp. 47–57.

Received on October 6, 2014

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.34

---

УДК 630\*232. 322.44+631.53.035

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТИМУЛЯТОРОВ ИЗ ВОДНОЙ ВЫТЯЖКИ КОРОПОМЕТНОГО КОМПоста И ГЕТЕРОУКСИНА ПРИ ПИКИРОВКЕ СЕЯНЦЕВ СОСНЫ В КОНТЕЙНЕРАХ

© *Б.А. Мочалов<sup>1,2</sup>, д-р с.-х. наук, проф.*

*М.Л. Бунтина<sup>1,2</sup>, асп., мл. науч. сотр.*

*С.В. Бобушкина<sup>2</sup>, канд. с.-х. наук, науч. сотр.*

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: bmochalov@mail.ru

<sup>2</sup>Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; e-mail: buntina\_mariya@mail.ru; svetlana-bobushkina@rambler.ru

Рассматриваются результаты исследований по использованию стимуляторов роста природного и химического происхождения при пикировке сеянцев сосны обыкновенной, выращиваемых с закрытой корневой системой. В качестве стимуляторов апробированы водные вытяжки из коропометных компостов и гетероауксина способом замачивания корней всходов сосны при их пикировке, которое необходимо при посеве семян со всхожестью менее 95 % и высеве 2-3 семечек в ячейку. Проведены опыты с выдерживанием корней пикируемых всходов в растворах стимуляторов в течение 4, 8, 16 и 24 ч. Исследования проводили в средней подзоне тайги (Вельский тепличный комплекс Архангельской области). Сеянцы выращивали в кассетах «Плантек-81» на торфяном субстрате два года: первый год – в теплице под пленкой, второй – без пленки на площадке дорастивания. Анализ средних показателей параметров сеянцев показал, что наиболее высокая эффективность получена на варианте с замачиванием корней всходов в растворах стимуляторов в течение 16 ч. Высота, объем стволика и выход стандартных увеличились на 22...30 %. При этом определенное преимущество имели сеянцы в варианте с раствором водной вытяжки из корокомпоста. Положительное действие стимуляторов отмечено уже через 1 мес. и наиболее полно проявляется в конце вегетации. В конце второго года роста объем стволиков соответствует рангам первого года, что, очевидно, связано с последствием обработки стимуляторами. В целом можно отметить, что водная вытяжка из коропометного компоста, применяемая в качестве стимулятора, оказывает положительное влияние на рост сеянцев сосны. Использование стимуляторов роста при пикировке сеянцев и их подкормках, а также при подготовке семян к посеву, способствует повышению выхода и качества посадочного материала с закрытой корневой системой и может быть важным инновационным приемом многоротационной интенсивной технологии его производства в суровых условиях Европейского Севера.

*Ключевые слова:* стимуляторы, водная вытяжка корокомпоста, гетероауксин, сеянцы с закрытыми корнями, пикировка сеянцев, сосна.

### *Введение*

В системе искусственного лесовосстановления в последнее время все более широкое распространение находит создание лесных культур посадочным материалом с закрытой корневой системой (ПМЗК). Его производство

основано на использовании дорогостоящего оборудования в тепличных комплексах, поэтому важнейшей задачей является получение максимального выхода сеянцев высокого качества в биологическом и товарном отношении. Для решения данной задачи необходимо использовать передовые технологии выращивания сеянцев и проводить поиск новых агротехнических и технологических решений.

Одним из перспективных направлений может быть использование физиологически активных веществ – стимуляторов роста. По мнению многих авторов [1, 6, 9, 11, 12], их использование целесообразно при обработке семян хвойных, для повышения их всхожести, при выращивании сеянцев и саженцев проведением внекорневых обработок. Положительные результаты испытания стимуляторов получены при выращивании сеянцев хвойных пород в питомниках и теплицах в суровых условиях Севера [7, 8].

Наши исследования затрагивают способ использования стимуляторов – замачивание корней всходов сосны при их пикировке. Условием высокой эффективности выращивания сеянцев в контейнерах является наличие в каждой ячейке одного здорового растения. При использовании семян со всхожестью менее 95 % их высевают по 2-3 семечка в ячейку, однако часть ячеек остается без всходов. После появления всходов производится их пикировка, при которой лишние растения из ячеек удаляют с сохранением корня и пересаживают в пустые ячейки.

Во время пикировки при выемке всходов из ячейки проводятрыхление субстрата, при посадке их в пустые ячейки необходимо его уплотнение для обеспечения зажатия корня. При этом изменяются водно-физические характеристики субстрата (плотность сложения, аэрация, водопроницаемость и вододерживающая способность и др.), что естественно оказывает влияние на интенсивность роста и развития сеянцев. Поэтому для активизации их роста и развития используют стимуляторы.

#### *Объекты и методы исследования*

Объектами исследований являлись сеянцы сосны с закрытыми корнями и два вида стимуляторов: гетероауксин и водная вытяжка из коропометного компоста. Гетероауксин – водорастворимый препарат, регулятор роста растений, его действующее вещество – калиевая соль индолил-3-уксусной кислоты. Раствор готовили из расчета 1 г препарата на 1 л воды. Водная вытяжка из коропометного компоста содержит органические кислоты (гуминовые, фульво- и аминокислоты), регуляторные пептиды, витамины, гормоны и другие продукты жизнедеятельности микроорганизмов, а также живую почвенную (ризосферную) микрофлору [10]. Компост готовили из измельченной коры ели с добавлением 5 % куриного помета в садовых компостерах Bio-240 методом аэробного компостирования. В образцах водной вытяжки определяли содержание водорастворимых форм фосфора ( $P_2O_5$  – по ГОСТ 27753.5–88), калия ( $K_2O$  – по ГОСТ 27753.6–88), азота нитратного ( $NO_3$  – по ГОСТ 27753.7–88) и аммиачного ( $NH_4$  – по ГОСТ 27753.1–88).

Исследования проводили в Вельском тепличном комплексе по выращиванию посадочного материала с закрытой корневой системой (ПМЗК) для лесовосстановления (г. Вельск, Архангельская обл.). Сеянцы выращивали в кассетах «Плантек-81» с размером ячеек 4×4×7 см, по 81 ячейке в кассете (9×9 рядов) [4]. Использовали торфяной субстрат промышленного производства. При пикировке корни всходов сосны после извлечения из субстрата выдерживали определенное время в растворе стимулятора. Контролем служили сеянцы, пикированные без стимуляторов (как принято на производстве) и не пикированные. Пикированные сеянцы каждого варианта опытов в количестве не менее 100 шт. фиксировали в кассетах, измеряли их высоту  $H$  и диаметр  $D$ . Все материалы замеров обрабатывали статистически с использованием соответствующих методик [3].

#### *Результаты исследований и их обсуждение*

По принятой технологии сеянцы выращиваются два года – первый год в теплице под пленкой, на второй год их выносят в кассетах на открытую площадку доращивания. Было проведено две серии опытов с различным временем выдерживания корней пикируемых всходов в растворах стимуляторов. В опытах 2012 г. корни выдерживали 4 и 24 ч отдельно в растворах обоих стимуляторов. В опытах 2013 г. для стимуляторов была принята продолжительность замачивания корней 16 ч (средняя в сравнении с предыдущим годом). С обработкой раствором вытяжки из корокопоста дополнительно заложено два варианта опытов с увеличением продолжительности выдержки на 8 и 16 ч.

Содержание и концентрации водорастворимых форм фосфора, калия и азота в водных вытяжках корокопоста в опытах обоих лет представлены в табл. 1. Химические характеристики вытяжек 2012 и 2013 гг. довольно близки. Для них характерно относительно высокое содержание калия. Содержание нитратного азота и подвижного фосфора в 3,2 и 4,6 раза меньше, чем калия, а наиболее низкое содержание отмечено по азоту аммиачному. Относительно высокие содержания в растворе калия и нитратного азота могут в определенных условиях оказывать ингибирующее влияние на всходы и сохранность сеянцев хвойных [2].

Таблица 1

#### **Химические показатели водных вытяжек корокопоста в опытах**

Определяемый показатель	2012 г.		2013 г.	
	мг/100г	%	мг/100г	%
Водорастворимый фосфор ( $P_2O_5$ )	98,4	0,10	102	0,10
Водорастворимый калий ( $K_2O$ )	450	0,45	407	0,47
Азот:				
аммиачный ( $NH_4$ )	11,7	0,01	5,2	0,005
нитратный ( $NO_3$ )	141	0,14	100	0,10

Биометрические показатели сеянцев в конце первого года выращивания (опытные посеы 2012 г.) приведены в табл. 2. Выдерживание корней сеянцев при пикировке в растворах гетероауксина и водной вытяжки из компоста в течение 4 ч не оказало положительного влияния, при выдерживании их в растворах стимуляторов 24 ч у растений заметно увеличилась высота. В сравнении с традиционно пикированными сеянцами она была больше соответственно на 13,5 и 16,2 % с достоверным различием ( $t_{\text{факт}} = 3,4$  и  $3,8$ ).

Таблица 2

**Характеристика 1-летних сеянцев сосны в опытах  
со стимулятором при пикировке всходов**

Вариант опыта	Время *, часы	Высота, см	Диаметр **, мм	Объем ство- лика $D^2H$ , см <sup>3</sup>	Различия по $H$	
		$H \pm m$	$D \pm m$		%	$t_{\text{факт}}$
Гетероауксин	4	3,2±0,09	1,0±0,02	0,032	-13,5	3,8
	24	4,2±0,11	1,1±0,05	0,051	+13,5	3,4
Вытяжка корокомпоста	4	3,9±0,10	1,0±0,02	0,031	+5,4	1,4
	24	4,3±0,12	1,1±0,04	0,052	+16,2	3,8
Контроль ***	–	3,7±0,10	1,0±0,02	0,037	100,0	–
Не пикированные	–	3,8±0,05	1,0±0,03	0,038	+2,7	0,9

\*Время выдержки корней всходов в растворе стимулятора. \*\*Здесь и далее, в табл. 3, замечены у шейки корня. \*\*\*Здесь и далее, в табл. 3–5, всходы, пикированные без стимулятора.

Объем стволика сеянцев на этих вариантах увеличился соответственно на 24,3 и 27,0 %, причем и по высоте, и по объему некоторое преимущество имели сеянцы в варианте с раствором водной вытяжки из корокомпоста. Средняя высота не пикированных сеянцев в конце сезона была несколько больше (на 2,7 %), чем пикированных, хотя различие недостоверно ( $t_{\text{факт}} = 0,9$ ).

Корни сеянцев в одном стимуляторе, но с разными сроками замачивания, имеют значительные различия. При увеличении продолжительности выдержки корней в растворах гетероауксина и водной вытяжки из корокомпоста от 4 до 24 ч высота сеянцев была больше на 31,3 и 10,3 % соответственно, по объему стволика разница составила 67,7 и 59,4 %. В целом же относительно низкие показатели размеров сеянцев во всех вариантах можно объяснить поздним сроком посева семян и их низким качеством.

В конце первого года вегетации кассеты с сеянцами были вынесены на площадку доращивания, где второй год сеянцы доращивали без пленки по общепринятой технологии. Различия по высоте по вариантам в конце второго года были меньше и не превышали 17,0 %, по диаметру они колебались в пределах 4,0...20,0 % (табл. 3).

Наиболее высокие биометрические параметры (высота, диаметр, объем стволика) получены у сеянцев в варианте с выдержкой корней в растворе водной вытяжки корокомпоста в течение 24 ч. В этом же варианте было наибольшее количество (40,3 %) сеянцев с высотой 10 см и более.

Таблица 3

**Высота, диаметр и выход 2-летних стандартных сеянцев  
в опытах со стимуляторами (посев 2012 г.)**

Вариант опыта	Время*, часы	Высота, см	Диаметр, мм	Объем стволика, см <sup>3</sup>	Процент стандарт- ных сеянцев по высоте**
		$H \pm m$	$D \pm m$		
Гетероауксин	4	7,8±0,16	2,3±0,07	0,41	5,6
	24	9,0±0,17	2,2±0,08	0,44	27,8
Вытяжка корокомпоста	4	8,1±0,16	1,9±0,03	0,29	10,8
	24	9,4±0,19	2,4±0,07	0,54	40,3
Контроль	–	8,3±0,09	2,0±0,04	0,33	18,2
Не пикированные	–	8,5±0,16	2,3±0,09	0,45	18,2

\*Здесь и далее, в табл. 4, 5, время выдержки корней сеянцев в растворе стимуляторов.

\*\*По ГОСТ 56-98-93 [5].

Наименьший выход стандартных сеянцев и минимальная высота отмечены в варианте с использованием гетероауксина в течение 4 ч. У не пикированных сеянцев сохранилось небольшое преимущество в средних показателях размеров по сравнению с пикированными без стимуляторов.

Анализ средних показателей высоты и диаметра в вариантах с разной продолжительностью выдержки корней сеянцев, пикированных по общепринятой технологии и не пикированных в растворах испытываемых стимуляторов, показывает неодинаковое влияние стимуляторов на развитие корней и надземной части. У сеянцев с выдержкой корней всходов в растворах гетероауксина и водной вытяжки компоста в течение 24 ч высота достоверно больше на 5,9...13,3 %, при выдержке 4 ч – на 8,2...2,4 % меньше. По диаметру наиболее высокие показатели у 2-летних сеянцев получены в вариантах выдерживания корней в растворах водной вытяжки компоста 24 ч и гетероауксина 4 ч.

Очевидно, различный срок замачивания корней в растворах определенных стимуляторов может оказывать стимулирующее влияние на рост и развитие определенных частей растений (корней, стволика, хвои). Однако анализ средних показателей объема стволиков у 1- и 2-летних сеянцев в вариантах со стимуляторами показывает, что их объем в конце второго года роста соответствует рангам первого года. Это может быть связано с последствием стимулирующего влияния замачивания корней всходов при пикировке на рост и развитие сеянцев, выращиваемых с комом субстрата, и на второй год роста на площадке дорастивания.

В опытах 2013 г. был принят один срок замачивания корней всходов в растворе гетероауксина (16 ч) и расширен диапазон времени выдержки в растворе водной вытяжки корокомпоста (16, 24 и 32 ч). Динамика изменения высоты пикированных и непикированных сеянцев и их диаметр шейки корня (табл. 4) показывает, что влияние пикировки и использования стимуляторов

проявляется практически в течение всего сезона вегетации. При этом положительное действие замачивания корней всходов при пикировке в растворах испытываемых стимуляторов отмечается уже через 1 мес. и наиболее полно проявляется в конце вегетации. По сравнению с замерами в июне высота сеянцев в июле увеличилась лишь на 42...55 %, в конце сезона различия составили 2,8–3,0 раза. После появления всходов у сеянцев идет активный рост корней, дальше протекают этапы интенсивного роста надземной части. Очевидно, более сильное нарастание размеров сеянцев обусловлено стимулирующим влиянием выдерживания корней в растворах вытяжки и гетероауксина. По высоте и диаметру наиболее сильное действие оказал раствор вытяжки из компоста при экспозиции 16 ч. Наиболее низкие размеры имели сеянцы, пикированные без замачивания корней.

Таблица 4

**Высота и диаметр 1-летних сеянцев сосны в опытах со стимуляторами при пикировке (посев 2013 г.)**

Вариант опыта	Время, ч	Дата замеров сеянцев			
		26.06.2013	19.07.2013	26.09.2013	
		<i>H±m</i> , см		<i>H±m</i> , см	<i>D±m</i> , мм
Вытяжка корокомпоста	16	2,0±0,04	3,1±0,07	9,2±0,21	1,7±0,04
	24	2,1±0,05	3,0±0,08	8,5±0,21	1,5±0,06
	32	2,1±0,05	3,0±0,07	8,4±0,20	1,5±0,04
Гетероауксин	16	2,0±0,04	3,0±0,07	8,9±0,22	1,7±0,04
Контроль	–	1,9±0,04	2,7±0,06	7,3±0,15	1,3±0,05
Не пикированные	–	1,9±0,03	2,9±0,05	8,9±0,16	1,5±0,03

Анализ показателей высоты, объема стволика и выхода стандартных 1-летних сеянцев в опытах со стимуляторами в посевах 2013 г., приведенных в табл. 5, показывает значительное влияние пикировки и стимуляторов на данные параметры.

Сеянцы, пикированные без стимуляторов, имеют наиболее низкие показатели всех параметров. У не пикированных сеянцев, по сравнению с ними, высота больше на 21,9 % (различие достоверно), объем стволика – на 67,0 %, выход стандартных – на 29,2 %. При пересадке всходов в пустую ячейку увеличивается плотность субстрата, снижается его аэрация, что негативно влияет на физиологические процессы и рост сеянцев. Данные изменения зависят в значительной мере от вида торфа, используемого для подготовки субстрата, особенно от процентного содержания в нем мелких фракций.

Из испытываемых вариантов наибольшее влияние на высоту и объем стволика отмечено при выдерживании корней всходов в процессе пикировки в растворах вытяжки корокомпостного компоста и гетероауксина 16 ч. При более продолжительном замачивании в растворе вытяжки из компоста эффект несколько меньше, но более высокий, чем при пикировке без стимуляторов, и перекрывает негативное действие изменения физических свойств субстрата.



Таблица 5

**Высота, объем стволика и выход стандартных 1-летних сеянцев  
в опытах со стимуляторами (посев 2013 г.)**

Вариант опыта	Время, ч	Высота		Раз- личия t <sub>факт</sub>	Объем стволика		Раз- личия % <sup>**</sup>	Процент стандарт- ных сеянцев
		см	%		см <sup>3</sup>	% <sup>*</sup>		
Вытяжка корокомпоста	16	9,2	+26,0	7,4	0,27	+ 125	+ 35	36,4
	24	8,5	+16,4	4,7	0,19	+ 58	- 5	23,5
	32	8,4	+15,1	4,4	0,19	+ 58	- 5	18,9
Гетероауксин	16	8,9	+21,9	6,0	0,26	+ 117	+ 30	32,3
Контроль	–	7,3	100,0	–	0,12	100	- 40	3,8
Не пикированные	–	8,9	+21,9	7,3	0,20	+ 67	100	33,0

\* По сравнению с контролем. \*\* По сравнению с не пикированными.

### Выводы

1. Одним из наиболее показательных параметров эффективности технологии производства ПМЗК является выход посадочного материала, отвечающего нормативным требованиям (стандарту) или требованиям потребителя. По параметрам ОСТ 56-98–93 более высокая эффективность пикировки (по сравнению с не пикированными сеянцами) получена в варианте с замачиванием корней всходов сосны в течение 16 ч в растворе вытяжки из коропометного компоста, наиболее близкая к нему – в варианте с гетероауксином.

2. Использование стимуляторов роста при пикировке и подкормках сеянцев, а также при подготовке семян к посеву, способствует повышению выхода и качества ПМЗК и является важным инновационным приемом многоротационной интенсивной технологии его производства в суровых условиях Севера.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багаев С.С., Калашикова С.А. Исследование влияния биологически активных веществ на сеянцы ели европейской // Проблемы воспроизводства лесов Европейской тайги: материалы Всерос. науч.-практ. конф., Кострома, 26-27 сент. 2012 г. Кострома: Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2012. С.19–23.

2. Варфоломеев Л.А., Мочалов Б.А. К применению в лесопитомниках удобрений, приготовляемых на основе древесной коры // Применение минеральных удобрений в лесном хозяйстве: тез. докл. Всесоюзного совещания, г. Архангельск, 12-13 авг. 1986 г. Архангельск, 1986. С. 76.

3. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований). Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Колос, 1979. 416 с.

4. Мочалов Б.А., Бобушкина С.В. Влияние вида кассет на размеры сеянцев сосны с закрытыми корнями и их рост в культурах на Севере // Лесн. журн. 2013. № 5. С. 65–70. (Изв. высш. учеб. заведений).

5. ОСТ 56-98–93. Сеянцы и саженцы основных древесных и кустарниковых пород. Технические условия. Утв. и введен в действие приказом Рослесхоза № 327 от 10.12.1993.

6. Панюшкина Н.В. Особенности роста, развития и способы размножения можжевельника обыкновенного в Среднем Поволжье // Лесн. журн. 2011. № 3. С. 29–32. (Изв. высш. учеб. заведений).

7. Пентелькина Н.В., Острошенко Л.Ю. Выращивание сеянцев хвойных пород в условиях Севера и Дальнего Востока с использованием стимуляторов роста. Режим доступа: [http://science-bsea.narod.ru/2005/les\\_2005/pentelkina\\_vyrachivanie.htm](http://science-bsea.narod.ru/2005/les_2005/pentelkina_vyrachivanie.htm)

8. Пентелькина Н.В., Мочалов Б.А., Буторин А.Н. Выращивание сеянцев ели с использованием крезацина в условиях закрытого грунта // Лесн. хоз-во. 2006. № 6. С. 45–47.

9. Редько Н.Г. Влияние физиологически активных веществ на рост однолетних сеянцев ели обыкновенной: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. С-Пб., 1992. 16 с.

10. Титов И.Н., Кыдралиева К.А. Гуминовые препараты на основе продуктов аэробной и анаэробной биоконверсии органических отходов // Гуминовые вещества – ресурсы 21 века: сб. тр. Режим доступа: <http://vcvetu.ru/udobrenie/4G04/index.html>.

11. Устинова Т.С. Биологические стимуляторы роста, применяемые в лесных питомниках. Режим доступа: [http://sciencebsea.narod.ru/2009/les\\_komp\\_2009/ustinova\\_biolg.htm](http://sciencebsea.narod.ru/2009/les_komp_2009/ustinova_biolg.htm)

12. Хамитов Р.С. Стимуляция грунтовой всхожести семян кедр сибирского препаратом «Гумат+7» // Лесн. журн. 2006. № 6. С. 127–128. (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 06.08.14

UDC 630\*232.322.44+631.53.035

### The Use of Stimulators Made of Aqueous Extract from Bark and Chicken Manure Compost and Heteroauxin When Pricking Out Containerized Pine Seedlings

*B.A. Mochalov<sup>1,2</sup>, Doctor of Agriculture, Professor*

*M.L. Buntina<sup>1,2</sup>, Postgraduate Student, Research Assistant*

*S.V. Bobushkina<sup>2</sup>, Candidate of Agricultural, Research Assistant*

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russia; e-mail: b.mochalov@narfu.ru

<sup>2</sup>Northern Research Institute of Forestry, Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russia; e-mail: mariya.buntina@yandex.ru, e-mail: svetlana-bobushkina@rambler.ru

The Results of the researches on the use of growth stimulators of a natural and chemical origin when pricking of Scotch pine seedlings are considered, grown up with the closed root system. The aqueous extract from bark and chicken manure compost and heteroauxin are approved as stimulators. Our researches affect a new way of using stimulators - soaking the roots of pine seedlings when they are being pricked out, that is necessary when the germination rate is less than 95 % and 2-3 seeds are needed in each cell. Roots were dived into stimulator solutions and kept for 4, 8, 16 and 24 hours. The research was conducted in the greenhouse complex in Velsk, the Arkhangelsk Region, the middle taiga subzone. The seedlings were grown up in «Plantek-81» containers on a peat substratum for two years – the first year inside the greenhouse, the second – at the sites of completion of growing. Analysis of the averages of the seedlings parameters showed that the highest efficiency was obtained in the variant with roots soaking for 16 hours. Height, stem volume and yield of standard size seedlings increased by 22–30 %. Seedlings, soaked in a solution of aqueous

extract from bark and chicken manure compost, showed particular advantage. We established that the positive effect of stimulators could be seen as soon as after a month, and it most fully realized in the end of the growing season. At the end of the second year of growth, the stem volume corresponded to the ranks of the first year, which obviously was an indicator of the stimulators' effectiveness. In general, it can be noted, that the aqueous extract from bark and chicken manure compost as a stimulator has a positive impact on the growth of pine seedlings. Using the growth stimulators when pricking out and fertilizing seedlings, as well as in the preparation of seeds for sowing, improves yield and quality of containerized seedling stock and can be an important innovation for intensive multirotational technology of forest planting stock production in the harsh climate of the North.

*Keywords:* stimulators, aqueous extracts from bark and chicken manure compost, heteroauxin, seedlings with the closed roots, pricking-out of seedlings, pine.

#### REFERENCES

1. Bagaev S.S., Kalashnikova S.A. Issledovanie vliyaniya biologicheskii aktivnykh veshchestv na seyantsy eli evropeyskoy. [Research on Influence of Biologically Active Agents on Norway Spruce Seedlings]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Problemy vosproizvodstva lesov Evropeyskoy taygi»* [Problems of Reproduction of the European Taiga Forests: Proc. All-Russian Scientific and Practical Conference]. Kostroma, 2012, pp. 19–23.
2. Varfolomeev L.A., Mochalov B.A. K primeneniyu v lesopitomnikakh udobreniy, prigotovlyaemykh na osnove drevesnoy kory [About the Use of Fertilizers, Prepared from Bark in Forest Nurseries]. *Primenenie mineral'nykh udobreniy v lesnom khozyaystve. Tezisy dokladov Vsesoyuznogo soveshchaniya* [Use of Mineral Fertilizers in Forestry. Theses of All-Union Meeting]. Arkhangelsk, 1986, 76 p.
3. Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta* [Field Experiment Methods]. Moscow, 1979. 416 p.
4. Mochalov B.A., Bobushkina S.V. Vliyanie vida kasset na razmery seyantsev sosny s zakrytymi korniyami i na ikh rost v kul'turakh na Severe [Influence of the Type of Containers and the Size of Containerized Pine Seedlings on Their Growth in Artificial Stands in the North]. *Lesnoy zhurnal*, 2013, no. 5, pp. 65–70.
5. *OST 56-98-93. Seyantsy i sazhenitsy osnovnykh drevesnykh i kustarnikovykh porod. Tekhnicheskie usloviya* [Industry Standard 56-98-93. Seedlings and Saplings of the Main Tree and Shrub Species. Technical Conditions].
6. Panyushkina N.V. Osobennosti rosta, razvitiya i sposoby razmnozheniya mozhzhevel'nika obyknovennogo v Srednem Povolzh'e [Peculiarities of Growth, Development and Ways of Propagation of Common Juniper in the Middle Volga Region]. *Lesnoy zhurnal*, 2011, no. 3. pp. 29–32.
7. Pentel'kina N.V., Ostroshenko L.Yu. *Vyrashchivanie seyantsev khvoynykh porod v usloviyakh Severa i Dal'nego Vostoka s ispol'zovaniem stimulyatorov rosta* [Growing of Coniferous Seedlings of the Russian North and Far East Conditions, Using the Growth Stimulators]. Available at: [http://science-bsea.narod.ru/2005/les\\_2005/pentelkina\\_vyrachivanie.htm](http://science-bsea.narod.ru/2005/les_2005/pentelkina_vyrachivanie.htm).

8. Pentel'kina N.V., Mochalov B.A., Butorin A.N. Vyrashchivanie seyantsev eli s ispol'zovaniem krezatsina v usloviyakh zakrytogo grunta [Growing of Spruce Seedlings Using Cresatsin in Covered Soils]. *Lesnoe khozyaystvo*, 2006, no. 6, pp 45–47.

9. Red'ko N.G. *Vliyanie fiziologicheski aktivnykh veshchestv na rost odnoletnikh seyantsev eli obyknovennoy*: avtoref. dis. ... kand. s.-kh. nauk [Effect of Physiologically Active Agents on the Growth of One Year Norway Spruce Seedlings: Cand. Agric. Sci. Dis. Abs.]. St. Petersburg, 1992. 16 p.

10. Titov I.N., Kydraliev K.A. Guminovye preparaty na osnove produktov aerobnoy i anaerobnoy biokonversii organicheskikh otkhodov [Humic Preparations on the Basis of Products of Aerobic and Anaerobic Bioconversion of Organic Waste]. *Sb.tr. «Guminovye veshchestva – resursy 21 veka»* [Humic Substances – Resources of the 21 Century: Proceedings].

11. Ustinova T.S. *Biologicheskie stimulyatory rosta, primenyaemye v lesnykh pitomnikakh* [Biological Growth Stimulators, Applied in Forest Nurseries]. Available at: [http://sciencebsea.narod.ru/2009/les\\_komp\\_2009/ustinova biolog.htm](http://sciencebsea.narod.ru/2009/les_komp_2009/ustinova biolog.htm).

12. Khamitov R.S. Stimulyatsiya gruntovoy vskhozhesti semyan kedra sibirskogo preparatom «Gumat+7» [Stimulation of Soil Germination Rate of Siberian Pine Seeds by the Use of Agent "Gumat+7"]. *Lesnoy zhurnal*, 2006, no. 6, pp. 127–128.

Received on August 6, 2014

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.67

---

УДК 630\*6:630\*111 (470.13)

**ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ  
ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА В ВОСТОЧНЫХ РАЙОНАХ  
ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ  
В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

© *Н.М. Большаков, д-р экон. наук, проф.*

*В.В. Жиделева, д-р экон. наук, проф.*

*В.В. Пахучий, д-р с.-х. наук, проф.*

Сыктывкарский лесной институт – филиал С.-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, ул. Ленина, д. 39, г. Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 167982; e-mail: institut@sfi.komi.com

В исследовании механизма сохранения северотаежных (бореальных) лесов в условиях изменения климата главным является изучение сопряжения разнообразных сил природы, интересов различных слоев населения, состояния и производительности лесных экосистем, снятия угроз, связанных с нарастающей сменой лесообразующих пород и усыханием еловых насаждений. Многообразие лесорастительных условий и различие производительности лесов бореальной зоны указывают на целесообразность проведения как лесорастительного, так и лесоэкономического районирования. Его цель – дать естественно-историческую основу для разработки региональных систем лесохозяйственных мероприятий. В основу разделения территории на районы принят метод факторного анализа. Общее количество учетных параметров – 51, в том числе 28 характеристик экотопа, т. е. системы «климатоп–эдафотоп»: состояние атмосферы, водный баланс территории, почвенно-грунтовые условия, таксационные показатели лесных насаждений. В качестве учетной единицы принято лесничество. Матрицы факторных нагрузок рассчитаны методом главных факторов. В результате выделено 4 лесорастительных района, в их границах – 7 подрайонов. Лесоэкономическое районирование выполнено с учетом характеристик лесосечного фонда, степени развития лесопромышленного производства, тяготения района к путям транспорта и др. Территория Республики Коми была разделена на 8 районов. На основе синтеза лесорастительного и лесоэкономического районирования разработана схема эколого-экономического районирования с разделением территории на 4 района и 9 подрайонов. В пределах эколого-экономических районов выделены системы лесохозяйственных мероприятий: притундровая защитная, горная и предгорная защитная, таежная эксплуатационная. Выделено 4 основных рекреационных района: Вычегодско-Мезенский, Тиманский, Печорский, Уральский. Согласно нашим расчетам, рекреационная структура Республики Коми может обеспечить ежегодную емкость рекреантов до 400...500 тыс. чел. Состояние и производительность лесных экосистем оценивали по приросту древесины в зависимости от обобщенных факторов по состоянию на 1961 г. в лесхозах и на 2008 г. в лесничествах. Методика определения и принципы интерпретации их были разработаны при лесорастительном районировании. Установлено, что зависимость среднего прироста от обобщенных факторов Ф1 (теплообеспеченность) и Ф2 (континентальность климата) может быть описана уравнениями множественной регрессии ( $R_1 = 0,97$ ;  $R_2 = 0,91$ ). По уравнениям рассчитан средний прирост в лесхозах (1961 г.) и лесничествах (2008 г.).

Приросты в Корткеросском и Сыктывкарском лесничествах, равные в 1961 и 2008 гг. соответственно 1,29 и 1,69 м<sup>3</sup>/га, приняты за 1,0, приросты в других лесничествах выражали в долях от 1,0. Таким образом были определены коэффициенты относительной продуктивности для лесничеств. Установлено, что средний прирост в целом по республике в 1961 г. составлял 0,99 м<sup>3</sup>/га, а в 2008 г. – 1,23 м<sup>3</sup>/га. Прирост уменьшается при движении с юга на север и от западных границ республики к Уральскому хребту. Это указывает на важность не только широтного (зонального), но и провинциального подразделения территории. Исследования свидетельствуют о существенном вкладе климатических показателей в динамику прироста. Однако дополнительного изучения заслуживает количественная оценка соотношения вкладов в изменение прироста собственно климата, лесохозяйственной деятельности и изменения структуры лесопользования. Учет климатических изменений целесообразен как в северных районах, где происходит перемещение северной границы леса, так и в южных районах республики, для которых характерно наиболее значительное абсолютное увеличение прироста.

*Ключевые слова:* северотаежные (бореальные) леса, лесные ресурсы, лесопользование, эколого-экономические районы, лесоводственные системы, рекреация, изменение климата.

Северотаежные (бореальные) леса как совокупность лесоболотных геосистем играют основную роль в процессе смягчения последствий изменения климата. Их сохранение и воспроизводство становится первоочередной задачей снятия угроз благополучию современного и будущих поколений людей. Особенно данная проблема значима для восточных районов Европейского Севера России.

Восточные районы Европейского Севера России, представленные Республикой Коми и Ненецким автономным округом (в составе Архангельской обл.), занимают площадь 59,4 млн га, или 40 % территории Северного экономического района Российской Федерации. Здесь располагается около 1/3 площади бореальных (таежных) лесов европейского континента, формируется гидрологический режим крупных северных рек (Печора, Мезень и др.), лесные экосистемы являются полигоном для стока углерода. Так, в Республике Коми в фитомассе насаждений ежегодно его накапливается около 66 млн т [3].

Ведущее место по удельному участию в лесном покрове Европейского Севера занимает Республика Коми. Общая площадь земель лесного фонда составляет 36,3 млн га, или 87,2 % территории республики. Около 2,7 млн га занимают леса, не входящие в лесной фонд, в том числе земли особо охраняемых природных территорий (национальный парк «Югыд ва» – 1,9 млн га, Печоро-Илычский государственный заповедник – 0,7 млн га). Лесистость в отдельных районах республики различна, зависит от физико-географических условий и составляет в среднем 79 % [6]. В Ненецком автономном округе лесной фонд официально не выделен, хотя в земельном фонде здесь под лесом находится 1,74 млн га. В то же время площадь тундры и лесотундры составляет 12,5, болот – 3,4 млн га.

Анализ распределения лесного фонда по категориям земель в Республике Коми свидетельствует о том, что из общей площади земель лесного фонда лесные земли занимают 29,0 млн га, в том числе покрытые лесом – 28,7, не покрытые лесом – 0,3 млн га. За период с 1961 г. покрытая лесом площадь увеличилась на 1,6 млн га, не покрытая лесом уменьшилась на 0,9 млн га. Это может свидетельствовать о положительной роли лесного хозяйства республики в области лесовосстановления, изменении структуры лесопользования, возможном влиянии изменения климата на состояние лесов. Болота занимают 6,3 млн га, или 17 % площади лесного фонда. За последние полвека их площадь увеличилась на 1,5 млн га, что, с одной стороны, может указывать на наступление более влажного периода, с другой – свидетельствовать о недостаточном объеме мероприятий, направленных на регулирование водного режима, например методами гидротехнических мелиораций. Последнее особенно важно на участках, где ранее были проведены рубки для заготовки древесины и наблюдается заболачивание вырубок. В целом в Республике Коми и Ненецком автономном округе площадь тундры и лесотундры составляет 23,0, а болот – 9,6 млн га. Это необходимо учитывать при оценке взаимодействия лесного, тундрового и болотного типов растительности в условиях изменения климата. По целевому назначению и категориям защитности леса Республики Коми распределяются следующим образом: эксплуатационные леса – 21,8 млн га (около 60 %), защитные – 14, 5 млн га (около 40 %).

Общий запас древесины в лесах республики на 1 января 2012 г. составлял 2,83 млрд м<sup>3</sup>, в том числе хвойные – 2,35 млрд м<sup>3</sup> (около 83 %), мягколиственные – 0,48 млрд м<sup>3</sup> (около 17 %). Из общего запаса насаждений на долю еловых древостоев приходится 56,6, сосновых – 24,9, других хвойных пород (пихта, лиственница, кедр) – 1,4, березовых – 13,6, осиновых – 3,4 %. Средний класс бонитета насаждений в целом по республике равен IV, 6. В лесах Республики Коми сосредоточены значительные запасы дополнительных древесных ресурсов (кора, пни, корни, сучья, ветви). В спелых и перестойных насаждениях эксплуатационного фонда республики они оцениваются в 800 млн т. Запасы древесной зелени (хвоя, листья, недревесневшие побеги) составляют 415 млн т [4].

Ежегодная расчетная лесосека по всем видам рубок на 1 января 2012 г. – 33,5 млн м<sup>3</sup>, фактическая заготовка древесины – 7,2 млн м<sup>3</sup>. Сплошными рубками заготовлено 7,0 млн м<sup>3</sup>, выборочными – 0,2 млн м<sup>3</sup>, в том числе при проведении рубок ухода – около 46,2 тыс. м<sup>3</sup>. В целом по Республике Коми расчетная лесосека осваивается на 1/5. В значительной степени это связано со слабым развитием транспортной сети. Поэтому создание современной сети дорог является одной из наиболее важных проблем для лесного комплекса республики при организации рационального лесопользования [7]. Возможный ежегодный объем заготовки пневого осмола составляет 4 млн м<sup>3</sup> (складочных), бересты – 17,9, хвойной лапки – 340, живицы – 2,4, березового сока – 500, грибов – 78, ягод (клюква, брусника, черника) – 370, лекарственного сырья

(вахта трехлистная, багульник, лабазник) – 4,5 тыс. т [6]. Однако объемы промышленной заготовки и переработки грибов, ягод, лекарственного сырья незначительны. В основном их заготовка осуществляется местным населением для личного использования.

Физико-географические условия республики специфичны и характеризуются большим разнообразием. Это связано со значительной протяженностью территории в широтном направлении, влиянием на режим теплообеспеченности и влагообеспеченности Уральской горной страны. От северо-западных и центральных районов России Республика Коми отличается сложностью геологических, гидрогеологических и почвенных условий. Все это обуславливает многообразие лесорастительных условий и различие производительности лесов и указывает на целесообразность проведения лесорастительного районирования. Под лесорастительным районированием понимают разделение территории лесного фонда на однородные части, отличающиеся от соседних природными условиями, обуславливающими распространение лесообразующих древесных пород, состав лесов, типы леса, продуктивность лесов и лесовосстановительные процессы в них. Цель лесорастительного районирования – дать естественно-историческую основу для разработки региональных систем лесохозяйственных мероприятий. Ранее для Республики Коми такое районирование было выполнено [11]. Признавая научную новизну выполненного исследования, необходимо отметить, что границы выделенных округов не совпадают с границами административных или хозяйственных подразделений, что может приводить к неопределенностям при использовании районирования в прикладных целях. В данной работе в качестве учетной единицы принято лесничество, что обеспечивает совпадение границ лесорастительных районов (подрайонов) с границами лесничеств.

Предварительно были подобраны «карты-признаки» с границами районов или изолиниями, которые были выделены по одному признаку, т. е. характеристике состояния атмосферы, водного баланса территории, поверхностных и подземных вод, почвенно-грунтовых условий, таксационных показателей лесных насаждений. Общее количество учтенных параметров 51, в том числе 28 характеристик экотопа – системы «климатоп–эдафотоп».

В основу разделения территории на районы принят метод факторного анализа, позволяющий выполнить обработку больших объемов информации [12]. Матрицы факторных нагрузок рассчитаны методом главных факторов. Установлено, что большая часть суммарной дисперсии (изменчивости) экологических параметров может быть учтена четырьмя обобщенными факторами: Ф1 учитывает 60 % изменчивости параметров и интерпретирован как фактор теплообеспеченности, Ф2 – 13 % изменчивости параметров и интерпретирован как фактор континентальности климата, Ф3 – 10 % суммарной дисперсии и интерпретирован как гипсометрический фактор, обобщенный фактор Ф4 – 4 % суммарной дисперсии параметров и интерпретирован как гидрологический фактор. В данной работе рассмотрены возможности анализа обобщенных факторов Ф1 и Ф2, описывающих около 73 % суммарной дисперсии.

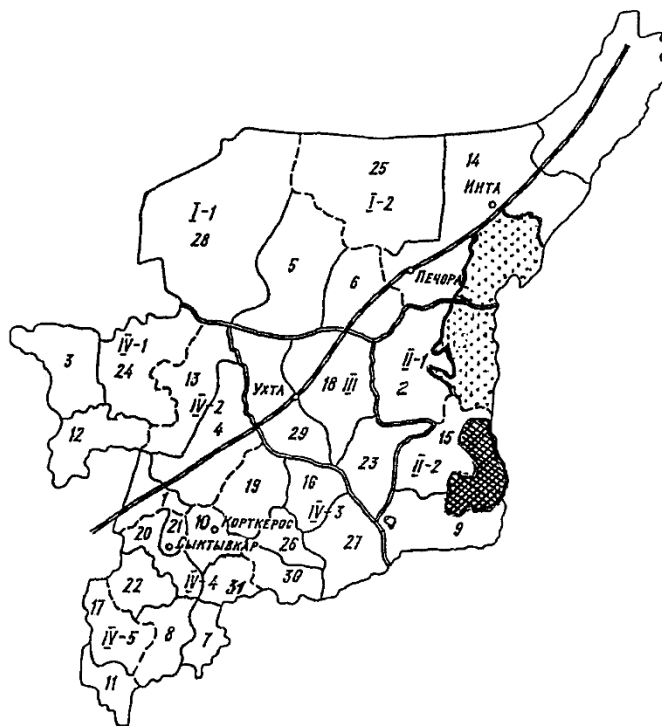


В соответствии со схемой распределения учетных единиц (лесничеств) в факторном пространстве Ф1 и Ф2 территория Республики Коми была разделена на районы, характеризующиеся общностью входящих в него лесничеств по совокупности анализируемых экологических параметров. В результате выделено 4 лесорастительных района, в их границах – 7 подрайонов.

Лесоэкономическое районирование имеет другие принципы и масштабы деления территории. Тем не менее объединение подходов лесорастительного и лесоэкономического районирования оправдано и служит цели разграничения территории региона на однородные по лесорастительным и экономическим условиям районы. Лесоэкономическое районирование было выполнено с учетом характеристики лесосечного фонда, степени развития производства лесного комплекса, тяготения района к путям транспорта и др. Территория республики была разделена на 8 лесоэкономических районов [8].

На основе лесорастительного и лесоэкономического районирования разработана схема эколого-экономического районирования с разделением территории республики на 4 района и 9 подрайонов (рис. 1).

Рис. 1. Схема эколого-экономического районирования Республики Коми: I–IV – номера районов; I-1...IV-4 – номера подрайонов; 1–31 – номера лесничеств (1 – Айкинское, 2 – Вуктыльское, 3 – Ертмовское, 4 – Железнодорожное, 5 – Ижемское, 6 – Каджеромское, 7 – Кажимское, 8 – Койгородское, 9 – Комсомольское, 10 – Корткеросское, 11 – Летское, 12 – Междуреченское, 13 – Мещурское, 14 – Печорское, 15 – Печоро-Ильчское, 16 – Помоздинское, 17 – Прилузское, 18 – Сосногорское, 19 – Сторожевское, 20 – Сыктывдинское, 21 – Сыктывкарское, 22 – Сысольское,



23 – Троицко-Печорское, 24 – Удорское, 25 – Усинское, 26 – Усть-Куломское, 27 – Усть-Немское, 28 – Усть-Цилемское, 29 – Ухтинское, 30 – Пруптское, 31 – Локчимское); ———— – границы районов; - - - - - границы подрайонов; ———— – границы лесничеств; ▨ – территория национального парка «Югид ва»; ▩ – территория Печоро-Ильчского заповедника

Согласно имеющемуся опыту разработки зонально-типологических систем ведения лесного хозяйства, на основе учета специфики физико-географических условий и требований охраны природы в пределах эколого-экономических районов выделены следующие системы лесохозяйственных мероприятий. В Северном эколого-экономическом районе на равнинной местности рекомендована притундровая защитная, а в предгорных и горных районах Урала – горная и предгорная защитная система. В Восточно-Приуральском эколого-экономическом районе в предгорных и горных районах – горная и предгорная защитная, на остальной территории – северо- и среднетаежная защитно-эксплуатационная система. В Центральном эколого-экономическом районе – северо- и среднетаежная эксплуатационно-защитная система. В Косланском подрайоне Юго-Западного эколого-экономического района – северо- и среднетаежная эксплуатационно-лесовосстановительная (репродуктивная), в Летско-Лузском подрайоне – южнотаежная лесовосстановительно-эксплуатационная, а в остальных подрайонах Юго-Западного эколого-экономического района – среднетаежная эксплуатационно-лесовосстановительная. Подразделение таежной системы на северо-, средне- и южно-таежные варианты с различным удельным весом эксплуатационной, защитной и лесовосстановительной компоненты выполнено на основе учета зонального (широтного) положения районов и близости их к Уралу. Кратко остановимся на основных положениях предложенных лесоводственных систем.

*Притундровая защитная система.* Притундровые леса отнесены к защитным. В этих условиях в отдельных случаях могут быть разрешены выборочные рубки, если это не противоречит режиму охраны территории. При ведении хозяйства основное внимание следует уделить естественному возобновлению путем сохранения подроста, создания условий для его постоянного накопления. В районах с развитым оленеводством на участках в стадии облесения, а также в лесных культурах и молодняках до 15–20-летнего возраста выпас оленей должен быть запрещен. Притундровые леса перспективны с точки зрения организации туризма, охоты, рыбной ловли. При соблюдении определенных правил эти виды деятельности экологически чисты и экономически выгодны. В то же время освоение территорий, связанное с разведкой, добычей и транспортировкой полезных ископаемых, может в данных условиях привести к загрязнению вод и почв, уничтожению растительного покрова, естественных условий обитания ценных видов животных и рыб. Техногенные воздействия в данных условиях должны сопровождаться программами рекультивации и иметь надежный механизм реализации этих программ. Таким образом, повышение комплексной продуктивности притундровых лесов заключается в максимальном использовании их защитных, климаторегулирующих и средообразующих свойств, всемерном содействии возобновлению леса, развитию экологически чистых видов пользования, прежде всего осуществления рекреационной деятельности.

*Горная и предгорная защитная система.* Учитывая относительно слабую освоенность горных и предгорных лесов, их важную средообразующую,

почвозащитную, водоохранную и противозерозионную роль, такие территории следует рассматривать как резервный экологический фонд, исключить из хозяйственного освоения, а в случае использования строго руководствоваться правилами рубок и лесовосстановления в горных лесах. Комплекс лесомелиоративных мероприятий, входящих в данную защитную систему, может включать противозерозионную организацию территории, профилактические и активные меры борьбы со смывом и размывом почв. Повышение комплексной продуктивности горных и предгорных лесов в районе наряду с проведением лесохозяйственных мероприятий может быть достигнуто обеспечением условий для нормального функционирования охраняемых территорий, прежде всего Печоро-Илычского государственного биосферного заповедника и национального парка «Югыд ва», а также реализацией системы мероприятий, направленных на сохранение естественных условий для размножения печорской семги. Необходимо отметить, что самые крупные по площади современные массивы девственных лесов на всем Европейском Севере сосредоточены в рассматриваемых районах Республики Коми. Учитывая их уникальность, в 1995 г. по решению ЮНЕСКО Печоро-Илычский государственный биосферный заповедник с буферной зоной и национальный парк «Югыд ва» с охранной зоной были включены в перечень объектов Всемирного культурного и природного наследия под общим названием «Девственные леса Коми». Это подчеркивает важность соблюдения требований защитной компоненты в структуре данной лесоводственной системы.

*Таежная эксплуатационная система.* Таежная эксплуатационная система во всех районах и подрайонах должна ориентировать на комплексное, непрерывное и неистощительное лесопользование. Повышение комплексной продуктивности лесов при реализации положений этой системы достигается сочетанием таких мероприятий, как рубки для заготовки древесины, естественное и искусственное лесовосстановление, уход в молодняках и лесных культурах, коммерческие рубки ухода, генетико-селекционные мероприятия, формирование оптимального состава и строения древостоев, охрана лесов от пожаров, защита от болезней и вредителей, выборочное и научно обоснованное применение химической, лесной и гидротехнических мелиораций. На части площадей в южных районах для интенсификации лесовосстановительных работ могут быть рекомендованы элементы плантационного лесоводства.

Общеизвестны оздоровительные свойства лесной среды, однако воспользоваться ими инорайонным жителям России и зарубежным посетителям создаются возможности лишь при надлежащей организации рекреационного хозяйства в республике и в первую очередь транспортной сети. Нужно учесть, что большое значение для северных регионов имеют различные формы зимнего спорта, которые немыслимы без соответствующей инфраструктуры. Немалые доходы в республиканский бюджет могут приносить лицензионные виды охоты и рыболовства. В лесах республики обитают виды зверей и птиц, которые могут представлять интерес для любителей охоты: бурый медведь (численность осо-

бей 3...4 тыс.), лось (до 16 тыс.), речная выдра, глухарь, повсеместно распространен волк. В реках возможен лицензионный лов атлантического лосося, хариуса и других ценных промысловых рыб. Однако охотничьих и рыболовных хозяйств, баз отдыха, оборудованных на современном уровне, в республике недостаточно. В определенной степени в связи с этим объем допустимой годовой добычи охотничьих ресурсов не выбирается ни по одному виду. Так, в 2011 г. при лимите добычи лосося в количестве 387 особей выдано 310 разрешений, добыто 225 особей. Лимит на добычу медведя составлял 315 особей, выдано 106 разрешений, добыто 37 особей. На глухаря выдано около 7 000 разрешений, добыто около 1 000 особей. В 2011 г. добыто 22 волка. Разрешенный объем вылова семги (325 кг) для любителей-рыболовов освоен только на 46 % [6].

Первоочередной задачей в деле рекреационного освоения территории Республики Коми является разработка Комплексной предпроектной и предплановой программы, в которой должна быть отражена государственная политика в сфере рекреации. Предварительно необходимо осуществить инвентаризацию наиболее ценных объектов природного и культурного наследия республиканского и федерального уровней и разработать мероприятия по их охране. Результатом этих работ должен явиться Рекреационный кадастр Республики Коми. Предварительно уже сейчас могут быть выделены 4 основных рекреационных района:

1) Вычегодско-Мезенский район – равнинная часть юга и юго-запада республики. Развитие рекреации в этом районе ориентировано в основном на внутренний спрос;

2) Тиманский район – возвышенная (до 470 м) со слабо выраженным рельефом территория, занятая Тиманским кряжем, в северной и южной частях ориентирована в основном для внешних рекреантов;

3) Печорский район – расположен северо-восточнее Тиманского кряжа, рекреационной осью которого является р. Печора с системой ее притоков, перспективно развитие водного туризма, охоты, рыболовства;

4) Уральский район – горный район, расположенный в восточной части республики вдоль Уральского хребта, наиболее перспективен в рекреационном отношении, имеется немало историко-культурных памятников; наиболее привлекательный для иностранных рекреантов регион в плане организации спортивного и природо-познавательного туризма.

Н.М. Большаковым [5] разработана Комплексная схема развития рекреационной структуры Республики Коми на 2000–2050 гг., которая представлена на рис. 2.

Предлагаемая рекреационная структура Республики Коми может обеспечить в перспективе ежегодную емкость рекреантов до 400...500 тыс. чел. Таким образом, рекреационный потенциал республики очень высок, он включает уникальные природные и историко-культурные элементы. Лесной покров и сравнительно низкая антропогенная нагрузка обеспечивают высокую экологическую чистоту региона, спрос на которую уже сейчас не могут обеспечить многие районы России и Европы в целом.

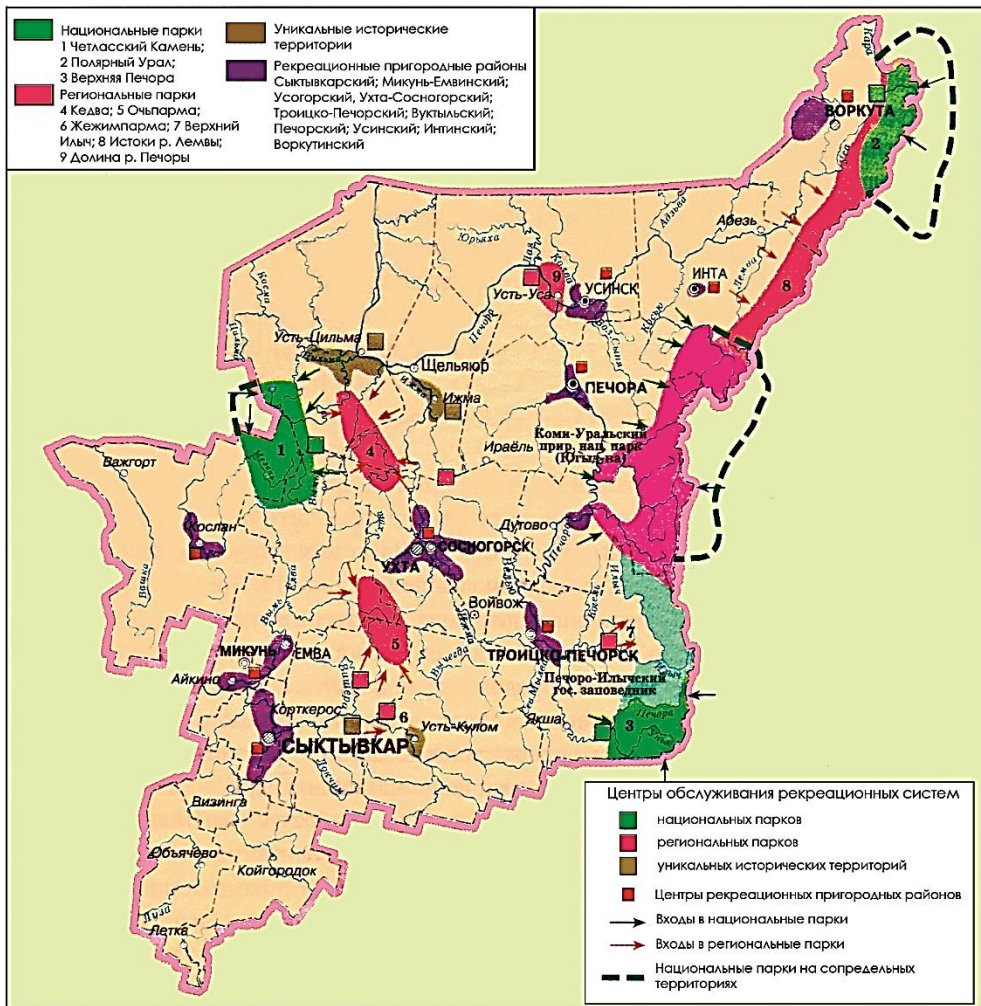


Рис. 2. Схема лесных рекреационных территорий в Республике Коми

Распределение по территории, состояние и производительность лесных экосистем в значительной степени определяются климатическими условиями. В связи с тем, что именно для северных территорий изменение климата может иметь особое значение, актуально изучение этих процессов для Европейского Севера в целом и слагающих его регионов, в частности Республики Коми. Вопрос о возможности глобального изменения климата обсуждается с конца прошлого столетия. По мнению авторов, наиболее вероятно повышение средней температуры воздуха на 3...5 °С и увеличение количества осадков на 7...16 %. Предполагается, что в Канаде и Скандинавии северная граница бореальных лесов может переместиться на север на расстояние до 700 км [13]. Предпосылки

к этому имеются и в Республике Коми. Анализируя климатические характеристики, авторы «Атласа Республики Коми по климату и гидрологии» [2] приходят к выводу, что в период с 1935 г. по 1990 г. здесь наблюдалось повышение средней годовой температуры воздуха. Сравнение средней годовой температуры по данным 1964 [1] и 1997 гг. [2] также согласуется с этим выводом. При этом наибольшее потепление произошло в северных районах, в крайних южных температура практически не изменилась.

По данным 1964 г. [1] годовое количество осадков в Республике Коми составляло более 400 мм, на Тимане – более 600 мм, на Урале – до 1 000 мм. Для 1997 г. сумма осадков убывает с севера на юг от 700 до 550 мм, на Тимане она увеличивается до 750...800 мм, на Урале достигает 1500 мм и более [2], т. е. количество осадков за рассматриваемый период существенно увеличилось. Видимо, с этим может быть связано отмеченное выше увеличение площади нелесных земель в республике, представленных болотами.

Известно, что прирост древесины зависит от комплекса взаимосвязанных климатических и эдафических характеристик. Учитывая это, считаем целесообразным оценить зависимость прироста не от конкретных климатических показателей, а от обобщенных факторов, методика определения и принципы интерпретации которых рассматривались выше в связи с лесорастительным районированием. Установлено, что большая часть суммарной дисперсии параметров (средняя температура в отдельные летние месяцы, продолжительность периодов со среднесуточной температурой более 5 °С и более 10 °С, суммы температур, суммы осадков, продолжительность безморозного периода, испарение с суши, гидротермический коэффициент) может быть учтена обобщенными факторами Ф1 и Ф2. Первый учитывает 77...75 % суммарной дисперсии климатических характеристик и интерпретирован как обобщенный фактор теплообеспеченности, второй учитывает 14...17 % суммарной дисперсии параметров, отражающих статьи прихода влаги или рассчитанных с использованием сумм осадков (гидротермический коэффициент), и интерпретирован в данном случае как обобщенный фактор влагообеспеченности.

Ф1 и Ф2 были использованы для выравнивания среднего прироста в лесхозах Республики Коми по состоянию на 1961 г. [9] и в лесничествах по состоянию на 2008 г. [10]. В результате установлено, что зависимость среднего прироста от обобщенных факторов Ф1 и Ф2 может быть описана уравнениями множественной регрессии по состоянию на 1961 г.

$$Y_1 = 0,989 + 0,123\Phi_1 + 0,060\Phi_2 \quad (R = 0,97; R^2 = 0,94); \quad (1)$$

и на 2008 г.

$$Y_2 = 1,232 + 0,205\Phi_1 + 0,016\Phi_2 \quad (R = 0,91; R^2 = 0,82), \quad (2)$$

где  $Y_1$  и  $Y_2$  – средний прирост в лесхозах и лесничествах Республики Коми соответственно в 1961 и 2008 г., м<sup>3</sup>/га в год;

$\Phi_1$ ,  $\Phi_2$  – обобщенные факторы.

По уравнениям (1), (2) рассчитали средний прирост в лесхозах (1961 г.) и лесничествах республики Коми (2008 г.). Приросты в Корткеросском участковом лесничестве Корткеросского лесничества и Сыктывкарском лесничестве, равные в 1961 и 2008 гг. соответственно 1,29 и 1,69 м<sup>3</sup>/га в год, приняли за 1,0, приросты в других лесничествах выразили в долях от 1,0, определив таким образом коэффициенты относительной продуктивности для лесничеств.

Установлено, что средняя величина коэффициентов в 1961 и 2008 гг. отличается незначительно (0,77 и 0,73). В то же время наблюдается значительное увеличение абсолютных значений среднего прироста в лесничествах Республики Коми. Так, если в 1961 г. средний прирост в целом для республики составлял 0,99 м<sup>3</sup>/га в год, то по последним оценкам лесоустройства в 2008 г. – 1,23 м<sup>3</sup>/га в год. Анализ конфигурации линий одинакового прироста показывает, что прирост уменьшается при движении с юга на север и от западных границ Республики Коми к Уральскому хребту. Это указывает на важность не только широтного (зонального), но и провинциального подразделения территории. Для условий Республики Коми изменение направления линий одинакового прироста в значительной степени связано с влиянием горного Урала. В юго-западной части территории широтное направление линий меняется на направление вдоль главного водораздела Уральского хребта. Сгущение линий на западном макросклоне Урала, наиболее высокие части которого характеризуются арктическими условиями, является отражением вертикальной зональности.

Согласно уравнениям (1), (2), обобщенные факторы Ф1 и Ф2 объясняют значительную часть изменчивости среднего прироста в республике. Это свидетельствует о существенном вкладе климатических показателей в динамику прироста. В то же время дополнительного изучения заслуживает вопрос количественной оценки соотношения вкладов в изменение прироста собственно климата, лесохозяйственной деятельности и изменения структуры лесопользования. Видимо, целесообразны специальные исследования, на основании которых возможно принятие решения о коррекции объемов лесохозяйственных работ в отдельных лесничествах и методов оценки эффективности этих работ, учитывающие климатические изменения. Известно, что еще в конце прошлого века в Финляндии были разработаны модели, позволяющие прогнозировать изменение продуктивности лесов в связи с ожидаемым изменением климата, даны соответствующие рекомендации по коррекции программ рубок ухода, охраны лесов от энтомовредителей, грибных заболеваний и т. д. [14]. Учет климатических изменений целесообразен как в северных районах, где происходит перемещение северной границы леса, так и в южных районах республики, для которых характерно наиболее значительное абсолютное увеличение прироста.

В заключение можно отметить, что таежные леса в восточных районах Европейского Севера выполняют важные биосферные и экологические функции. Они являются огромным резервуаром для стока углерода, обеспечивают сохранение биоразнообразия на видовом, экосистемном и ландшафтном уровнях,

длительный период являются источником древесины и других видов лесных ресурсов, что определяет их значение для экономики региона. Современные лесные массивы темнохвойной тайги в Республике Коми – это наиболее древние коренные леса на Европейском Севере. Признанием этого является их включение в перечень объектов Всемирного культурного и природного наследия. Рационализация использования лесных ресурсов и улучшение лесов возможно на основе региональных лесоводственных систем, базирующихся на лесорастительном, эколого-экономическом и рекреационном районировании. Результаты исследований позволяют определить наиболее перспективные пути развития интенсификации лесопользования и расширенного воспроизводства лесов, выделить эколого-экономические районы, где будут преобладать экологически чистые виды лесопользования, в том числе осуществление рекреационной деятельности и природоохранных мероприятий. В эколого-экономических районах с эксплуатационной направленностью предложено сочетание рубок для заготовки древесины, рубок ухода, мероприятий по повышению производительности леса, плантационное лесовыращивание. В регионе около половины территории занимают тундровые и болотные фитоценозы. В условиях изменения климата необходимо учитывать их взаимодействие с лесными сообществами в целях планирования пространственного размещения лесохозяйственных мероприятий и коррекции методов оценки их эффективности.

В механизме устойчивого лесопользования в условиях изменения климата главным является сопряжение разнообразных сил природы, интересов различных социальных слоев населения, снятие угроз, связанных с нарастающей сменой лесообразующих пород и усыханием еловых насаждений. Учитывая большое экологическое, экономическое и социальное значение бореальных лесов Европейского Севера, необходимо подготовить предложения об участии России в международном проекте «Соглашение по лесам Европы» (МКП – Forest-3) в деле повышения вклада лесов в смягчение последствий изменения климата.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Коми АССР. М.: ГУГК ГТК СССР, 1964. 112 с.
2. Атлас Республики Коми по климату и гидрологии. М.: Дрофа: Дизайн. Информация. Картография, 1997. 116 с.
3. Бобкова К.С. Бюджет углерода в лесных экосистемах европейского северо-востока // Резервуары и потоки углерода в лесных и болотных экосистемах бореальной зоны: материалы междунар. науч. конф. Сыктывкар: Коми НЦ РАН, 2011. С. 16–17.
4. Бобкова К.С., Перчаткин П.А., Свойкин В.Ф. Древесные ресурсы // Лесное хозяйство и лесные ресурсы Республики Коми / Под ред. Г.М. Козубова, А.И. Таскаева. М.: Дрофа: Дизайн. Информация. Картография, 2000. С. 331–367.
5. Большаков Н.М. Новый подход к лесопользованию // Лесн. журн. 2000. № 4. С. 133–139. (Изв. высш. учеб. заведений).



6. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Республики Коми в 2011 году» / М-во природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми, ГБУРК «ГФИ РК». Сыктывкар, 2012. 188 с.

7. Жиделева В.В., Большаков Н.М., Гурьева Л.А., Левина И.В., Землянички Ю.В. Организационно-правовые и экономические аспекты развития сети лесных дорог // Развитие сети лесных дорог и операционное планирование лесозаготовок = Forest roads network development and forest operational planning: учеб. пособие / Под общ. ред. В.Я. Ларионова. Сыктывкар: Сыкт. лесн. ин-т, 2010. С. 36–50.

8. Лес Коми ССР. 1991–1995 гг. : хоздоговорная НИР ХД-48-91 (промежут. отчет за 1991 г.). Сыктывкар, 1991. 88 с.

9. Леса и лесная промышленность Коми АССР. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1961. 395 с.

10. Лесной план Республики Коми. Приложение 1. Показатели лесов, расположенных на землях лесного фонда и землях иных категорий, распределение их площади по лесным регионам Кн. 2. Вологда: Комитет лесов Республики Коми, 2008. С. 1–2.

11. Козубов Г.М., Мартыненко В.А., Дегтева С.В., Галенко Э.П., Забоева И.В. Лесорастительное районирование Республики Коми // Лесное хозяйство и лесные ресурсы Республики Коми / Под ред. Г.М. Козубова, А.И. Таскаева. М.: Дрофа: Дизайн. Информация. Картография, 1999. С. 257–287.

12. Пахучий В.В. Эколого-экономические основы организации лесного хозяйства в Республике Коми // Проблемы комплексного использования и воспроизводства лесных ресурсов в Республике Коми. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1993. С. 13–27.

13. Andrasko K. Global warming and forests: an overview of current knowledge // Unasylva. 1990. Vol. 41 (163). P. 3–11.

Поступила 24.05.13

UDC 630\*6:630\*111 (470.13)

### **Ecological and Economical Basis of Forest Management in the Eastern Regions of the Russian European North Under the Conditions of Climate Changes**

*N.M. Bolshakov, Doctor of Economic Sciences, Professor*

*V.V. Zhideleva, Doctor of Economic Sciences, Professor*

*V.V. Pakhuchiy, Doctor of Agriculture, Professor*

Syktvykar Forest Institute, Branch of Saint-Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Lenina, 39, Syktvykar, Komi Republic, 167982, Russia; e-mail: institut@sfi.komi.com

The main issue in research of conservation mechanism of northern taiga (boreal) forests under the conditions of climate change is a study of relations between natural sources, interests of different levels of society, condition and productivity of forest ecosystems, improvement of the situation dealing with the increasing changes of dominating conifers to hardwood species and drying of spruce stands. Variety of forest growth conditions and difference in productivity of boreal forests indicate practicability of forest-growth and forest-economical zoning use. Its aim is making a natural-historical basis for regional systems of forest management development. A factor analysis method is used as a basis for the territory division. The total amount of the used parameters – is 51, which includes 28 characteristics of an ecotope, which is the system «climatope – edaphotope»: state of atmosphere, water

balance of the territory, soil conditions, and valuation indicators of forest stands. Forestry is considered as an inventory item. Matrixes of factor loading are calculated by means of the key factors method. Four forest growth zones are defined as a result, with seven sub zones within the boundaries. Forest-economical zoning is made taking into account the forest fund characteristics, levels of timber industry development, transport lines accessibility, etc. The territory of the Komi republic was divided into eight zones. Based on a synthesis of forest-growth and forest-economical zoning the scheme of the eco-economical zoning with the division of the territory into four zones and nine sub zones was developed. Within the boundaries of eco-economical zones the systems of forestry activities are made: tundra protective, mountainous and piedmont protective, taiga exploitative. Four main recreational zones are defined: Vychegda-Mezen, Timan, Pechora, and Ural. According to the authors' calculations, the recreational structure of the Komi republic can provide an annual capacity of recreators about 400–500 thousand people. Conditions and productivity of forest ecosystems were estimated by the amount of annual timber growth depending on unified factors dated in 1961 in forest farms and in 2008 in forestry. Methodology of definition and principles of interpretations were made while forest-growth zoning. It's known that dependence of annual growth from the unified factors F1 (heat supply) and F2 (climate continentality) can be presented by multiple regression equation ( $R_1 = 0,97$ ;  $R_2 = 0,91$ ). According to the equations the average increment in forest farms (1961) and forestry (2008) is calculated. The increments in Kortkeros and Syktyvkar forestries in 1961 and 2008, are equal in accordance 1,29 and 1,69 m<sup>3</sup>/ha per year, are taken as 1.0, but increments in other forestries were expressed in shares, by estimating the index of relative productivity for forestry. It is established that an average increment in the republic in general in 1961 was 0,99 m<sup>3</sup>/ha per year, and in 2008 – 1,23 m<sup>3</sup>/ha. The increment is decreasing from the south to the north and from the western boundaries to the Ural range. This testifies to the importance of not only latitudinal (zonal), but also provincial territory division. Researches testify to a considerable contribution of the climate indicators into the increment dynamics. However, quantitative estimation of contributions into the climate change, forest management activities and changes of forest use structure are worth of the additional research. Climate changes consideration is appropriate in the northern regions where there is a transfer of the northern forest boundary, as well as in the southern regions of the republic with a more significant representative absolute increment.

*Keywords:* nord taiga (boreal) forests, forest resources, timber exploitation, eco-economic regions, silvicultural systems, recreation, climate changing.

#### REFERENCES

1. *Atlas Komi ASSR* [Atlas of Komi ASSR]. Moscow, 1964. 112 p.
2. *Atlas Respubliki Komi po klimatu i gidrologii* [Atlas of Komi Republic on the Climate and Hydrology]. Moscow, 1997. 116 p.
3. Bobkova K.S. Byudzhët ugleroda v lesnykh ekosistemakh evropeyskogo severovostoka [Carbon Budget in the Forest Ecosystems of European North-East]. *Rezervuary i potoki ugleroda v lesnykh i bolotnykh ekosistemakh boreal'noy zony: mater. mezhdunar. nauch. konf.* [Carbon Holder and Streaming in the Forest and Helobious Ecosystems of Boreal Zone: Int. Sci. Conf. Proc.]. Syktyvkar, 2011, pp. 16–17.
4. Bobkova K.S., Perchatkin P.A., Svoykin V.F. Drevesnye resursy [Woody Resources]. *Lesnoe khozyaystvo i lesnye resursy Respubliki Komi* [Forestry and Forest Resources of Komi Republic]. Moscow, 2000, pp. 331–367.

5. Bol'shakov N.M. Novyy podkhod k lesopol'zovaniyu [New Approach to Forest Management]. *Lesnoy zhurnal*, 2009, no. 4, pp. 133–139.

6. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii okruzhayushchey sredy Respubliki Komi v 2011 godu» [State Report «About Environment Condition of Komi Republic in 2011»]. Syktyvkar, 2012. 188 p.

7. Zhideleva V.V. Organizatsionno-pravovye i ekonomicheskie aspekty razvitiya seti lesnykh dorog [Institutional and Economical Aspects of Forest Road Development]. *Razvitie seti lesnykh dorog i operatsionnoe planirovanie lesozagotovok* [Forest Roads Network Development and Forest Operational Planning]. Syktyvkar, 2010, pp. 36–50.

8. KhD-48-91 Les Komi SSR. 1991–1995 gg. [Contractual Work-48-91. Forest of Komi SSR in 1991–1995]. Syktyvkar, 1991. 88 p.

9. Lesa i lesnaya promyshlennost' Komi ASSR [Forests and Forest Industry of Komi ASSR]. Moscow, 1961. 395 p.

10. Pokazateli lesov, raspolozhennykh na zemlyakh lesnogo fonda i zemlyakh inykh kategoriy, raspredelenie ikh ploshchadi po lesnym regionam [Forest Indicators, Situated in Forest Fund Zones and Other Categories Zones, Their Distribution on Forest Regions]. *Lesnoy plan Respubliki Komi* [Plan of Forests in Komi Republic]. Vologda, 2008, vol. 2, pp. 1–2.9.

11. Kozubov G.M. Lesorastitel'noe rayonirovaniye Respubliki Komi [Forest Plant Zoning in Komi Republic]. *Lesnoe khozyaystvo i lesnye resursy Respubliki Komi* [Forestry and Forest Resources of Komi Republic]. Moscow, 1999, pp. 257–287.

12. Pakhuchiy V.V. Ekologo-ekonomicheskie osnovy organizatsii lesnogo khozyaystva v Respublike Komi [Ecology-Economical Bases of Forestry Organisation in Komi Republic]. *Problemy kompleksnogo ispol'zhttp://vk.com/id305651374ovaniya i vosproizvodstva lesnykh resursov v Respublike Komi* [Problems of Complex Use and Reproduction of Forest Resources in Komi Republic]. Syktyvkar, 1993, pp. 13–27.

13. Andrasko K. *Global Warming and Forests: an Overview of Current Knowledge*. Unasylva, 1990, vol. 41 (163), pp. 3–11.

Received on May 24, 2013

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.77

УДК 630\*536

**ХАРАКТЕРИСТИКА ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПРОЕКЦИИ КРОН ДЕРЕВЬЕВ ЧЕРЕМУХИ МААКА В Г. ЕКАТЕРИНБУРГЕ**© *Л.И. Аткина, д-р с.-х. наук, проф.**У.А. Сафронова, канд. с.-х. наук, ст. преп.*

Уральский государственный лесотехнический университет, Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: Atkina@mail.ru

Жизненное состояние и декоративные качества деревьев черемухи Маака на объектах озеленения г. Екатеринбурга сильно варьируют в зависимости от локальных факторов, действующих на конкретную посадку. Для оптимизации пространственной структуры существующих посадок и правильного проектирования новых необходимы точные данные об особенностях формирования кроны используемых видов растений. В целях изучения потребностей деревьев черемухи Маака в свободном пространстве для нормального развития кроны были поставлены следующие задачи: зафиксировать линейные размеры кроны в различных направлениях; выяснить, какое влияние на развитие отдельных частей кроны оказывает их экспозиция и взаимодействие с соседними растениями; определить площади горизонтальных проекций кроны обследованных деревьев; установить расстояние между деревьями, не нарушающее их жизнеспособности. В ходе исследования были измерены по восьми направлениям радиусы проекций кроны деревьев черемухи Маака в возрасте от 30 до 50 лет в групповых посадках. По каждому направлению для дерева отмечались факторы, влияющие на развитие кроны с данной стороны и расстояние до фактора. Выборка была рассортирована по «свободным» и «ограниченным» условиям развития для определения степени деформации кроны обследованных деревьев в направлении свободного пространства и в тех направлениях, где происходит взаимодействие с кронами соседних растений. Среднестатистическая горизонтальная проекция кроны деревьев черемуха Маака, достигших полного развития в условиях групповых посадок на территории г. Екатеринбурга, имеет форму практически правильной окружности радиусом  $3,5 \pm 0,06$  м. В направлении пространственного ограничения этот показатель уменьшается на 21,2 % относительно среднего по всей совокупности измерений и составляет  $2,8 \pm 0,07$  м. В направлении открытого пространства происходит разрастание части кроны, средний радиус увеличивается на 26,5 % относительно среднего по всей совокупности измерений и составляет  $4,5 \pm 0,07$  м. Учитывая, что средний шаг посадки деревьев черемухи Маака в условиях групповых посадок г. Екатеринбурга достаточно велик, около 5,1 м, полученные отклонения можно считать нормой. Зависимости между экспозицией разных частей кроны по странам света и степенью их развития не установлено. Средняя площадь горизонтальной проекции кроны деревьев черемуха Маака, достигших полного развития кроны в условиях групповых посадок, составляет около  $40 \text{ м}^2$ .

*Ключевые слова:* черемуха Маака, проекция кроны, деформация кроны, свободные и ограниченные условия развития.

### *Введение*

После 60-х годов прошлого века в озеленении г. Екатеринбурга широкое распространение получил декоративный и зимостойкий интродуцент с Дальнего Востока – черемуха Маака (*Padus maackii* (Rupr.) Kom.) [5]. Исследования последних лет подтверждают, что деревья данного вида успешно выполняют санитарно-гигиенические и декоративные функции как во дворах, так и на магистральных улицах города [3]. Благодаря высокой устойчивости к условиям городской среды [7], способности адаптироваться к экстремальным факторам, быстрому росту и высоким декоративным качествам черемуха Маака считается очень перспективным интродуцентом для создания быстрого декоративного эффекта средствами озеленения [6]. Однако, являясь светолюбивой породой, чувствительной к затенению, даже в полутени она теряет свою декоративность. Этот вид не рекомендуется для создания загущенных посадок [1]. Наблюдения предыдущих лет показали, что в Екатеринбурге облик деревьев исследуемого вида и характер их роста напрямую зависит от условий освещения и густоты насаждений [2], жизненное состояние растений определяется локальными факторами, действующими на конкретную посадку [3]. Ухудшение санитарного состояния в большинстве случаев вызвано нарушением правил посадки при создании объекта [4].

Чтобы иметь возможность оптимизировать пространственную структуру существующих посадок и не допускать ошибок при проектировании новых объектов озеленения, необходимо иметь точные данные об особенностях формирования кроны используемых видов растений в условиях озеленяемого района.

### *Цель и задачи*

В целях изучения потребностей деревьев черемухи Маака в свободном пространстве для нормального развития крон было проведено исследование формы и размеров горизонтальной проекции крон деревьев данного вида в групповых посадках на территории г. Екатеринбурга, в ходе которого были поставлены следующие задачи: зафиксировать линейные размеры крон деревьев черемухи Маака в различных направлениях (по сторонам света); выяснить, какое влияние на развитие отдельных частей крон оказывает их экспозиция и взаимодействие с соседними растениями; определить площади горизонтальных проекций крон обследованных деревьев; установить расстояние между деревьями, не нарушающее их жизнеспособности.

### *Объекты и методы*

Для исследования были подобраны чистые по составу и смешанные групповые посадки с участием черемухи Маака в возрасте от 30 до 50 лет, расположенные на достаточном удалении от проезжей части и других экстремальных факторов, которые могли бы оказать определяющее влияние на развитие крон. В общей сложности было обследовано 90 взрослых (достигших полного развития кроны в условиях взаимодействия с другими растениями)

деревьев, в различном санитарном состоянии (от 1 до 3 баллов по стандартной шкале). Для точного определения санитарного состояния растений и границ крон (пока они с листьями) измерения произведены в августе–сентябре.

Радиусы проекции кроны измеряли по восьми направлениям, начиная с северного, с помощью лазерной рулетки (точность до 0,1 м). Край кроны определяли по верхушкам нескольких живых ветвей. В каждом из 8 направлений для дерева фиксировали радиус горизонтальной проекции кроны, фактор, влияющий на развитие кроны с данной стороны (наличие соседнего дерева, проезжей части, стен домов и т.п.), расстояние до фактора. Дополнительно для каждого дерева измеряли диаметр ствола на высоте 1,3 м, высоту и возраст, отмечали санитарное состояние.

Для каждого обследованного дерева черемухи Маака рассчитывали площадь горизонтальной проекции кроны несколькими способами: как площадь круга, радиус которого равен среднему радиусу для дерева; как сумму площадей треугольников, образованных радиусами по каждому из 8 направлений, и соединяющими их хордами; как сумму площадей секторов круга по всем измеренным радиусам кроны.

#### *Результаты*

Предварительный анализ собранных данных средствами Microsoft Excel показал, что полученное выборочное распределение значений радиусов крон черемухи Маака подчиняется закону нормального распределения. Чтобы сравнить развитие крон обследованных деревьев в направлении свободного пространства и в тех направлениях, где происходит взаимодействие с соседними растениями, общая выборка была рассортирована по «свободным» и «ограниченным» условиям развития. Для проверки гипотезы о равенстве дисперсий выборок по свободным и ограниченным условиям развития крон был использован двухвыборочный F-тест для дисперсии, результаты которого показали, что дисперсии не равны. Проверка гипотезы о равенстве средних значений радиуса с помощью двухвыборочного t-теста с различными дисперсиями установила, что выборки отдельно по свободным и ограниченным направлениям крон достоверно отличаются друг от друга и от общей совокупности. Средние показатели радиусов крон по всем деревьям и направлениям приведены в табл. 1.

Все деревья, обследованные в ходе выполнения данной работы, произрастают в групповых посадках. Их кроны развивались во взаимодействии с другими деревьями, в результате чего они так или иначе деформированы, формы их проекций отличаются от круга. Таким образом, средний радиус по всей совокупности измерений соответствует радиусу проекции кроны некоторого усредненного дерева, развившегося в групповой посадке в условиях взаимодействия с соседними растениями, и составляет  $3,5 \pm 0,06$  м.

Таблица 1

**Статистические показатели радиусов горизонтальных проекций крон  
всех измеренных деревьев**

Параметр	По условиям развития ветвей		По всей выборке
	Свободные	Ограниченные	
Число измерений	320	400	720
Среднее арифметическое (с ошибкой среднего), м	4,5±0,07	2,8±0,07	3,5±0,06
Дисперсия	1,64	1,78	2,42
Среднее квадратичное отклонение, м <sup>2</sup>	1,28	1,34	1,55
Коэффициент вариации V, %	28,8	48,2	44,2
Точность опыта p, %	1,61	2,41	1,65

Средний радиус по «свободным» условиям развития кроны соответствует среднему радиусу сегмента кроны деформированного дерева в сторону ее разрастания (сегмент «+»). Он равен 4,5±0,07 м и превышает средний радиус по всей совокупности измерений на 26,5 %.

Средний радиус по направлениям, где происходит взаимодействие с соседними деревьями, характеризует средний радиус сегмента кроны деформированного дерева со стороны угнетения ее роста (сегмент «-») и составляет 2,8±0,07 м. Отклонение среднего радиуса взаимодействующих сегментов от среднего по всей совокупности измерений составляет 21,2 %.

Среднее расстояние между стволами деревьев черемухи Маака и соседствующих с ними растений по всем обследованным групповым посадкам 5,1 м.

Кроме непосредственных воздействий со стороны соседних деревьев и различных объектов, существенное влияние на развитие крон черемухи Маака оказывают условия инсоляции, которые определяются экспозицией каждой конкретной части растения в определенное время суток. Чтобы установить различия в развитии крон черемухи Маака в зависимости от ориентации по сторонам света, средние значения радиусов проекций крон по каждому из направлений были сведены в табл. 2 и сопоставлены с долевым участием ограниченных условий развития крон.

Из табл. 2 видно, что отклонение средних показателей радиуса горизонтальной проекции крон обследованных деревьев по странам света от среднего по всей выборке во всех случаях не превышает статистической погрешности. Следовательно, степень развития отдельных частей кроны деревьев черемухи Маака не зависит от их экспозиции. Коэффициент корреляции между средними значениями радиусов крон по странам света и долевым участием ограниченных условий развития по каждому направлению составил -0,38, что свидетельствует о наличии слабой отрицательной корреляции между этими показателями.

Таблица 2

**Статистическая характеристика радиусов горизонтальных проекций  
крон черемухи Маака**

Параметр	По направлениям измерений*								По всей выборке
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
Среднее арифметическое, м	3,56	3,61	3,59	3,56	3,64	3,43	3,38	3,39	3,52
Коэффициент вариации V, %	44,3	41,4	45,5	44,8	41,7	41,4	47,8	47,1	44,15
Ошибка среднего <i>m</i> , м	0,17	0,16	0,17	0,17	0,16	0,15	0,17	0,17	0,06
Точность опыта <i>p</i> , %	4,7	4,4	4,8	4,7	4,4	4,4	5,0	5,0	1,65
Абсолютное отклонение, м	0,04	0,09	0,07	0,04	0,12	-0,09	-0,14	-0,13	-
Относительное отклонение, %	1,3	2,5	2,1	1,1	3,5	-2,6	-3,9	-3,8	-
Доля ограниченного расположения, %	51,1	54,4	45,6	61,1	57,8	55,6	64,4	54,4	55,56

\*N – северное, NE – северо-восточное, E – восточное, SE – юго-восточное, S – южное, SW – юго-западное, W – западное, NW – северо-западное.

Как следует из табл. 2, развитие крон черемухи Маака, произрастающих в групповых посадках, в среднем в 55,6 % случаев происходит в условиях непосредственного взаимодействия с другими деревьями. Таким образом, около половины периметра кроны среднестатистического дерева черемухи Маака в групповых посадках г. Екатеринбурга испытывает непосредственное воздействие со стороны соседних растений.

Площадь горизонтальной проекции кроны среднестатистического дерева черемухи Маака, рассчитанная как площадь круга радиусом 3,5 м (средний радиус по всей совокупности обследованных деревьев) составляет 38,5 м<sup>2</sup>. Средние значения площади горизонтальных проекций крон всех обследованных деревьев, рассчитанные разными способами, приведены в табл. 3.

Очевидно, что площадь горизонтальной проекции кроны дерева, рассчитанная как сумма площадей секторов круга, превышает реальные показатели (поскольку круг при минимальном периметре имеет максимальную площадь). Площадь, рассчитанная как сумма площадей треугольников, образованных радиусами по каждому из направлений, и соединяющими их хордами,



Таблица 3

**Статистические показатели площадей горизонтальных проекций крон  
всех измеренных деревьев**

Параметр	Способ расчета площади горизонтальной проекции кроны одного дерева		
	по среднему радиусу	по сумме секторов круга	по сумме треугольников
Среднее арифметическое, м <sup>2</sup>	40,0±1,5	45,9±1,7	38,3±1,4
Дисперсия	219,8	268,5	184,8
Среднее квадратичное отклонение, м <sup>2</sup>	14,8	16,4	13,6
Коэффициент вариации V, %	37,1	35,7	35,5
Ошибка среднего <i>m</i> , м <sup>2</sup>	1,5	1,7	1,4
Точность опыта <i>p</i> , %	3,8	3,7	3,7

в некоторых случаях может быть меньше реального показателя. Чем больше будет число измеряемых радиусов и, следовательно, количество треугольников, на которые разбивается горизонтальная проекция кроны, тем точнее сумма их площадей будет характеризовать реальную площадь проекции кроны. Но на практике многократное измерение радиусов горизонтальной проекции кроны для каждого обследуемого дерева занимает много времени.

*Выводы*

1. Среднестатистическая горизонтальная проекция крон деревьев черемуха Маака, достигших полного развития в условиях групповых посадок на территории г. Екатеринбурга, имеет форму практически правильной окружности радиусом 3,5±0,06 м. В направлении пространственного ограничения этот показатель уменьшается на 21,2 % относительно среднего по всей совокупности измерений и составляет 2,8±0,07 м. В направлении открытого пространства происходит разрастание части кроны, и средний радиус увеличивается на 26,5 % относительно среднего по всей совокупности измерений и составляет 4,5±0,07 м. Учитывая, что средний шаг посадки деревьев черемухи Маака в условиях групповых посадок г. Екатеринбурга достаточно велик, около 5,1 м, полученные отклонения можно считать нормой.

2. Зависимости между экспозицией разных частей кроны по странам света и степени их развития не установлено.

3. Средняя площадь горизонтальной проекции крон деревьев черемуха Маака, достигших полного развития кроны в условиях групповых посадок на территории г. Екатеринбурга, составляет около 40 м<sup>2</sup>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов Е.С., Аксенова Н.А. Декоративные садовые растения // Энциклопедия природы России. Изд. 2-е, испр. М.: АБФ/АВФ, 2000. 560 с.

2. Сафронова У.А., Аткина Л.И. Комплексная характеристика деревьев черемухи Маака в юго-западной части г. Екатеринбурга // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: Материалы V Всерос. научн.-техн. конф. Ч. 2. Екатеринбург: УГЛТУ, 2009. С. 130–133.

3. Сафронова У.А., Аткина Л.И. Опыт использования черемухи Маака (*Padus Maackii* Kom.) в озеленении магистральных улиц г. Екатеринбурга // Фитодизайн в современных условиях: материалы межд. конф. Белгород: БелГУ, 2010. С. 45–49.

4. Сафронова У.А. Динамика изменения санитарного состояния черемухи Маака (*Padus Maackii* Kom) в озеленительных посадках г. Екатеринбурга // Ландшафтная архитектура и садово-парковое строительство: современные тенденции: материалы межд. конф. 3–4 сент. 2010 г. Воронеж: ВГЛТА, 2010. Т. 2. С. 68.

5. Семкина Л.А., Макарова О.Б., Яковлева С.В. Состояние зеленых насаждений в г. Свердловске и на некоторых промышленных предприятиях // Экология и интродукция растений на Урале: сб. науч. тр. Свердловск: УрО РАН СССР, 1991. С. 81–93.

6. Скупченко Л.А., Мишуров В.П., Волкова Г.А., Портнягина Н.В. Интродукция полезных растений в подзоне средней тайги Республики Коми // Итоги работы Ботанического сада за 50 лет. Т. 3. СПб.: Наука, 2003. 214 с.

7. Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М., Козик Е.В. Оценка состояния городской среды методом фитоиндикации (на примере г. Красноярск) // Лесн. журн. 2011. № 4. С. 29–32. (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 15.05.13

UDC 630\*536

### **Characteristic of the Shape and Size of the Horizontal Crown Projection of Cherry Maak (*Padus Maackii* Rupr Kom) in Yekaterinburg**

*L.I. Atkina, Doctor of Agriculture, Professor*

*U.A. Safronova, Candidate of Agriculture, Senior Lecturer*

Ural State Forest Engineering University, Sibirskiy trakt, 37, Ekaterinburg, 620100, Russia; e-mail: Atkina@mail.ru

Vital status and decorative qualities of cherry Maak (*Padus Maackii* Rupr Kom) trees at the plantings of greenery of Yekaterinburg vary widely depending on local factors affected on a particular planting. Accurate data about the peculiarities of the crown formation of the used plant species are necessary for optimizing the spatial patterns of existing plantings and for the proper design of new plantings. The following tasks were performed in order to study the needs of cherry Maak trees in free space for normal development of the crown: to fix the linear dimensions of the crown in different directions; to find out what is the impact on the development of individual parts of the crown caused by their exposure and interaction with neighboring plants; to determine the areas of the horizontal crown projections of the surveyed trees; to determine the distance between trees that does not violate their viability. The radiuses of the crown projections of cherry Maak trees in age from 30 to 50 years in group plantings were measured during the study. For a tree for each direction were noted the factors affecting on the development of the crown from this side, and the distance to the factor. The selection was sorted by “free” and “limited” conditions of development to determine the degree of deformation of the crown of the surveyed trees in the direction of free space and in the directions where there is an interaction with the crowns of neighboring plants. The average horizontal crown projection of the of the trees under full development in the conditions

of group plantings of greenery in Yekaterinburg has a shape of almost an exact circle of radius  $3,5 \pm 0,06$  m. This indicator decreased by 21,2 % compared to the average for the entire set of measurements and is  $2,8 \pm 0,07$  meters in the direction of the space limitations. The expansion of the crown takes place in the direction of open space and the average radius increased by 26,5 % compared to the average for the entire set of measurements and it is  $4,5 \pm 0,07$  m. Considering that the average planting step of cherry Maak trees in terms of group plantings in the city of Yekaterinburg is large enough, approximately 5,1 m, the obtained deviations can be considered as the norm. The dependence between exposition of different parts of the crown on light side and the degree of their development was not installed. The average area of the horizontal crown projection of the cherry Maak trees under full development of the crown in terms of group plantings in the city of Yekaterinburg is about 40 m.

*Keywords:* cherry Maak, crown projection, crown deformation, free and limited conditions of development.

#### REFERENCES

1. Aksenov E.S., Aksenova N.A. *Dekorativnye sadovye rasteniya: derevya i kustarniki* [Ornamental Garden Plants: Trees and Shrubs]. Moscow, 2000, vol. 1. 560 p.
2. Safronova U.A., Atkina L.I. Kompleksnaya kharakteristika derev'ev cheremukhi Maaka v yugo-zapadnoy chasti g. Ekaterinburga [Comprehensive Characterization of Cherry Maak Trees in the Southwestern Part of Yekaterinburg]. *Nauchnoe tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii* [Scientific Creativity of Youth – for Russian Forest Sector]. Ekaterinburg, 2009, pp. 130–133.
3. Safronova U.A., Atkina L.I. Opyt ispol'zovaniya cheremukhi Maaka (Padus Maackii Kom.) v ozelenenii magistral'nykh ulits g. Ekaterinburga [Experience of Cherry Maak (Padus Maackii Rupr Kom) Using in the Greening of Main Streets of Yekaterinburg]. *Fitodizayn v sovremennykh usloviyakh* [Fitodesign in Modern Conditions]. Belgorod, 2010, pp. 45–49.
4. Safronova U.A. Dinamika izmeneniya sanitarnogo sostoyaniya cheremukhi Maaka (Padus Maackii Kom) v ozelenitel'nykh posadkakh g. Ekaterinburga [Dynamics of Changes in the Sanitary Condition of Cherry Maak (Padus Maackii Rupr Kom) in the Greenery Planting of Yekaterinburg]. *Landshafnaya arkhitektura i sadovo-parkovoe stroitel'stvo: sovremennye tendentsii* [Landscape Architecture and Landscape Construction: current trends]. Voronezh, 2010, vol. 2. 68 p.
5. Semkina L.A., Makarova O.B., Yakovleva S.V. Sostoyanie zelenykh nasazhdeniy v g. Sverdlovsk i na nekotorykh promyshlennykh predpriyatiyakh [Status of Green Plantings in Sverdlovsk and in Certain Industrial Facilities] *Ekologiya i introduktsiya rasteniy na Urale* [Ecology and Introduction of Plants in the Urals]. Sverdlovsk, 1991, pp. 81–93.
6. Skupchenko L. A. *Introduktsiya poleznykh rasteniy v podzone sredney taygi Respubliki Komi: Itogi raboty Botanicheskogo sada za 50 let* [Introduction of Useful Plants in the Middle Taiga Subzone of the Komi Republic: Results of the Botanical Garden for 50 Years]. St. Petersburg, 2003, vol. 3. 214 p.
7. Suntsova L. N., Inshakov E. M., Kozik E.V. Otsenka sostoyaniya gorodskoy sredy metodom fitoindikatsii (na primere g. Krasnoyarska) [Assessment of Urban Environment State by Phytoindication Method (based on example of Krasnoyarsk)]. *Lesnoy zhurnal*, 2011, no. 4, pp. 29–32.

Received on May 15, 2013

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.92

УДК 630\*27

**ВЛИЯНИЕ РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ  
НА СОСТОЯНИЕ ДРЕВЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ  
ЛЕСОПАРКА «ДРУЖБА» (г. ВЛАДИМИР)**

© *Е.Ф. Некипелова<sup>1</sup>, асп.*

*В.В. Петрик<sup>1</sup>, д-р с.-х. наук*

*Ю.И. Поташева<sup>1</sup>, канд. с.-х. наук, доц.*

*А.Г. Куприянова<sup>2</sup>, канд. с.-х. наук, доц.*

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002;

e-mail: katerina\_nekipelova@mail.ru; v.petrik@narfu.ru; y-potashева@yandex.ru.

<sup>2</sup>С.-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер, д. 5, г. С.-Петербург, Россия, 194021; e-mail: aleksa.ku@mail.ru

Зеленые насаждения – неотъемлемая часть градостроительной структуры города и важнейшая часть ее экологического каркаса. Они входят в систему жизнеобеспечения как важнейшие средообразующие и средозащитные факторы, обеспечивающие комфортность и качество среды обитания человека, и обязательный элемент городского ландшафта. Любое вмешательство в природу, рекреационная деятельность людей в лесопарках имеют как положительные, так и отрицательные стороны. При рекреационном использовании лесопарков возникают неблагоприятные природные изменения, которые могут оказаться опасными для продолжения естественного развития природных компонентов. Изучен характер и степень влияния рекреационной нагрузки на состояние древесных насаждений в лесопарке «Дружба» г. Владимира. Исследования проведены по общепринятым лесоводственно-таксационным методам с измерением основных таксационных показателей. Изучены также санитарное состояние древостоя и его декоративные качества. Установлено, что в зависимости от степени рекреации происходят следующие количественные и качественные изменения фитоценозов лесопарка: наибольшей рекреационной нагрузке подвергаются такие типы леса, как дубняк волосистоосоково-снытевый, дубняк волосистоосоковый, дубняк лещиново-снытевый; средний диаметр древостоя на площадях с высокой степенью воздействия уменьшается по сравнению с эталонным объектом, подверженным минимальной рекреационной нагрузке; количественный показатель деревьев на 1 га территории в рекреационных насаждениях низкой степени воздействия в 2 раза выше, чем на высокорекреацируемых площадях.

*Ключевые слова:* лесопарки, рекреационная нагрузка, древостой, санитарное состояние, таксационная характеристика.

Лесные насаждения, являются важной составной частью пригородных зон, оказывают благотворное влияние на человека, создавая благоприятную для него среду [8]. Лес, как огромный фильтр, очищает воздух от пыли и различных аэрозолей, перерабатывает углекислый газ, пополняет запасы кислорода, выделяет летучие вещества – фитонциды, подавляющие болезнетворные микробы. Лесные массивы, расположенные вблизи городов, служат местами отдыха населения [1].

Лесопарки, являясь одним из представителей благоустроенных лесных массивов, получили в настоящее время самое широкое распространение [3, 6]. В архитектурно-планировочном решении городской среды – это один из основных элементов зеленых и пригородных зон, обеспечивающий комфортность и качество среды обитания человека [11].

В связи со стремительно возрастающими темпами урбанизации, сильное воздействие рекреации приводит к ухудшению состояния древостоев пригородных лесов [10]. Характер и степень этого влияния были рассмотрены на примере лесопарка «Дружба» г. Владимира.

Лесопарк «Дружба» общей площадью 267,1 га, расположенный на юго-западной окраине г. Владимира, между автомагистралью Москва–Уфа и железной дорогой Москва–Нижний Новгород, является частью некогда обширного Ямского леса, протянувшегося от Сосенок до устья р. Колокши [7].

В прошлом эта территория представляла собой сосново-еловый тип лесных насаждений с липовым подлеском и не осваивалась вплоть до середины XIX в. В настоящее время в составе насаждений преобладают широколиственные (липа, дуб, клен) и мелколиственные (осина) породы естественного происхождения, доля хвойных (сосна, ель) незначительна [4]. Это объясняется тем, что во время Великой Отечественной войны большая часть древостоев сосны и ели была вырублена для строительства землянок и заготовки дров.

Основные растительные сообщества лесопарка: дубняки волосистоосоково-снытевый, лещиново-снытевый, волосистоосоковый, широколиственный; липняки волосистоосоково-снытевый, волосистоосоковый, снытевый, елово-широколиственный; сосняк костянично-разнотравный; осинник широколиственный.

Главные лесообразующие породы – дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) и липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.). Также повсеместно произрастают клен остролиственный (*Acer platanoides* L.), ель обыкновенная (*Picea abies* L.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), осина (*Populus tremula* L.), береза повислая (*Betula pendula* Roth.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), черемуха обыкновенная (*Prunus padus* L.).

Кустарниковая растительность представлена лещиной обыкновенной (*Corylus avellana* L.), бересклетом бородавчатым (*Euonymus verrucosus* Scop.), смородиной обыкновенной (*Ribes nigrum* L.), волчегодником обыкновенным (*Daphne mezereum* L.), а также кустарничками костяники каменистой (*Rubus saxatilis* L.) и земляники лесной (*Fragaria vesca* L.).

На территории лесопарка произрастает около 90 лесных и опушечных травянистых растений. Основной полог образуют: осока волосистая (*Carex pilosa* Scop.), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), купырь лесной (*Anthriscus silvestris* L.). Кроме того, встречаются: вороний глаз (*Paris quadrifolia* L.), герань лесная (*Geranium sylvaticum* L.), кислица обыкновенная (*Oxalis acetosella* L.), копытень европейский (*Asarum europaeum* L.), майник двулистный (*Maianthemum bifolium* L.), тимopheевка луговая (*Phleum pratense* L.), чина весенняя (*Lathyrus vernalis* L.), луговик дернистый (*Deschampsia cespitosa* L.),

ястребинка волосистая (*Hieracium pilosella* L.), ландыш майский (*Convallaria majalis* L.) и др.

Во время исследований территория лесопарка была условно разделена в зависимости от степени рекреационной нагрузки на пробные площади, которые соответствуют следующим группам (ОСТ 56-100–95).

1. Фитоценозы, испытывающие наивысшую интенсивность рекреации: вытопанные участки составляют более 60 %, изрезаны сплошной сетью дорожек и тропинок, напочвенный покров полностью отсутствует, повсеместно наличие необорудованных мест отдыха и последствий рекреации в виде свалок бытовых отходов, кострищ.

2. Фитоценозы с высокой интенсивностью рекреации: вытопанные участки составляют от 45 до 60 %, изрезаны достаточно плотной дорожно-тропиночной сетью, напочвенный покров либо полностью отсутствует, либо представлен мозаично, большое количество неорганизованных мест отдыха, кострищ, свалок бытовых отходов.

3. Фитоценозы со средней интенсивностью рекреации: вытопанные участки составляют 30...45 % и в основном связаны с пересечением дорожек и тропинок между собой, мест рекреации с кострищами существенно меньше.

4. Фитоценозы, испытывающие низкую рекреационную нагрузку, вытопанные участки составляют 15...30 %; дорожно-тропиночная сеть имеет минимальную густоту, кострища, как и необорудованные места отдыха, практически отсутствуют.

5. Фитоценозы, в которых рекреационная нагрузка со стороны деятельности человека либо полностью отсутствует, либо незначительна, вытопанные участки составляют менее 15 % [5]; эти фитоценозы данной группы приняты контрольными (эталон).

Во время первого полевого сезона в разных частях парка были заложены 10 пробных площадей (ПП), которые подбирали путем визуальной оценки территории лесопарка в зависимости от типа леса и степени интенсивности рекреационного воздействия, описанного выше. Использовались временные ПП с измерением на них всех таксационных показателей. Учитывались также санитарное состояние древостоя и его декоративные качества. Для определения категории состояния древостоя в зависимости от рекреационной нагрузки применяли шкалу, принятую в Санитарных правилах... [9]. Для оценки декоративности использовали методику В.И. Ерохиной, Г.П. Жеребцовой, Т.И. Вольф-труб [2].

На выбранных пробных площадях (ПП №1 – 3), соответствующих 1-й группе рекреационной нагрузки, произрастают чистые и смешанные по составу древостои. Преобладают дубовые насаждения с примесью таких пород, как клен остролистный, липа мелколистная, береза повислая. Насаждения высокополнотные, их средняя полнота – 0,90 (табл. 1).

Таблица 1

## Таксационная характеристика древостоя

№ ПП	Тип леса*	Состав	Средние		Относительная полнота
			высота, м	диаметр, см	
<i>Наивысшая рекреационная нагрузка</i>					
1	Дубняк лещиново- снытевый	10Д ед. Кл, Б	22,3 ± 0,49	21,1 ± 0,74	0,93
2	Дубняк лещиново- снытевый	4Д 3Лп 2Кл 1Б	22,1 ± 0,90	25,6 ± 1,16	0,87
3	Дубняк волоси- стоосоково- снытевый	10Д ед. Кл, Лп	21,9 ± 0,44	28,0 ± 0,89	1,37
<i>Высокая рекреационная нагрузка</i>					
4	Дубняк волоси- стоосоково- снытевый	7Д 2Лп 1Б ед. Кл	20,8 ± 0,54	26,8 ± 0,87	1,32
5	Дубняк волоси- стоосоковый	7Д 3Ос	22,3 ± 0,43	27,2 ± 0,77	1,36
<i>Средняя рекреационная нагрузка</i>					
9	Сосняк костянично- разнотравный	6С 2Лп 1Б 1Ос ед. Д + Кл	22,8 ± 0,41	39,1 ± 1,44	1,08
10	Осинник широкотравный	5Ос 2Е 1Лп 1Д 1Кл + Б	24,8 ± 0,46	35,2 ± 1,47	1,22
<i>Низкая рекреационная нагрузка</i>					
12	Липняк волосистоосоко- вый	10Лп + Ос	20,6 ± 0,47	30,4 ± 0,46	0,88
13	Дубняк широкотравный	10Д	19,4 ± 0,21	34,5 ± 0,19	0,55
<i>Минимальная рекреационная нагрузка</i>					
11	Липняк елово- широкотравный	7Лп 2Д 1Е + Кл, Б	27,8 ± 0,59	29,6 ± 0,88	1,12

\*Типы леса приведены в соответствии с классификацией Л.П. Рысина (1969 г.).

Средний показатель санитарного состояния древостоя варьируется от 2,4 до 2,8 балла и характеризует древостой как сильно ослабленный. Декоративность деревьев в основном средняя, большую часть составляют деревья 2-го класса (табл. 2).

Таблица 2

**Санитарное состояние древостоя и его декоративность  
в зависимости от степени рекреационной нагрузки**

№ ПП	Порода	Количество деревьев, шт.	Санитарное состояние *	Оценка декоративности **
			Среднее значение	
<i>Наивысшая рекреационная нагрузка</i>				
1	Дуб черешчатый	79	2,4	2,6
	Клен остролистный	2	1,0	1,0
	Береза повислая	4	1,0	2,0
2	Дуб черешчатый	50	2,8	2,9
	Клен остролистный	22	1,2	2,1
	Липа мелколистная	22	1,9	2,4
	Береза повислая	5	4,0	3,4
3	Дуб черешчатый	86	2,8	2,5
	Клен остролистный	12	1,2	1,2
	Липа мелколистная	7	1,0	1,0
<i>Высокая рекреационная нагрузка</i>				
4	Дуб черешчатый	68	3,3	2,9
	Клен остролистный	10	1,0	1,1
	Липа мелколистная	18	1,6	1,3
	Береза повислая	4	2,3	1,5
5	Дуб черешчатый	71	2,5	2,6
	Осина	30	1,6	1,5
<i>Средняя рекреационная нагрузка</i>				
9	Сосна обыкновенная	34	1,7	1,9
	Клен остролистный	17	2,2	2,4
	Липа мелколистная	26	2,3	2,3
	Береза повислая	6	1,3	2,3
	Осина	16	1,8	2,8
	Дуб черешчатый	1	6,0	4,0
10	Дуб черешчатый	4	3,8	3,5
	Клен остролистный	25	1,1	1,2
	Липа мелколистная	8	1,4	1,6
	Береза повислая	2	1,0	1,5
	Ель обыкновенная	19	3,3	3,2
	Осина	42	2,1	2,1
<i>Низкая рекреационная нагрузка</i>				
12	Липа мелколистная	95	2,1	1,9
	Осина	5	4,0	4,0
13	Дуб черешчатый	100	1,8	2,0



Окончание табл. 2

№ ПП	Порода	Количество деревьев, шт.	Санитарное состояние*	Оценка декоративности**
			Среднее значение	
<i>Минимальная рекреационная нагрузка</i>				
11	Липа мелколистная	70	2,1	1,7
	Клен остролистный	8	1,4	2,3
	Ель обыкновенная	11	4,0	1,0
	Береза повислая	1	2,0	2,2
	Дуб черешчатый	10	1,8	1,2

\*1 – без признаков ослабления; 2 – ослабленные; 3 – сильно ослабленные; 4 – усыхающие; 5 – сухостой текущего года; 6 – сухостой прошлых лет [9]. \*\*1 – растения, отличающиеся хорошим развитием и формой кроны, оригинальностью ее строения, яркой и сочной окраской листьев и цветков, благоприятным эмоциональным воздействием; 2 – растения, сохранившие свой габитус, имеющие хорошо сформированный ствол и ветви кроны; 3 – растения с заметным угнетением в росте и развитии, крона и ствол деформированы, имеются сухие ветви и побеги, ствол поврежден (морозобоины, дупла); 4 – растения сильно угнетенные, ветви отмирают на 60...70 %, крона сильно деформирована, ствол сильно поврежден, растения не могут восстановить свою жизнедеятельность и должны быть удалены [2].

Подрост представлен в большей степени кленом остролистным, его состояние оценивается как удовлетворительное. Подрост дуба черешчатого, как основной породы практически полностью отсутствует, экземпляры, единично произрастающие на территории, по санитарному состоянию оцениваются как нежизнеспособные.

Состав подлеска: рябина обыкновенная, лещина обыкновенная, бересклет бородавчатый, черемуха обыкновенная. Состояние его оценивается как удовлетворительное, так как с раннего возраста подлесок подвержен воздействию вредителей.

Живой напочвенный покров на данных участках полностью отсутствует.

Пробные площади, соответствующие 2-й группе, представлены смешанными по составу древостоями с преобладанием дуба черешчатого в качестве главной породы и присутствием липы мелколистной, осины, березы повислой, клена остролистного в качестве сопутствующих пород (ПП № 4 и 5). Средняя полнота насаждений – 1,37.

Как и на объектах с наивысшей рекреационной нагрузкой, средний показатель санитарного состояния древостоя составляет 2,5...3,3 балла, что свидетельствует об ослабленности произрастающих на данных территориях деревьев. Декоративные качества деревьев относятся к 3-му классу, что говорит об их низкой декоративности.

Состав подлеска представлен 4 видами: лещина обыкновенная, черемуха обыкновенная, бересклет бородавчатый, рябина обыкновенная. Густота – 6,4 тыс. шт./га, из них 4,9 тыс. шт./га (78 %) приходится на долю лещины.

Подрост основных пород дуба черешчатого, клена остролистного, липы мелколистной очень мелкий и относится к угнетенному.

Живой напочвенный покров представлен 10 видами, среди которых наиболее распространены копытень европейский, сныть обыкновенная, в качестве единичных экземпляров можно встретить костянику каменистую, вороний глаз и чину весеннюю.

К фитоценозам со средней интенсивностью рекреации относятся смешанные по составу древостои, представленные сосняком костянично-разнотравным, осинником широколиственным (ПП №9 и 10). Данные насаждения можно отнести в высокополнотным, так как средняя полнота составляет 1,1.

Средний показатель санитарного состояния древостоя колеблется в пределах 1,7...2,1 балла, что свидетельствует о снижении рекреационной нагрузки. Декоративность исследуемых объектов также повышается (от 1,8 до 2,1 балла).

В подлеске произрастают бересклет бородавчатый, смородина обыкновенная, лещина обыкновенная, волчегонник обыкновенный, черемуха обыкновенная с густотой около 27,5 тыс. шт./га.

Подрост сосны как лесообразующей породы полностью отсутствует, подрост клена и липы представлен обильно. Количество подроста клена достигает 41,2 тыс. шт./га.

Живой напочвенный покров достаточно разнообразен, наиболее часто встречаемые виды (купырь лесной, копытень европейский, осока волосистая) составляют соответственно 29,1; 30,1 и 8,1 % от общего количества видов, произрастающих на данной территории.

Исследуемые пробные площади, соответствующие низкой степени воздействия (ПП № 12 и № 13), представлены дубняком широколиственным с полнотой 0,55 и липняком волосистоосоковым с полнотой 0,88. Санитарное состояние древостоя в среднем составляет 1,8 балла. Его декоративные качества относятся ко 2-му классу.

В подлеске липняка произрастают лещина обыкновенная, бересклет бородавчатый и рябина обыкновенная с густотой 3,5 тыс. шт./га. Что касается дубового типа леса, то подлесок здесь практически отсутствует и его количество не превышает 1 тыс. шт./га.

Живой напочвенный покров очень разнообразен. В дубняке широколиственном произрастают следующие виды растений: чина весенняя, ромашка лекарственная, осока волосистая, кислица обыкновенная, ландыш майский, сныть обыкновенная, герань лесная, купырь лесной и др.

В качестве контрольного (эталонного) объекта (ПП №11) был выбран липняк елово-широколиственный с полнотой 1,12, где рекреационная нагрузка либо полностью отсутствует, либо незначительна. Это в основном связано с достаточным удалением данного участка от городской застройки, наличием естественной преграды на местности в виде оврага, а также с отсутствием организованной дорожно-тропиночной сети. Средний показатель санитарного

состояния древостоя составляет 1,8 балла и характеризует хорошее состояние древостоя. Декоративность деревьев достаточно высокая (1- и 2-й класс).

Подрост представлен в большей степени кленом остролистным, елью обыкновенной и липой мелколистной, его состояние оценивается как хорошее.

Подлесок достаточно хорошо развит. В его составе рябина обыкновенная, лещина обыкновенная, бересклет бородавчатый, волчегонник обыкновенный. Подлесок произрастает в количестве 2,5 тыс. шт./га и по санитарному состоянию квалифицируется как жизнеспособный.

В травяном ярусе произрастают осока волосистая (*Carex pilosa* L.), подмаренник душистый (*Galium odoretum* (L.) Scop.), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.), ландыш майский (*Convallaria majalis* L.), копытень европейский (*Asarum europaeum* L.), пролесник многолетний (*Mercurialis perennis* L.), чина весенняя (*Lathyrus vernalis* L.), костяника каменистая (*Rubus saxatilis* L.), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.), майник двулистный (*Maianthemum bifolium* L.).

Анализ полученных данных показал, что наибольшей рекреационной нагрузке подвергаются такие типы леса, как дубняки волосистоосоково-снытевый, волосистоосоковый, дубняк лещиново-снытевый, волосистоосоково-снытевый, что обусловлено удобным расположением данных насаждений вблизи городской застройки (табл. 3).

Таблица 3

#### Влияние рекреационной нагрузки на дуб черешчатый

Рекреационная нагрузка	Густота подроста шт./га	Доля сухостоя, %	Средний диаметр, см	Сомкнутость полога
Наивысшая	572	11,8	24,9	1,12
Высокая	833	9,0	27,0	1,34
Средняя	1000	5,5	37,2	1,15
Низкая	816	4,0	32,4	0,71
Минимальная	1100	3,0	29,6	1,12

Наименьшая рекреационная нагрузка отмечена на участках, расположенных в значительной удаленности от населенного пункта. Здесь состояние древостоев значительно лучше по всем показателям.

Отмечено снижение среднего диаметра дуба черешчатого на площадях с высокой степенью воздействия по сравнению с эталонным объектом, подверженным минимальной рекреационной нагрузке. Количественный показатель деревьев на 1 га территории в рекреационных насаждениях низкой степени воздействия в 2 раза выше, чем на высокорекреацируемых площадях, доля сухостоя увеличивается от 3,0 до 11,8 %.

Все эти показатели свидетельствуют о значительном изменении общего состояния древостоев с повышением рекреационной нагрузки.

*Выводы*

1. С уменьшением рекреационной нагрузки в составе древостоя увеличивается доля хвойных (сосна и ель) по отношению к лиственным (липа, дуб, клен, осина). На площадях с наивысшей и высокой степенями рекреационной нагрузки хвойные насаждения полностью отсутствуют. Их доля с понижением нагрузки возрастает от средней до минимальной (от 26,5 до 29,0 %).

2. С увеличением рекреационной нагрузки общее санитарное состояние древостоя ухудшается (от 1,8 до 2,7 балла), декоративность снижается (от 1,2 до 2,6 балла).

3. Возрастает количество деревьев, подверженных воздействию болезней и вредителей (20,6 % на пробных площадях с наивысшей степенью рекреации по сравнению с 5,3 % с минимальной степенью рекреации).

4. На площадях с наиболее интенсивным воздействием (ПП № 1 – 5) доля сухостоя на 8,8 % выше, чем на площадях с минимальной рекреацией (ПП № 11 – 13).

5. Чрезмерная рекреационная нагрузка приводит к деградации не только основного древостоя и ухудшению состояния подроста (в фитоценозах с наивысшей нагрузкой подрост основных пород полностью отсутствует), но и к увеличению количества подроста сопутствующих пород от 1,1 до 6,4 тыс. шт./га.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Актуальные проблемы охраны природы: межвуз. сб. Иваново: Ивановский гос. ун-т, 1977. 131 с.
2. *Ерохина В.И., Жеребцова Г.П., Вольфтруб Т.И.* Озеленение населенных мест: справ. М.: Стройиздат. 1987. 480 с.
3. *Игнатенко М.М., Гаврилов Г.М., Карнов Л.Н.* Лесопарки Ленинграда. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1980. 192 с.
4. Особо охраняемые природные территории и объекты Владимирской области и сопредельных регионов: материалы I межрегион. науч.-практ. конф. «Мониторинг и сохранение особо ценных природных территорий и объектов Владимирской области и сопредельных регионов», Владимир, 25-26 нояб. 2011 г. Владимир: ООО «Гамма-Принт». 190 с.
5. ОСТ 56-100-95. Методы и единицы измерения рекреационных нагрузок на лесные природные комплексы. Утв. приказом Рослесхоза № 114 от 20 июля 1995 г.
6. *Пряхин В.Д., Николаенко В.Т.* Пригородные леса. М.: Лесн. пром-сть, 1981. 248 с.
7. *Романов В.В.* Ландшафты Владимирской области: учеб. пособие в 2 ч. Ч. 1. Ландшафты Смоленско-Московской провинции. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2008. 56 с.
8. *Рысин Л.П.* Сложные боры Подмосковья. М.: Наука, 1969. 107 с.
9. Санитарные правила в лесах Российской Федерации (Приказ Рослесхоза № 10 от 15.01.1998). М.: Минюст РФ 1998. 29 с.

10. Смертин В.Н., Грязькин А.В. Особенности парцеллярной структуры фитоценозов в условиях интенсивной рекреации // Лесн. журн. 2008. № 5. С. 43–51. (Изв. высш. учеб. заведений).

11. Травникова Г.И. Организация территории лесопарка: метод. пособие к выполнению курсовой работы. Архангельск: Изд-во САФУ, 2011. 36 с.

Поступила 13.02.2015

UDC 630\*27

### **Influence of Recreational Load on the State of Tree Plantations in Forest Park “Druzhba” in Vladimir**

*E.F. Nekipelova<sup>1</sup>, Postgraduate Student*

*V.V. Petrik<sup>1</sup>, Doctor of Agriculture*

*Y.I. Potasheva<sup>1</sup>, Candidate of Agriculture, Associate Professor*

*A.G. Kupriianova<sup>2</sup>, Candidate of Agriculture, Associate Professor*

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russia; e-mail: katerina\_nekipelova@mail.ru, v.petrik@narfu.ru, y-potasheva@yandex.ru

<sup>2</sup>St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, St. Petersburg, 194021, Russia; e-mail: aleksa.ku@mail.ru

Green plantations are an integral part of urban planning structure of the city and the most important part of its environmental framework. They enter in a life-support system of the city as the most important environment formation factors and environment protection to ensure comfort and quality of the human environment, and as a compulsory element of the urban landscape. Any interference with nature, human recreational activities in the forest parks have both positive and negative sides. When recreational use of parks emerge adverse environmental changes that can be dangerous to continue the natural development of natural components. The character and the degree of influence of recreational load on the state of tree plantations in the forest park "Druzhba" in Vladimir were studied. All studies were conducted according to generally accepted silvicultural - taxational techniques with the measurement of the main indicators of taxation. Also were studied the sanitary state of the stand and its decorative qualities. The studies found that, depending on the degree of recreation the following quantitative and qualitative changes of forest park phytocenoses take place, namely: to most recreational load are subjected these types of forests as *Quercetum caricoso (pilosae)-Aegopodium*, *Quercetum caricoso (pilosae)*, *Quercetum Corylus-Aegopodium*; value of the mean diameter of the squares with a high degree of exposure is reduced compared to the reference object, subjected to a minimum of recreational load; quantitative measure of trees per 1 ha of plantations in recreational low degree of exposure to 2-fold higher than high recreational areas.

*Keywords:* forest parks, recreational load, forest stand, sanitary state, taxational characteristics.

REFERENCES

1. *Aktual'nye problemy okhrany prirody* [Actual Problems of Nature Protection]. Ivanovo, 1977. 131 p.
2. Erokhina V.I., Zherebtsova G.P., Vol'frub T.I. *Ozelenenie naseleennykh mest* [Beautification of Inhabited Territories]. 1978. 480 p.
3. Ignatenko M.M., Gavrilov G.M., Karpov L.N. *Lesoparki Leningrada* [Leningrad Forest Parks]. Leningrad, 1980. 192 p.
4. Osobo okhranyaemye prirodnye territorii i ob"ekty Vladimirskoy oblasti i sopredel'nykh regionov [Extra Protected Areas and Objects of the Vladimir Region and Neighboring Regions]. *Materialy I Mezhhregional'noy nauchno–prakticheskoy konferentsii «Monitoring i sokhranenie osobo tsennykh prirodnykh territoriy i ob"ektov Vladimirskoy oblasti i sopredel'nykh regionov»* [Materials of the I Interregional Scientific and Practical Conference "Monitoring and Conservation of Valuable Natural Territories and Objects of the Vladimir Region and Neighboring Regions]. Vladimir, November 25–26, 2011.
5. *OST 56-100–95. Metody i edinitsy izmereniya rekreatsionnykh nagruzok na lesnye prirodnye komplekсы* [Industry Standart 56-100-95. Methods and Units of Recreational Pressure on Forest Natural Systems].
6. Pryakhin V.D., Nikolaenko V.T. *Prigorodnye lesa* [Suburban Forests]. Moscow, 1981. 248 p.
7. Romanov V.V. *Landshafty Vladimirskoy oblasti* [The Landscapes of the Vladimir Region]. Vladimir, 2008. 56 p.
8. Rysin L.P. *Slozhnye bory Podmoskov'ya* [Complex Forests of the Moscow Region]. Moscow, 1969. 107 p.
9. *Sanitarnye pravila v lesakh Rossiyskoy Federatsii* [Sanitary Rules in the Forests of the Russian Federation].
10. Smertin V.N., Gryaz'kin A.V. Osobennosti partsellyarnoy struktury fitotsenozov v usloviyakh intensivnoy rekreatsii [Features of Phytocoenosis Parceling Structure in Intensive Recreation]. *Lesnoy zhurnal*, 2008, no. 5, pp. 43–51.
11. Travnikova G.I. *Organizatsiya territorii lesoparka* [Organization of the Forest Park Territory]. Arkhangelsk, 2011. 36 p.

Received on February 13, 2015

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.100

---

УДК 630\*907.2

## ПРОБЛЕМЫ РЕКРЕАЦИОННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛЕСОВ ОПОЛЯ УКРАИНЫ

© *Л.И. Копий, д-р с.-х. наук, проф.*

*О.И. Дерех, асп.*

Национальный лесотехнический университет Украины, ул. Г. Чупринки, д. 103,  
г. Львов, Украина, 79057; e-mail: kop.l@mail.ru; olja-ozarkiv@rambler.ru

Рассмотрена роль рекреационных лесов Украины в эколого-экономическом аспекте лесохозяйственной деятельности человека. Показаны основные направления восстановления лесных рекреационных ресурсов и мероприятия, связанные с повышением уровня рекреационного эффекта. Рекреационная деятельность людей на лесные насаждения вызывает увеличение количества и площади механических повреждений деревьев; снижение поврежденного древостоя, что вызывает активизацию развития подроста и особенно подлеска; вытаптывание лесной подстилки; дигрессию поверхностного слоя почвы; изменения в таксономической структуре и количественном составе травяного покрова. Как следствие, в зоне среднего и, особенно, интенсивного воздействия рекреационной деятельности лесные экосистемы постепенно деградируют и трансформируются, что требует немедленных лесовосстановительных мероприятий. Цель исследований – изучение механического повреждения деревьев бука и дуба в зависимости от стадий рекреационной дигрессии лесных экосистем зеленой зоны г. Львова. Механически поврежденными считали деревья, которые имели рану на стволе до камбия, сломанные или срубленные ветки, выраженные признаки этих повреждений. Устанавливался процент этих повреждений по высоте. Доля поврежденных деревьев на стационарах с разной стадией дигрессии составляла 40...100 %. Существует прямая корреляционная связь между стадией дигрессии и площадью повреждений древостоев: с увеличением рекреационной нагрузки процент повреждения и площадь повреждений возрастают. Для сохранения дубовых и буковых насаждений рекреационной зеленой зоны г. Львова необходимо обустроить троповую и площадочную инфраструктуру отдыха и обеспечить регулирование рекреационной нагрузки в соответствии с действующими нормами. Это позволит не только стабилизировать экологическое равновесие лесных экосистем этой территории, но и улучшить их эстетическую привлекательность.

*Ключевые слова:* рекреационные леса, природный баланс, лесоиспользование, древостой, механические повреждения.

### *Постановка проблемы*

Лес – сложная экологическая система. Все его компоненты тесно взаимосвязаны между собой и с окружающей средой. Эти взаимосвязи производились и постепенно регулировались в течение длительного периода, поэтому они отличаются известной устойчивостью и сбалансированностью. Всякое пользование лесом, в том числе и рекреационное, существенно влияет на его компоненты.

Использование лесов для отдыха, так называемые рекреационные нагрузки, вызывают определенные изменения в состоянии и жизнедеятельности лесных экосистем. В лесах зеленой зоны городов наиболее распространены следующие виды рекреационных нагрузок: вытаптывания, механические повреждения, удаления, засорения, выжигания, разрушения почвенного и растительного покрова, его фрагментация, что приводит к нарушению природных потоков вещества, энергии и информации, трансформации природных экосистем, иногда их упрощению, снижению производительности и устойчивости, деградации и др. Именно поэтому большие площади лесов охватил процесс, получивший название рекреационная дигрессия.

Цель нашего исследования – изучение механического повреждения деревьев бука лесного и дуба обыкновенного в зависимости от стадий рекреационной дигрессии лесных экосистем зеленой зоны г. Львова и различных типов лесорастительных условий.

#### *Объекты и методика исследований*

Территория исследований расположена на юго-востоке от г. Львова и называется "Ополье", она относится к зеленой зоне города. Для исследования механического повреждения древостоев были заложены стационары «Винники», «Липники», «Давыдов», в пределах города – лесопарк «Зубра». Климат умеренно континентальный, с мягкой зимой, затяжной влажной весной, теплым дождливым летом и относительно сухой осенью. Среднегодовая температура воздуха составляет +7,2 °С, наиболее низкая она в январе (–4,6 °С), наиболее высокая в июле (+ 17,3 °С). Среднее годовое количество осадков в регионе составляет 650 мм в равнинной части, относительная влажность – 80 % [2]. Почвы – темно-серые, оподзоленные, суглинистые на лессовидных отложениях.

Объектами исследований являются древостои влажной грабовой дубравы (стационар «Давыдов» и лесопарк «Зубра») и влажной дубово-грабовой бучины (стационары «Винники» и «Липники»).

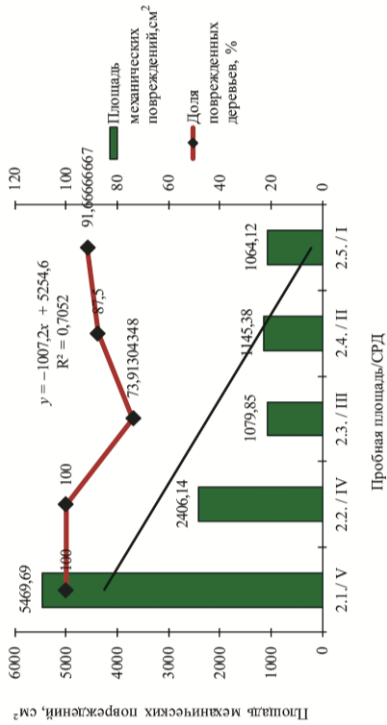
За основу оценки стадии рекреационной дигрессии (СРД) взята методика, разработанная С.А. Генсируком и соавторами [1]. Дополнительно применена методика И.В. Шукеля для оценки дигрессии по количеству бытовых отходов и мест разложения очагов [3, 4].

Механически поврежденными считали деревья, которые имели рану на стволе до камбия, сломанные и срубленные ветки или выраженные признаки этих повреждений. Устанавливали процент этих повреждений и высоту. Статистическую обработку экспериментальных данных и графическое оформление было выполнено с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2010.

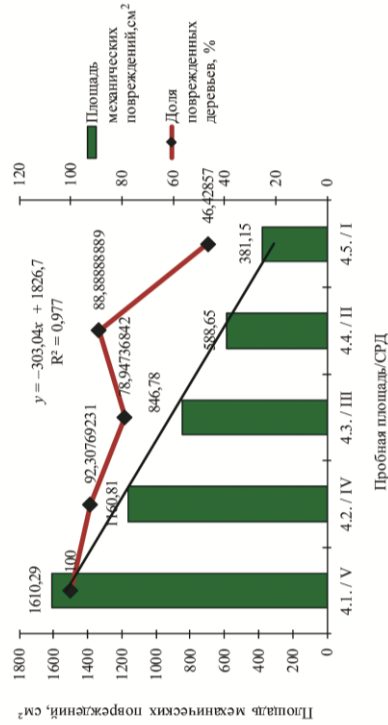
#### *Результаты исследования*

Степень рекреационной нагрузки на смешанные дубовые и буковые древостои зависит от частоты устройства и размеров мест отдыха, густоты сети дорог и троп. В частности, об этом свидетельствуют показатели механического повреждения деревьев (см. рисунок).

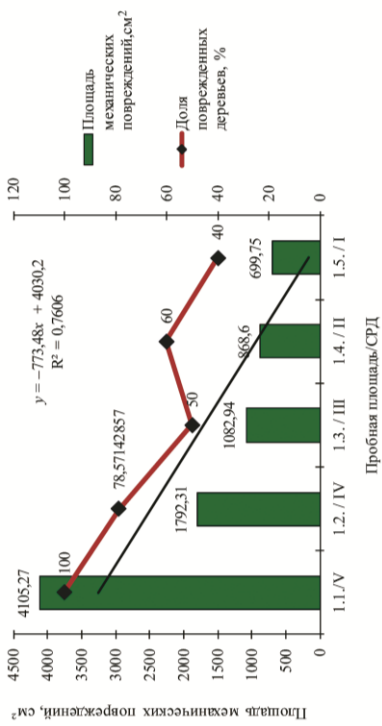




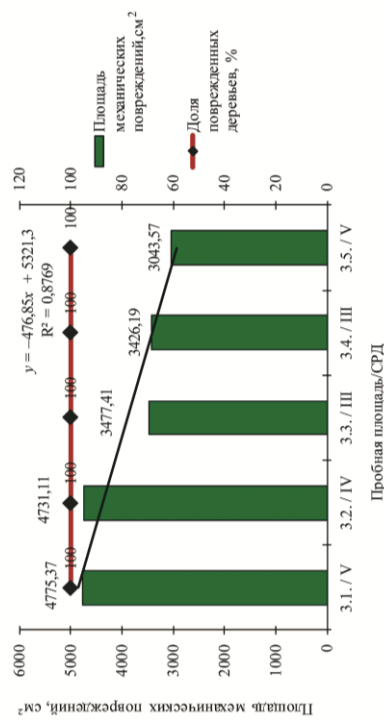
б



2



а



6

Повреждения буковых и дубовых древостоев в зависимости от стадии рекреационной дигрессии: а – стационар «Винники»; б – «Липники»; в – «Зубра»; г – «Давыдов»

Характеристика опытных участках стационаров в зоне интенсивного рекреационного воздействия (V СРД): «Винники» – общая площадь механических повреждений 4105,27 см<sup>2</sup>, средний процент повреждения деревьев до высоты 1,5 м – 17,6; стационар «Липники» – 5469,69 см<sup>2</sup>, процент поврежденных деревьев до 1,8 м – 12,3; «Зубра» – 4775,37 см<sup>2</sup>, процент повреждения до высоты 2,0 м – 22,3; «Давыдов» – 1610,29 см<sup>2</sup>, процент повреждения до высоты 1,8 м – 9,06.

Процент поврежденных деревьев на стационарах составляет 40...100 (доля поврежденных деревьев отражает процент поврежденных от общего количества деревьев на пробной площади стационара). Общая площадь повреждений на пробных площадях с I СРД по сравнению с V СРД на стационаре «Винники» уменьшается в 5,9 раза, «Липники» – в 5,1 раза, «Давыдов» – в 4,2 раза, на стационаре «Зубра» с III СРД – в 1,4 раза. Однако встречаются случаи, когда площадь повреждений на пробных площадях с меньшими рекреационными нагрузками выше, чем с большим рекреационным воздействием, и наоборот. Это можно объяснить средним диаметром деревьев на пробной площади (ПП) («Липники», ПП 2.4 – больший диаметр; «Зубра» (ПП 3.5 с V СРД) – низкие показатели площади повреждения, поскольку средний диаметр в 1,5 раза меньше по сравнению с другими). С уменьшением рекреационного воздействия, число поврежденных деревьев от их общего числа постепенно уменьшается. Следовательно, существует прямая корреляционная связь между стадией дигрессии и площадью повреждений древостоев: с увеличением рекреационной нагрузки процент повреждения и площадь повреждений увеличиваются.

#### *Выводы*

В поддержании стабильности функционирования биосферы определяющую роль играют леса благодаря их значительной площади, емкости, продолжительности развития, устойчивости, производительности, сложности структурно-функциональной организации. Поэтому лесные экосистемы являются важными структурными элементами общеевропейской экосети и других программ конструирования стабильного пространства устойчивого развития континента, в которых принимает участие Украина.

Вследствие недостаточно урегулированной рекреационной деятельности повреждаются структурно-функциональные компоненты дубовых и буковых насаждений зеленой зоны г. Львова. Установлено увеличение количества и площади механических повреждений деревьев с увеличением рекреационного воздействия на участок. Поэтому рекомендовано лесничествам обустроить места отдыха, прокладывать замкнутые круговые маршруты, обеспечивать дровами; размещать информационные материалы в местах отдыха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генцирук С.А., Нижник М.С., Возняк Р.Р. Рекреационное использование лесов. Киев: Урожай, 1987. 248 с.
2. Матолич Б.М., Ковальчук И.П., Иванов Э.А. и др. Природные ресурсы Львовщины. Львов: ПП Лукашук В.С., 2009. 120 с.
3. Шукель И.В., Марутяк С.Б., Поронник И.Ю. Рекреационные дигрессии в лесах Кивцевивском лесничества Волынской области // Наук. висн. ДЛТУ, 2003. Вып. 13.4. С. 26–34.
4. Шукель И.В. Рекреационные дигрессии сосновых насаждений Ревуцкого лесничества в зеленой зоне города Ровно // Наук. висн. ДЛТУ, 2004. Вып. 14.6. С. 102–107.

Поступила 05.11.14

UDC 630\*907.2

**The Problems of Recreational Use of the High Plains Forests in Ukraine**

*L.I. Kopyi, Doctor of Agriculture, Professor*

*O.I. Derekh, Postgraduate Student*

Ukrainian National Forestry University, G. Chyprunky, 103, Lviv, 79051, Ukraine; e-mail: kop.l@mail.ru; e-mail: olja-ozarkiv@rambler.ru

The role of the recreational forests in Ukraine at economic-ecological context of forestry activity is examined. The reference directions of recovery of forest recreational resources and activities, associated with increased of recreational effect levels are shown. Recreational activity of people on forest plantations causes: increase the number and area of mechanical damage to the trees; decrease of the damaged stand, which causes activation of undergrowth and especially the underwood; litter trampling; topsoil digression; change in taxonomic structure and composition of grass cover. As a consequence, in the middle zone, and especially in the impact of intensive recreational activities gradually forest ecosystems degrade and transform that requires immediate reforestation. The aim was to study the mechanical damage of the beech and oak trees, depending on the stages of recreational digression forest ecosystems of the green zone in Lviv. Mechanical damage was considered on a tree that had a wound on the trunk to the cambium, broken or cut branches or salient features of these lesions. The percentage of these lesions was set on height. The share of damaged trees on flatter with different stages of digression is 40–100 %. There is a direct correlation between the stage and the area of damage of digression stands: with the increase of recreational load percentage of damage and area of damage increase. To preserve the oak and beech forests of recreational green area of Lviv the pathway infrastructure facilities must be equipped and recreational load must be regulated in accordance with applicable regulations. It will not only stabilize the ecological balance of the forest ecosystems of the territory, but also improve their aesthetic appeal.

*Keywords:* recreational forests, natural balance, the use of forest, forest stand, mechanical damage.

REFERENCES

1. Gensiruk S.A., Nizhnik M.S., Voznyak P.P. *Rekreatsionnoe ispol'zovanie lesov* [Recreational Use of Forests]. Kiev, 1987. 248p.
2. Matolich B.M., Koval'chuk, Ivanov E.A. *Prirodnye resursy L'vovshchiny* [Natural Resources of Lviv]. Lviv, 2009. 120 p.
3. Shukel' I.V., Marutyak S.B., Poronnik I.Yu. Rekreatsionnye digressii v lesakh Kivetsivskom lesnichestva Volynskoy oblasti [Recreational Digressions in Forests of Kivetsivsk Forestry of the Volyn Region]. *Nauk. visn. DLTU*, 2003, vol. 13.4, pp. 26–34.
4. Shukel' I.V. Rekreatsionnye digressii osnovnykh nasazhdeniy Revutskogo lesnichestva v zelenoy zone goroda Rovno [Recreational Digressions of Pine Plantations of Revutskiy Forestry in the Green Area of Rovno]. *Nauk. visn. Ukr. DLTU*, 2003, vol. 14.6, pp. 102–107.

Received on November 5, 2014

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.111

---

---



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.055

**АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ ЗЕРЕН  
ПРИ ШЛИФОВАНИИ ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

© *А.В. Сергеевичев, канд. техн. наук, доц.*

С.-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, г. С.-Петербург, Россия, 193232; e-mail: 910sav@gmail.com

Шлифование выполняют в целях выравнивания поверхности после предыдущих операций и придания ей требуемой шероховатости, а также удаления слоя древесины или древесного материала для обеспечения заданного размера изделия. Изучение и определение поверхностной энергии древесины и древесных материалов является актуальной задачей современной деревообработки, связанной с образованием новых поверхностей в результате технологических процессов. Исследуемые процессы обработки деталей абразивными инструментами по описанию и моделированию являются наиболее сложными. Они характеризуются развитыми пространственно-временными связями, детальное изучение которых должно выполняться на основе системного подхода. Закономерности износа абразивного инструмента непосредственно связаны с работой единичных абразивных зерен. В основе механизма износа лежат явления адгезии, диффузии, абразивного разрушения, пластического течения тончайших поверхностных слоев, размягченных под действием высоких контактных температур и давлений, химического воздействия на абразив окружающей среды и обрабатываемого материала. Под действием механических и температурных напряжений происходит растрескивание, скалывание режущих кромок, выкрашивание из связки отдельных абразивных зерен и целых комплексов. Вероятность вырывания абразивного зерна в инструменте и его разрушения с увеличением глубины резания значительно возрастает. В этом случае почти все абразивные зерна достигают максимальной глубины резания. На вершинах абразивных зерен появляются значительные площадки износа. На основании анализа закономерностей работы единичных абразивных зерен инструмента с момента их активации до момента разрушения или вырывания из связки можно установить взаимосвязь износа абразивного инструмента с износом и закономерностями работы единичных абразивных зерен, что является неотъемлемой частью возможности совершенствования конструкций инструмента.

*Ключевые слова:* шлифование древесины и древесных материалов, шероховатость обработанной поверхности, резание, единичное абразивное зерно.

*Введение*

При шлифовании материал удаляется с обрабатываемой поверхности в зоне контакта заготовки с инструментом, которая представляет собой область

взаимного проникновения абразивных зерен инструмента в материал заготовки и гребешков материала в промежутки между вершинами абразивных зерен.

Для выражения основных зависимостей динамической модели через технологические факторы в параметрическом виде необходимо более детальное исследование взаимодействия инструмента и заготовки.

Основными источниками шероховатости при шлифовании являются: следы режущих кромок в обрабатываемом материале; пластические, упругие, температурные деформации, хрупкое разрушение материала поверхностного слоя; перенос на обрабатываемую поверхность частичек материала, оставшихся на режущих кромках инструмента.

При шлифовании фактор геометрического копирования часто является преобладающим. Шероховатость образуется при отображении поверхностей резания в материале заготовки. При воздействии только геометрического фактора она может быть представлена как совокупность следов единичных абразивных зерен, которые проходят через рассматриваемое сечение. Каждая единичная риска в этом случае будет копировать форму вершины единичного зерна в сечении поверхности резания плоскостью, перпендикулярной траектории движения. В связи с тем, что абразивные зерна имеют разнообразную форму, микрорельеф шлифованной поверхности, обусловленный геометрическим фактором, является нерегулярным [1].

#### *Методы исследования*

Закономерности износа абразивного инструмента непосредственно связаны с работой единичных абразивных зерен. В основе механизма износа лежат явления адгезии, диффузии, абразивного разрушения, пластического течения тончайших поверхностных слоев, размягченных под воздействием высоких контактных температур и давлений, химического влияния на абразив окружающей среды и обрабатываемого материала. Под действием механических и температурных напряжений происходит растрескивание, скалывание режущих кромок, выкрашивание из связки отдельных абразивных зерен и целых комплексов.

Механизм износа единичных абразивных зерен и явления, возникающие при контакте зерна с материалом, рассматривается в работах Т.Н. Лоладзе, Е.Н. Маслова и др. Механизм износа абразивного инструмента в целом до настоящего времени не имеет столь четкого логического представления. Для его описания весьма перспективным является использование динамических теоретико-вероятностных моделей процесса шлифования [2].

При работе инструмента не все зерна изнашиваются одинаково, что связано с изотропностью их физических свойств и различием в величине относительного износа. Износ абразивных зерен непрерывно увеличивается, затупившиеся вершины перестают резать, что приводит к снижению объема снимаемого материала и производительности процесса. Интенсификация режима

в целях сохранения производительности вызывает резкое ухудшение качества обработанных поверхностей.

Влияние технологических факторов на силы при микрорезании единичными зернами рассматривается в работах А.Н. Резникова и Н. Танака. На основании современных положений теории пластичности установлены зависимости для расчета составляющих силы резания  $P_{gy}$  и  $P_{gz}$  на единицу длины условной режущей кромки при микрорезании абразивными зернами, имеющими площадки износа:

$$P_{gy} = \left( \frac{\sqrt{3,25}a_g \sin \beta}{\sin \beta_1} + 0,5b(z) \right) \tau_s; \quad (1)$$

$$P_{gz} = \left( \frac{\sqrt{3,25}a_g \cos \beta}{\sin \beta_1} + 0,5\mu b(z) \right) \tau_s, \quad (2)$$

где  $a_g$  – глубина микрорезания единичным абразивным зерном, мкм;  
 $\beta$  – угол между равнодействующей силы резания и скоростью резания, град;  
 $\beta_1$  – угол сдвига, град;  
 $b(z)$  – ширина площадки на вершине абразивного зерна в направлении скорости резания, мкм;  
 $\mu$  – коэффициент трения;  
 $\tau_s$  – среднее касательное напряжение в плоскости сдвига, кПа.

При прохождении абразивным зерном зоны контакта заготовки с инструментом силы резания изменяются синхронно с изменением глубины микрорезания. Они увеличиваются при движении абразивного зерна от точки его входа в зону контакта к основной плоскости, достигают максимума в области отрицательных значений  $z$ , затем уменьшаются. С увеличением числа контактов зерна с материалом силы резания возрастают за счет увеличения глубины микрорезания и площадок износа [7].

Глубина микрорезания единичным зерном  $a_g$ , входящая в уравнение сил резания, отличается от ее геометрической величины  $t_g$ . Она является случайной величиной, так как абразивное зерно взаимодействует со случайным профилем микронеровностей. Задача по определению всех возможных вариантов нагружения абразивного зерна сводится к определению статических характеристик  $a_g$  и  $b(z)$  при условии, что его вершина попала на один из выступов шероховатости поверхности. Наибольший интерес при анализе процесса разрушения абразивного зерна представляют наиболее неблагоприятные условия его нагружения, когда оно попадает на один из выступов шероховатости поверхности. При расчете вероятности выпадения и разрушения абразивного зерна необходимо исходить из условия его нагружения силой, по величине близкой или равной максимально возможной  $P_{gz\max}$ . До разрушения абразивное зерно может проходить зону контакта от 800 до 3500 раз, и встреча зерна с одной из наибольших величин микропрофиля достаточно вероятна [5].

При контакте с одним из наибольших выступов шероховатости средний размер площадки износа вершины абразивного зерна в направлении скорости резания  $b(z)$  при ширине среза  $s_{gx}$  равен  $\pi s_{gx} / 4$ , средняя глубина микрорезания определяется как

$$\bar{a}_g = \frac{1}{s_{gx}} \int_0^{s_{gx}} a_g(x) dx \text{ при } a_g(x) = \begin{cases} y_g & \text{при } y_g \geq 0 \\ 0 & \text{при } y_g < 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $y_g$  – координата точки профиля шероховатости поверхности до площадки износа абразивного зерна.

При треугольной форме выступа шероховатости  $a_g$  вычисляется по зависимости

$$\bar{a}_g = \frac{t_{gi}}{2b_R} [2b_R - b_g(h)], \quad (4)$$

где  $t_{gi}$  – размерный износ вершины зерна, мкм;

$b_R$  – длина сечения выступа шероховатости на уровне  $t_{gi}$ , мкм;

$b_g(h)$  – ширина площадки износа при размерном износе вершины зерна, мкм.

Величина площадки износа зерна определяется по его размерному износу.

С увеличением числа касаний величина составляющих сил резания ( $P_{gy}$ ) повышается вследствие увеличения глубины резания и размеров площадки износа.

Вероятность вырывания абразивного зерна в инструменте и его разрушения с увеличением глубины резания значительно возрастает. В этом случае почти все абразивные зерна достигают максимальной глубины резания и на их вершинах появляются значительные площадки износа.

Физические основы разрушения абразивного зерна при шлифовании рассмотрены и изучены во многих работах [3, 6, 8]. Рассмотрены вопросы распространения упругих волн, выполнен анализ величины напряжений, возникающих в зерне и мостиках связки. Показано, что абразивное зерно работает в условиях высоких циклических нагрузок. Поверхностные слои зерна нагреваются в зоне контакта и охлаждаются при выходе из нее, появляются значительные термические напряжения. Все это приводит к снижению прочности зерна и прочности его закрепления в инструменте.

Статистические данные по прочности закрепления абразивных зерен при шлифовании могут быть получены методом строгания поверхности инструмента с регистрацией сил, действующих на индентор [11, 12]. Метод строгания дает обобщенную характеристику по прочности закрепления зерен в инструменте и прочности самого зерна. При строгании часть абразивных зерен выламывается из связки, часть их разрушается.

Анализ тензограмм, полученных при строгании абразивного инструмента твердосплавными резцами, показывает, что прочность закрепления единичных зерен неодинакова и является случайной величиной, распределенной по закону, близкому к нормальному.



Анализ теоретических и экспериментальных кривых показывает, что величина максимума частоты значительно зависит от твердости абразивного инструмента. С увеличением твердости значение частоты в максимуме уменьшается, среднее значение и дисперсия сил закрепления абразивных зерен увеличиваются [3].

С возрастанием твердости на одну степень прочность закрепления зерна в круге увеличивается примерно в 1,2–1,4 раза.

Если принять, что прочность закрепления абразивного зерна в инструменте распределена по закону, близкому к нормальному, то вероятность разрушения единичного зерна определится по следующей зависимости:

$$P(R_g < P_g) = \frac{1}{\sigma_R \sqrt{2\pi}} \int_0^{P_g} \exp\left(-\frac{(R_g - \bar{R}_g)^2}{2\sigma_R^2}\right) dR_g. \quad (5)$$

Вероятность вырывания абразивного зерна в круге и его разрушения с увеличением глубины резания наиболее значительно возрастает при малых глубинах микрорезания.

На основании анализа работы единичных абразивных зерен можно рассмотреть вопросы прогнозирования износа абразивного инструмента [9,10]. Для установившегося процесса шлифования, когда износ инструмента за касание постоянен, выражаем относительную глубину микрорезания единичным зерном в плоскости:

$$t_g(\tau) = \Delta R V_k \tau - h_g. \quad (6)$$

Приращение износа вершины зерна вычисляем из предположения, что за  $V_k \Delta t$  контактов длина резания за касание изменяется незначительно:

$$\Delta h_g = \int_{-L_g}^{L_g} h_0 P_k dz V_k \Delta t. \quad (7)$$

Переходя к пределу  $\Delta t \rightarrow 0$  и заменяя  $\frac{\Delta h_g}{\Delta t}$  на  $\frac{dh_g}{dt}$ , получаем интегро-дифференциальное уравнение износа абразивного инструмента:

$$\dot{h}_g = V_k \int_{-L_g}^{L_g} h_0 P_k dz. \quad (8)$$

Вероятность контакта вершины абразивного зерна с обрабатываемым материалом зависит от глубины микрорезания и износа зерна  $h_g$ . Для момента времени  $t = t_0 = 0$  имеем  $h_g = 0$ , что является для дифференциального уравнения (8) начальным условием.

При работе инструмента в режиме затупления размерный износ вершины зерна, наиболее приближенной к заготовке, равен износу инструмента:

$$\Delta h_{g \max} = \Delta R \text{ при } t_{g \max} = t_f. \quad (9)$$

При работе инструмента в режиме самозатачивания наиболее прочно закрепленные абразивные зерна разрушаются при максимальной глубине микрорезания:

$$R_{g \max} = P_{g \max} \text{ при } t_{g \max} = t_f. \quad (10)$$

Зависимости (9) и (10) являются граничными условиями решения дифференциального уравнения износа инструмента.

Для наглядного описания структуры зависимости (8) рассмотрим частный случай, когда вероятность контакта вершины с обрабатываемым материалом пропорциональна глубине микрорезания:

$$P_k = \frac{y-\Delta r}{t_f-\Delta r} = \frac{1}{t_f-\Delta r} \left( t_g - \Delta r - \frac{z^2}{D_0} \right);$$

$$L_p = \frac{1}{t_f-\Delta r} \int_{-L_g}^{L_g} \left( t_g - \Delta r - \frac{z^2}{D_0} \right) dz = \frac{2 \cdot 2\sqrt{D_0}}{3(t_f-\Delta r)} (t_g - \Delta r)^{3/2}; \quad (11)$$

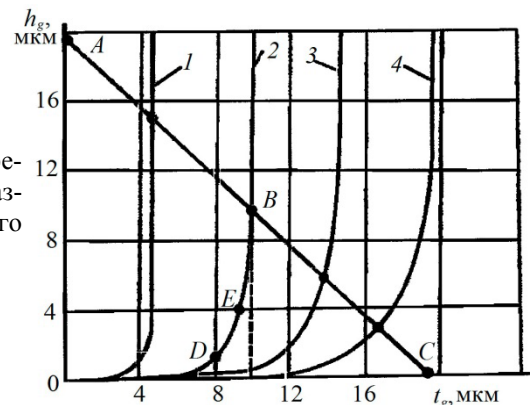
$$\dot{h}_g = \frac{2 \cdot 2h_0\sqrt{D_0}}{3(t_f-\Delta r)} (\Delta R V_k \tau - h_g - \Delta r)^{3/2} V_k \quad (12)$$

*Результаты исследования*

Скорость износа вершины абразивного зерна зависит от относительного износа  $h_0$ , скорости износа инструмента  $\Delta R V_k$ , величины самого износа и режима резания. Уравнение (12) является приближенным аналогом дифференциального уравнения износа абразивного инструмента, что позволяет рекомендовать его только для приблизительных расчетов.

В системе координат  $h_g$  и  $t_g$  (см. рисунок) каждому значению скорости износа инструмента соответствует кривая (1 – 4). Точки на кривой определяют глубину микрорезания и износ зерен в момент времени  $\tau$ . При  $\tau = 0$  глубина и износ равны 0 (начальное условие для решения дифференциального уравнения (8)). При увеличении числа контактов инструмента с заготовкой увеличиваются  $h_g$  и  $t_g$ . Точка на графике, соответствующая координатам вершины зерна, перемещается по линии  $\Delta R$  в сторону прямой ABC. С увеличением глубины микрорезания и площадок износа увеличиваются силы резания (уравнения (1), (2)), что приводит к разрушению зерна [4].

Наиболее прочно закрепленное зерно (граничное условие уравнения (8)) разрушается в т. В, которая определяет максимальную глубину резания. Совокупность точек, соответствующих граничному условию (10), образует линию ABC. Для каждой глубины  $t_f$  на линии существует только одна точка,



Соотношение между глубиной микрорезания и износом вершины зерна при различных значениях износа абразивного инструмента

через которую проходит только одна кривая с определенным значением  $\Delta R$ . При увеличении твердости абразивного инструмента линия ABC перемещается в сторону увеличения значений  $h_g$  и  $t_g$  зерна. Такой инструмент при определенном значении  $\Delta R$  позволяет работать с большей глубиной микрорезания  $t_f$ , но при этом возрастает опасность появления прижогов в связи с увеличением сил резания и температуры в зоне контакта.

#### Выводы

1. Выполнен анализ закономерностей работы единичных абразивных зерен инструмента с момента их активации до момента разрушения или вырывания из связки.

2. На основании проведенного анализа можно установить взаимосвязь износа абразивного инструмента с износом и закономерностями работы единичных абразивных зерен, что является неотъемлемой частью возможности совершенствования конструкций инструмента.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Королев А.В.* Исследование процессов образования поверхностей инструментов и детали при абразивной обработке. Саратов: Саратовский ун-т, 1975. 202 с.
2. *Любимов В.Г.* Режущие свойства одиночного абразивного зерна и шлифовального круга // Лесн. журн. 1974. №5. С. 79–87. (Изв. высш. учеб. заведений).
3. *Новоселов Ю.К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Севастополь: СевНТУ, 2012. 304 с.
4. *Новоселов Ю.К.* Оптимизация процессов шлифования деталей // Технология и организация производства. 1975. №8. С. 31–34.
5. *Резников А.Н.* Абразивная и алмазная обработка материалов: справ. М.: Машиностроение, 1977. 391 с.
6. *Рыбин Б.М., Санаев В.Г., Кириллов Д.В.* К вопросу выбора параметров шероховатости для оценки неровностей древесины // Лесн. вестн. М.: МГУЛ, 2014. №4. С. 131–137.
7. *Сергеевичев А.В.* Основные характеристики процесса шлифования древесины и древесных материалов // Изв. СПбЛТА. 2014. №206. С. 124–138.
8. *Федосеев О.Б.* Теоретические и экспериментальные исследования процесса шлифования сверхтвердыми материалами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Тбилиси, 1976. 24 с.
9. *Daude O.* Zusammenhang zwischen Shleifscheibe, Bearbeitungsbedingungen und arbeitsergebnis beim schleifen // Jnd.-Anz. 1969. N32. P. 741–745.
10. *Gerner L.H., Burk R.E., Grummitt O.* In Frontiers In Chemistry // Interscience. 1962. N4. P. 57–65.
11. *Matsui S., Tamaki I.* Influence of the elastic displacement of grain cutting edges on grinding mechanism // Technol. Reports (Tohoku Univ). 1976. N41. P. 73–88.
12. *Tanaka Y.* Frictional properties of abrasive grains // Technol. Repots (Osaka Univ.). 1967. N17. P. 523–531.

Поступила 15.12.14

UDC 674. 055

**The Analysis of Destruction of Abrasive Grains During the Grinding of Wood and Wood Materials**

*A.V. Sergeevichev, Candidate of Engineering, Associate Professor*

St. Petersburg state forest technical university under name of S. M. Kirov, Institutsky per., 5, St. Petersburg, 193232, Russia; e-mail: 910sav@gmail.com

Grinding is carried out for the purpose of abrasion of a surface after the previous operations and of attaching the demanded roughness, and also removal of a layer of wood or wood material by it for providing the given size of a product. Studying and definition of the surface energy of wood and wood materials are actual problems of the modern woodworking, connected to formation of new surfaces as a result of technological processes. The studied processing of details by abrasive tools according to the description and model operation is the most composite. They are characterized by developed existential communications which detailed studying has to be carried out on the basis of systems approach. Regularities of a wear of the abrasive tool are directly connected with work of simple abrasive grains. The phenomenon of adhesion, diffusion, abrasive destruction, plastic flow of the shallowest surface layers softened under the influence of high contact temperatures and pressure, chemical impact on an abrasive of a surrounding medium and the processed material are fundamentally of the mechanism of a wear. Under the influence of mechanical and temperature stresses there is a cracking fissuring, shear of trimming blades, microchipping from a linking of separate abrasive grains and the whole complexes. The probability of an evulsion of abrasive grain and its destructions with increase in depth of cutting considerably increases in the tool. In this case almost all abrasive grains reach the maximal depth of cutting. At tops of abrasive grains there are considerable platforms of a wear. On the basis of the analysis of regularities of work of simple abrasive grains of the tool from the moment of their activation until destruction or an evulsion from a sheaf it is possible to establish interrelation of a wear of the abrasive tool with a wear and regularities of work of simple abrasive grains that is an integral part of possibility of perfecting of designs of the tool.

*Keywords:* grinding of wood and wood materials, a roughness of the processed surface, cutting, simple abrasive grain.

REFERENCES

1. Korolev A.V. *Issledovanie protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumentov i detali pri abrazivnoy obrabotke* [Research of Processes of Formation of Tools and a Detail Surfaces at Abrasive Processing]. Saratov, 1975. 202 p.
2. Lyubimov V.G. Rezhushchie svoystva odinochnogo abrazivnogo zerna i shlifoval'nogo kruga [The Cutting Properties of Individual Abrasive Grain and an Abrasive Disk]. *Lesnoy zhurnal*, 1974, no. 5, pp. 79–87.
3. Novoselov Yu.K. *Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke* [Dynamics of a Surfaces Formation at Abrasive Processing]. Sevastopol, 2012. 304 p.
4. Novoselov Yu.K. Optimizatsiya protsessov shlifovaniya detaley [Optimization of Processes of Grinding of Details]. *Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva*, Kiev, 1975, no. 8, pp. 31–34.

5. Reznikov A.N. *Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov* [Abrasive and Diamond Processing of Materials]. Moscow, 1977. 391 p.

6. Rybin B.M., Sanaev V.G., Kirillov D.V. K voprosu vybora parametrov shero-khovatosti dlya otsenki nerovnostey drevesiny [To a Question of a Choice of Parameters of a Roughness for an Assessment of Wood Roughnesses]. *Lesnoy vestnik*, Moscow, 2014, no. 4, pp. 131–137.

7. Sergeevichev A.V. Osnovnye kharakteristiki protsessa shlifovaniya drevesiny i drevesnykh materialov [Main Characteristics of Grinding Process of Wood and Wood Materials]. *Izvestiya SPbFTU*, St. Petersburg, 2014, no. 206, pp. 124–138.

8. Fedoseev O.B. *Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya protsessa shlifovaniya sverkhтвердыми materialami: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Theoretical and Pilot Studies of Process of Grinding by Supersolid Materials: Cand.Tech.Sci.Diss.Abs.]. Tbilisi, 1976. 24 p.

9. Daude O. Zusammenhang zwischen Schleifscheibe. Bearbeitungsbedingungen und arbeitsergebnis beim schleifen. *Jnd.-Anz*, 1969, no. 32, pp. 741–745.

10. Gerner L.H., Burk R.E., Grummitt O. in *Frontiers in Chemistry. Interscience*. New York, 1962, no. 4, pp. 57–65.

11. Matsui S., Tamaki I. Influence of the elastic displacement of grain cutting edges on grinding mechanism. *Technology Reports*. Tohoky Univ, 1976, no. 41, pp. 73–88.

12. Tanaka Y. Frictional properties of abrasive grains. *Technology Reports*. Osaka Univ., 1967, no. 17, pp. 523–531.

Received on December 15, 2014

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.117

---

УДК 621.311

## ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ЛЕСОПИЛЬНОЙ РАМЫ

© С.П. Агеев, д-р техн. наук, доц.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,  
наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002;

e-mail: doctor.mart11@mail.ru

Нормирование удельных расходов энергии на деревообрабатывающих предприятиях строится в соответствии с расчленением производства, с одной стороны, на отдельные операции и процессы по видам производимой продукции, с другой – на отдельные участки (агрегаты, цехи, предприятие в целом). В соответствии с этим различают операционные удельные нормы по отдельным операциям и суммарные удельные нормы по отдельным производственным процессам. Целью настоящей статьи явилось изложение подхода к установлению операционной нормы удельного расхода электроэнергии на выполнение операций распиловки древесины на лесопильных рамах с учетом вероятностных характеристик пиловочного сырья. Для проведения исследований предложена линейная математическая модель графика электропотребления механизма резания главного привода лесопильной рамы, использованы методы теории вероятностей. На основе применения методов теории вероятностей найдены законы распределения максимальной мощности, общего и удельного электропотребления за эффективное и операционное время цикла, а также их числовые характеристики, установлены зависимости показателей линейной модели электропотребления от геометрических характеристик распиливаемого сырья и параметров режима лесопильных рам. Полученные результаты могут быть использованы при решении вопросов нормирования и планирования электропотребления процессов лесопиления. Установлено, что основные показатели линейной модели электропотребления лесопильной рамы являются случайными величинами, распределенными не по закону Гаусса. Однако вид графика плотности распределения позволил аппроксимировать его законом нормального распределения, при этом их основные характеристики сохранились. Ошибка аппроксимации составила не более 0,02 %. Получены формулы расчета показателей электропотребления в зависимости от геометрических характеристик пиловочного сырья.

*Ключевые слова:* лесопильная рама, рабочий цикл лесопильной рамы, мощность, абсолютный и удельный расходы электроэнергии, плотность распределения вероятностей, геометрические характеристики распиливаемого сырья.

В настоящее время вопросы рационального использования энергетических ресурсов приобретают все большее значение в различных отраслях промышленности. Лесопиление является основополагающим в механической обработке древесины и представляет собой сложный энергоемкий процесс. Энергозатраты на производство пилопродукции иногда необоснованно завы-

шены, что во многом определяется несогласованностью энергетических свойств оборудования с технологическими операциями.

Нормирование удельных расходов энергии на деревообрабатывающих предприятиях строится в соответствии с расчленением производства, с одной стороны, на отдельные операции и процессы по видам производимой продукции, с другой – на отдельные участки (агрегаты, цехи, предприятие в целом). В соответствии с этим различают операционные удельные нормы по отдельным операциям и суммарные удельные нормы по отдельным производственным процессам [3].

Потребление электроэнергии приемниками лесопильного производства зависит от многих технологических факторов, большинство из которых не учитываются при анализе и планировании электропотребления. Характерной особенностью технологического процесса лесопиления является то, что в нем постоянно проявляется воздействие случайных факторов (форма и размеры пиловочных сортиментов, изменчивость продолжительности технологических операций и т. д.) [1].

Одним из способов повышения точности расчета операционных норм является использование в качестве исходной информации показателей индивидуальных графиков нагрузки энергоемких потребителей или их моделей.

Цель настоящей статьи – изложение подхода к установлению операционной нормы удельного расхода электроэнергии на выполнение операций распиловки древесины на лесопильных рамах (ЛР) с учетом вероятностных характеристик пиловочного сырья.

На рис. 1 представлена линейная модель графика нагрузки лесопильной рамы, задаваемая следующей формулой:

$$P(t) = \begin{cases} P_{\min} + \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\tau_{\text{Э}}} t & \text{при } 0 \leq t \leq \tau_{\text{Э}}; \\ P_{\text{В}} & \text{при } \tau_{\text{Э}} < t \leq \tau_{\text{О}}, \end{cases}$$

где  $P_{\min}$ ,  $P_{\max}$ ,  $P_{\text{В}}$  – минимальное значение мощности, потребляемой двигателем главного привода ЛР в начале рабочего цикла; максимальное значение мощности, имеющей место в конце эффективного времени цикла; мощность потребляемая во вспомогательном времени цикла;

$\tau_{\text{Э}}$ ,  $\tau_{\text{О}}$ ,  $\tau_{\text{В}}$  – эффективное, операционное время рабочего цикла и вспомогательное время цикла (межторцовых разрывов).

Среднее значение мощности за эффективное время цикла

$$P_{\text{СЭ}} = \frac{P_{\min} + P_{\max}}{2}.$$

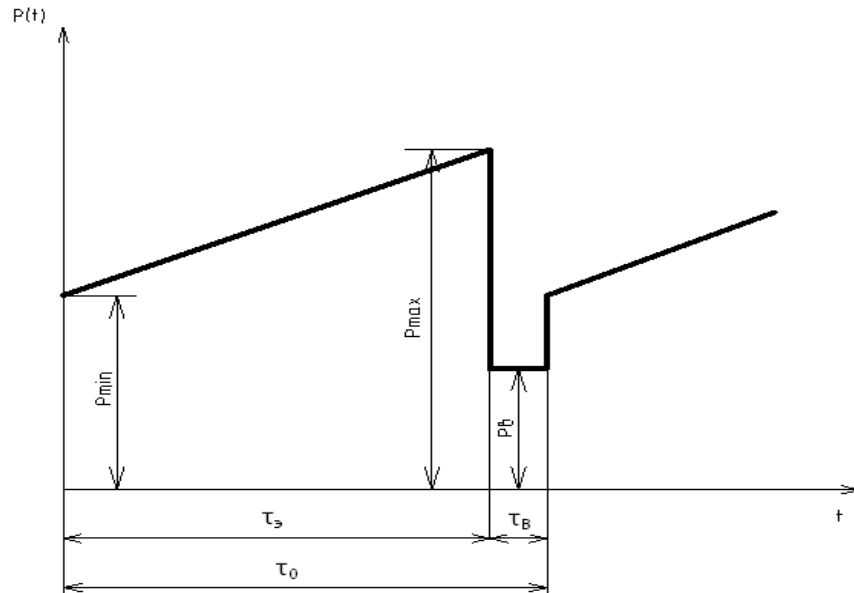


Рис. 1. Линейная модель графика нагрузки лесопильной рамы

Согласно энергетической характеристике механизма резания лесопильной рамы [2], минимальное и максимальное значения потребляемой мощности соответствуют минимальному  $A_{\min}$  и максимальному  $A_{\max}$  значениям текущей производительности в операционном цикле:

$$P_{\min} = c_D \sqrt{A_{\min}} + P_{\text{пост}} = 0,5c_D d_B \sqrt{\pi u} + P_{\text{пост}}; \quad (1)$$

$$P_{\max} = c_D \sqrt{A_{\max}} + P_{\text{пост}} = 0,5c_D d_K \sqrt{\pi u} + P_{\text{пост}}, \quad (2)$$

где  $c_D$  – коэффициент энергоемкости;

$P_{\text{пост}}$  – постоянная составляющая потребляемой двигателем мощности;

$d_B, d_K$  – диаметры бревна в вершине и комле соответственно,

$$d_B, d_K = d_B + cL;$$

$c$  – средний сбеги бревен;

$L$  – длина бревен;

$u$  – скорость подачи.

Мощность  $P_B$  может быть определена по формуле

$$P_B = k G_B n^2 r \cdot 10^{-5},$$

где  $k$  – опытный коэффициент, зависящий от условий трения;

$G_B$  – вес возвратно движущихся частей механизма;

$n$  – частота вращения коленчатого вала;

$r$  – радиус кривошипа.

Так как длина бревен в сортировочной партии является случайной величиной [1], то случайными также будут максимальное значение потребляемой мощности  $P_{\max}$ ; количество электроэнергии, потребляемое за эффективное



( $w_э$ ) и операционное ( $w_о$ ) время цикла; удельные расходы электроэнергии (УРЭ) за эффективное ( $d_э$ ) и операционное ( $d_о$ ) время цикла.

Для целей нормирования электропотребления интерес представляют закон распределения и вероятностные характеристики максимальной мощности  $P_{max}$ . Для их получения преобразуем выражение (2) следующим образом:

$P_{max} = 0,5c_d(d_B + cL)\sqrt{\pi u} + P_{пост}(0,5c_d d_B \sqrt{\pi u} + P_{пост}) + 0,5c_d cL\sqrt{\pi u}$ ,  
или с учетом (1):

$$P_{max} = P_{min} + bL, \quad (3)$$

где  $b$  – постоянный (при определенных условиях) коэффициент, характеризующий прирост максимальной мощности при увеличении длины бревна на 1 м,  $b = 0,5c_d c\sqrt{\pi u}$ .

Из (3) следует, что максимальное значение потребляемой мощности является линейной функцией длины бревен.

Экспериментальные исследования, проведенные на лесопильных заводах г. Архангельска, подтвердили гипотезу о распределении длины бревен в сортировочной партии согласно нормальному закону (закону Гаусса).

В [4] показано, что в результате линейного преобразования нормально распределенной случайной величины получается случайная величина, также распределенная по нормальному закону. Таким образом, максимальная мощность, распределенная по нормальному закону, имеет следующие характеристики:

математическое ожидание

$$MP_{max} = P_{min} + bML;$$

дисперсия

$$DP_{max} = b^2DL,$$

где  $ML$ ,  $DL$  – математическое ожидание и дисперсия длины бревен в сортировочной партии.

Определив показатели линейной модели графика нагрузки ЛР, можно найти общее и удельное электропотребление по распиленному сырью.

Для этого найдем выражение плотности распределения потребления электроэнергии за эффективное время цикла. Тогда с учетом (3) будем иметь:

$$w_э(L) = P_{сэ}\tau_э = \frac{P_{min} + P_{max}}{2} \frac{L}{u} = \frac{2P_{min} + bL}{2u} L = \frac{P_{min}}{u} L + \frac{b}{2u} L^2 = a_1 L^2 + b_1 L. \quad (4)$$

Здесь  $a_1$  и  $b_1$  – постоянные (при определенных условиях) коэффициенты.

Из (4) следует, что количество электроэнергии за эффективное время цикла является квадратичной функцией длины бревен.

Для нахождения закона распределения функции  $w_э(L)$  случайного аргумента  $L$  применим методику, изложенную в [4]. Тогда последовательно получим

$$f(L) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(L-ML)^2}{2DL}}; \quad w_3 = \varphi(L) = a_1 L^2 + b_1 L;$$

$$L = \psi(w_3) = \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 + 4a_1 w_3}}{2a_1}; \quad |\psi'(w_3)| = \frac{1}{\sqrt{b_1^2 + 4a_1 w_3}};$$

$$g(w_3) = f(\psi(w_3)) |\psi'(w_3)| = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi(b_1^2 + 4a_1 w_3)}} e^{-\frac{(\sqrt{b_1^2 + 4a_1 w_3} - b_1 - 2a_1 ML)^2}{2(2a_1 \sigma_L)^2}}, \quad (5)$$

где  $\sigma_L$  – среднее квадратическое отклонение длины бревен;  
 $\varphi(L), \psi(w_3)$  – функциональные зависимости;  
 $(w_3)$  – производная от функции  $\psi(w_3)$ .

Кривая плотности  $g(w_3)$  этого распределения показана на рис. 2.

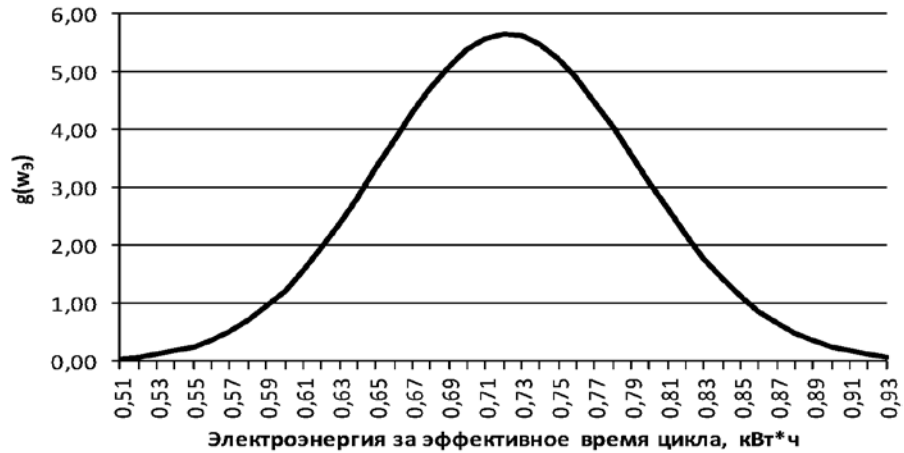


Рис. 2. Плотность распределения количества электроэнергии, потребляемой за эффективное время цикла

Из выражения (5) следует, что электропотребление за эффективное время цикла, как случайная величина, распределено не по закону Гаусса. Однако вид графика плотности распределения позволяет аппроксимировать его законом нормального распределения, сохранив при этом основные характеристики случайной величины  $w_3$ : математическое ожидание  $Mw_3$  и дисперсию  $Dw_3$ .

Используя выражение (4), найдем математическое ожидание электропотребления за эффективное время цикла распиловки:

$$Mw_3 = M(a_1 L^2 + b_1 L) = a_1 ML^2 + b_1 ML.$$

С учетом того, что

$$ML^2 = DL + (ML)^2,$$

окончательно получим

$$Mw_3 = a_1 DL + a_1 (ML)^2 + b_1 ML. \quad (6)$$

Для определения дисперсии  $Dw_э$  приравняем плотности распределения (5) и нормального закона:

$$g(w_э) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi(b_1^2 + 4a_1 w_э)}} e^{-\frac{(\sqrt{(b_1^2 + 4a_1 w_э)} - b_1 - 2a_1 ML)^2}{2(2a_1 \sigma_L)^2}} = \frac{1}{\sigma_W \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(w_э - Mw_э)^2}{2Dw_э}}. \quad (7)$$

Подставим в (7)  $w_э = Mw_э$ :

$$\frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi(b_1^2 + 4a_1 Mw_э)}} e^{-\frac{(\sqrt{(b_1^2 + 4a_1 Mw_э)} - b_1 - 2a_1 ML)^2}{2(2a_1 \sigma_L)^2}} = \frac{1}{\sigma_W \sqrt{2\pi}},$$

откуда среднее квадратическое отклонение количества электроэнергии

$$\sigma_W = \sigma_L \sqrt{(b_1^2 + 4a_1 Mw_э) e^{\frac{(\sqrt{(b_1^2 + 4a_1 Mw_э)} - b_1 - 2a_1 ML)^2}{2(2a_1 \sigma_L)^2}}}. \quad (8)$$

Покажем, что в этом выражении

$$e^{\frac{(\sqrt{(b_1^2 + 4a_1 Mw_э)} - b_1 - 2a_1 ML)^2}{2(2a_1 \sigma_L)^2}} \approx 1. \quad (9)$$

Для этого числитель степени представим следующим образом:

$$\begin{aligned} \sqrt{b_1^2 + 4a_1 Mw_э} - (b_1 + 2a_1 ML) &= \sqrt{b_1^2 + 4a_1(a_1 DL + a_1 (ML)^2 + b_1 ML)} - \\ &- (b_1 + 2a_1 ML) = \sqrt{(b_1 + 2a_1 ML)^2 + 4a_1^2 DL} - (b_1 + 2a_1 ML). \end{aligned}$$

Можно показать, что при конкретных технических параметрах ЛР и геометрических характеристиках распиливаемого сырья второе слагаемое под квадратным корнем составляет всего 0,016 % первого слагаемого. Поэтому, если этим слагаемым пренебречь, то получим соотношение (9).

В этом случае дисперсия электропотребления за эффективное время цикла может быть вычислена по формуле

$$Dw_э = DL(b_1^2 + 4a_1 Mw_э) = DL \frac{P_{\min}^2 + 2bu + Mw_э}{u^2}. \quad (10)$$

Аппроксимация реального закона распределения случайной величины  $w_э$  нормальным вносит ошибку в определение дисперсии около 0,003 %, что вполне допустимо для решения поставленной задачи.

Найдем плотность распределения и числовые характеристики удельного расхода электроэнергии по распилу сырья. Рассматривая бревно как круговой цилиндр с диаметром  $D_{ср} = d_B + 0,5cL$ , находим его объем по формуле

$$V = \frac{\pi D_{ср}^2}{4} L.$$

Тогда УРЭ по распилу сырья за эффективное время цикла с учетом (4):

$$d_{\text{э}} = \frac{w_{\text{э}}}{V} = \frac{4(a_1L^2 + b_1L)}{\pi D_{\text{CP}}^2 L} = \frac{4(a_1L + b_1)}{\pi(d_B + 0,5cL)^2} = \frac{4P_{\text{min}} + 2bL}{\pi u(d_B + 0,5cL)^2}.$$

Для нахождения его плотности распределения применим использованную выше методику, аппроксимировав реальный закон распределения нормальным.

В результате получим следующие характеристики:  
математическое ожидание

$$Md_{\text{э}} = \frac{4P_{\text{min}} + 2bL}{\pi u(d_B + 0,5cML)^2};$$

дисперсия

$$Dd_{\text{э}} = DL \left( \frac{4P_{\text{min}}c + bcML - 2bd_B}{\pi u(d_B + 0,5cML)^3} \right)^2.$$

При этом средняя ошибка аппроксимации составила не более 0,01 %.

Найдем закон распределения общего потребления электроэнергии за операционное время цикла. Тогда с учетом (4):

$$w_0 = w_{\text{э}} + w_B = \frac{P_{\text{min}}}{u}L + \frac{b}{2u}L^2 + P_B\tau_B = a_1L^2 + b_1L + P_B\tau_B, \quad (11)$$

где  $w_B$  – электроэнергия, потребляемая за вспомогательное время цикла.

При этом нормативное значение вспомогательного времени принимается постоянным:  $\tau_B = 1,9$  с.

Из (11) следует, что общее электропотребление  $w_0$  является линейной функцией аргумента  $w_{\text{э}}$ , поэтому также имеет нормальное распределение со следующими характеристиками:

математическое ожидание

$$Mw_0 = Mw_{\text{э}} + Mw_B = a_1DL + a_1(ML)^2 + b_1ML + P_B\tau_B;$$

дисперсия

$$Dw_0 = Dw_{\text{э}} = DL(b_1^2 + 4a_1Mw_{\text{э}}).$$

Найдем плотность распределения и числовые характеристики удельного расхода электроэнергии  $d_0$  по распилу сырья за операционное время цикла:

$$d_0 = \frac{w_0}{V} = \frac{w_{\text{э}} + w_B}{V} = \frac{2(bL^2 + 2P_{\text{min}}L + 2uw_B)}{\pi u D_{\text{CP}}^2 L} = d_{\text{э}} + \frac{4w_B}{\pi D_{\text{CP}}^2 L}. \quad (12)$$

Из (12) следует, что чем больше длина бревен (их объем), тем меньше влияние межторцовых разрывов на УРЭ  $d_0$ , тем он меньше отличается от  $d_{\text{э}}$ .

Как показывают расчеты, второе слагаемое в правой части (12) составляет не более 2 % от УРЭ  $d_{\text{э}}$  и поэтому не оказывает существенного влияния на формирование закона распределения УРЭ  $d_0$ . На этом основании можно считать, что УРЭ  $d_0$  за операционное время цикла приближенно представляет собой нормально распределенную случайную величину.

Математическое ожидание и дисперсия УРЭ  $d_0$  могут быть определены по следующим формулам:

$$Md_0 = Md_3 + \frac{4w_B}{\pi} M\left(\frac{1}{D_{CP}^2 L}\right) = Md_3 + \frac{w_B}{MV};$$

$$Dd_0 = Dd_3 + D\left(\frac{w_B}{V}\right) = Dd_3 + w_B^2 D\left(\frac{1}{V}\right), \quad (13)$$

где  $MV$  – математическое ожидание объема бревен данного диаметра.

Практические расчеты показали, что для наиболее часто встречающихся диаметров бревен второе слагаемое в (13) составляет не более 0,5 % от первого. Поэтому, если им пренебречь, то можно считать, что

$$Dd_0 = Dd_3.$$

Согласно закону нормального распределения любое значение УРЭ  $d_0$  и вероятность его превышения могут быть определены по выражению

$$d_0 = Md_0 + \beta \sigma_{d_0},$$

где  $\beta$  – статистический коэффициент, учитывающий вероятность превышения удельным расходом уровня  $Md_0$ ;

$\sigma_{d_0}$  – среднее квадратическое отклонение УРЭ  $d_0$ .

Используя функцию Лапласа [5], получим расчетное значение УРЭ  $d_{OP}$ , вероятность превышения которого составляет 0,05. В этом случае коэффициент  $\beta = 1,65$ . Таким образом, можно утверждать, что 95 % всех значений УРЭ за операционное время цикла при распиловке бревен одного диаметра не выйдет за уровень расчетного значения:

$$d_{OP} = Md_0 + 1,65\sigma_{d_0}. \quad (14)$$

Это выражение может быть принято за основу для определения операционной нормы УРЭ за операционное время цикла при распиловке бревен данного диаметра.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев С.П. Математическое моделирование процессов распиловки древесины // Изв. СПбЛТА. 2007. Вып. 179. С. 147 – 153.
2. Агеев С.П. Энергетическая характеристика электропривода механизма резания лесопильной рамы // Лесн. журн. 2009. №2. С. 96 – 101. (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Алексин М.В., Синев В.С., Пижурин П.А., Коперин И.Ф., Головков С.И., Павлосюк В.А. Экономия энергоресурсов в лесной и деревообрабатывающей промышленности М.: Лесн. пром-сть, 1982. 216 с.
4. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2000. 480 с.
5. Гастингс Н., Пикок Дж. Справочник по статистическим распределениям. М.: Статистика, 1980. 250 с.

Поступила 11.04.14

UDC 621.311

**Linear Model of the Electrical Energy Consumption Process of a Saw-Frame**

*S.P. Ageev, Doctor of Engineering, Associate Professor*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russia; e-mail: doctor.mart11@mail.ru

Specific energy consumption rationing in the woodworking enterprises is constructed in accordance with the decomposition of production into the items and processes by types of manufactured articles and into particular parts (devices, shop floors, the company as a whole). In accordance with this distinction, there are operating specific power requirements for every item and total specific power requirements for every process of production. The idea of the article is to outline the approach to the operating specific power requirements for the wood sawing processes in the saw-frames with regard to the probabilistic characteristics of wood raw materials. A linear mathematical model of electrical energy consumption graphic chart of cutting mechanism of a saw-frame main drive gear is proposed for the research, and the probability theory methods are used. On the basis of the probability theory methods the maximum capacity distribution laws, total and specific energy consumption for the effective and operational working cycle time, and their numerical characteristics are defined. We established the geometrical characteristics of sawed wood resources and saw-frame duty parameters dependency of factors of the energy consumption linear model. The results can be used in solving issues related to the rate making and energy consumption planning of the sawmilling processes. The key indicators of the energy consumption linear model of a saw-frame are the chance variables distributed not by Gauss' law. However, the distribution density graphic chart has approximated this law by the normal distribution law, while retaining their basic characteristics. The approximation error is not more than 0.02 %. The formulas of the electrical energy consumption indexes, depending on the geometrical characteristics of sawed wood resources are obtained.

*Keywords:* saw-frame, working cycle of a saw-frame, capacity, absolute and specific energy consumption, density of probability distribution, geometrical characteristics of sawed wood resources.

REFERENCES

1. Ageev S.P. Matematicheskoe modelirovanie protsessov raspilovki drevesiny [Mathematic Simulation of Wood Sawing Processes]. *Izvestia SPbLTA*, 2007, vol. 179, pp. 142–152.
2. Ageev S.P. Energeticheskaya kharakteristika elektroprivoda mekhanizma rezaniya lesopil'noy ramy [Electric Motor Drive Energy Characteristic of the Saw-Frame Cutting Mechanism]. *Lesnoy zhurnal*, 2009, no. 2, pp. 96–101.
3. Aleksin M.V., Sinev V.S., Pizhurin P.A., Koperin I.F., Golovkov S.I., Pavlosyuk V.A. *Ekonomiya energoresursov v lesnoy i derevoobrabatывayushchey promyshlennosti* [Energy Conservation in the Timber and Wood Industries]. Moscow, 1982. 216 p.
4. Venttsel' E.S., Ovcharov L.A. *Teoriya veroyatnostey i ee inzhenernye prilozheniya: ucheb. posobie dlya vtuzov* [The Theory of Chances and Its Engineering Applications]. Moscow, 2000. 480 p.
5. Hastings N.A.J., Peacock J.B. *Statistical Distributions. A Handbook for Students and Practitioners*. London, 1976.

Received on April 11, 2014

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.126

УДК 674.047:66.047.354

## РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ СВЧ-СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

© *В.И. Мелехов, д-р техн. наук, проф.*

*В.А. Шульгин, ст. преп.*

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,  
наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: v.shulgin@agtu.ru

В настоящее время интенсивно развивается сушка древесины в микроволновых лесосушильных камерах. При проведении процесса сушки с применением энергии электромагнитного поля наиболее эффективным является диапазон сверхвысоких частот. Результаты исследования фундаментальных свойств древесины, процессов, происходящих в древесине при воздействии электромагнитного поля различной частоты, а также модели поглощения микроволновой энергии единичными сортаментами и штабелем пиломатериалов, приведены в различных научных источниках, где рассмотрены теплофизические вопросы сушки древесины, но недостаточно освещен процесс контроля сушки и электрофизические явления, происходящие при этом. Это не позволяет осуществлять оптимальный контроль и автоматическое управление процессом сушки древесины, что может привести к таким негативным проявлениям, как повышение температуры и электрической пробой в пиломатериале и объеме резонатора, деформации и короблению высушиваемого пиломатериала. В отличие от сушки древесины в конвективных установках процесс в камерах резонаторного типа с использованием сверхвысоких частот имеет свои особенности, характеризующиеся резонансными электрофизическими явлениями, происходящими в резонаторе, которые могут быть рассмотрены на основе базовых положений электродинамики. Цель данной работы – на основании энергетической функциональной зависимости резонатора (добротности) получить возможность осуществлять измерение и контроль процесса сушки древесины. Рассмотрены электрофизические явления, свойственные резонатору лесосушильной камеры в процессе сушки древесины при сверхвысоких частотах, приведены аналитические выражения баланса мощностей электромагнитного вектора Пойтинга, коэффициенты, позволяющие устанавливать оптимальный режим сушки.

*Ключевые слова:* СВЧ-сушка древесины, резонатор, добротность резонансной камеры, тангенс угла диэлектрических потерь, энергия электромагнитного поля, удельные диэлектрические потери, подведенная мощность.

В теории и практике СВЧ-энергетики четко выявляются ее основные преимущества, к числу которых относится возможность сосредоточения большой электромагнитной энергии в малых объемах и возможность ее концентрации в определенном месте, что может явиться основой разработки новых энергосберегающих технологий. Микроволновое нагревание применяется не только в лесосушильных камерах, но и в других процессах [3], а также в бытовых и специализированных промышленных установках [2, 4–6]. Результаты исследования фундаментальных свойств древесины, процессов, происходящих в древесине при воздействии электромагнитного поля различной частоты, а также мо-

дели поглощения микроволновой энергии единичными сортами и сушильным штабелем пиломатериалов, приведены в монографии В.П. Галкина [1]. В этой работе рассмотрены основные теплофизические вопросы сушки древесины, но недостаточно освещен процесс контроля сушки и электрофизические явления, происходящие в СВЧ-сушильной камере. Это не позволяет осуществлять оптимальный контроль и автоматическое управление процессом сушки древесины, что может привести к таким нежелательным явлениям, как увеличение температуры и электрической пробой в пиломатериале и объеме резонатора, деформации и короблению высушиваемого пиломатериала.

В отличие от сушки древесины в конвективных установках протекание процесса в СВЧ-сушильных камерах резонаторного типа имеет свои особенности [7–9], характеризующиеся резонансными электрофизическими явлениями, происходящими в резонаторе, которые могут быть рассмотрены на основе базовых положений электродинамики.

Одной из основных особенностей сушки древесины в СВЧ-сушильной камере является невозможность измерения для системы с распределенными параметрами традиционных для системы с сосредоточенными электрическими параметрами напряжения  $U$  и тока  $I$ , которые в разных пространственных точках имеют различное значение. Поэтому в СВЧ-диапазоне измеряют напряженность электромагнитного поля  $E$ . Соотношение  $J_{эп} = \gamma_{э} E$ , связывающее вектор плотности электрической проводимости  $J_{эп}$  с вектором напряженности электрического поля  $E$  через удельную электрическую проводимость, называют законом Ома в дифференциальной форме. На практике производить измерения напряженности электромагнитного поля в СВЧ-резонаторе затруднительно, поскольку ее значения имеют распределенную в пространстве структуру и составляют порядка сотен, тысяч и более киловатт на метр.

Поскольку определяющим для физического процесса нагревания в СВЧ-диапазоне является то, что в системе с распределенными постоянными теряет всякий смысл значение величины тока и напряжения: в разных точках пространственной структуры они имеют различное значение. Поэтому измерение мощности это единственный способ однозначной оценки интенсивности электромагнитного поля, от которой зависит скорость нагревания древесины.

Как известно, в цепях переменного синусоидального тока различают активную (среднюю за период)

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = UI \cos \varphi$$

и реактивную мощность

$$Q = UI \sin \varphi,$$

где  $T$  – период;

$u, i$  – мгновенные значения напряжения и тока;

$U, I$  – действующие значения напряжения на нагрузке и тока, протекающего через нагрузку;

$\varphi$  – фазовый сдвиг между напряжением и током.



В цепях высоких и сверхвысоких частот используют сигналы импульсной формы – радио- или видеоимпульсы. В этом случае представляет интерес не только средняя мощность, но и импульсная. При прямоугольной огибающей импульса импульсная мощность  $P_{и}$  и ее среднее значение  $P$  за период  $T$  повторения импульсов связаны соотношением

$$P_{и} = \frac{T}{\tau} P = \gamma P, \quad (1)$$

где  $\tau$  – длительность импульса;

$\gamma$  – скважность последовательности импульсов.

Практически измеряют среднюю мощность  $P$  и по формуле (1) определяют импульсную  $P_{и}$ .

В СВЧ-лесосушильной камере измеряют поглощаемую нагрузкой (древесиной) мощность или мощность, проходящую к нагрузке. В соответствии с этим используют ваттметры поглощаемой и проходящей мощности. Поглощаемую мощность измеряют тогда, когда нужно определить мощность, отдаваемую источником в согласованную нагрузку.

При измерении мощности на высоких и сверхвысоких частотах определяющую роль имеет согласование полных сопротивлений в тракте передачи энергии. От качества согласования зависит уровень мощности, получаемой от генератора или усилителя, значение отражений в тракте генератор–линия–нагрузка и мощность, поглощаемая нагрузкой. Если нагрузка с полным сопротивлением  $Z_{н} = R_{н} + jX_{н}$  подключена к генератору непосредственно, то генератор с внутренним сопротивлением  $Z_{г} = R_{г} + jX_{г}$  отдает в эту нагрузку мощность:

$$P = \frac{U_{г}^2 R_{н}}{(R_{г} + R_{н})^2 + (X_{г} + X_{н})^2},$$

где  $U_{г}$  – действующее значение напряжения на выходе генератора.

При этом наибольшую мощность  $P_{макс}$  генератор будет отдавать нагрузке при комплексно-сопряженном согласовании их сопротивлений, т. е. при  $R_{г} = R_{н}$  и  $X_{г} = -X_{н}$ . Эта мощность называется располагаемой мощностью генератора:  $P_{макс} = U_{г}^2 / 4R_{г}$ . Если нагрузка подключена к генератору через линию передачи, то согласование усложняется. Электромагнитная энергия передается от генератора к нагрузке, как правило, по однородной линии с распределенными параметрами, определяющими ее волновое сопротивление

$$\rho = \sqrt{L/C},$$

где  $L$  – индуктивность;

$C$  – емкость.

Для простоты полагают, что такие линии вносят потери настолько малые, что ими можно пренебречь. И тогда мощность, отдаваемая генератором в согласованную с его сопротивлением линию, нагруженную на любое сопротивление  $Z_{н}$ , определяется по формуле

$$P_{\text{н}} = P_{\text{МАКС}} (1 - |\dot{\Gamma}_{\text{н}}|^2),$$

где  $\Gamma_{\text{н}}$  – коэффициент отражения от нагрузки по напряжению.

Если волновое сопротивление линии передачи согласовано с сопротивлением нагрузки ( $Z_{\text{н}} = \rho$ ), то коэффициент отражения равен нулю и к нагрузке поступает максимальная мощность.

Измерение поглощаемой мощности калориметрическим методом относится к наиболее точным измерениям высокочастотной мощности больших и средних значений практически на любой частоте. Он основан на преобразовании электромагнитной энергии в тепловую.

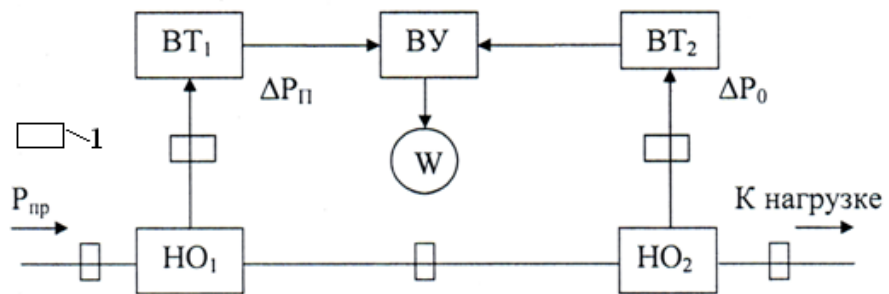
На практике при использовании резонаторной СВЧ-сушильной камеры не удается получить идеальное согласование генератора с нагрузкой. Наряду с мощностью падающей существует и мощность отраженной волны, которая распространяется в обратном направлении, отразившись от нагрузки (пиломатериала) в сушильном штабеле. Тогда мощность проходящей волны  $P_{\text{пр}}$  можно выразить следующим соотношением:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{п}} - P_{\text{о}} = P_{\text{п}} (1 - |\dot{\Gamma}_{\text{н}}|^2), \quad (2)$$

где  $P_{\text{п}}$  и  $P_{\text{о}}$  – мощности падающей (поглощенной) и отраженной волн;

$\Gamma_{\text{н}}$  – коэффициент отражения от нагрузки.

Для измерения проходящей мощности применим метод ответвления, который реализуется с помощью измерительной линии, представляющей собой волновод с направленными ответвителями  $\text{НО}_1$  и  $\text{НО}_2$  [5]. Схема реализации этого метода приведена на рисунке.



Структурная схема измерения проходящей мощности генератора: 1 – волновод измерительной линии;  $\text{НО}_1$ ,  $\text{НО}_2$  – направленные ответвители;  $\Delta P_{\text{п}}$ ,  $\Delta P_{\text{о}}$  – ответвленные мощности падающей и отраженной волн; ВУ – вычитающее устройство; W – магнитоэлектрический измеритель;  $\text{ВТ}_1$  и  $\text{ВТ}_2$  – поглощающие ваттметры

Направленные ответвители  $\text{НО}_1$  и  $\text{НО}_2$  с одинаковыми характеристиками и противоположными ориентациями включены последовательно в линию передачи. Ответвленные мощности падающей  $\Delta P_{\text{п}}$  и отраженной волн  $\Delta P_{\text{о}}$

измеряются поглощающими ваттметрами  $ВТ_1$  и  $ВТ_2$ . Результат измерения каждым ваттметром подается на вычитающее устройство ВУ, на выходе которого включен магнитоэлектрический измеритель  $W$ , проградуированный в единицах мощности. Его показания, в соответствии с формулой (2), пропорциональны проходящей мощности. Для определения поглощенной мощности прибор отградуирован в единицах поглощенной мощности.

При анализе процессов в объемных резонаторах полагают, что диэлектрик, заполняющий объем резонатора, идеален и потери в металле отсутствуют. В тех случаях, когда объем резонатора заполнен воздухом, предположение об идеальности резонатора близко к истине. Резонатор СВЧ-сушильной камеры используется для сушки древесины, которая является природным биокompозитным материалом, содержащим в своем составе множество различных (органических и неорганических) веществ с различной удельной проводимостью, поэтому необходимо учитывать начальную и конечную проводимость древесины, являющуюся нагрузкой резонатора, которая изменяется в процессе сушки.

Таким образом, в реальных условиях объемный резонатор сушильной камеры обладает потерями. В колебательной системе потери мощности на нагревание древесины оценивают добротностью  $Q$ . Это понятие применено для оценки потерь энергии в объемных резонаторах СВЧ-сушильных камер.

Добротность  $Q$  – это отношение энергии  $W$ , запасенной в колебательной системе, к теряемой в этой системе в течение периода колебаний энергии  $W_{\text{ПТ}}$ :

$$Q = 2\pi \frac{W}{W_{\text{ПТ}}}.$$

Энергию потерь  $W_{\text{ПТ}}$  можно выразить как произведение мощности потерь, под которой подразумевается суммарная мощность потерь в диэлектрике  $P_{\text{ПД}}$  и металле объемного резонатора  $P_{\text{ПМЕТ}}$ ,

$$P_{\text{П}\Sigma} = P_{\text{ПД}} + P_{\text{ПМЕТ}},$$

на время (период колебаний  $T_p$ ), соответствующее резонансу:

$$W_{\text{ПТ}} = P_{\text{П}\Sigma} T_p.$$

Период колебаний  $T_p$  связан с частотой колебаний  $f_p$  соотношением  $T_p = 1/f_p$ , следовательно

$$W_{\text{ПТ}} = P_{\text{П}\Sigma} / f_p.$$

При этом

$$Q = 2\pi f_p \frac{W}{P_{\text{П}\Sigma}}, \quad (3)$$

где  $2\pi f_p = \omega_p$  ( $\omega_p$  – угловая резонансная частота).

Выражение (3) является основным для определения добротности колебательной системы.

Полная энергия электромагнитного поля, заключенная в объеме  $V$ :

$$W = \int_V \left( \frac{\mu_a H^2}{2} + \frac{\epsilon_a E^2}{2} \right) dV, \quad (4)$$

где  $\mu_a, \epsilon_a$  – абсолютная магнитная и диэлектрическая проницаемости;

$H$  и  $E$  – мгновенные значения магнитного и электрического полей в объеме  $V$ .

Таким образом, полная энергия поля представляет собой сумму мгновенных значений энергий магнитного и электрического полей. В колебательной системе происходит непрерывное преобразование электрической энергии в магнитную энергию и обратно. Максимальному значению магнитного поля соответствует нулевое значение электрического поля и наоборот. Поэтому вместо суммы мгновенных значений магнитной и электрической энергии в выражении (4) можно использовать их максимальные значения:

$$W = \int_V \frac{\mu_a H_m^2}{2} dV = \int_V \frac{\epsilon_a E_m^2}{2} dV, \quad (5)$$

где  $H_m$  и  $E_m$  – максимальные значения магнитного и электрического полей.

Потери на нагревание древесины, обусловленные взаимодействием микроволновой энергии с материалом и связанные с поглощением мощности облучающей волны, определяются по (3) с учетом того, что  $Q = 1/\text{tg}\delta$ . Энергия электромагнитного поля  $W$ , запасенная в объеме  $V$  резонатора, определяется соотношением (5) для электрической составляющей поля, поскольку магнитная составляющая поля, определяющая потери в металле корпуса сушильной камеры, имеет малые значения. Мощность потерь в древесине  $P_{\text{Пд}}$  характеризуется удельными потерями  $P_{\text{уд}}$ .

Согласно (3) диэлектрические потери при пренебрежении потерями в металле

$$P_{\text{Пд}} = P_{\text{уд}} = W_{\text{Э}}/Q = W_{\text{Э}} \text{tg}\delta = \omega \epsilon_a \text{tg}\delta \int_V |E|^2 dV, \quad (6)$$

где  $W_{\text{Э}}$  – энергия электромагнитного поля, запасенная в объеме  $V$ .

Рассмотрим выражение (6) в соответствии с уравнением баланса мгновенных значений мощностей резонатора лесосушильной камеры в объеме  $V$  в интегральной форме:

$$- \int_V E J_{\text{СТ}} dV = \int_V \sigma E^2 dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left( \frac{\epsilon_a E^2}{2} + \frac{\mu_a H^2}{2} \right) dV + \oint_S [EH] dS.$$

Представим это выражение в соответствии с балансом комплексных мощностей вектора Пойтинга в интегральной форме:

$$\int_V \dot{S}_{\text{СТ.и}} dV = \int_V P_{\text{П.СР}} dV + i2\omega \int_V (W_{\text{М.СР}} - W_{\text{Э.СР}}) dV + \oint_S \dot{P} dS. \quad (7)$$

Здесь левая часть и последнее слагаемое справа – комплексные величины, которые называются соответственно комплексной мощностью стороннего источника в объеме  $V$  и комплексной мощностью, выходящей из поверхности  $S$ , ограничивающей объем  $V$ . Остальные интегралы в (7) вещественные.

Приравняв в выражении (7) вещественные части слева и справа, получим

$$\int_V P_{\text{ст.ср}} dV = \int_V P_{\text{п.ср}} dV + \oint_S P_{\text{ср}} dS, \quad (8)$$

которое можно представить в виде

$$P_{\text{ст.ср}} = P_{\text{п.ср}} + \frac{\partial w}{\partial t} + P_{\text{и.ср}},$$

где  $P_{\text{ст.ср}}$  – мощность электромагнитного поля сторонних источников;

$P_{\text{п.ср}}$  – мощность потерь, расходуемая на нагрев древесины,

$$P_{\text{п.ср}} = \int_V \sigma E^2 dV;$$

$\partial w / \partial t$  – мощность, расходуемая на изменение энергии  $w$  в объеме  $V$ ;

$P_{\text{и.ср}}$  – мощность поля, выходящая сквозь замкнутую поверхность  $S$ , ограничивающую объем  $V$ .

Поскольку среднее значение энергии электромагнитного поля в объеме  $V$  при установившемся процессе не изменяется во времени,  $\partial w_{\text{ср}} / \partial t = 0$ , то можно представить его в следующем виде:

$$P_{\text{ст.ср}} = P_{\text{п.ср}} + P_{\text{и.ср}}. \quad (9)$$

Вещественные части комплексных мощностей, равные средним за период значениям мощностей, называют активными мощностями. Соотношения (8), (9) выражают баланс средних за период значений мощностей.

Приравнявая в (7) мнимые части, получим:

$$P_{\text{р.ст}} = 2\omega \int_V (W_{\text{м.ср}} - W_{\text{э.ср}}) dV + \text{Im} \oint_S \dot{P} dS, \quad (10)$$

где  $P_{\text{р.ст}} = -\frac{1}{2} \text{Im} \int_V \dot{E} J_{\text{ст}}^* dV$  – мнимая часть стороннего источника, называемая

реактивной мощностью этого источника;

$J_{\text{ст}}^*$  – комплексно-сопряженная плотность электрического тока.

Среднее значение амплитуды мгновенной реактивной мощности источника за период равно нулю, так как она связана с колебательным характером движения энергии. В течение четверти периода реактивная энергия переходит из источников в электромагнитное поле и поглощается активным сопротивлением резонатора, двигаясь в одном направлении, в течение следующей четверти периода эта энергия возвращается из электромагнитного поля в источник и поглощается активным сопротивлением генератора, двигаясь в другом направлении. Соотношение (10), представляющее баланс реактивных мощностей комплексного вектора Пойтинга (7), показывает, что реактивная мощность источника  $P_{\text{р.ст}}$  определяется разностью средних значений энергий маг-

нитного и электрического полей в объеме  $V$  и мнимой части потока вектора  $\vec{\Pi}$  через поверхность  $S$ , ограничивающую объем  $V$ .

Полагаем, что резонатор лесосушильной камеры представляет собой изолированную область  $V$ , для которой поток  $\vec{\Pi}$  сквозь ограничивающую ее поверхность  $S$  равен нулю. Тогда для изолированного объема выражения (8) – (10) имеют следующий вид для активной и реактивной составляющих:

$$P_{\text{ст.ст}} = P_{\text{п.ст}}; P_{\text{р.ст}} = 2\omega(W_{\text{м.ст}} - W_{\text{э.ст}}),$$

что соответствует режиму согласования комплексного источника  $\dot{S}_{\text{ст.и}}$  с нагрузкой резонатора лесосушильной камеры (реактивная энергия вся находится в замкнутом объеме  $V$ ). При измерении проходящей мощности отраженная волна отсутствует и  $P_{\text{пр}} = P_{\text{п}}$ .

Если при этом средние значения энергий электрического и магнитного полей в объеме  $V$  равны ( $W_{\text{м.ст}} = W_{\text{э.ст}}$ ), то мощность стороннего источника (генератора) активна ( $P_{\text{р.ст}} = 0$ ) и в изолированной области имеет место резонанс. Обмен реактивной энергией резонатора с источником (генератором) происходит с дополнительными потерями как в том, так и в другом.

Поскольку энергия электромагнитного поля  $W$ , запасенная в объеме  $V$  резонатора, определяется соотношением (5), то мощность электрической составляющей поля  $P_{\text{э}}$ , сосредоточенную в объеме  $V$  и затраченную на его образование, определяет интеграл

$$\int_V \epsilon_a \frac{\partial E}{\partial t} E dV = P_{\text{э}}, \quad (11)$$

который характеризует мощность электрического поля  $P_{\text{э}}$ , сосредоточенную в объеме  $V$ , затраченную на его образование.

Энергию электромагнитного поля, запасенную в объеме  $V$ , затраченную на образование этого поля, можно определить интегрированием по времени выражения (11), определяющего мощность электрического поля:

$$W_{\text{э}} = \int_0^t P_{\text{э}} dt = \int_0^t \int_V \epsilon_a \frac{dE}{dt} E dV dt, \quad (12)$$

где выражение  $\frac{dE}{dt} dt = dE$  представляет собой дифференциал поля  $E$  и является изменяемой от мощности потерь  $P_{\text{э}}$  величиной в соответствии с выражением (3) для добротности  $Q$ .

Интеграл по времени при этом переходит в интеграл по полю  $E$ . Предполагая, что в момент времени  $t = 0$  поле отсутствует, а в произвольный момент  $t$  равняется  $E$ , выражение для электрической энергии можно записать в следующем виде:

$$W_{\text{э}} = \int_V \int_0^E \epsilon_a E dE dV;$$

$$W_{\text{э}} = \int_V \frac{\epsilon_a E^2}{2} dV. \quad (13)$$

Выражение (13) дает возможность вычислить значение энергии электрического поля, сосредоточенной в объеме  $V$ . Подынтегральное выражение представляет собой объемную плотность электрической энергии:

$$\Delta W_{\text{э}} = \epsilon_a E^2 / 2.$$

В соответствии с соотношением (3), поскольку тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрического материала (древесины)  $\text{tg}\delta = \sigma / \omega \epsilon_a$

$$P_{\text{уд}} = \sigma_{\text{э}} \int_V |E|^2 dV. \quad (14)$$

где  $\sigma_{\text{э}}$  – удельная электрическая проводимость среды.

В процессе высушивания древесины снижается удельная диэлектрическая проводимость. Из выражения (14) следует, что при уменьшении проводимости  $\sigma_{\text{э}}$ , увеличивается напряженность поля  $E$  в соответствии с выражением (12). Это объясняется тем, что добротность  $Q$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  являются обратными величинами:

$$Q = 1/\text{tg}\delta.$$

Таким образом, с учетом (12)–(14) удельные потери  $P_{\text{уд}}$  остаются неизменными в процессе сушки, пока принудительно не изменить подводимую мощность генератора.

Добротность нагруженных резонаторов может быть определена в соответствии с выражением (3) для добротности  $Q$  ненагруженного резонатора.

Если резонатор нагружен, то к средней мощности потерь в резонаторе  $P_{\text{п}\Sigma}$  следует прибавить среднюю мощность, отдаваемую резонатором в нагрузку  $P_{\text{н}}$ , поскольку нагрузкой резонатора являются диэлектрические потери в древесине, загруженной в резонансную сушильную камеру.

Запишем выражение для добротности нагруженного резонатора:

$$Q_{\text{н}} = \omega_p \frac{W}{P_{\text{п}\Sigma} + P_{\text{н}}} = \omega_p \frac{W}{P_{\text{п}\Sigma}} \frac{1}{1 + P_{\text{н}}/P_{\text{п}\Sigma}} = Q \frac{1}{1 + P_{\text{н}}/P_{\text{п}\Sigma}}, \quad (15)$$

где  $\omega_p = 2\pi f_p$  – угловая резонансная частота резонатора.

Таким образом, в СВЧ-лесосушильной камере резонаторного типа следует обеспечивать оптимальное согласование генератора с резонатором и поддерживать его в процессе сушки древесины.

Добротность нагруженного резонатора СВЧ-лесосушильной камеры позволяет осуществлять измерение и контроль текущей влажности пиломатериалов в процессе сушки, а также согласование генератора с поглощаемой нагрузкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Галкин В.П.* Древесиноведческие аспекты инновационной технологии сушки древесины: моногр. М.: МГУЛ, 2010. 238 с.
2. *Гареев Ф.Х.* Проблемы и перспективы СВЧ-сушки древесины // Журн. ЛПИ. 2004. № 1. С 50–52.
3. *Коптелова Е.Н., Кузнецова Л.Н., Кутакова Н.А., Третьяков С.И.* Интенсификация процесса выделения бетулина из бересты с использованием СВЧ-поля // Лесн. журн. 2013. №5. С. 193–201. (Изв. высш. учеб. заведений).
4. *Недорезова Е.В.*, Совершенствование технологии и оборудования для сушки древесины электромагнитной энергией СВЧ: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2002. – 154 с.
5. *Пюшнер Г.* Нагрев энергией СВЧ. М.: Энергия, 1968. 310 с.
6. *Серговский П.С., Расев А.И.* Гидротермическая обработка и консервирование древесины: учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 360 с.
7. *Шульгин В.А.* Измерительные аспекты инновационной технологии сушки древесины // Альманах современной науки и образования. 2011. №4. С. 95–96.
8. *Шульгин В.А.* Особенности сушки древесины // Альманах современной науки и образования. 2013. №3. С. 215–218.
9. *Шульгин В.А.* Особенности сушки древесины (возникновение электрического пробоя) // Альманах современной науки и образования. 2013. №3. С. 219–222.

Поступила 26.12.2013

УДК 674.047:66.047.354

**Resonance Phenomena in the Process of Wood Microwave Drying**

*V.I. Melekhov, Doctor of Engineering, Professor*

*V.A. Shulgin, Senior Lecturer*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russia; e-mail: v.shulgin@agtu.ru

Currently drying of wood with the use of electromagnetic energy in a camera of resonator type is developed intensively. The most efficient is the range of ultra-high frequency. Results of the study of fundamental properties of wood, the processes occurring in the wood when exposed by electromagnetic field of different frequencies, as well as models of microwave energy absorption by unit assortments and lumber stack are given in various scientific sources, where the questions of thermal drying of wood are considered, but are poorly elucidated the control process of drying and electrical phenomena. This does not allow for optimum control and automatic control of the drying process of wood, which may result in such negative effects as an increase in the temperature and electrical breakdown in the timber and the volume of the resonator, deformation and warpage of the drying timber. In difference of wood drying in the convection machine the process of resonator-type with the use of ultrahigh frequency has its own characteristics, which are characterized by resonant electro phenomena, occurred in the cavity, which may be considered on the basis of the basic provisions of electrodynamics. The purpose of this work – is on the basis of the functional dependence of resonator to carry out the measurement and control of the drying process of



wood. It is considered the electrical phenomena, peculiar to resonator of ultrahigh frequency drying camera of wood, analytical expressions of power balance of electromagnetic Poynting vector coefficients are given, allowing establish the optimal mode of drying.

*Keywords:* microwave drying of wood, resonator, factor of quality of the resonance camera, loss-angle tangent, electromagnetic energy, specific dielectric absorption loss, penciled power.

#### REFERENCES

1. Galkin V.P. Drevesinovedcheskie aspekty innovatsionnoy tekhnologii sushki drevesiny: monografiya [Wood Directing Aspects of Innovative Wood Drying: a Monography]. Moscow, 2010. 238 p.
2. Gareev F.Kh. Problemy i perspektivy SVCh-sushki drevesiny [Problems and Prospects of Microwave Wood Drying]. Zhurnal LPI, 2004, no. 1, pp. 50–52.
3. Koptelova E.N., Kuznetsova L.N., Kutakova N.A., Tretyakov S.I. Intensifikatsiya protsessa vydeleniya betulina iz beresty s ispol'zovaniem SVCh-polya [Intensification of Betulin Isolation from Birch Bark Using Microwave Field]. Lesnoy zhurnal, 2013, no. 5, pp. 193–201.
4. Nedorezova E.V. Sovershenstvovanie tekhnologii i oborudovaniya dlya sushki drevesiny elektromagnitnoy energiy SVCh: diss.kand.tech.nauk [Improving of Technology and Equipment for Wood Drying Microwave Electromagnetic Energy: Cand. Tech. Sci. Diss.]. Voronezh, 2002. 154 p.
5. Pyushner G. Nagrev energiy SVCh [Heating by Microwave Frequency Energy]. Moscow, 1968. 310 p.
6. Sergovskiy P.S., Rasev A.I. Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny [Hydrothermal Treatment and Preservation of Wood]. Moscow, 1987. 360 p.
7. Shul'gin V.A. Izmeritel'nye aspekty innovatsionnoy tekhnologii sushki drevesiny [Measuring Aspects of the Innovative Technology of Drying Wood]. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya*, Tambov, 2011, no. 4 (47), pp. 95–96.
8. Shul'gin V.A. Osobennosti sushki drevesiny [Features of Wood Drying]. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya*, Tambov, 2013, no. 3(70), pp. 215–218. ISSN 1993-5552.
9. Shul'gin V.A. Osobennosti sushki drevesiny (vozniknovenie elektricheskogo proboya) [Features of Wood Drying (Occurrence of Electrical Breakdown)]. *Al'manakh sovremennoy nauki i obrazovaniya*, Tambov, 2013, no. 3, pp. 219–222.

Received on December 26, 2013

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.135

---

УДК 613.644

## **АНАЛИЗ УРОВНЯ ШУМА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ДРЕВЕСИНЫ**

© *С.А. Черепанов, асп.*

*Д.А. Лужанский, асп.*

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова,  
наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002;  
e-mail: serg-edu@yandex.ru; arov-dm@mail.ru

Шум является одним из основных вредных производственных факторов в деревообработке. Фрезерные деревообрабатывающие станки имеют высокий уровень шума, превышающий санитарные нормы, однако данные о шумовых характеристиках современных фрезерных станков при высоких частотах практически отсутствуют. Проанализировано влияние режимов резания, породы древесины и числа зубьев фрезы на уровень и спектр шума при высокоскоростном фрезеровании древесины. Эксперименты проведены на современном обрабатывающем центре с числовым программным управлением и использованием измерительного микрофона и анализатора. Записаны 1/3-октавные уровни звукового давления при обработке заготовок из сосны и дуба двух- и шестизубыми фрезами на различных режимах резания, а также фонового уровня шума в цехе и компрессора станка. Анализ экспериментальных данных показал, что в спектре шума при низких частотах вращения доминирует частота врезания зубьев, на высоких – частота вращения. При фрезеровании двузубой фрезой в спектре преобладают частоты врезания зубьев и вращения шпинделя, при фрезеровании шестизубой фрезой – частота вращения шпинделя. Уровень шума при фрезеровании дуба выше, чем при фрезеровании сосны. Уровень шума при высокоскоростном фрезеровании на 2...17 дБ превышает фоновый уровень шума в цехе, при этом в большинстве случаев уровень шума при резании ниже уровня шума, создаваемого компрессором станка. При наиболее производительных режимах резания с использованием шестизубой фрезы уровень шума всего на 3...6 дБ выше фонового, что позволяет использовать такие фрезы при высокоскоростном фрезеровании.

*Ключевые слова:* фрезерование древесины, спектр шума, уровень звукового давления, частота врезания зубьев, режимы резания.

Обеспечение безопасных условий труда является одной из наиболее важных задач на деревообрабатывающем производстве. Среди вредных производственных факторов важное место занимает шум. Деревообрабатывающие станки характеризуются высокими уровнями звукового давления, зачастую превышающими санитарные нормы, поэтому проблема исследования уровня шума деревообрабатывающих станков и разработки мероприятий по его снижению является актуальной. Основные методы исследования и анализа уровня шума, возникающего при работе различного оборудования, рассмотрены в работах [1, 2]. Шумовые характеристики деревообрабатывающего оборудования проанализированы в работах [3, 4]. Так, авторы работы [3] измеря-

ли уровень шума на рабочих местах и установили, что он составляет 82...110 дБА (меньшие значения соответствовали фрезерным станкам, большие – рейсмусовым), т. е. имеет место превышение нормы (80 дБА). Это вызвано, в частности, высокими скоростями резания древесины, достигающими 30...50 м/с за счет повышения частоты вращения шпинделя. Современные деревообрабатывающие станки с числовым программным управлением (ЧПУ) имеют частоты вращения шпинделя свыше 20 тыс. об/мин. Однако данные о шумовых характеристиках станков на таких частотах практически отсутствуют. Как правило, производитель указывает уровень шума только на одном из режимов работы станка. Поэтому представляет интерес проанализировать уровень шума при высокоскоростном фрезеровании. Для решения данной задачи было проведено экспериментальное исследование уровня и спектра шума в зависимости от режимов резания и числа зубьев инструмента.

Цель исследования – сравнительный анализ зависимости уровня и спектра шума от режимов резания, числа зубьев фрезы и породы древесины при работе фрезерного станка в условиях действующего производственного цеха. Задача оценки уровня шума на рабочем месте оператора станка не ставилась.

Эксперимент проходил на обрабатывающем центре BIESSE ROVER 20, имеющем следующие характеристики: мощность главного привода – 6,6 кВт, частота вращения шпинделя 1 тыс... 24 тыс. об/мин. Для измерений использовали аппаратуру фирмы «Брюль и Кьер».

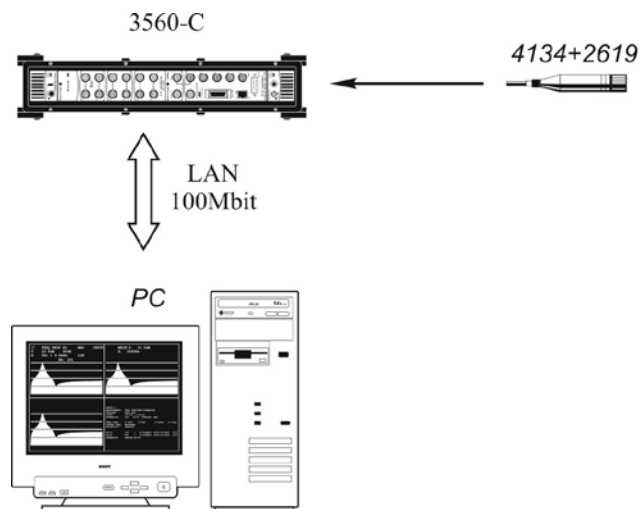


Рис. 1. Измерительная схема

Схема измерительного тракта представлена на рис. 1. Измерительный микрофон (мод. 4134) с предусилителем (мод. 2619) устанавливали на штативе на расстоянии 1 м от зоны резания. По высоте от пола микрофон был установлен на одном уровне с заготовкой на столе станка. Запись сигнала с мик-

рофона в ПК производили с помощью анализатора (мод. 3560-С). Экспериментальная установка представлена на рис. 2. В связи с тем, что типовые концевые фрезы имеют 2-3 зуба, для исследования влияния числа зубьев на уровень шума были спроектированы и изготовлены фрезы диаметром 30 мм с числом зубьев 2 и 6.



Рис. 2. Экспериментальная установка

В качестве входных параметров использовали: число зубьев фрезы  $z$ , ориентация волокон заготовки относительно направления подачи  $\varphi$  ( $0^\circ$  соответствует подаче вдоль,  $90^\circ$  – поперек волокон), подача на зуб  $S$ , частота вращения шпинделя  $n$ , глубина резания  $t$ , порода древесины (сосна и дуб). В качестве выходного параметра измеряли 1/3-октавные уровни звукового давления в диапазоне частот 20...3150 Гц, по которым в дальнейшем определяли общий уровень шума, а также уровень шума, скорректированный по шкале А.

Поскольку исследование проводили в действующем цехе, возможность отключить фоновые источники шума (другие станки и системы вентиляции) отсутствовала, т. е. на измеряемый собственный уровень шума работающего станка накладывался фоновый уровень шума в цехе. Поэтому предварительно был проведен замер фонового уровня шума от работающего оборудования в

цехе. Его величина составила 74,62 дБ (72,74 дБА). Спектр фонового шума представлен на рис. 3.

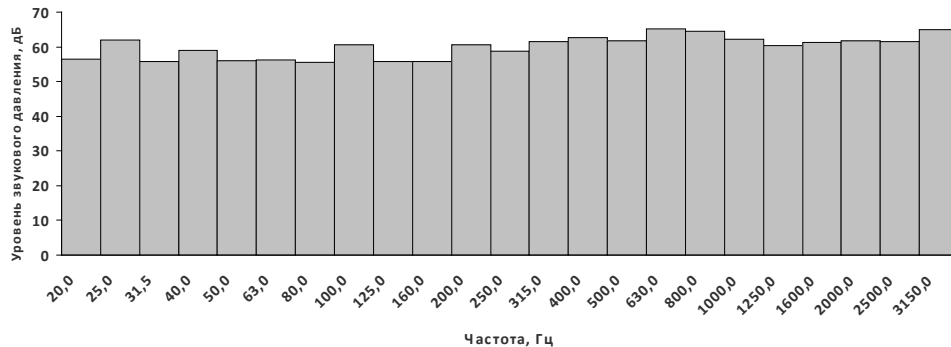


Рис. 3. 1/3-октавные уровни звукового давления фонового шума в цехе

Обработывающий центр, на котором проводили эксперименты, для закрепления заготовок оснащен вакуумным столом. Для создания вакуума использовался компрессор, расположенный рядом со станком и являющийся мощным источником шума. Согласно замерам уровень шума компрессора более чем на 10 дБ превышает фоновый уровень шума работающего оборудования в цехе и составляет 87,46 дБ (85,87 дБА). Спектр шума компрессора представлен на рис. 4.

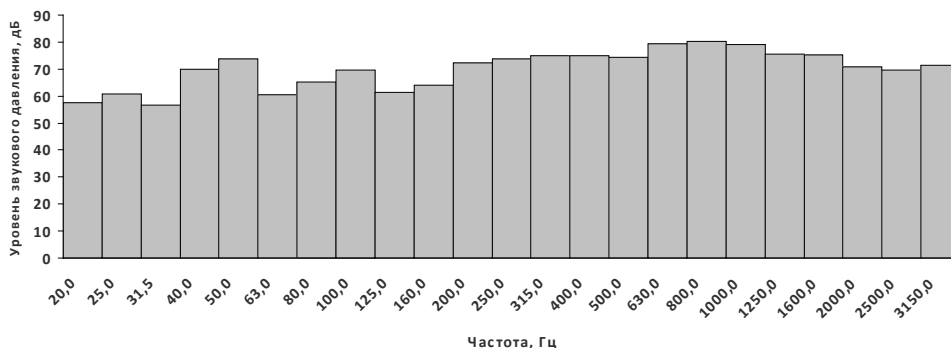


Рис. 4. 1/3-октавные уровни звукового давления шума компрессора

Чтобы устранить влияние шума компрессора на замеры уровня шума при резании, эксперимент проводили в моменты, когда компрессор периодически отключался. Результаты экспериментов представлены в таблице, из данных которой видно, что уровень шума при фрезеровании превышает фоновый уровень шума в цехе на 2...17 дБ в зависимости от режимов резания, при этом при обработке дуба уровень шума в среднем выше, чем при обработке сосны. Представляет интерес тот факт, что при наиболее производительных режимах резания (шестизубая фреза,  $n = 15000$  об/мин,  $S = 0,18$  мм/об) уровень шума превышал фоновый всего на 3...6 дБ (с учетом коррекции по шкале А). Следует отметить, что уровень шума в большинстве из режимов ниже уровня шума, создаваемого работой компрессора станка.

## Результаты экспериментов

Число зубьев фрезы	Ориентация волокон заготовки, град	Подача на зуб, мм/зуб	Частота вращения, тыс. об/мин	Глубина резания, мм	Уровень звукового давления при фрезеровании			
					сосны		дуба	
					дБ	дБА	дБ	дБА
2	0	0,06	5	6	81,00	77,21	82,16	77,51
6				83,09	79,67	82,61	78,20	
2	90			2	78,32	75,44	83,29	77,27
6				85,14	80,57	86,08	80,85	
2	0	0,18		2	77,38	74,64	81,30	76,10
6				83,57	80,57	83,51	80,74	
2	90			6	83,90	78,72	87,74	80,37
6				79,74	76,37	83,83	77,93	
2	0	0,06	15	2	84,65	78,19	84,95	81,24
6				81,50	79,09	84,74	78,17	
2	90			6	88,04	85,04	93,03	89,88
6				88,87	86,83	84,48	78,32	
2	0	0,18		6	87,03	84,58	88,83	85,68
6				81,47	78,53	83,40	75,79	
2	90			2	84,17	80,83	87,38	84,07
6				81,05	77,55	84,53	77,47	

Анализ спектров шума показал следующее. При частоте вращения шпинделя 5 тыс. об/мин (при фрезеровании как двузубой, так и шестизубой фрезой) в спектре присутствует подъем уровня на частоте врезания зубьев (рис. 5). При фрезеровании двузубой фрезой с частотой вращения 15 тыс. об/мин видны два подъема уровня: первый, более сильный – на частоте врезания зубьев, второй – на частоте вращения шпинделя (рис. 6). При фрезеровании шестизубой фрезой с частотой вращения 15 тыс. об/мин присутствует некоторый подъем уровня на частоте вращения шпинделя, на частоте врезания зубьев подъем уровня отсутствует (рис. 7). Подъем уровня шума на частотах 20...25 Гц на рис. 7 обусловлен, по всей видимости, работой цеховой системы вентиляции. На всех режимах присутствует некоторый подъем уровня на частоте 500 Гц, соответствующей одной из резонансных частот шпиндельного узла.

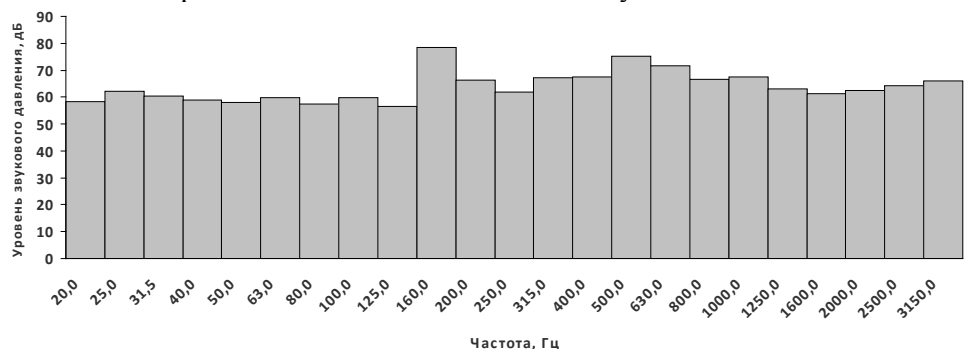


Рис. 5. 1/3-октавные уровни звукового давления шума при резании ( $n = 5$  тыс. об/мин;  $S = 0,06$  мм/зуб;  $t = 6$  мм;  $z = 2$ ; подача вдоль волокон; дуб)

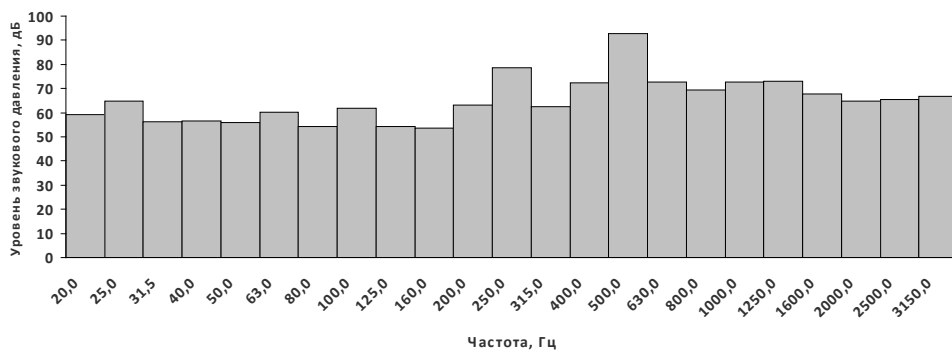


Рис. 6. 1/3-октавные уровни звукового давления шума при резании ( $n = 15$  тыс. об/мин;  $S = 0,06$  мм/зуб;  $t = 6$  мм;  $z = 2$ ; подача поперек волокон; дуб)

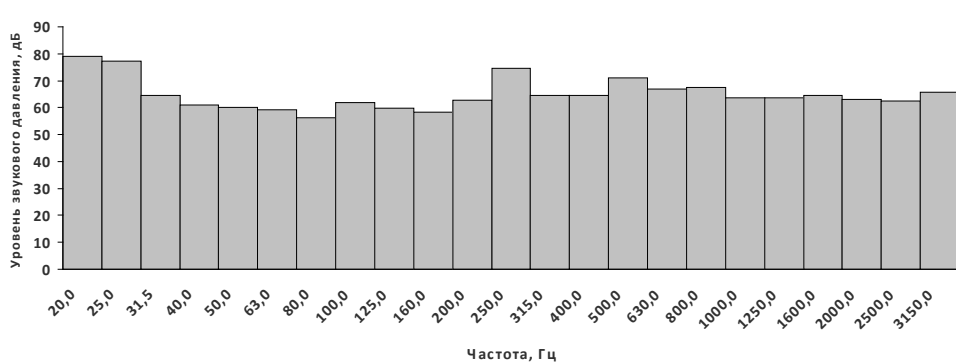


Рис. 7. 1/3-октавные уровни звукового давления шума при резании ( $n = 15$  тыс. об/мин;  $S = 0,18$  мм/зуб;  $t = 2$  мм;  $z = 6$ ; подача вдоль волокон; дуб)

### Выводы

1. При частоте вращения 5 тыс. об/мин в спектре шума превалирует частота врезания зубьев, при 15 тыс. об/мин и фрезеровании двузубой фрезой – частота врезания зубьев, в меньшей степени частота вращения шпинделя; при 15 тыс. об/мин и фрезеровании шестизубой фрезой присутствует только частота вращения шпинделя, частота врезания зубьев практически неразличима.

2. Уровень шума при высокоскоростном фрезеровании на 2...17 дБ превышает фоновый уровень шума в цехе, при этом в большинстве случаев уровень шума при резании ниже создаваемого компрессором станка.

3. Уровень шума при фрезеровании дуба в среднем выше, чем при фрезеровании сосны.

4. При наиболее производительных режимах резания с использованием шестизубой фрезы уровень шума превышает фоновый всего на 3...6 дБ, что позволяет использовать такие фрезы при высокоскоростном фрезеровании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев С.П., Казаков А.М., Колотилов Н.Н.* Борьба с шумом и вибрацией в машиностроении. М.: Машиностроение, 1970. 208 с.
2. *Иванов Н.И.* Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник. М.: Логос, 2008. 424 с.
3. *Цветков В.М.* Обеспечение безопасных условий эксплуатации и экологичности деревообрабатывающих станков фрезерной группы: дис. ... канд. техн. наук. Ростов Н/Д: ДГТУ, 2005. 125 с.
4. *Черемных Н.И., Чижевский М.П.* К вопросу уменьшения шума станков строительной группы // Лесн. журн. 1973. №1. С. 88–95. (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 02.04.2015

UDC 613.644

**The Analysis of Noise Level at High-Speed Milling of Wood**

*S.A. Cherepanov, Postgraduate student*

*D.A. Luzhanskiy, Postgraduate student*

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, 163002 Arkhangelsk, Russia; e-mail: serg-edu@yandex.ru

Noise is one of the major harmful production factors in a woodworking. Woodworking milling machines have high noise level, exceeding sanitary standards, however data on noise characteristics of modern milling machines with high frequencies are practically absent. It is analysed the influence of the modes of cutting, breed of wood and number of teeth of a mill on the level and a range of noise at high-speed milling of wood is carried out. Research was conducted on the modern processing center with numerical program control with use of a measuring microphone and the analyzer. Record of 1/3 octava levels of sound pressure when processing preparations from a pine and an oak of two teeth and six teeth mills on various modes of cutting was made. Also record of background noise level in shop and the machine compressor was made. The analysis of experimental data showed that in a noise range with low frequencies of rotation the frequency of incision of teeth dominates. At high frequencies of rotation, when milling by a two teeth mill in a range the frequency of incision of teeth and frequency of rotation of a spindle dominate, and when milling by a six teeth mill only the frequency of rotation of a spindle. Noise level when milling an oak is higher, than when milling a pine. Noise level at high-speed milling on 2 ... 17 dB exceeds background noise level in shop, thus, in most cases noise level when cutting lower than a noise level, the machine created by the compressor. At the most productive modes of cutting with use of a six teeth mill noise level exceeds background on only 3 ... 6 dB that allows to tell about prospects of use of such mills at high-speed milling.

*Keywords:* wood milling, noise range, level of sound pressure, frequency of teeth incision, cutting modes.

REFERENCES

1. *Alekseev S.P., Kazakov A.M., Kolotilov N.N.* *Bor'ba s shumom i vibratsiyey v mashinostroenii* [Fight Against Noise and Vibration in Mechanical Engineering]. Moscow, 1970. 208 p.



2. Ivanov N.I. *Inzhenernaya akustika. Teoriya i praktika bor'by s shumom* [Engineering Acoustics. Theory and Practice of Fight Against Noise]. Moscow, 2008. 424 p.
3. Tsvetkov V.M. *Obespechenie bezopasnykh usloviy ekspluatatsii i ekologichnosti derevoobrabatyvayushchikh stankov frezernoy gruppy*: Dis. kand. tekhn. nauk [Providing Safe Service Conditions and Environmental Friendliness of Woodworking Machines of Milling Group: Cand.Tech.Sci. Dis.]. Rostov-na-Donu, 2005. 125 p.
4. Cheremnyh N.I., Chizhevskiy M.P. К вопросу umen'shenija shuma stankov strogal'noj gruppy [To a question of reduction of noise of machines of planing group]. *Lesnoi zhurnal*, 1973, no1. p. 88–95.

Received on April 2, 2015

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.146

---



УДК 674.048

**УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОПИТКИ ДРЕВЕСИНЫ СПОСОБОМ «ПРОГРЕВ–ХОЛОДНАЯ ВАННА» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМИДОФОСФАТА КМ***© И.М. Озаркив<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.**Р.А. Демчина<sup>1</sup>, канд. хим. наук, доц.**П.П. Грыджук<sup>1</sup>, магистр**М.Ф. Федына<sup>1</sup>, канд. хим. наук, доц.**Б.М. Перетятко<sup>2</sup>, и. о. замначальника кафедры*<sup>1</sup>Национальный лесотехнический университет Украины, ул. Ген. Чупринки, д. 103, г. Львов, Украина, 79057; e-mail: igor.ozarkiv@gmail.com<sup>2</sup>Львовский государственный университет безопасности жизнедеятельности, ул. Клепаровская д. 35, г. Львов, Украина, 79000; e-mail: bodya01@gmail.com

Антипирены, созданные на основе сконденсированных соединений карбамида и фосфорной кислоты, не обладают высокой токсичностью, довольно дешевы и нашли применение в качестве антипирена – амидофосфата КМ. Целью работы было изучение возможности использования амидофосфата КМ для пропитки древесины разных пород методом «прогрев–холодная ванна». Перед нами стояла задача разработать эффективные режимы пропитки антипиреном. Синтез амидофосфата КМ производили за счет конденсации 85-й % ортофосфорной кислоты с карбамидом в расплаве при температуре 135 °С в мольном соотношении 1 : 1. Для проведения экспериментальных исследований использовали образцы древесины мягких пород размером 40×40×250 мм. Образцы предварительно нагревали в течение 60 мин до температуры 90 °С, погружали на 40 мин в холодный раствор антипирена (температурой 25 °С). Глубину пропитки образцов амидофосфатом КМ контролировали с помощью реакции на фосфат-ион. Для проведения огневых испытаний образцы древесины готовили по ГОСТ 16363 с учетом требований ГОСТ 2140. Образцы разных пород древесины размером 10×10×150 мм выпиляли из заболонной части древесины. Огневые испытания образцов различных пород древесины, пропитанных амидофосфатом КМ, проводили согласно ГОСТ 16383 и строительных норм НПБ 251–98 с использованием метода «огневой» трубы. Установлено, что древесина, защищенная амидофосфатом КМ, переходит из группы легковоспламеняющихся материалов в группу самозатухающих, а сам амидофосфат КМ можно отнести к антипиренам II-й группы огнезащитной эффективности при использовании 17 %-го водного раствора и расходе от 40...85 кг/м<sup>3</sup> в зависимости от породы древесины, обработанной методом «прогрев–холодная ванна». Следует отметить то, что во время огневых испытаний тления не наблюдалось. Самостоятельное горение после снятия теплового импульса продолжалось короткий промежуток времени (сосна – 32 с, дуб – 47 с). Воспламенение не обработанных антипиреном образцов наблюдалось через 15...20 с, защищенных – значительно позже

(сосна – 85 с, дуб – 52 с). Эти данные указывают на способность амидофосфата КМ снижать горение древесины. Средняя потеря массы древесины сосны составляла менее 16, дуба – менее 18 %.

*Ключевые слова:* пропитка древесины, антипирен, амидофосфат КМ, огнезащита, ортофосфорная кислота, синтез, конденсация.

Защита от биоогнезащиты деревянных изделий, конструкций и зданий на сегодня является одной из важных научно-практических проблем, которые требуют решения [2, 4, 6, 13]. Основные задачи в области комплексной огнезащиты древесины сводятся к повышению ее долговечности за счет образования оболочек, защищающих от влияния внешнего источника огня без изменения при этом условий эксплуатации и физико-механических свойств самой древесины.

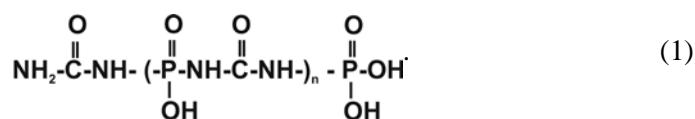
Анализ известных способов огнезащиты деревянных столярно-строительных изделий и конструкций показал, что именно химический способ огнезащиты с помощью антипиренов является наиболее надежным и перспективным. Известно [1, 2, 4–7, 10–13], что раньше использовали полихлорфенолы, сурьму- и хромсодержащие вещества для повышения био- и огнестойкости древесины. Но они наносили значительный ущерб и вред окружающей среде и человеку. На смену им пришли солевые антипирены, содержащие фосфатнокислый аммоний, буру, борную кислоту, карбонат натрия и др. Следует отметить, что они также имеют существенные недостатки: теряют свое влияние на огнезащиту со временем, вымываются водой, а также могут содержать компоненты, которые вызывают коррозию металлических конструкций, контактирующих непосредственно с древесиной. Некоторые солевые антипирены при повышении температуры (105 °С и выше) разлагаются, что усложняет процесс обработки ими древесины [7].

Новые пропиточные средства, в частности смеси солевого антипирена и полимерного антисептика ДСА-1 [3], нельзя использовать для обработки внешних древесных поверхностей из-за их способности к вымыванию, что сокращает срок их эксплуатации.

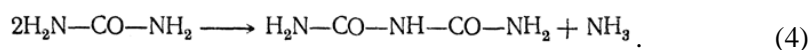
В последнее время все чаще используют антипирены на основании сконденсированных олигомеров, в частности на основе композиции фенолоспиртов и сконденсированных органосилоксанов [8, 9]. При пропитке древесины такими химическими средствами защиты в самом материале осуществляется конденсация фенолоспиртов с образованием полимерного каркаса фенолоформальдегидной смолы (ФФС) в структуре древесины. В качестве антипиренов применяют карбамидофурановые (КФуС) и карбамидо-меланиноформальдегидные (КМФС) смолы. Нужно отметить, что антипирены, созданные на основе фенолоспиртов (КФуС, КМФС), имеют достаточно большую токсичность, но их использование оправдано в условиях повышенной огнеопасности, когда стоимость изделий и их токсичность не являются первостепенными.

Антипирены на основе сконденсированных соединений карбамида и фосфорной кислоты (например, амидофосфат КМ), не обладают высокой токсичностью, довольно дешевы.

Для проведения исследований нами были выбраны антипирены с учетом их эффективности огнезащиты, стоимости и экологичности. Амидофосфат КМ является продуктом конденсации карбамида и ортофосфорной кислоты при температуре ~127 °С. Химическая формула амидофосфата КМ:

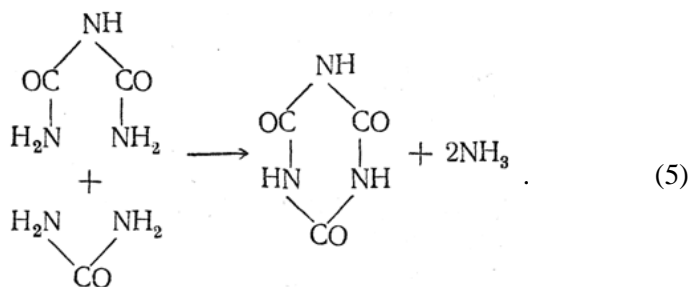


Исходные для синтеза вещества также могут быть использованы как антипирены. Карбамид при нагревании разлагается с образованием газообразного аммиака и углекислого газа, а также может претерпевать ряд эндотермических превращений, которые способствуют поглощению теплоты:



Биурет

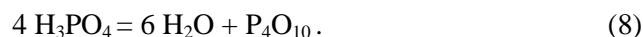
Биурет с карбамидом также конденсируется с образованием циануровой кислоты:



Все приведенные выше процессы характеризуются поглощением теплоты в достаточно широком диапазоне температур (150...200 °С). Другой компонент амидофосфатных олигомеров – ортофосфорная кислота – тоже может участвовать в эндотермических реакциях, в конечном виде он является источником пиролизной воды и инертного фосфорпентаоксида:

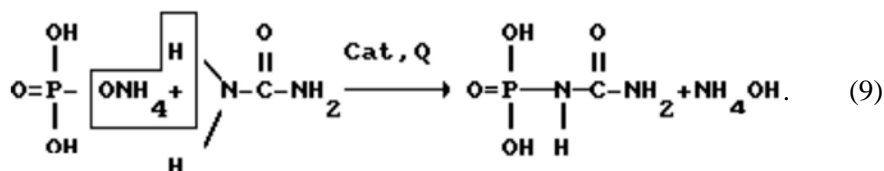


Последующее нагревание может привести к образованию три-(H<sub>5</sub>P<sub>3</sub>O<sub>10</sub>) и тетраполифосфорной (H<sub>6</sub>P<sub>4</sub>O<sub>13</sub>) кислот, а в результате пиролиза – к их полной дегидратации, вследствие чего образуется димер оксида фосфора (V) P<sub>4</sub>O<sub>10</sub>:

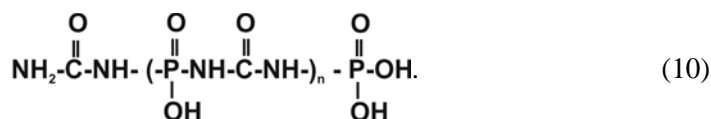


Очевидно, что перечисленные выше свойства карбамида и ортофосфорной кислоты будет сохранять и продукт их конденсации.

Карбамид конденсируется с ортофосфорной кислотой, вследствие чего образуется амидофосфат КМ. На его также можно получить при взаимодействии фосфата аммония и карбамида:



Из уравнения (9) видно, что продуктом конденсации по такой схеме является димер, однако в литературе встречаются сведения о возможном образовании олигомеров следующего строения:



Прогнозировалось, что амидофосфат КМ будет иметь преимущества по сравнению с другими соевыми антипиренами. В частности, он лучше поглощается древесиной, не содержит токсических веществ, не снижает показатели физико-механических свойств древесины, обладает большой растворимостью в воде.

Цели данной работы – исследование возможности проведения огневой защиты древесины с помощью амидофосфата КМ методом горячехолодных ванн, определение показателей пропитки древесины 17 %-ым водным раствором антипиренов, а также огнезащитных свойств древесины сосны и дуба, как объектов огнезащиты.

Синтез амидофосфата КМ проводили за счет конденсации 85 %-й ортофосфорной кислоты с карбамидом в расплаве при температуре 135 °С и мольном соотношении 1 : 1. Процесс проходил до рН до 5...6 на песчаной бане в четырехгорлой колбе, оснащенной мешалкой, термометром и обратным холодильником.

Для синтеза в реактор загружали необходимое количество карбамида и раствора фосфорной кислоты. Синтез проводили по заданному температурно-временному графику при перемешивании реакционной смеси с отбором проб.

После окончания реакции содержимое колбы охлаждали до температуры 65 °С и растворяли в воде. Следует отметить, что при таких условиях образуется продукт, имеющий наибольшую растворимость. Как показали исследования, молярное соотношение исходных веществ 1 : 1 приводит к получению продукта с наилучшими огнезащитными свойствами.

В эксперименте использовали образцы древесины мягких пород размером 40×40×250 мм. Их предварительно нагревали в течение 60 мин до температуры 90 °С и погружали на 40 мин в раствор антипирена с температурой 25 °С. Образцы взвешивали на электронных весах с точностью до 0,001 г. Объемы растворов измеряли с точностью до 1 мл.

Пропитку образцов осуществляли в емкости, изготовленной из материала, стойкого к коррозии. Образцы помещали таким образом, что они не касались друг друга, а также стенок ванны. Толщина слоя раствора над верхней плоскостью образца составляла 5...10 мм. Расход пропиточного раствора определяли взвешиванием образца до и после пропитки. Взвешивание пропитанных образцов проводили после прекращения стекания раствора с них. Остатки раствора на торцах снимали с помощью фильтровальной бумаги. У пропитанных образцов измеряли потерю массы через 1 ч, 3, 7 и 10 сут. Было установлено, что за 10 сут масса образцов при температуре 25 °С и относительной влажности воздуха до 60 % оставалась практически постоянной. Для образцов, пропитанных амидофосфатом КМ, высаливания не наблюдалось, хотя чувствовался запах аммиака, который со временем исчезал.

Глубину пропитки образцов амидофосфатом КМ (табл. 1) контролировали с помощью реакции на фосфат-ион. На поверхность образца древесины пипеткой сначала наносили раствор  $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$  в 30 %-й серной кислоте, потом, через 10...15 с, – раствор  $\text{SnCl}_2$  в  $\text{HCl}$ . Окрашенные в синий или синезеленый цвет участки образцов содержат фосфат-ион, который, на наш взгляд, является продуктом кислотного гидролиза амидофосфата КМ (влияние 30 %-й  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) или остатка  $\text{PO}_4^{3-}$  после синтеза. Нами установлено, что древесина, которая не пропитывалась амидофосфатом КМ, не давала качественной реакции на фосфат-ион.

Таблица 1

**Результаты пропитки методом «прогрев–холодная ванна»  
17 %-м водным раствором амидофосфата КМ ( $\rho = 1,080$  г/мл)**

Образец древесины	Масса образца, г		Объем поглощенного антипирена, мл	Глубина пропитки, мм		Расход антипирена, кг/м <sup>3</sup>
	до пропитки	после пропитки		поперек волокон	вдоль волокон	
Липа	251,6	344,0	84	10	40	230
Ольха	288,3	350,0	56	11	35	154
Береза	240,0	305,0	59	10	35	162
Сосна	232,0	266,0	31	6	18	85
Дуб	236,0	252,0	14	4	10	40

Для проведения огневых испытаний образцы древесины были подготовлены по ГОСТ 16363 с учетом требований ГОСТ 2140. Образцы разных пород древесины размером 10×10×150 мм выпиливали из заболонной части древесины. Перед нанесением огнезащитного препарата образцы доводили до постоянной массы в термостате при температуре  $(45 \pm 2)$  °С.

Обработку образцов антипиренами проводили через 30 мин после термостатирования, для предупреждения изменения массы за счет поглощения влаги до начала испытаний образцы помещали в эксикатор.

Огневые испытания образцов древесины различных пород, пропитанных амидофосфатом КМ, проводили согласно ГОСТ 16383 и строительных норм НПБ 251–98 с использованием метода «огневой» трубы.

За результат испытаний принимали среднее арифметическое трех значений, округленное до 1 %. Образцы поджигали спиртовой горелкой с высотой пламени 40...55 мм. После загорания образца горелку отодвигали и осуществляли фиксацию параметров процесса горения. Изменение температуры в огневой трубе учитывали с помощью термопар Х-А (хромель-алюмель), зафиксированных на 10 мм выше верхних торцов образцов. Результаты приведены на рис. 1, 2.

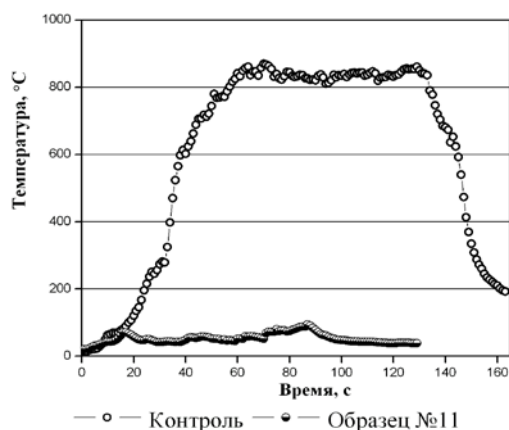
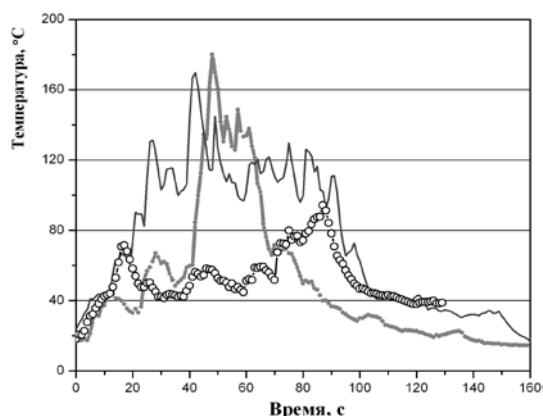


Рис. 1. Термограммы газов горения образцов древесины сосны и контрольного образца, обработанного амидофосфатом КМ

Рис. 2. Термограмма газов горения образцов древесины дуба и сосны, обработанных амидофосфатом КМ (— — дуб №11; — — дуб №4; ○ — сосна №11)



Как следует из результатов наших исследований (табл. 2, 3), древесина, защищенная амидофосфатом КМ, переходит из группы легковоспламеняющихся материалов в группу самозатухающих. Амидофосфат КМ можно отнести к антипиренам II группы огнезащитной эффективности при использовании 17 %-го водного раствора и расходе от 40 до 85 кг/м<sup>3</sup> в зависимости от породы древесины, обработанной методом «прогрев–холодная ванна». Следует отметить то, что во время огневых испытаний тления не наблюдалось. Самостоятельное горение после снятия теплового импульса имело место только на протяжении короткого промежутка времени, что указывает на способность примененного антипирена уменьшать процесс горения древесины.

Установлено, что, средняя потеря массы древесины сосны составляла меньше 16, дуба – 18 %. Как показывают термограммы газов горения (рис. 1, 2), контрольный образец, не обработанный антипиреном, уже через 15...20 с начинал загораться, что приводило к увеличению температуры, которая уже через 1 мин достигала 800 °С, и после прекращения огневого импульса (15 с) продолжал гореть до полного сгорания (потеря массы ~ 85 %).

Таблица 2

**Результаты огневых испытаний образцов древесины сосны,  
обработанных амидофосфатом КМ\***

№ образца	Масса образца, г			Потеря массы, %	Время, с	
	не обработанного	до испытания	после испытания		воспламенения	самостоятельного горения
1	6,557	6,804	5,700	16,22	81	33
2	6,076	6,227	5,245	15,77	85	26
3	5,904	6,201	5,368	13,44	90	20
4	7,871	7,995	6,678	16,47	83	25
5	7,925	8,135	6,889	15,31	80	20
6	6,155	6,390	5,332	16,55	81	35
7	6,506	6,657	5,457	18,03	80	60
8	8,278	8,746	7,560	13,56	86	15
9	6,309	6,728	5,580	17,06	80	60
10	7,615	7,835	6,552	16,37	83	40
11	7,578	8,124	6,989	13,97	87	10
12	7,003	7,255	6,219	14,28	80	38
Среднее значение для 12 образцов				15,59	83	32
Контрольный образец**	7,825	7,825	1,140	85,43	15	120

\* Тления образцов после их горения не наблюдалось.

\*\*Время тления контрольных образцов 120 с.



Таблица 3

**Результаты огневых испытаний образцов древесины дуба,  
обработанных амидофосфатом КМ\***

№ образца	Масса образца, г			Потеря массы, %	Время, с	
	не обработанного	до испытания	после испытания		воспламенения	самостоятельного горения
1	9,345	9,981	8,248	17,36	55	35
2	9,022	9,186	6,625	27,82	50	75
3	8,897	9,055	6,981	22,90	45	80
4	10,957	11,391	9,863	13,41	45	70
5	9,830	10,182	9,040	16,25	60	30
6	8,615	8,890	7,225	18,73	55	75
7	9,801	10,064	7,891	21,59	50	25
8	11,315	11,701	10,141	13,31	60	30
9	11,266	11,669	9,723	16,67	50	25
10	9,032	9,357	7,530	19,52	55	65
11	12,026	12,477	11,490	7,91	53	25
12	10,699	11,235	9,637	14,22	50	30
Среднее значение для 12 образцов				17,47	52	47
Контрольный образец**	10,285	10,285	2,290	77,73	30	170

\* Тление образцов после их горения не наблюдалось.

\*\*Время тления контрольных образцов 110 с.

Образцы древесины, обработанные антипиреном (как следует из графиков), удерживают практически стабильную температуру на протяжении всего времени.

Как видно из рис. 2, температура газов горения пропитанных образцов древесины дуба выше, чем сосны. Это можно объяснить меньшей огнезащитностью и большей потерей массы этих образцов из-за большей горючести древесины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Генель С.В. Старение древесины и фанеры, пропитанных антипиренами // Науч.-техн. реф. сб. «Механ. обраб. древесины». 1978. Вып. 11-12. С. 18–21.
2. Горшин С.Н. Консервирование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1977. 336 с.
3. Жартовський В.М. Шляхи створення та використання просочувальних вогнебізахисних препаратів ДСА-1, ДСА-2 для деревини і фанери // Кінетика і каталіз. 2006. № 1. С. 176–179.
4. Иванов Ф.М., Горшин С.Н., Уэйт Дж. Биоповреждения в строительстве / Под ред. Ф.М. Иванова, С.А. Горшина. М.: Стройиздат, 1984. 320 с.

5. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний: НПБ 251–98. [Введен в действие 31.06. 1998]. М.: ВНИИПО МВД России, 1998. 5 с.
6. *Озарків І.М., Губер Ю.М., Сорока Л.Я., Копинець З.П.* Основи біовогнезахисту деревини: навч. посібник. Львів: РВВ НЛТУ України, 2007. 72 с.
7. *Озарків І.М., Перетятко Б.М.* Аналіз біовогнезахисних препаратів для дерев'яних конструкцій і споруд // Науковий вісник: зб. наук.-техн. праць. Львів: Укр ДЛТУ, 2003. Вип. 13.4. С. 278–285.
8. Пат. 2147028 РФ С 09 К 21/04, С 09 D 5/16, В 27 К 3/52, В 05 D 7/06 / Гречман А.О., Гречман Т.А. Заявл. 06.04.1999; опубл. 27.03.2000.
9. Пат. 2172242 РФ В 27 К 3/52, В 27 К 3/34, С 07 F 9/22. Огнезащитный состав КМ / Леонович А.А., Шелоумов А.В.; Заявитель и патентообладатель СПб ГЛТА. № 2000113921/04; заявл. 31.05.2000; опубл. 20.08.2001.
10. *Перетятко Б.М., Озарків І.М., Демчина Р.О., Федина М.Ф.* Дослідження показників просочення деревини з допомогою антипіренів, створених на основі карбаміду та сполук фосфору // Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. Львів: НЛТУ України, 2011. Вип. 21.4. С. 169–173.
11. *Перетятко Б.М.* Особливості технологічного процесу вогнезахисту деревини // Науковий вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. Львів: НЛТУ України, 2011. Вип. 21.15. С. 77–81.
12. *Попов А.Н., Угрюмов С.А.* Фурановые олигомеры в производстве композиционных материалов // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. Брянск: БГИТА, 2008. Вып. 21. С. 260–261.
13. *Серговський П.С.* Гидротермическая обработка и консервирование древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1987. 360 с.

Поступила 23.11.14

УДК 674.048

### **Improvement of Technology of Wood Impregnation by Heat-Cold Bath with Amidophosphate KM as a Flame Retardant**

*I.M. Ozarkiv<sup>1</sup>, Doctor of Engineering, Professor*

*R.A. Demchina<sup>1</sup>, Candidate of Chemistry, Associate Professor*

*P.P. Grydzhuk<sup>1</sup>, Master*

*M.F. Fedyna<sup>1</sup>, Candidate of Chemistry, Associate Professor*

*B.M. Peretyatko<sup>2</sup>, Acting Deputy Head of Chair*

<sup>1</sup>National Forest University of Ukraine, General Chuprynka st., 103, Lvov, 79057, Ukraine; e-mail: igor.ozarkiv@gmail.com

<sup>2</sup>Lvov State University of Emergency Management, Kleparovskaya st., 35, Lvov, 79000, Ukraine; e-mail: bodya01@gmail.com

Flame retardants created as a result of condensed compounds of urea and phosphoric acid are not toxic, pretty cheap and used as a flame retardant – amidophosphate KM. The mission of the investigation was to study the possibility of using the amidophosphate KM for the impregnation of different kinds of wood by the so-called “heat-cold bath”. The task was to develop the effective modes of impregnation by the antypirene. The synthesis of the ami-

dophosphate KM was performed by condensing of 85 % ortho-phosphoric acid and urea in the melt at 135 °C at molecular ratio as 1: 1. The 40×40×250 mm sized samples of softwood were used for the experimental work. The preheated samples for 60 min at 90 °C were placed in a cold flame retarder solution for 40 min at 25 °C. In order to reveal the depth of impregnation by the amidophosphate KM the phosphate ion reaction was used. For the test of materials for fire-resistance the softwood samples were prepared according to the State Standard 16363 with the specifications of the State Standard 2140. The samples of different kinds of wood sized of 10×10×150 mm were sawed out from the sap-wood. The tests of different kinds of wood impregnated with the amidophosphate KM for fire-resistance were conducted according to the State Standard 16383 and the building regulation NPB 251–98 by the flame tube method. The results of the investigation reveal that impregnated wood with the amidophosphate KM can be traced from the group of flammable materials to the group of self-extinguishing materials; the amidophosphate KM is accepted as a flame retarder of the second group of fire rating when using of 17 % water solution and 40...85 kg per m<sup>3</sup> of wood depending on its kind, treated by the “heat–cold bath”. It should be noted, that during the tests of materials for fire-resistance a smoldering process was not observed. Self-combustion after the heat impulse removal took place for a short period of time (32 s for pine wood and 47 s for oak wood). The inflammation of the samples not treated with a flame retarder was observed in 15...20 s, of the impregnated samples – in 85 s of pine wood and in 52 s of oak wood. These data indicate the ability of the applied flame retarder to reduce the processes of wood burning. The average weight lost of pine wood was less than of 16 % and less than of 18 % for oak wood.

*Keywords:* wood impregnation, flame retarder, amidophosphate KM, flame retardance, ortho-phosphoric acid, synthesis, condensation.

#### REFERENCES

1. Genel' S. V. Starenie drevesiny i fanery, propitannykh antipirenamy [Aging of Wood and Plywood Impregnated by Flame Retardants]. *Nauch.-techn. sb. ref. "Meh. obrab. drevesiny"* [Scientific and Technical Abstracts Collection "Mechanical Wood Processing"], 1978, no. 11–12, pp. 18–21.
2. Gorshin S.N. *Konservirovanie drevesiny* [Wood Preservation]. Moscow, 1977. 336 p.
3. Zhartovskiy V.M. Shljahy stvorennja ta vykorystannja prosochuval'nyh vognеbi-ozahysnyh preparativ DSA-1, DSA-2 dlja derevyny i fanery [Creation and Use of Impregnating Biological Flame Retardants DSA–1 DSA–2 for Wood and Plywood]. *Kinetika i kataliz* [Kinetics and Catalysis], 2006, no. 1, pp. 176–179.
4. Ivanov F.M., Gorshin S.N., Weit G. et al. *Biopovrezhdeniya v stroitel'stve* [Bio-deterioration in Construction]. Moscow, 1984. 320 p.
5. *NPB 251–98. Ognезashchitnye sostavy i veshchestva dlya drevesiny i materialov na ee osnove. Obshchie trebovaniya. Metody ispytaniy* [Fire Regulations 251–98. Fire Retardant Compositions and Substances for Wood. General Requirements. Test Methods]. Moscow, 1998. 5 p.
6. Ozarkiv I.M. Guber Yu.M., Soroka L.Ya., Kopinets' Z.P. *Osnovy biovognезahystu derevyny* [Basics of Biological Flame Retardants of Wood]. Ukraine, Lvov, 2007. 72 p.

7. Ozarkiv I.M., Peretyatko B.M. Analiz biovognezahysnyh preparativ dlja der-ev'janyh konstrukcij i sporud [Analysis of Biological Flame Retardants for Wooden Constructions and Buildings]. *Naukoviy visnik NLTU* [Scientific Bulletin of NLTU]. Ukraine, Lvov, 2003, no. 13.4, pp. 278–285.
8. Grechman A.O., Grechman T.A. *Ognebiozashchitnyy propitochnyy sostav* [Biological Flame Retardant Impregnating Compound]. Patent RF, no. 2147028, 2000.
9. Leonovich A.A., Sheloumov A.V. *Sposob polucheniya antipirena* [Method of Flame Retardants Producing]. Patent RF, no. 2172242, 2001.
10. Peretyatko B.M., Ozarkiv I.M., Demchina R.O., Fedina M.F. Doslidzhennja pokaznykiv prosochennja derevyny z dopomogoj antypireniv, stvorenyh na osnovi karbamidu ta spoluk fosforu [Study of Wood Impregnation Using the Flame Retardants Based on Carbamide and Phosphorous Compounds]. *Naukoviy visnik NLTU* [Scientific Bulletin of NLTU]. Ukraine, Lvov, 2011, no. 21.4, pp. 169–173.
11. Peretyatko B.M. Osoblyvosti tehnologichnogo procesu vognezahystu derevyny [Process Features of Wood Fire Protection]. *Naukoviy visnik NLTU* [Scientific Bulletin of NLTU]. Ukraine, Lvov, 2011, no. 21.15, pp. 77–81.
12. Popov A.N., Ugryumov S.A. Furanovye oligomery v proizvodstve kompozitsionnykh materialov [Furan Oligomers in the Production of Composite Materials]. *Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa: sb. nauch. tr.* [Actual Problems of the Forest Complex]. Bryansk, 2008, no. 21, pp. 260–261.
13. Sergovs'kiy P.S. *Gidrotermicheskaya obrabotka i konservirovanie drevesiny* [Hydrothermal Treatment and Preservation of Wood]. Moscow, 1987. 360 p.

Received on November 23, 2014

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.154

---

УДК 676.12

## **УПРОЧНЕНИЕ МАКУЛАТУРНЫХ ВИДОВ БУМАГИ И КАРТОНА, ПРОКЛЕЕННЫХ В КИСЛОЙ, НЕЙТРАЛЬНОЙ И СЛАБОЩЕЛОЧНОЙ СРЕДАХ**

© *С.А. Гордейко, асп.*

*Н.В. Черная, д-р техн. наук, проф.*

*Е.П. Шишаков, канд. техн. наук*

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, д. 13а,  
г. Минск, Беларусь, 220050; e-mail: svetastar1988@mail.ru

Статья посвящена изучению влияния упрочняющих соединений на основе синтетических каучуковых латексов и полиаминоамидных соединений при проклейке в кислой (рН 4,8...5,2), нейтральной (рН 6,5...7,2) и слабощелочной (рН 7,3...7,8) средах на гидрофобность, прочность образцов бумаги. В настоящее время для придания бумаге и картону требуемой прочности, характеризуемой прочностью в сухом и во влажном состояниях, применяют преимущественно полиаминоамидэпихлоргидриновые (Melapret PAE/A, Maresin и др.) и меламино- и мочевино-формальдегидные смолы. Их вводят в бумажную массу, содержащую природные и синтетические проклеивающие вещества, проявляющие гидрофобизирующие свойства в кислой, нейтральной и слабощелочной средах. Разнообразные виды природных проклеивающих веществ в виде гидродисперсий модифицированной канифоли используют для проклейки волокнистой суспензии в кислой и нейтральной средах, а синтетических – в нейтральной и слабощелочной. При этом процессы проклейки и упрочнения являются конкурирующими. Поэтому особый научный и практический интерес представляют исследования, которые направлены на изучение синтетических полимеров, проявляющих упрочняющее действие на клееные виды бумаги и картона, полученные при рН 4,8...7,8. Цель работы – разработка технологического режима гидрофобизации и упрочнения макулатурных видов бумаги и элементарных слоев картона в кислой, нейтральной и слабощелочной средах в присутствии синтетических полимеров на основе синтетических каучуковых латексов и полиаминоамидных соединений. Методология проведения работы состояла в том, что сначала подбирали модельный объект волокнистой суспензии (целлюлозу, которая по фракционному составу и бумагообразующим свойствам моделирует вторичное волокнистое сырье – макулатуру), затем в нее вводили гидрофобизирующие вещества в виде гидродисперсии модифицированной канифоли (укрепленный клей марки ТМ) и дисперсии АКД марки Dumar VP 738 и синтетические полимеры, способные оказывать упрочняющее действие на бумагу и элементарные слои картона, изготовленные из вторичного (макулатурного) сырья. В качестве таких полимерных соединений использовали катионный крахмал марки Hi Cat («Roquette», Франция), полиаминоаминэпихлоргидридную смолу (товарный продукт Melapret PAE/A («Кемиопол», Польша) и новый полимер (получен на кафедре химической переработки древесины Белорусского государственного технологического университета), представляющий собой продукт поликонденсации адипиновой кислоты с диэтилентриамином, модифицированный смоляными кислотами, а также стирол-акрилатную дисперсию Acronal 290 D («BASF», Германия). Из полученной бумажной

массы изготавливали образцы бумаги и элементарные слои картона, для которых определяли гидрофобность и прочность в сухом состоянии.

*Ключевые слова:* макулатура, проклейка, упрочнение, катионный крахмал, полиамидаминэпихлогидридная смола, синтезированный полиаминоамидный полимер, стирол-акрилатная дисперсия.

### *Введение*

Объем потребления вторичного волокнистого сырья (макулатуры) в целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) постоянно возрастает в связи с высокой стоимостью и дефицитом первичного волокнистого сырья (целлюлозы). Из имеющегося перечня макулатурного сырья МС-1А ... МС-13В чаще всего используют макулатуру марок МС-5Б, МС-6 и МС-7Б, из которой изготавливают достаточно широкий ассортимент бумажной и картонной продукции (тароупаковочные и санитарно-гигиенические виды бумаги, коробочный и упаковочный картон и т. д.), отличающийся свойствами и областью применения. Многотоннажными видами бумаги и картона являются такие, которые используют в строительной (для сыпучих материалов), парфюмерно-косметической (коробочный картон) и легкой (тарный картон, гофрированный картон), а также в полиграфической индустрии (газетная и журнальная виды бумаги) [2].

Возникающие технологические трудности, вызванные невысокими бумагообразующими свойствами макулатурного сырья и нестабильным его фракционным составом, диктуют необходимость применения вспомогательных химических веществ, способных придавать клееным видам бумаги и картона требуемую прочность в сухом и во влажном состояниях [1].

Научный и практический интерес представляют данные об эффективности упрочняющего действия разнообразных полимерных соединений (натуральных и синтетических) на бумагу и элементарные слои картона, изготовленные из макулатурного сырья и проклеенные в кислой, нейтральной и слабощелочной средах.

В настоящее время на предприятиях ЦБП широко применяют модифицированный (катионированный) крахмал, а также полиамидаминэпихлогидридную и меламино- и мочевиноформальдегидную смолы (синтетические полимеры), для гидрофобизации – модифицированную канифоль (проклейка в кислой среде) и димеры алкилкетенов (проклейка в нейтральной и слабощелочной средах). Однако эффективность их действия снижается при замене первичного волокнистого сырья (целлюлозы) на вторичное (макулатуру) [3].

К перспективным способам упрочнения массовых видов бумаги и картона, изготовленных из макулатурного сырья, относятся способы, основанные на правильном подборе и применении веществ функционального назначения. В научной литературе отсутствуют данные о применении в технологии упрочнения в проклеенной макулатурной массе стирол-акрилатной дисперсии

и нового соединения, полученного на кафедре химической переработки древесины БГТУ и представляющего собой продукт поликонденсации адипиновой кислоты с диэтилентриамином (ППАКД), модифицированный канифолью [5].

#### Методы исследования

Объектами исследования являлись бумажные массы, представляющие дисперсные системы, содержащие целлюлозные (модельный объект) и макулатурные (исследуемый объект) волокна, гидрофобизирующие, упрочняющие и удерживающие вещества, и изготовленные из них образцы бумаги и элементарных слоев картона.

Для моделирования бумагообразующих свойств вторичного волокнистого сырья (макулатуры) МС-5Б, МС-6Б, МС-7Б определены фракционный состав, средневзвешенная длина волокон и водоудерживающая способность волокнистых суспензий из целлюлозы сульфатной из лиственных пород древесины небеленой (ГОСТ 28172–89) (табл. 1) и данной группы макулатуры.

Таблица 1  
Бумагообразующие свойства волокнистых суспензий

Количество циклов переработки	Остаток, %, на сите, меш.					Средневзвешенная длина волокон, мм	Водоудерживающая способность, %
	16	30	50	100	>100		
<i>Целлюлоза сульфатная из лиственных пород древесины</i>							
1	0,2	24,5	39,6	16,5	19,2	1,00	189,6
2	0,3	20,1	33,8	21,0	24,2	0,97	161,3
3	0,2	19,3	28,8	25,8	25,9	0,98	154,5
4	0,1	17,1	30,9	25,5	26,4	0,91	150,1
5	0,2	16,1	24,1	31,8	27,8	0,93	148,3
6	0,1	14,6	19,2	36,4	29,7	0,89	143,4
7	0,1	11,6	18,6	37,2	32,5	0,90	136,1
8	0,0	4,5	12,1	42,8	40,6	0,86	134,2
<i>Макулатура марки МС-6Б</i>							
–	0,2	18,5	29,6	25,5	26,2	0,95	151,6

Установлено, что в качестве волокнистого сырья, моделирующего бумагообразующие свойства макулатурных волокон (МС-5Б, МС-6Б, МС-7Б), можно использовать данный вид целлюлозы.

Суть приготовления волокнистой суспензии заключалась в том, что 4%-ую волокнистую суспензию, распущенную в дезинтеграторе марки БМ-3, размалывали в мельнице НДМ-3 комплекта ЛКР-1 до степени помола  $(38 \pm 2)^\circ \text{ШР}$  [4].

В кислой среде в качестве гидрофобизирующих веществ для проклейки использовали гидродисперсию модифицированной канифоли, которую получали разбавлением водой 70 %-го укрепленного клея-паты марки ТМ (ТУ РБ 600012243.007–2000) до концентрации 2 %, в нейтральной и слабощелочной средах – водную дисперсию димера алкилкетена АКД, выпускаемую по ТУ РБ 2499-004-88593806–2010 под товарной маркой Dumar VP 738. Для осуществления процесса электролитной коагуляции гидродисперсии модифицированной канифоли ТМ использовали электролит – сульфат алюминия (ГОСТ 12966–85), введением которого в бумажную массу обеспечивали рН 4,8...5,2. Присутствие в бумажной массе димера алкилкетена АКД не требовало использования электролита, при этом рН бумажной массы находился в диапазоне 6,5...7,8.

Для придания проклеенным образцам бумаги и элементарным слоям картона требуемой влагонепроницаемости применяли традиционно используемый катионный крахмал марки Hi Cat («Roquette», Франция), полиамидо-аминэпихлоргидридную смолу (товарный продукт Melapret PAE/A («Кемиопол», Польша) и новый полимер ППАКД [6], а также стирол-акрилатную дисперсию Acongol 290 D («BASF», Германия).

Для получения бумажной массы, проклеенной в кислой среде (рН 4,8...5,2), в волокнистую суспензию последовательно вводили 2 %-ую гидродисперсию модифицированной канифоли ТМ (расход 0,4 % от а. с. в.), 2 %-й раствор конкретного исследуемого синтетического полимерного соединения (расход увеличивали от 0 до 0,1% от а. с. в.) и 5 %-й раствор электролита (до обеспечения рН 4,8...5,2). Для получения бумажной массы, проклеенной в нейтральной (рН 6,5...7,2) и слабощелочной (рН 7,2...7,5) средах, в волокнистую суспензию последовательно вводили 2 %-ую дисперсию АКД (расход 0,14 % от а. с. в.) и 2 %-й раствор конкретного исследуемого синтетического полимерного соединения (расход увеличивали от 0 до 0,54 % от а. с. в.).

Образцы бумаги массой 80 г/м<sup>2</sup> готовили на листоотливном аппарате «Rapid-Ketten» (фирма «Ernst Naage», Германия) из бумажной массы, представляющей собой дисперсную систему, в которой дисперсной фазой являлись волокна и частицы образовавшихся упрочняющих и проклеивающих комплексов, дисперсионной средой – вода.

Прочность в сухом состоянии исследуемых образцов определяли на вертикальной машине М350-5СТ («Testometric», Англия) по ISO 1924/24, SCAN P67 и TAPPI T494, гидрофобность (впитываемость при одностороннем смачивании) – на аппарате Кобба по ГОСТ 12606–82Е.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Исследуемые композиции бумажных масс, отличающиеся видом и расходом полимерных соединений (ПС), приведены в табл. 2, свойства образцов бумаги и элементарных слоев картона, полученных из бумажных масс (композиции 1–8), – на рис. 1, 2.

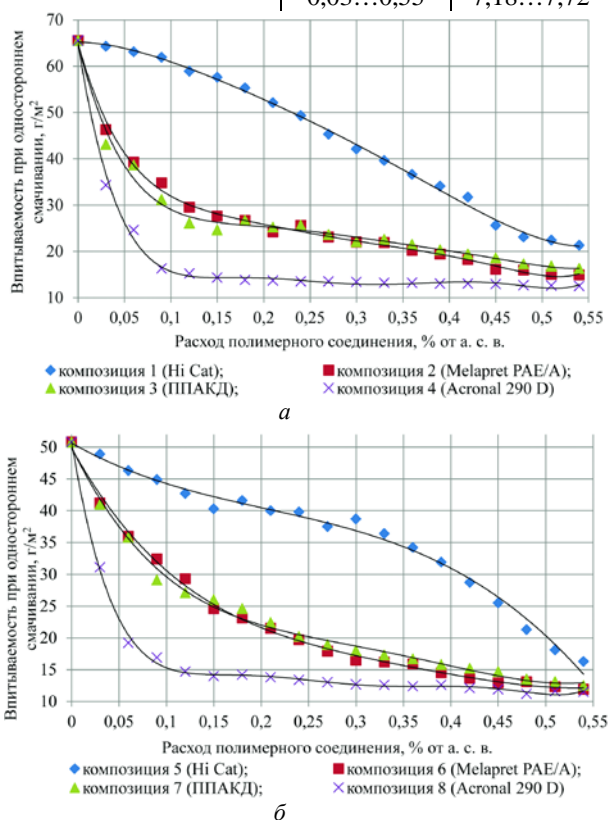


Таблица 2

**Вид и расход полимерного соединения в бумажных массах,  
проклеенных в кислой, нейтральной и слабощелочной средах**

Номер композиции бумажной массы	Полимерное соединение	Расход ПС, % от а. с. в.	pH бумажной массы
<i>Получение бумажной массы в кислой среде (pH 4,8...5,2), проклеенной гидродисперсией ТМ в присутствии электролита</i>			
1	Катионный крахмал Hi Cat	0,03...0,55	5,10...5,20
2	Полиамидаминэпихлоргидридная смола Melapret PAE/A	0,03...0,55	4,81...4,84
3	ППАКД	0,03...0,55	5,17...5,20
4	Стирол-акрилатная дисперсия Acronal 290 D	0,03...0,55	5,01...5,14
<i>Получение бумажной массы в нейтральной (pH 6,5...7,2) и слабощелочной (pH 7,3...7,8) средах, проклеенной дисперсией АКД</i>			
5	Катионный крахмал Hi Cat	0,03...0,55	7,12...7,31
6	Полиамидаминэпихлоргидридная смола Melapret PAE/A	0,03...0,55	6,67...6,80
7	ППАКД	0,03...0,55	7,01...7,65
8	Стирол-акрилатная дисперсия Acronal 290 D	0,03...0,55	7,18...7,72

Рис. 1. Впитываемость при одностороннем смачивании образцов бумаги, проклеенных в кислой (а), нейтральной и слабощелочной (б) средах, в зависимости от вида и расхода полимерного соединения



Как видно из рис. 1, с увеличением расхода полимерных соединений (катионного крахмала марки Hi Cat, полиамидаминэпихлогидридной смолы Melapret PAE/A, ППАКД и стирол-акрилатной дисперсии Acronal 290 D) от 0 до 0,55 % от абс. сухого вещества впитываемость при одностороннем смачивании исследуемых образцов уменьшается от 65,5 до 12,5 г/м<sup>2</sup>, что свидетельствует о повышении гидрофобности образцов бумаги и элементарных слоев картона. Минимальная впитываемость при одностороннем смачивании 14,0...16,0 г/м<sup>2</sup> достигается для образцов бумаги и элементарных слоев картона, полученных из композиций 4 и 8, содержащих стирол-акрилатную дисперсию Acronal 290 D в количестве 0,12...0,15 % от а. с. в. и проклеенных в кислой (рН 4,8...5,2), нейтральной (рН 6,5...7,2) и слабощелочной (рН 7,3...7,8) средах. При использовании в составе бумажной массы катионного крахмала Hi Cat в количестве 0,51...0,54 % от а. с. в. впитываемость при одностороннем смачивании для исследуемых образцов составила 21,3...22,4 и 16,3...18,1 г/м<sup>2</sup>, проклеенных соответственно в кислой и нейтральной средах.

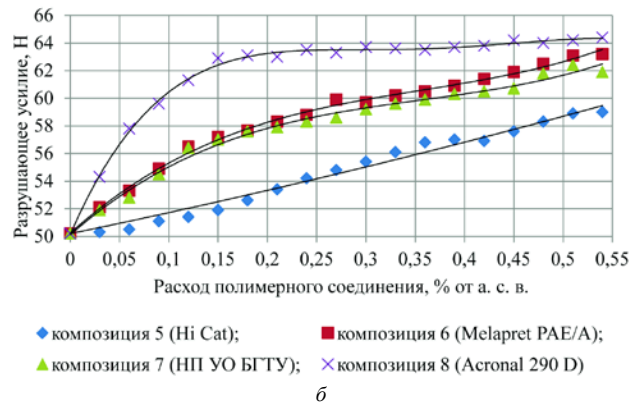
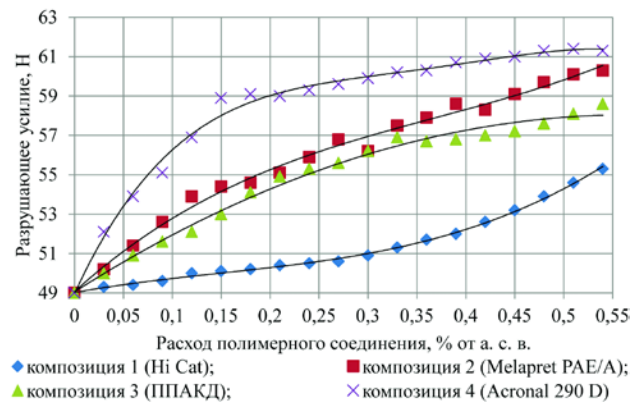


Рис. 2. Разрушающее усилие образцов бумаги, проклеенных в кислой (а), нейтральной и слабощелочной (б) средах, в зависимости от вида и расхода полимерного соединения

Наилучшей гидрофобностью обладают образцы бумаги, полученные из композиций 4 (рН 5,01...5,14) и 8 (рН 7,18...7,72) (присутствует Acronal 290 D) и имеющие впитываемость при одностороннем смачивании не более 14,9 и 14,0 г/м<sup>2</sup> соответственно.

Аналогичные зависимости получены нами для образцов бумаги и элементарных слоев картона (табл. 2), изготовленных из вторичного (макулатура марок МС-5Б, МС-6Б, МС-7Б) волокнистого сырья вместо первичного (целлюлоза из лиственных пород древесины (ГОСТ 28172–89 и ГОСТ14940–96), что подтверждает правильность выбора модельного волокнистого сырья – целлюлозы из лиственных пород древесины.

Следует отметить, что во всем изученном диапазоне расходов полимерных соединений наблюдается прирост прочности для исследуемых образцов бумаги и элементарных слоев картона, проклеенных в кислой, нейтральной и слабощелочной средах. Кроме того, эффективность действия всех синтетических полимерных соединений выше, чем при использовании исследуемого природного (крахмал). Наилучший эффект упрочнения исследуемых образцов в сухом состоянии проявляется для композиции 4 (разрушающее усилие 61,3 Н) и 8 (64,4 Н). Установлено, что стирол-акрилатная дисперсия оказывает достаточно высокое упрочняющее и гидрофобизирующее действие на образцы бумаги и элементарных слоев картона, изготовленные из макулатурного сырья.

#### *Выводы*

1. Для компенсации потери прочности бумаги, изготовленной из вторичного (макулатура) волокнистого сырья вместо первичного (целлюлоза), целесообразно использовать стирол-акрилатную дисперсию (расход 0,12...0,15 % от а. с. в.) при проклейке как в кислой, так и в нейтральной и слабощелочной средах. При этом прочность в сухом состоянии (разрушающее усилие) и гидрофобность (впитываемость при одностороннем смачивании) образцов бумаги и элементарных слоев картона находятся в пределах 56,9...62,3 Н и 14,0...15,2 г/м<sup>2</sup> соответственно.

2. Разработанный технологический режим упрочнения бумаги и элементарных слоев картона, проклеенных в кислой, нейтральной и слабощелочной средах, основан на последовательном введении в волокнистую суспензию стирол-акрилатной дисперсии марки Acronal 290 D (расход 0,12 % от а. с. в.), АКД марки «Dumar VP 738» (расход 0,11 % от а. с. в.) и катионного полиэлектролита марки «Lycrid P48» (расход 0,05 % от а. с. в.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников В.Л. Бумага и картон из волокнисто-полимерных композиций. Минск: БГТУ, 2004. 274 с.

2. Кулешов А.В. Осипов А.С. Влияние цикличности использования макулатурного волокна на бумагообразующие свойства // Лесн. журн. 2008. № 4. С. 132–139. (Изв. высш. учеб. заведений).

3. Осипов П.В. Совершенствование производства продукции со свойствами влапопрочности // Наука и технология. 2012. № 7. С. 56–59.

4. Черная Н.В., Жолнерович Н.В. Технология бумаги и картона: метод. указания к лабораторным работам. Минск: БГТУ, 2006. 56 с.

5. Черная Н.В., Колесников В.Л., Жолнерович Н.В. Технология производства бумаги и картона. Минск: БГТУ, 2013. 435 с.

6. Флейшер В.Л. Получение импортзамещающего азотсодержащего полимера с упрочняющим действием на макулатурные виды бумаги и картона // Материалы. Технология. Инструменты. 2014. №1. С. 87–89.

Поступила 15.12.14

UDC 676.12

### **Reinforcement of Scrap Paper and Recycled Cardboard Sized in Acidic, Neutral and Weakly Alkaline Media**

*S.A. Gordeyko, Postgraduate Student*

*N.V. Chernaya, Doctor of Engineering, Professor*

*E.P. Shishakov, Candidate of Engineering*

Belarusian State Technological University, Sverdlova st., 13, block A, Minsk, 220050, Belarus; e-mail: svetastar1988@mail.ru

The paper is devoted to the study of the strengthening connections effect, based on synthetic rubber latex and polyaminoamide compounds in the sizing in acidic (pH 4.8–5.2), neutral (pH 6.5–7.2) and weakly alkaline (pH 7.3–7.8) media, on the hydrophobicity and strength of the paper samples. Now the polyamideamine-epichlorohydrin (Melapret PAE/A, Maresin, etc.), melamine-formaldehyde and urea-formaldehyde resins are applied to reinforce the paper and cardboard to be resistant in dry and wet conditions. The resins are introduced into the pulp containing natural and synthetic sizing agents with hydrophobic properties in acidic, neutral and weakly alkaline media. A variety of natural sizing agents in the form of modified resins hydrodispersions are used for fiber suspension sizing in acidic and neutral media, and synthetic – in neutral and weakly alkaline media. The processes of sizing and hardening are competing. Therefore, the studies of the synthetic polymers with a strengthening effect on the sized paper and cardboard produced at pH 4.8–7.8 are of special scientific and practical interests. The mission of the paper is the developing of a technological mode of water-repellency treatment and the reinforcement of scrap paper and basic layers of cardboard in acidic, neutral and weakly alkaline media in the presence of synthetic polymers based on the synthetic rubber latex and polyaminoamide compounds. We started with a selection of fiber suspension model (pulp, simulating the secondary fibrous raw material – waste paper by its fractional composition and papermaking properties), and then we administered the hydrophobic agents such as the modified resins hydrodispersion (a reinforced size of TM brand) and AKD dispersions of Dymar VP 738 brand and synthetic polymers providing a strengthening effect on the basic paper and cardboard layers manufactured from the secondary (waste paper) raw materials. As the polymer compounds we used a cationic

starch of Hi Cat brand (“Roquette”, France), polyamideamine-epichlorohydrin resin (Melapret PAE/A (“Kemiopol”, Poland)) and a new polymer obtained at the Department of chemical processing of wood of Belarusian State Technological University – the polycondensate of hexandioic acid with diethylenetriamine, modified by rosin acids, and styrene-acrylate dispersion Acronal 290 D (“BASF”, Germany). From the resulting pulp the paper samples and basic cardboard layers were prepared, and dry hydrophobicity and strength were determined.

*Keywords:* waste paper, paper sizing, reinforcement, cationic starch, polyamideamine-epichlorohydrin resin, synthesized polyaminoamide polymer, styrene-acrylate dispersion.

#### REFERENCES

1. Kolesnikov V.L. *Bumaga i karton iz voloknisto-polimernykh kompozitsiy* [Paper and Board Produced from Fibrous and Polymeric Furnishing]. Minsk, 2004. 274 p.
2. Kuleshov A.V., Osipov A.S. Vliyanie tsiklichnosti ispol'zovaniya makulturnogo volokna na bumagoobrazuyushchie svoystva [Effect of Cyclical Use of Recycled Fiber on the Paper-Forming Properties]. *Lesnoy zhurnal*, 2008, no. 4, pp. 132–139.
3. Osipov P.V. Sovershenstvovanie proizvodstva produktsii so svoystvami vlagoprochnosti [Rationalization of Production of Wet-Strength Properties]. *Nauka i tekhnologiya*, 2012, no. 7, pp. 56–59.
4. Chernaya N.V., Zholnerovich N.V. *Tekhnologiya bumagi i kartona: metod. ukazaniya k laboratornym rabotam* [Technology of Paper and Paperboard: Laboratory Operations Manual]. Minsk, 2006. 56 p.
5. Chernaya N.V., Kolesnikov V.L., Zholnerovich N.V. *Tekhnologiya proizvodstva bumagi i kartona* [Technology of Paper and Board Industry]. Minsk, 2013. 435 p.
6. Fleysher V.L. Poluchenie importzameshchayushchego azotsoderzhashchego polimera s uprochnyayushchim deystviem na makulturnye vidy bumagi i kartona [Preparation of Import Substitution Nitrogenated Polymer with Reinforcement on Scrap Paper and Cardboard]. *Materialy. Tekhnologiya. Instrumenty*, 2014, no. 1, pp. 87–89.

Received on December 15, 2014

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.165

---

УДК 676.017

**ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА  
БЕЛЕННОЙ ЛИСТВЕННОЙ СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В КАЧЕСТВЕ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ  
БЕРЕЗЫ И ОСИНЫ В СООТНОШЕНИИ 70:30**

© Л.А. Миловидова<sup>1</sup>, канд. техн. наук, вед. науч. сотр.

Т.А. Королева<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.

М.Е. Романов<sup>2</sup>, инж.-технолог

Е.О. Окулова<sup>1</sup>, асп.

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: lmilovidova@mail.ru

<sup>2</sup>ООО БКТ «Сервис», ул. Можайская, д.18, литера А, пом. 6Н, г. С.-Петербург, Россия, 190013; e-mail: maxim.romanov@bktservice.ru

Основными породами лиственного древесного сырья для предприятий целлюлозно-бумажной промышленности России остаются береза и осина, которые имеют существенные различия в плотности и морфологии волокна, что оказывает существенное влияние как на технологию производства целлюлозы, так и на ее свойства. Результаты ранее выполненного исследования свидетельствуют, что экономически целесообразно увеличивать содержание древесины березы в составе лиственного сырья только до 70 %. Дальнейшее повышение приводит к неоправданному росту затрат на производство беленой целлюлозы из-за увеличения расхода белящих реагентов. Однако расход реагентов на отбелку связан не только с породным составом древесины, но и с реакционной способностью компонентов, входящих в состав технической целлюлозы, в первую очередь – лигнина, реакционная способность которого в значительной степени зависит от условий варки. Проведено исследование влияния параметров варки лиственной древесины при содержании в древесном сырье 70 % березы на белимость (способность целлюлозы к отбелке). Ее обычно оценивают по расходу диоксида хлора на 1 ед. Каппа. В лабораторных условиях были проведены варки древесины и получены образцы целлюлозы с числом Каппа 17...18. Установлено, что положительное влияние на белимость целлюлозы из такого сырья оказывает повышение концентрации активной щелочи до 60 г/л, что соответствует расходу активной щелочи 18,0 % в ед. Na<sub>2</sub>O, и сокращение продолжительности стоянки на конечной температуре до 40 мин (температура варки 156 °С). Последующее проведение двухступенчатой кислородно-щелочной обработки позволяет дополнительно повысить белимость лиственной сульфатной целлюлозы.

*Ключевые слова:* лиственная целлюлоза, древесина березы и осины, условия варки целлюлозы, белимость целлюлозы, кислородно-щелочная обработка.

Одним из главных направлений развития целлюлозно-бумажной промышленности в России является увеличение производства новых высокорентабельных видов бумаги и картона, которое сопровождается совершенствованием структуры потребления древесного сырья и вовлечением в переработку ресурсов лиственной древесины, в первую очередь березы и осины [1, 4]. Эти породы имеют существенные различия в плотности (плотность древесины

березы – 460...570 кг/м<sup>3</sup>; осины – 370...400 кг/м<sup>3</sup>) и морфологии волокна [9]. При этом в составе основных полисахаридов в древесине березы и осины принципиальных отличий нет. Основным компонентом гемицеллюлоз лиственной древесины является ксилан, который содержится в наружных слоях клеточной стенки (по сравнению с елью в 2; 2,5 и 4 раза больше в слоях ML+P; S<sub>1</sub> и S<sub>2</sub> соответственно) [11]. Вследствие этого лиственные волокнистые полуфабрикаты имеют специфические, отличные от хвойных полуфабрикатов, свойства. Из волокон лиственной древесины получается бумага с гладкой печатной поверхностью и высокой непрозрачностью. Эти качества делают сегодня целлюлозу из лиственной древесины основным и весьма ценным полуфабрикатом в производстве высококачественных печатных видов бумаги [1].

По причине различий в плотности древесины березы и осины процессы делигнификации для этих пород имеют некоторые отличия. Было установлено, что при одинаковых условиях обработки растворение лигнина древесины березы в начале варки протекает медленнее, чем у осины, и только после достижения температуры 135...140 °С скорость его растворения заметно увеличивается. Растворение лигнина древесины осины начинается уже при температуре 100...105 °С. Во второй период варки делигнификация древесины обеих пород протекает примерно с одинаковой скоростью. Меньшая скорость растворения лигнина березовой древесины в начале варки объясняется медленным проникновением варочных реагентов в области локализации лигнина из-за повышенной плотности древесины. На это указывает активное поглощение щелочи древесиной березы в этот период варки [7, 2]. В результате для получения технической целлюлозы с одинаковой степенью провара для варки березовой древесины требуется более длительная (на 0,5...0,75 ч) варка.

По степени избирательности процесса щелочной делигнификации эти породы древесины также имеют различия. В первый час варки (до 95 °С) гемицеллюлозы березы растворяются в 9,6, а осины в 4,6 раза быстрее лигнина. Из осиновой древесины получается техническая целлюлоза с более высоким выходом, чем из березы, так как последняя содержит меньше целлюлозы и гемицеллюлоз. В то же время из березовой древесины получается сульфатная целлюлоза с более высокими показателями механической прочности по сравнению с целлюлозой из осины вследствие большей длины древесных волокон [2].

При совместной варке березы и осины [11] в начале процесса осиновая щепа вследствие меньшей плотности поглощает больше щелочи по сравнению с березовой; оставшейся щелочи не хватает для завершения делигнификации березовой древесины. В результате из-за «перевара» осиновой древесины происходит щелочная деградация ее углеводной части, что приводит к снижению общего выхода и ухудшению прочностных характеристик технической целлюлозы.

Все сказанное выше подтверждает вывод о целесообразности отдельной переработки осиновой и березовой древесины. Однако на российских предприятиях для производства лиственной сульфатной целлюлозы исполь-

зуют смесь березовой и осиновой древесины. Кроме того, в настоящее время для повышения объемов выработки целлюлозы стараются увеличить долю более плотной березовой древесины в составе древесного сырья и таким образом увеличить выход целлюлозы с 1 м<sup>3</sup> котла. В связи с этим важным вопросом технологии сульфатной варки лиственной древесины является вопрос об оптимальном соотношении древесины березы и осины при их совместной варке.

Результаты ранее выполненного исследования [8] свидетельствуют, что экономически целесообразно увеличивать содержание древесины березы в составе лиственного сырья только до 70 %. Дальнейшее повышение доли березовой древесины приводит к неоправданному росту затрат на производство блененной целлюлозы из-за увеличения расхода белящих реагентов. Однако расход реагентов на отбелку зависит не только от породного состава древесины, но и от реакционной способности компонентов, входящих в состав технической целлюлозы, в первую очередь – лигнина [10], реакционная способность которого в значительной степени зависит от условий варки [5].

#### *Цель исследования и используемые методики*

Целью исследования было изучение влияния параметров варки лиственной древесины при содержании в древесном сырье 70 % березы на белимость целлюлозы.

В лабораторных условиях были проведены варки лиственной древесины при весовом соотношении пород береза : осина = 70 : 30 и получены образцы целлюлозы с числом Каппа 17...18 (табл. 1). Для варок использовали нормальную фракцию щепы производственного изготовления. Весь эксперимент выполнен на одной отобранной пробе щепы.

Таблица 1

#### **Влияние условий варки на показатели лиственной блененной сульфатной целлюлозы (береза – 70 %, осина – 30 %)**

Номер образца	Условия варки			Показатели целлюлозы				Содержание структур $C_{A\alpha}$ на $C_6$
	Концентрация активной щелочи, г/л ед. $Na_2O$	Температура, °C	Продолжительность стоянки, мин	неблененной		блененной		
Число Каппа				Вязкость, мл/г	Белизна, %	Вязкость, мл/г		
1	58	153	80	17,6	1000	84,7	850	–
2		156	60	18,3	1050	85,1	900	–
3		159	40	18,2	–	85,4	–	1,83
4			60	18,3	1050	84,7	850	1,71
5	60		30	20,1	1100	86,0	900	–
6		153	60	17,5	1000	84,0	850	–
7		156	40	17,2	1000	86,7	900	1,87
8		153	60	16,6	1050	85,2	850	–
9		156	40	16,2	1000	85,8	800	–



Таблица 2

Условия отбели cellulозы Д<sub>0</sub>-Щ<sub>1</sub>-Д<sub>1</sub>-Щ<sub>2</sub>-Д<sub>2</sub>-К (температура на ступенях отбели 70 °С, концентрация массы 8 %)

Условия отбели	Степень отбели					
	Д <sub>0</sub> (ClO <sub>2</sub> )	Щ <sub>1</sub> (NaOH)	Д <sub>1</sub> (ClO <sub>2</sub> )	Щ <sub>2</sub> (NaOH)	Д <sub>2</sub> (ClO <sub>2</sub> )	К* (SO <sub>2</sub> )
Расход реагента, кг/т	В соответствии с величиной KF** = 0,2	10	60 % от разницы между общим расходом акт. хлора и расходом на ступень Д <sub>0</sub>	5	40 % от разницы между общим расходом акт. хлора и расходом на ступень Д <sub>0</sub>	
pH <sub>нач</sub> /pH <sub>кон</sub>	3,0/2,0	11,0/10,5	5,0/4,5	11,0/10,5	5,0/4,5	4,0...4,5
Остаточное содержание реагента, г/л	Отсутствует	Не определено	Следы	Не определено	0,02	
Продолжительность, ч	1,00	2,00	3,00	2,00	3,00	0,08

\* К – степень окисления водным раствором SO<sub>2</sub>. \*\* KF – фактор Каппа – отношение расхода диоксида хлора (ед. акт. хлора) в процентах к числу Каппа целлюлозы, поступающей в отбелку.

Далее образцы были отбелены по схеме Д<sub>0</sub>-Щ<sub>1</sub>-Д<sub>2</sub>-Щ<sub>2</sub>-Д<sub>2</sub>-К. Условия отбели представлены в табл. 2. Общий расход диоксида хлора составлял 3,5 кг/ед. Каппа в единицах активного хлора.

Результаты, приведенные в таблицах по варке и отбелке, представляют собой усредненные данные 3-4 обработок, разница между параллельными абсолютными значениями при определении выхода и числа Каппа не превышает ±0,2. Значения остальных показателей полностью укладываются в величины отклонений, допустимых стандартами ISO.

Для анализа небеленых и беленых образцов целлюлозы использовали следующие методики: белизна – ISO 2470; вязкость – ISO 5351/1; число Каппа – ISO 302.

Дополнительно из небеленых целлюлоз уксуснокислотным методом [6] были выделены образы лигнина, с помощью спектрометра Bruker AVANCE при частоте внешнего магнитного поля 500 МГц и температуре 300 К были записаны спектры ЯМР. В качестве растворителя использовали дейтерированный диметилсульфоксид (DMCO-d<sub>6</sub>).

#### Обсуждение результатов

Как следует из данных, представленных в табл. 1, повышение температуры варки от 153 до 159 °С при концентрации активной щелочи 58 г/л мало влияет на способность целлюлозы к отбелке. Можно лишь отметить, что увеличение продолжительности стоянки на конечной температуре является не-

желательным, поскольку приводит к снижению белимости целлюлозы, т. е. к снижению белизны образца, отбеленного с одинаковым расходом диоксида хлора на ед. Каппа. Так, при варке целлюлозы с концентрацией активной щелочи 58 г/л наилучшей белимостью обладал образец целлюлозы, полученный при варке на температуре 159 °С и длительности стоянки 30 мин. Положительное влияние на способность целлюлозы к отбелке оказало повышение концентрации активной щелочи до 60...62 г/л, однако увеличение продолжительности стоянки на конечной температуре и в этом случае остается нежелательным. Снижение вязкости целлюлозы после отбелки для всех образцов составляло 150...200 мл/г по сравнению с образцами небеленой целлюлозы. Полученные уровни вязкости должны обеспечить достаточно высокие уровни прочностных характеристик [3].

Значения белизны образцов целлюлозы вполне согласуются с данными ЯМР образцов остаточного лигнина. Чем выше содержание в лигнине структур фенольного типа Аг-О, тем выше реакционная способность остаточных лигнинов и белимость целлюлозы.

Обязательной ступенью современной схемы отбелки является кислородно-щелочная обработка (КЩО). Как известно, здесь могут использоваться две технологии: одно- или двухступенчатая КЩО [12].

Для исследования влияния одно- и двухступенчатых КЩО на белимость лиственной целлюлозы были выбраны образцы № 5, 7, обладавшие наилучшей белимостью (см. табл. 1). Режимы КЩО приведены в табл. 3. После КЩО образцы целлюлозы отбеливали по схеме Д<sub>0</sub>-Щ<sub>1</sub>-Д<sub>1</sub>-Щ<sub>2</sub>-Д<sub>2</sub>-К с расходом диоксида хлора (ед. акт. хлора) 3,5 кг/ед. Каппа. Показатели беленой целлюлозы представлены в табл. 4.

Таблица 3

**Условия кислородно-щелочных обработок**

Условия двухступенчатой кислородно-щелочной обработки	Условия одноступенчатой кислородно-щелочной обработки
Расход щелочи – 20 кг/т NaOH Расход кислорода – по давлению в реакторе	Расход щелочи – 20 кг/т NaOH Расход кислорода – по давлению в реакторе
1 ступень: температура 90 °С продолжительность 30 мин концентрация массы 10 % давление 0,8 МПа	Температура 110 °С Продолжительность 60 мин Концентрация массы 10 % Давление 0,4 МПа
2 ступень: температура 105 °С продолжительность 60 мин концентрация массы 10 % давление 0,4 МПа	

Таблица 4

**Влияние условий варки и КЩО на показатели лиственной беленой  
сульфатной целлюлозы**

Номер образца	Показатели целлюлозы						Содержание структур C <sub>АтоО</sub> на C <sub>6</sub>
	небеленой		после КЩО		беленой		
	Число Каппа	Вязкость, мл/г	Число Каппа	Вязкость, мл/г	Белизна, %	Вязкость, мл/г	
5*	20,0	1100	13,0	–	86,1	–	–
5**	20,0	1100	9,5	1100	87,0	750	1,90
7**	17,2	1000	9,0	1000	87,0	800	1,90

\*Одноступенчатая КЩО. \*\*Двухступенчатая КЩО.

Представленные данные подтвердили более высокую эффективность двухступенчатой КЩО по снижению числа Каппа (48...52 %) в сравнении с одноступенчатой (32 %). Кроме того, белимость целлюлозы после двухступенчатой КЩО несколько улучшилась, тогда как после одноступенчатой белимость осталась на уровне показателей небеленой целлюлозы после варки, что подтверждается достигнутыми значениями белизны. Объяснить более высокую белимость образцов после двухступенчатой КЩО также можно особенностями структуры остаточного лигнина, в составе которого высока концентрация фенольных структур (табл. 4).

#### Выводы

1. При варке лиственной сульфатной целлюлозы, предназначенной для дальнейшей отбелки, включение древесины березы в состав сырья в количестве 70 % и изменение температуры варки в интервале 153...159 °С не оказывают заметного влияния на белимость целлюлозы.

2. Положительно влияют на белимость целлюлозы, полученной из такого сырья, повышение концентрации активной щелочи до 60 г/л, что соответствует ее расходу 18 % в ед. Na<sub>2</sub>O, и сокращение продолжительности стоянки на конечной температуре до 40 мин при температуре варки 156 °С.

3. Последующее проведение двухступенчатой КЩО позволяет дополнительно повысить белимость лиственной сульфатной целлюлозы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров А.И., Мутовина М.Г., Бондарева Т.А., Малышкина В.К. Производство волокнистых полуфабрикатов из лиственной древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1984. С. 248.

2. Еришов А.В., Малышева Л.В., Гаврилова В.Е. К вопросу о формировании печатных видов бумаги с повышенным содержанием лиственной сульфатной целлюлозы: сб. тр. ЦНИИБ. М.: Лесн. пром-сть, 1978. С. 17–24.

3. Карманова Т.Е., Комаров В.И., Миловидова Л.А. Взаимосвязь вязкости с прочностными и деформационными свойствами лиственной и хвойной целлюлозы // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2010. № 6. С. 46–49.

4. Леса, лесные ресурсы и лесоправление в Российской Федерации. Справочный документ. Режим доступа: <http://www.profor.info/sites/profor.info/files/Background-ForestGovernance-Russia-Russian.pdf>

5. *Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Севастьянова Ю.В.* Влияние условий варки на белимость лиственной сульфатной целлюлозы // *Целлюлоза. Бумага. Картон.* 2004. № 9. С.64–65.

6. *Никандров А.Б., Lachenal P., Mortha G., Robert P., Зарубин М.Я.* Уксусно-кислотный метод выделения лигнина из древесины и целлюлозы // *Целлюлоза. Бумага. Картон.* 2001. № 7–8. С. 26–30.

7. Новые технологические разработки по использованию лиственной древесины на Котласском ЦБК. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1981. С. 24.

8. *Романов М.Е., Опарина А.А., Миловидова Л.А.* Возможности увеличения выработки лиственной целлюлозы на существующем варочном оборудовании // *Целлюлоза. Бумага. Картон.* 2012. № 4. С. 42–44.

9. Технология целлюлозно-бумажного производства. Справочные материалы. Т. I, часть 1. СПб.: ЛТА, 2002. С. 419.

10. *Ala-Kaila Kari, Jiebing Li, Olena Sevastyanova, Goran Gellerstedt.* Apparent and actual delignification response in industrial oxygen-alkali delignification of birch kraft pulp // *TAPPI.* 2003. N1. P. 23–27.

11. *Argyropoulos D.S.* Salient reactions in Lignin During Pulping and Oxygen Bleaching // *Pulp and Paper Science.* 2003. Vol. 29, N 9. P. 308–313.

12. *Johansson G., Samuelsson O.* Alkaline Destruction of Birch Xylan in the Light of Recent Investigations of Its Structure // *Svensk Papperstidn.* 1977. Vol. 80. N 16. P. 519–524.

Поступила 30.01.2015

UDC 676.017

### **Features of the Bleached Sulfate Hardwood Pulp Production When Using the Birch and Aspen Wood Resources in the Ratio of Seventy-to-Thirty**

*L.A. Milovidova<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Senior Research Scientist*

*T.A. Koroleva<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Associate Professor*

*M.E. Romanov<sup>2</sup>, Technical Engineer*

*E.O. Okulova<sup>1</sup>, Postgraduate Student*

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russia; e-mail: [lmilovidova@mail.ru](mailto:lmilovidova@mail.ru)

<sup>2</sup>BKT Service LLC, Mozhayskaya st., 18, bl.A, office 6H, Saint Petersburg, 190013, Russia; e-mail: [maxim.romanov@bktservice.ru](mailto:maxim.romanov@bktservice.ru)

Birch and aspen are the main species of deciduous wood raw materials for the pulp and paper mills of Russia. These wood species have differences in density and in the fiber morphology. These facts have a significant impact on the technology of pulp production and its properties. The previous studies have shown an economic effect in the increasing of the birchwood content in the composition of hardwood raw material only up to 70 %. Further increase leads to an unjustified increase of production costs of bleached pulp because of the increased bleaching requirement. However, the consumption of bleaching reagents depends not only on the species of wood, but also on the reactivity of the pulp components, primarily

of lignin as the lignin reactivity is largely dependent on the pulping conditions. This paper presents the research results of the effect of the hardwood cooking conditions on the pulp bleachability. The content of birchwood in the raw material was 70 %. The pulp ability to be bleached (bleachability) is usually assessed by the chlorine dioxide consumption per 1 kappa unit. Under laboratory conditions the wood cooking was conducted. The kappa number of the obtained pulp samples was of 17...18 units. It has been established that a positive influence on the pulp bleachability, obtained from the raw material of that kind, has increased the concentration of active alkali up to 60 g/l, which corresponds to an active alkali consumption of 18 % per a Na<sub>2</sub>O unit, and the reduction of duration at the final temperature up to 40 min at 156 °C cooking temperature. The two-stage oxygen-alkaline treatment can further improve the bleachability of sulfate hardwood pulp.

*Keywords:* hardwood pulp, birchwood and aspenwood, pulping conditions, pulp bleachability, oxygen-alkaline pulp treatment.

#### REFERENCES

1. Bobrov A.I., Mutovina M.G., Bondareva T.A., Malyshkina V.K. *Proizvodstvo voloknistykh polufabrikatov iz listvennoy drevesiny* [Production of Fibrous Semi-Finished Hardwood]. Moscow, 1984. 248 p.
2. Ershov A.V., Malysheva L.V., Gavrilova V.E. *K voprosu o formirovanii pechatnykh vidov bumagi s povyshennym содержанием listvennoy sul'fatnoy tsellyulozy. Sbornik trudov* [On the Formation of Printed Paper Types with a High Content of Hardwood Kraft Pulp: Collected Papers]. Moscow, 1978, no. 15, pp. 17–24.
3. Karmanova T.E., Komarov V.I., Milovidova L.A. *Vzaimosvyaz' vyazkosti s prochnostnyimi i deformatsionnymi svoystvami listvennoy i khvoynoy tsellyulozy* [Viscosity Relationship With the Strength and Deformation Properties of Hardwood and Softwood Pulp]. *Cellulose. Paper. Board*, 2010, no. 6, pp. 46–49.
4. *Lesnaya resursy i lesoupravlenie v Rossiyskoy federatsii* [Forests, Forest Resources and Forest Management in the Russian Federation]. Available at: <http://www.profor.info/sites/profor.info/files/Background-ForestGovernance-Russia-Russian.pdf>.
5. Milovidova L.A., Komarova G.V., Sevast'yanova Yu.V. *Vliyanie usloviy varki na belimost' listvennoy sul'fatnoy tsellyulozy* [Effect of Cooking Conditions on the Hardwood Kraft Pulp Bleachability]. *Cellulose. Paper. Board*, 2004, no. 9, pp. 64–65.
6. Nikandrov A.B., Lachenal P., Mortha G., Robert P., Zarubin M.Ya. *Uksusno-kislenny metod vydeleniya lignina iz drevesiny i tsellyulozy* [The Method of Acetic-Acid Extraction of Lignin From Wood Pulp]. *Cellulose. Paper. Board*, 2001, no. 7–8, pp. 26–30.
7. *Novye tekhnologicheskie razrabotki po ispol'zovaniyu listvennoy drevesiny na Kotlaskom TsBK* [The New Technological Developments on the Use of Hardwood in the Kotlas Pulp and Paper Mill]. Moscow, 1981, p. 24.
8. Romanov M.E., Oparina A.A., Milovidova L.A. *Vozmozhnosti uvelicheniya vyrabotki listvennoy tsellyulozy na sushchestvuyushchem varochnom oborudovanii* [Possibility of Increasing the Production of Hardwood Pulp in the Existing Cooking Equipment]. *Pulp. Paper. Board*, 2012, no. 4, pp. 42–44.
9. *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. Spravochnye materialy* [Technology of Pulp and Paper Production. Reference Materials]. Saint Petersburg, 2002, vol. I, part 1. 419 p.

10. Ala-Kaila K., Li J., Sevastyanova O., Gellerstedt G. Apparent and Actual Delignification Response in Industrial Oxygen-Alkali Delignification of Birch Kraft Pulp. *Tappi J.*, 2003, vol. 2, no. 10, pp. 23–27.

11. Argyropoulos D.S. Salient Reactions in Lignin During Pulping and Oxygen Bleaching. *Pulp and Paper Science*, 2003, vol. 29, no. 9, pp. 308–313.

12. Johansson G., Samuelsson O. Alkaline Destruction of Birch Xylan in the Light of Recent Investigations of Its Structure. *Svensk Papperstidn*, 1977, vol. 80, no. 16, pp. 519–524.

Received on January 30, 2015

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.174

---

УДК 661.728.2

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОМЫВКИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

©М.И. Кравченко, канд. техн. наук, доц.

С.-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, г. С.-Петербург, Россия, 19402; e-mail: ola.ola07@mail.ru

Исследован процесс промывки целлюлозы методом вытеснения сульфитного отработанного щелока в варочном котле периодического действия. Приведен метод расчета констант фильтрования и скорости фильтрации в зависимости от высоты слоя фильтрования и избыточного давления для промышленного варочного котла периодического действия. Показано, что процесс извлечения сухих веществ (растворимых органических веществ из волокон целлюлозы) протекает в два периода: первый – во внешнедиффузионной области, второй – во внутридиффузионной области методом вытеснения в варочных котлах. Установлено, что высота слоя к концу промывки целлюлозы методом вытеснения в варочных котлах вместимостью 320 м<sup>3</sup> может достигать 5,4 м при схеме вытеснения снизу вверх. При этом определены константы фильтрования. Варочные котлы, оборудованные гидрораспределителями для промывной жидкости, позволили выявить зависимость скорости фильтрации от гидравлического давления в варочном котле до 120 мин, процесс фильтрации щелока может происходить при постоянной скорости фильтрования. Проведение высокотемпературной промывки целлюлозы в варочных котлах периодического действия позволяет получить легкобелимую целлюлозу.

*Ключевые слова:* математическая модель, варка, промывка, отбелка целлюлозы, фильтрация, константы промывки, варочный котел, жесткость целлюлозы, константы фильтрования, скорость фильтрации, технологический регламент, эффективность, гидрораспределители промывной жидкости.

Периодические процессы варки и промывки целлюлозы наиболее удобно изучать во временных факторах, так как эти процессы осуществляются в разное время. Причем временные факторы строго ограничиваются технологическим регламентом.

В работах [2–5] рассмотрены математические методы описания процессов промывки и даны некоторые механизмы их протекания с расчетом кинетических коэффициентов, определяющих эти процессы.

Например, в работе [2] рассмотрена математическая модель процесса промывки целлюлозы, которая сводится к системе дифференциальных уравнений, описывающих диффузионную стадию промывки целлюлозы:

$$\frac{\partial^2 C_1}{\partial x \partial t} + \frac{K_1 a \partial C}{\rho \partial x} + \frac{K_1 a \partial C}{W_1 \partial t} = 0,$$

где  $C$ ,  $C_1$  – начальные и текущие концентрации распределяемого вещества;

$K_1$  – объемный коэффициент массопередачи;

$a$  – удельная поверхность целлюлозы;

$\rho = fE$ ;

$f$  – коэффициент пропорциональности;

$E$  – пористость промываемого осадка;

$W_1$  – скорость фильтрации промывной жидкости через слой волокна.

Объемный коэффициент массопередачи сложно определить из-за трудностей соблюдения критериев подобия этих процессов в лабораторных и промышленных условиях.

На практике нам важна скорость фильтрации промывной жидкости  $W_1$  и концентрация распределяемого вещества в отбираемых пробах в зависимости от продолжительности  $t$  промывки. Эти величины можно измерять на промышленном оборудовании.

Анализ системы промывки сульфитной целлюлозы, который выполняется в промышленных условиях в варочных котлах вместимостью 320 м<sup>3</sup>, позволяет определить скорость фильтрации промывной жидкости в зависимости от избыточного давления в котле, а также свойств и сопротивления осадка, которые функционально зависят от жесткости вырабатываемых видов целлюлозы.

В таблице приведены экспериментальные данные при отборе щелока в процессе высокотемпературной промывки целлюлозы в варочном котле объемом 320 м<sup>3</sup> при избыточном давлении. Промывную жидкость на промывку подавали через гидрораспределитель в нижнюю горловину варочного котла, а фильтрат отбирали из верхней горловины.

В результате исследований высокотемпературной промывки при избыточном давлении определена функциональная зависимость скорости фильтрации от гидравлического давления в варочном котле:

$$W_1 = f(P).$$

**Результаты, полученные при отборе щелока после сульфитной варки целлюлозы средней жесткости (Ж = 63)**

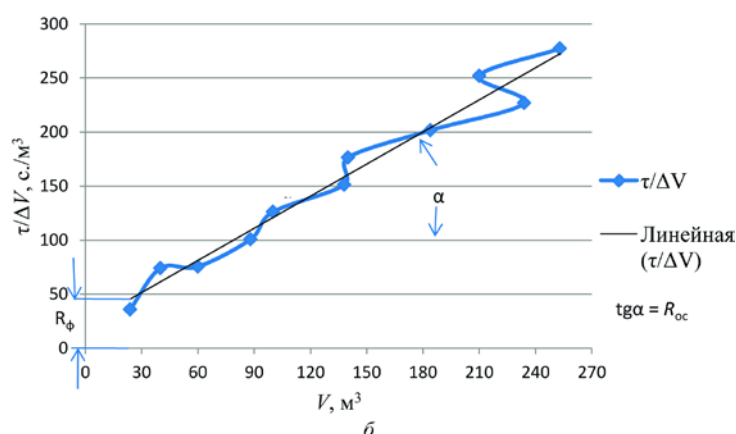
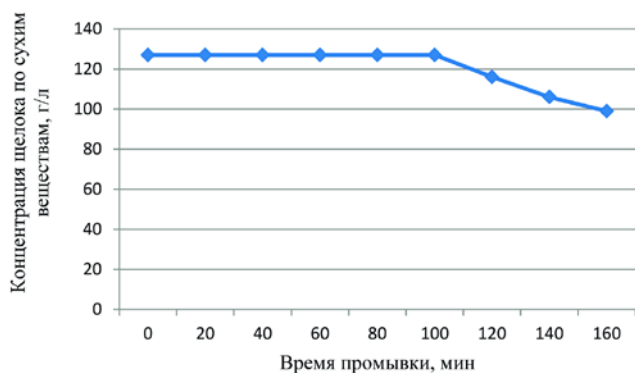
Время отбора щелока, мин	Средняя скорость вытеснения, м <sup>3</sup> /мин	Давление в котле $P \cdot 10^{-5}$ , Па	Температура отбираемого щелока, °С	Содержание мелкого волокна, мг/л	Объем отбираемого щелока, м <sup>3</sup>
14	1,7	1,9	109	27,6	23,8
20	2,0	2,0	109	27,2	40,0
30	2,0	2,2	109	14,5	60,0
40	2,2	2,2	109	19,0	88,0
50	2,0	2,0	109	16,0	100,0
60	2,3	2,3	109	18,6	138,0
70	2,0	2,2	109	8,6	140,0
80	2,3	2,2	110	24,6	184,0
90	2,6	2,2	110	19,2	234,0
100	2,1	2,2	108	14,5	210,0
110	2,3	2,3	108	18,2	253,0
120	3,0	2,2	108	–	360,0
130	2,4	2,2	107	–	312,0
140	2,8	2,2	106	–	392,0
150	1,2	2,2	90	–	180,0

Примечание. Отбор щелока через верхнюю сетку шел стабильно. После выгрузки котла сетка забита осадком концентрацией 35 %.



Это согласуется с теорией фильтрации [1], однако по истечении некоторого времени скорость фильтрации начинает резко уменьшаться, что и демонстрируют данные, приведенные в таблице. После 120 мин отбора фильтрата скорость фильтрации резко снижается из-за сжатия осадка, образовавшегося на фильтрующей сетке в верхней части варочного котла. Из данных таблицы видно, что до 120 мин процесс фильтрации происходит при постоянных скорости фильтрации и давлении, поэтому графическая зависимость  $\frac{\tau}{\Delta V} = f(V)$  позволяет определить сопротивление осадка и сопротивление фильтрующей перегородки в этом процессе. Подобная зависимость представлена на рисунке, где  $\tau$  – время промывки, мин;  $V$  – объем отобранного за это время фильтрата, м<sup>3</sup>.

Прямая линия на этом графике отсекает на линии  $\frac{\tau}{\Delta V}$  отрезок, который характеризует сопротивление фильтрующей перегородки  $R_\phi$ , установленной в верхней части варочного котла, тангенс угла наклона прямой – сопротивление осадка, образующегося на фильтровальной перегородке. Из рисунка *a* видно, что процесс промывки методом вытеснения в варочном котле имеет два периода.



Промывка методом вытеснения при варке сульфитной целлюлозы:  
*a* – концентрация отбираемого щелока; *b* – соотношение  $\frac{\tau}{\Delta V}$

В первом периоде промывки процесс протекает при постоянных температуре и концентрации вытесняемого щелока, во втором периоде наблюдается резкое снижение температуры промывки и концентрации отбираемого щелока по сухим веществам. Средняя скорость фильтрации при выбранных условиях – 2,25 м<sup>3</sup>/мин. При повышении гидравлического давления в котле в процессе промывки целлюлозы методом вытеснения скорость фильтрования увеличивается, при повышении температуры промывной жидкости возрастает концентрация отбираемого щелока. В результате первый период при определенных условиях может обеспечить высокую эффективность промывки по заданному технологическому регламенту. Из теории фильтрования [1] известно, что при постоянном давлении фильтрования объем фильтрата, прошедшего через 1 м<sup>2</sup> фильтрующей поверхности, связан со временем следующим уравнением:

$$V^2 + 2VC = K\tau, \quad (1)$$

где  $V$  – объем фильтрата, м<sup>3</sup>;

$C$  и  $K$  – константы фильтрования, учитывающие сопротивление фильтрующей перегородки и физико-химические свойства осадка и жидкости, а также режим фильтрования, м<sup>2</sup>/с;

$\tau$  – время фильтрования, с.

Из рисунка б можно определить константы фильтрования:

$$K = \frac{2}{\operatorname{tg}\alpha}; \quad C = \frac{R_{\phi}K}{2},$$

где  $\operatorname{tg}\alpha = R_{\text{ос}}$ ;

$R_{\text{ос}}$  – сопротивление осадка.

Если известна  $K$ , то можно вычислить концентрацию фильтрата во втором периоде промывки:

$$C = C_1 e^{-\frac{KW\tau}{\delta}}, \quad (2)$$

где  $C$  – концентрация фильтрата в конце первого периода промывки, кг/м<sup>3</sup> сухих веществ;

$C_1$  – концентрация фильтрата во втором периоде промывки, кг/м<sup>3</sup> сухих веществ;

$e$  – основание натурального логарифма,  $e = -2,718$ ;

$K$  – коэффициент находится экспериментально из рисунка б, в нашем случае  $K = 2,2$  м<sup>2</sup>/с;

$W$  – удельная интенсивность промывки, или скорость прохождения промывной воды, в нашем случае с учетом поверхности сита  $W = 0,012$  м/с;

$\tau$  – продолжительность промывки, с;

$\delta$  – толщина слоя осадка, м.

Уравнение (2) после логарифмирования примет следующий вид:

$$\frac{\tau_2 - \tau_1}{\lg C_1 - \lg C_2} = \frac{2,3 \delta}{K W}, \quad (3)$$

где  $\tau_2$  и  $\tau_1$  – время начала и конца наблюдений в любой период времени второго периода промывки, в нашем случае  $\tau_1 = 8280$  с;  $\tau_2 = 8310$  с;

$C_1$  и  $C_2$  – соответствующие концентрации отбираемого фильтрата во втором периоде промывки, в нашем случае  $C_1 = 127$  кг/м<sup>3</sup>;  $C_2 = 110$  кг/м<sup>3</sup>.

Расчет по уравнению (3) показывает, что толщина слоя из целлюлозных волокон в варочном котле должна быть 5,4 м.

Промывка слоя такой высоты представляет определенные технологические трудности, из-за особых свойств структурированного осадка, который имеет разную концентрацию по высоте слоя и который под действием компрессионных сил давления способен сжиматься, уменьшая скорость фильтрации.

Как видно из рисунка, сопротивление фильтрующей перегородки не слишком велико, поэтому для снижения уноса мелкого волокна можно верхнюю фильтрационную зону обрамлять фильтрующей сеткой более мелкого сечения.

Разработка оптимального режима высокотемпературной промывки в варочных котлах позволит предприятиям решить многие технико-экономические и экологические проблемы, связанные с процессами варки, промывки и отбелики целлюлозы. После высокотемпературной промывки целлюлоза белится легко и с меньшим расходом отбельных химикатов на 1 т в.с.ц.

#### Выводы

1. Изучен процесс промывки сульфитной целлюлозы методом вытеснения в варочных котлах вместимостью 320 м<sup>3</sup>.
2. Предложен метод расчета констант фильтрования.
3. Показано, что процесс промывки целлюлозы в варочных котлах проходит в два периода. В первом периоде процесс промывки методом вытеснения протекает при постоянных концентрации щелока и температуре, во втором – при падении концентрации щелока и температуры.
4. Расчетами показано, что высота слоя к концу промывки методом вытеснения в этих котлах может достигать до 5,4 м при схеме вытеснения снизу вверх.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. М.: Химия, 1980. с. 398.
2. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Луговой Ю.Е. // ТОХТ. 1972. Т. 6, № 2. с. 297.
3. Кравченко М.И., Ефремов Т.В., Киприанов А.И., Уткин С.П. О методе определения коэффициента стесненной диффузии в целлюлозосодержащем материале // Лесн. журн. 1981. № 1. С. 77–79. (Изв. высш. учеб. заведений).

4. *Кравченко М.И., Киприанов А.И.* Механизм процесса промывки сульфатной целлюлозы в слое // *Целлюлоза бумага картон*. 2000. № 9-10. С. 36–37.

5. *Kribins S.W/Me.* Применение теории диффузии к промывке сульфатной целлюлозы // *TAPPI*. 1960. Т. 43, № 10. Р. 801–805.

Поступила 26.12.2014

UDC 661.728.2

### Experimental Study of Pulp Washing Process

*M.I. Kravchenko, Candidate of Engineering, Associate Professor*

Saint Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov, Institutskiy per., 5, St. Petersburg, 194021, Russia; e-mail: ola.ola07@mail.ru

The process of pulp washing by sulfite liquor displacement in batch cooking digester was studied. Filtrating constants and filtration rate depending on filtering layer depth and excess pressure for large-scale batch digesters were computed. It was shown that dry solids extraction (soluble matter) from pulp fibers flow in two stages. The first stage – in out-diffusive area, while the second went on in internal diffusive area. It was showed that a depth of pulp layer at the end of displacement washing in cooking digesters of 320 m<sup>3</sup> capacity could reach up to 5,4 m in case of upward flow. The filtrating constants were calculated. It was found a relationship between filtration rate and hydraulic pressure at pulp washing in the cooking digesters equipped with hydraulic distributor for washing liquor. It was shown that at a certain hydraulic pressure in cooking digester a filtration rate of liquor might be constant till 120-th minute. High temperature pulp washing in batch cooking digesters enables producing easy-bleachable pulp.

*Keywords:* mathematical model, pulping, washing, pulp bleaching, filtration, washing constants, cooking digester, pulp hardness, filtrating constants, filtration rate, engineering regulations, efficiency, hydraulic distributors of washing liquor.

### REFERENCES

1. Zhuzhikov V.A. *Fil'trovanie. Teoriya i praktika razdeleniya suspenziy* [Filtration. Theory and Practice of Separating Suspensions]. Moscow, 1980. 398 p.

2. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Lugovoy Yu.E. *TOKhT*, 1972. Vol. 6, no. 2, 297 p.

3. Kravchenko M.I., Efremov T.V., Kiprianov A.I., Utkin S.P. О методе определения коэффициента стесненной диффузии в тsellyulozosoderzhashchem materiale [About the Method of Determining the Coefficient of Diffusion in a Constrained Cellulose-Containing Material]. *Lesnoy zhurnal*, 1981, no. 1, pp. 77–79.

4. Kravchenko M.I., Kiprianov A.I. Mekhanizm protsessa promyvki sul'fatnoy tsellyulozy v sloe [The mechanism of the Cleaning Process in the Sulfate Pulp Layer]. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2000, no. 9-10, pp. 36–37.

5. S.W/Me. Kribins. *Primenenie teorii diffuzii k promyvke sul'fatnoy tsellyulozy* [Application of the Theory of Diffusion to the Sulfate Pulp Washing]. 1960, no. 10, pp. 801–805.

Received on December 26, 2014

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.5.183