МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

АРХАНГЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ
ЗАВЕДЕНИЙ

Лесной журнал

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

4

2006

ИЗДАТЕЛЬ – АРХАНГЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 0536 – 1036. ИВУЗ. «Лесной журнал». 2006. № 4

Главный редактор – проф. **О.М. Соколов**
Заместители главного редактора:
проф. **А.Л. Невзоров**, проф. **Е.С. Романов,** проф. **С.И. Морозов**

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

проф. **Е.Д. Гельфанд,** проф. **Р.Е. Калитеевский,** акад. РАСХН **Н.И. Кожухов,** проф. **А.А. Камусин,** проф. **В.И. Комаров,** проф. **В.С. Куров**, проф. **Н.В. Лившиц,**проф. **Р.Н. Матвеева,** проф. **В.И. Мелехов,** проф. **М.Д. Мерзленко,** проф. **Е.Г. Мозолевская,** проф. **Е.Н. Наквасина,** доц. **О.А. Неволин,** проф. **А.Н. Обливин,** проф. **В.И. Онегин,** проф. **А.В. Питухин,** проф. **В.П. Рябчук,** проф. **Э.Н. Сабуров,** проф. **Е.Н. Самошкин,** проф. **В.Г. Санаев,** проф. **В.И. Санев,** проф. **В.А. Суслов,** проф. **Ф.Х. Хакимова,** проф. **В.Я. Харитонов,** проф. **Ю.А. Ширнин,** проф. **А.И. Чернодубов,** проф. **Г.А. Чибисов,** проф. **Х.-Д. Энгельманн**

Ответственный секретарь – заслуженный работник культуры РФ **Р.В. Белякова**

«Лесной журнал» публикует научные статьи по всем отраслям лесного дела, сообщения о внедрении законченных исследований в производство, о передовом опыте в лесном хозяйстве и лесной промышленности, информации о научной жизни высших учебных заведений, рекламные материалы и объявления. Предназначается для научных работников, аспирантов, инженеров лесного хозяйства и лесной промышленности, преподавателей и студентов.

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
«ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ» № 4

Редакторы Н.П. Бойкова, Л.С. Окулова
Перевод Н.Т. Подражанской
Компьютерный набор О.В. Деревцовой, верстка Е.Б. Красновой

Сдан в набор 04.09.2006. Подписан в печать 16.10.2006. Заказ № 203
Форм. бум. 70×108 1/16. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 14,35. Усл. кр.-отт. 14,35.
Уч.-изд. л. 17,27. Тираж 1000 экз.
Архангельский государственный технический университет

Адрес редакции: 163002, г. Архангельск, наб. Сев. Двины, 17,
тел./факс: (818-2) 27–37–18, 21–89–01
e-mail: forest@agtu.ru http: // lesnoizhurnal.agtu.ru

Издательство Архангельского государственного технического университета
163002, г. Архангельск, наб. Сев. Двины, 17

© ИВУЗ, «Лесной журнал», 2006

СОДЕРЖАНИЕ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

А.В. Родионов. Оценка эффективности освоения участков лесного фонда…….. 7

Б.П. Чураков, Е.С. Лисов. Влияние плотности микориз на самосев дуба черешчатого в дубравах Ульяновской области…….. 14

В.В. Петрик. Связь смолопродуктивности сосны обыкновенной с некоторыми морфологическими признаками шишек и семян 20

Д.А. Корепанов. Лесоводственная эффективность осушения сосновых древостоев в таежной зоне Волжско-Камского междуречья…….. 26

М.Н. Егоров. Фенотипическая структура естественного древостоя сосны обыкновенной в Центральном Черноземье (Усманский бор)…….. 30

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

А.Ю. Ширнин. Исследования процесса подъема переднего конца пачки хлыстов при лебедочной трелевке…….. 37

А.Н. Вихарев, П.Н. Гагарин. Моделирование напряженного состояния грунта вблизи работающего анкера……. 41

В.Н. Коршун. Основы механики лесной почвы……... 47

Д.Л. Нерадовский. Методика экспериментального определения длины заглубленных в грунт свай…… 55

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин. Математическая модель процесса конвективной сушки пиломатериалов в разряженной среде…… 64

В.И. Малыгин, А.Е. Смаглов. Оценка точности вычислений в задачах теплофизики при проектировании дереворежущего инструмента……. 72

В.А. Шамаев, Р.В. Скориданов, В.В. Постников. Получение модифицированной древесины с высокими прочностными свойствами……. 78

Д.А. Кадималиев, В.В. Ревин, Н.А. Атыкян, В.В. Шутова. Экологические характеристики прессованных материалов из отходов растительного сырья, обработанных грибом *P. tigrinus*…… 83

Е.С. Мельников, А.А. Смирнов. Влияние комплексного ухода на качество древесины высокопродуктивных ельников…… 89

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

Э.И. Гермер. Изучение суперактивного катализа кислородно-щелочной делигнификации древесины комплексами металлов переменной валентности с использованием в качестве модели 1,10-фенантролината меди (II). 3. Пути реализации катализа и его механизм……. 100

А.П. Карманов, Д.В. Матвеев, Л.С. Кочева. Исследование лигнина клеточных оболочек на различных стадиях делигнификации древесины с применением методов синергетики и нелинейной динамики…… 112

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Г.А. Кируца. Краткосрочное кредитование предприятий лесопромышленного комплекса…… 125

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

С.И. Думанский. Виброизоляция лесопильных рам с помощью пластинчатых амортизаторов…… 131

В.К. Любов. Совершенствование энергохозяйств предприятий лесопромышленного комплекса…… 135

ЮБИЛЕИ

Ректорат АГТУ, редколлегия и редакция «Лесного журнала». Валерий Иванович Комаров (к 60-летию со дня рожния)…… 143

Е.М. Романов, А.И. Павлов, А.Д. Кирсанов, П.Ф. Войтко. Юрий Александрович Ширнин…… 144

CONTENTS

FORESTRY

A.V. Rodionov. Efficiency Assessment of Forest Stock Development……. 7
B.P. Churakov, E.S. Lisov. Influence of Mycorrhizas' Density on English Oak Self-seed in Oak Forests of Ulyanovsk Region……. 14
V.V. Petrik. Link of Resin-productivity of Scotch Pine with Some Morphological Characters of Cones and Seeds……. 20
D.A. Korepanov. Forestry Efficiency of Pine Stands Drainage in Taiga Zone of Area between Volga and Kama……... 26
M.N. Egorov. Phenotypic Structure of Natural Stand of Scots Pine in Central Chernozem Area (Usman Pine Forest)……... 30

WOODEXPLOITATION

A.Yu. Shirnin. Investigation of Lifting Process for Front End of Tree Lengths Bundles in Drum Logging…….. 37
A.N. Vikharev, P.N. Gagarin. Simulation of Soil Stress near Working Anchor…… 41
V.N. Korshun. Principles of Forest Soil Mechanics…… 47
D.L. Neradovsky. Technique for Experimental Determination of Soil-Buried Piles Length…….. 55

MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOODSCIENCE

R.R. Safin, R.R. Khasanshin, R.G. Safin. Process Mathematical Model of Sawn-wood Convection Drying in Discharged Medium…… 64
V.I. Malygin, A.E. Smaglov. Assessment of Computing Accuracy in Thermal Physics Tasks when Designing Wood-cutting Tool…….. 72
V.A. Shamaev, R.V. Skoridanov, V.V. Postnikov. Producing Modified Timber with High Strength Properties…… 78
D.A. Kadimaliev, V.V. Revin, N.A. Atykyan, V.V. Shutova. Ecological Characteristics of Compressed Materials from Wastes of Plant Raw Material Treated by *P. Tigrinus* Fungus…….. 83
E.S. Melnikov, A.A. Smirnov. Influence of Integrated Care on Wood Quality of High-productive Spruce Forests……. 89

CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

E.I. Germer. Study of Superactive Catalysis of Acid-Alkaline Delignification of Wood by Complexes of Variable Valency Metals by Using 1.10 - Phenanthrolinate Copper (II) as a model. 3. Ways of Catalysis Realization and its Mechanism…… 100
A.P. Karmanov, D.V. Matveev, L.S. Kocheva. Investigation of Cell Membranes Lignin at Different Stages of Wood Delignification by Using Synergy and Nonlinear Dynamics Methods……. 112

ECONOMICS AND MANAGEMENT

G.A. Kirutsa. Short-term Crediting of Forest-industrial Enterprises……... 125

SUMMARIES AND EXCHANGE OF TEACHING

S.I. Dumansky. Vibration Insulation of Frame Saws by Block Shock-absorbers….. 131
V.K. Lyubov. Improvement of Energy Departments of Forest Industrial Enterprises 135

JUBILEES
Administration of ASTU, Editorial Board and Editorial Staff of «Lesnoy Zhurnal»
Valery Ivanovich Komarov (By 60th Birthday)……. 143
E.M. Romanov, A.I. Pavlov, A.D. Kirsanov, P.F. Vojtko. Yury Alexandrovich Shirnin……. 144

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 630*3:630*

А.В. Родионов

Родионов Андрей Викторович родился в 1974 г., окончил в 1997 г. Петрозаводский государственный университет, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры механизации сельскохозяйственного производства ПетрГУ. Имеет более 50 печатных работ в области технологии и экономики неистощительного лесопользования в условиях переходной экономики.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСВОЕНИЯ УЧАСТКОВ ЛЕСНОГО ФОНДА

Изложена новая методика оценки и сравнения эффективности вариантов освоения участков лесного фонда по интегральному показателю прибыльности и расходования ресурсов (в натуральном выражении). Рассмотрены примеры использования методики для определения эффективности различных технологий рубок ухода и лесовосстановления.

Ключевые слова: лесозаготовка, лесовосстановление, эффективность, ресурсосбережение.

В лесопользовании основным объектом является участок лесного фонда (УЛФ), на котором осуществляется производство продукции – заготовка и восстановление различных видов лесных ресурсов. Производство продукции как совокупность методов обработки, изготовления, изменения состояния, свойств, формы сырья, материалов или полуфабрикатов является сферой технологии [9].

Технология как наука изучает функционирование системы человек – машина – окружающая среда – предмет труда, которая получила название технологической системы (ТС). Продукция не включается как составная часть непосредственно в ТС, а рассматривается как цель ее функционирования [1]. Согласно ГОСТ 27.203–83 «Технологические системы. Общие требования к методам оценки надежности», эффективность такой ТС оценивается по качеству продукции, производительности и затрачиваемым ресурсам.

В условиях рыночной экономики этого недостаточно: ТС не может считаться эффективной, если произведенная продукция не продана с прибылью. Факт получения прибыли удостоверяет, что данная продукция

(и, соответственно, технология ее производства) удовлетворяет какую-либо общественную потребность по количеству и качеству [6].

Для сравнения и оценки эффективности различных ТС освоения УЛФ с учетом экономических факторов их функционирования в настоящее время используют показатель рентабельности (η):

$$\eta_i = \frac{P_i}{C_i} \to \max, \tag{1}$$

где P_i – прибыль на 1 м^3 древесины, продаваемой на рынке для i-го варианта ТС (показатель рыночной эффективности), р.;

C_i – себестоимость производства 1 м^3 продаваемой древесины для i-го варианта ТС (показатель технологической эффективности), р.

Чтобы устранить противоречие между существующими представлениями об эффективности ТС и рыночными факторами, целесообразно включить продукцию в состав этой системы. В предлагаемой ТС человек – машина – окружающая среда – предмет труда – продукция последняя составляющая является частью системы, но отчуждается от нее и становится предметом купли – продажи на рынке, чтобы извлечь прибыль.

С точки зрения системного подхода цель функционирования ТС меняется от производства продукции к прибыли, что адекватно отражает сущность рынка [6]. Таким образом, продукция становится технологическим фактором, что позволяет оценивать эффективность и оптимизацию системы с учетом ее конкурентоспособности.

Конкурентоспособность ТС повышается при снижении затрат ресурсов на производство продукции [6]. Ресурсы затрачиваются в натуральном виде и имеют денежную оценку. Эта оценка не всегда отражает затраты на освоение УЛФ, с учетом длительности цикла лесовыращивания, что является существенным недостатком рентабельности как интегрального показателя конкурентоспособности ТС. Некоторые ресурсы (например благоприятная окружающая среда) вообще не оценены в деньгах, поскольку не включены в рыночный оборот, однако используются в процессе производства [6].

Для оценки и сравнения ТС с длительным циклом производства продукции (лесовыращивание) предлагается методика, основанная на расчете расходования ресурсов в натуральном их выражении. Согласно этой методике, показатель эффективности (E_i) ТС имеет вид

$$E_i = \frac{P_i \overline{R}}{\overline{P} R_i} \to \max , \tag{2}$$

где $\overline{R}$ – средний показатель расходования ресурсов для n сравниваемых вариантов ТС;

$\overline{P}$ – средняя прибыль на 1 м^3 древесины для n сравниваемых вариантов ТС, р.;

R_i – интегральный показатель расходования ресурсов (в натуральном выражении с учетом значимости расходования для общества) для i-го варианта ТС.

Альтернативой данной методике могла бы быть зависимость, предполагающая суммирование показателей (метод равномерной оптимальности). Однако при этом возникает возможность компенсации низких оценок по одному критерию (например прибыли) за счет высоких оценок по другому критерию (расходованию ресурсов), и наоборот. Предложенная методика, основанная на принципе справедливого компромисса, свободна от данного недостатка [2].

Из выражения (2) следует, что эффективность ТС повышается при увеличении прибыли и снижении расходования ресурсов. Для оценки эффективности по формуле (2) требуется рассчитать интегральный показатель расходования ресурсов в натуральном их выражении [10]. При вычислении показателя R для различных вариантов ТС освоения УЛФ необходимо учитывать, что в любой из сравниваемых систем расходуются следующие ресурсы [7]:

– живой труд (человеко-дни, затраченные на выполнение основных, подготовительных и других работ);

– орудия труда (килограммы металла в конструкции машин и запасных частей);

– энергия (количество израсходованного топлива);

– предмет труда (количество природного объекта, использованного для производства продукции);

– окружающая среда (ее относительное повреждение или уничтожение);

– время, требуемое для выполнения технологических операций;

– информация (человеко-дни, необходимые для разработки документации).

В теории принятия решений разработаны следующие многокритериальные методы расчета интегрального показателя расходования различных ресурсов (с учетом их значимости) для сравнения и оценки альтернативных вариантов ТС освоения УЛФ [2, 4, 5]:

– вычисление показателя по методу Гермейера:

$$R = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i W_i \to \min; \qquad \sum_{i=1}^{k} \lambda_i = 1; \tag{3}$$

– вычисление показателя по методу Руссмана:

$$R = \prod_{i=1}^{k} \lambda_i W_i \to \min; \qquad \sum_{i=1}^{k} \lambda_i = 1; \tag{4}$$

– вычисление показателя по методу главной компоненты:

$$R = W_i \to \min . \tag{5}$$

В этих формулах i – число видов ресурсов, $i = 1,\ldots,k$;

W_i – показатель расходования i-го вида ресурса на единицу продукции;

λ_i – коэффициент значимости (вес) расходования i-го вида ресурса.

Поскольку ресурсы не выражаются в одних и тех же единицах измерения, в формулах (3)–(5) используются безразмерные показатели W_i, вычисляемые с помощью функции [4]:

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^{n} V_i}; \qquad \sum_{i=1}^{n} V_i > 0, \tag{6}$$

где i – число вариантов ТС освоения УЛФ, $i = 1, \ldots, n$;

V_i – расход i-го вида ресурса в n-м варианте ТС в известных единицах измерения.

Недостатком метода Гермейера является возможность компенсации низких оценок по некоторым критериям за счет высоких оценок по другим. Метод Руссмана свободен от этого недостатка, однако низкая оценка альтернативы хотя бы по одному из критериев влечет за собой общее ухудшение интегрального показателя, рассчитываемого по этому методу. Основным недостатком метода главной компоненты является произвол в выборе критерия, по которому сравниваются альтернативы (при этом все остальные критерии переводятся в разряд ограничений) [2, 4].

В целях компенсации недостатков рассмотренных методов вычисления интегрального показателя рекомендуется рассчитывать показатели по каждой методике в отдельности, а затем вычислять итоговый показатель (например, методом строчных сумм). Совместное использование методов Гермейера и главной компоненты позволяет выявить наилучшую альтернативу, а метода Руссмана – оценить равномерность «качества» сравниваемых ТС по всей совокупности критериев [4].

Информация, необходимая для определения коэффициентов значимости λ_i (см. формулы (3), (4)), а также выбора главной компоненты (см. формулу (5)) может быть получена только от экспертов с помощью методов, основанных на [5]:

– многокритериальной теории полезности (методы отношений, наибольших отклонений и др.);

– подходах аналитической иерархии;

– конструктивистском подходе;

– экспертных оценках.

Основным недостатком методов многокритериальной теории полезности и аналитической иерархии является то, что назначаемые веса критериев могут отражать мнение только одного эксперта, выбирающего ТС из предлагаемых ему альтернатив. От этого недостатка свободны методы, основанные на конструктивистском подходе и экспертных оценках.

Однако методы конструктивистского подхода предполагают, что эксперты назначают веса критериев, сравнивая группы заранее заданных альтернатив [5]. Поэтому был выбран метод сбора экспертных оценок – анкетирование [3], позволяющий:

– выявить предпочтения и ожидания экспертов, сформировавшиеся в ходе эксплуатации различных вариантов ТС освоения УЛФ. Согласно реф-

лексивному подходу [5], ожидания экспертов формируют основу их поведения по выбору предпочтительного варианта ТС в будущем, следовательно, экспертная оценка позволяет спрогнозировать направления развития технологии;

– охватить мнения экспертов, территориально удаленных друг от друга.

Экспертную оценку показателей важности сбережения ресурсов рекомендуется проводить регулярно [3].

Значимость различных видов ресурсов (табл. 1), расходуемых в процессе лесосечных и лесовосстановительных работ, оценивалась в 1998–2000 гг. на предприятиях лесной промышленности и лесного хозяйства Республики Карелия. В анкетировании приняли участие руководящие и инженерно-технические работники. Обработка анкет показала высокую согласованность мнений экспертов, результаты анкетирования статистически достоверны [3].

Полученные результаты показывают, что наиболее значимым для экспертов ресурсом, расходуемым в процессе лесосечных и лесовосстановительных работ, является живой труд (69,9 … 71,0 % от всей совокупности ресурсов). Следовательно, в качестве главной компоненты (см. формулу (5)) принимаем живой труд [2, 5, 8].

Высокая значимость живого труда подтверждается устойчивой тенденцией к переходу в Карелии на сортиментные технологии лесозаготовок, что позволяет сократить численность работающих в лесу. Ситуация стимулируется дефицитом рабочей силы в лесных поселках, возникшим из-за низкой оплаты труда в лесной отрасли, что не дает возможности поддерживать работоспособность и содержать хотя бы одного ребенка, т. е. обеспечивать простое воспроизводство рабочей силы [8].

Для апробации предлагаемой методики определения эффективности ТС в рамках проекта «Тайга – Модельный лес» в Республике Карелия были проведены сравнительные исследования российской, финской и шведской технологий рубок ухода. Они включали сбор фактических данных для определения прибыли, себестоимости и расходования ресурсов на 1 м^3 реализованной древесины [11].

Таблица 1

Вид ресурса	Лесосечные работы		Лесовосстановительные работы	
	Значимость	Ранг	Значимость	Ранг
Живой труд	0,399	1	0,327	1
Орудия труда	0,159	2	0,050	6
Энергия	0,100	5	0,098	5
Предмет труда	0,100	4	0,220	2
Окружающая среда	0,118	3	0,111	4
Машинное время	0,088	6	0,152	3
Информация	0,036	7	0,042	7
Итого	1,000	–	1,000	–

Таблица 2

Показатель	Технология рубок ухода		
	российская	финская	шведская
Себестоимость, р./м^3	74,07	283,48	287,16
Прибыль, р./м^3	225,93	16,52	12,84
Расходование ресурсов по методу:			
Гермейера	0,501	0,243	0,256
Руссмана	$3{,}79 \cdot 10^{-10}$	$0{,}18 \cdot 10^{-10}$	$0{,}28 \cdot 10^{-10}$
главной компоненты	0,679	0,159	0,161
R_i	0,590	0,201	0,209
E_i	4,699	0,177	0,094

На участках, разработанных по российской технологии, применялись лесоводственные нормативы, действующие на территории Карелии; по финской – требования, применяемые фирмой «Stora-Enso» при проведении рубок ухода в Финляндии; по шведской – нормативы системы лесной сертификации «FSC».

Рубки ухода по российской технологии выполняли с использованием бензопил «Husqvarna-257» и трелевочного трактора ТДТ-55А; по финской и шведской – харвестера «KINDAI H-8» и форвардера «KINDAI S-12».

На основе полученных данных рассчитаны себестоимость, прибыль, интегральный показатель расходования ресурсов (R_i) по формулам (3)–(5) и показатель эффективности (E_k) по формуле (2) для упомянутых технологий. Результаты расчетов представлены в табл. 2 (2000 г.).

Наилучшей по ресурсосбережению оказалась финская технология. Однако с точки зрения максимизации прибыли на 1 м^3 продукции лидирует российская технология, как и по показателю эффективности. Это означает, что для настоящего времени предпочтительнее российская технология, а для долгосрочного планирования технического перевооружения предприятий – финская. Достоверность рекомендации подтверждается переходом лесопромышленных предприятий Карелии на сортиментные технологии заготовки древесины, даже в ущерб прибыльности производства круглых лесоматериалов.

Сравнительный анализ технологий искусственного лесовосстановления проведен на примере посадки сеянцев сосны с открытой корневой системой на 1 га вырубки из-под сосняка-брусничника (число пней более 600 шт./га) с обработкой почвы лесокультурными агрегатами:

– ЛХТ-55+ПДН-2 с последующей ручной посадкой под меч Колесова;

– ЛХТ-55+Л-2У с последующей ручной посадкой в подготовленные лункообразователем Л-2У посадочные места.

Исходные данные для расчетов собраны на лесопромышленном предприятии ОАО «Воломский КЛПХ «Лескарел» (Карелия) в 2002–2004 гг. Результаты расчетов представлены в табл. 3 (2004 г.).

Таблица 3

Показатель	Машины и оборудование	
	ЛХТ-55 + ПДН-2+ + меч Колесова	ЛХТ-55 + Л-2У
Себестоимость, р./га	3421,22	3168,19
Прибыль, р./га	378,78	631,81
Расходование ресурсов по методу:		
Гермейера	0,565	0,435
Руссмана	$2{,}71 \cdot 10^{-9}$	$1{,}18 \cdot 10^{-9}$
главной компоненты	0,702	0,298
R_i	0,634	0,366
E_i	0,950	0,916

Как видно из табл. 3, лучшей по ресурсосбережению и максимизации прибыли на 1 га является технология с посадкой леса под лункообразователь Л-2У, при использовании которой производительность труда повышается в 2,4 раза, а себестоимость работ снижается на 253 р./га.

С 2004 г. холдинг ОАО «Сегежский ЦБК» начал внедрять на своих лесопромышленных предприятиях технологию лесовосстановления на базе лункообразователей Л-2У. Ожидаемый ежегодный объем лесовосстановительных работ по этой технологии – до 10 тыс. га.

В заключение отметим, что расчеты по формулам (2)–(6) можно проводить для оценки эффективности лесосечных и лесовосстановительных работ либо по отдельности, либо совместно при освоении участков лесного фонда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александров, В.А.* Моделирование технологических процессов лесных машин [Текст]: учеб. для вузов / В.А. Александров. – М.: Экология, 1995. – 256 с.

2. *Андреев, В.Н.* Принятие оптимальных решений: теория и применение в лесном комплексе [Текст] /В.Н. Андреев, Ю.Ю. Герасимов. – Йоэнсуу: Изд-во ун-та Йоэнсуу, 1999. – 200 с.

3. *Бешелев, С.Д.* Математико-статистические методы экспертных оценок [Текст] /С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.

4. *Горский, П.В.* Положение об аналитическом рейтинге рангового типа [Текст]: [Электронный ресурс] / П.В. Горский. – http: // www.gorskiy.ru /Articles/ ratrul.html.

5. *Ларичев, О.И.* Теория и методы принятия решений, а также хроника событий в волшебных странах [Текст]: учеб. для вузов / О.И. Ларичев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Логос, 2003. – 392 с.

6. *Маркс, К.* Избранные произведения [Текст]. В 3 т. / К. Маркс, Ф. Энгельс. – М.: Политиздат, 1986. – Т 1. – 635 с.

7. Повышение эффективности лесовосстановительных работ на основе ресурсосберегающей технологии [Текст]: отчет о НИР (заключ.) / Петрозавод. гос. ун-т; рук. А. М. Цыпук. – Петрозаводск, 2000. – 50 с.– № ГР 01200102931.

8. Представления о лесном секторе Республики Карелия (по официальным данным и результатам анкетирования): [Текст] / С. Карвинен [и др.]; под ред. С. Карвинен, А.В. Родионова. – Петрозаводск: Ин-т экономики КарНЦ РАН, 2004. – 64 с.

9. Советский энциклопедический словарь: [Текст] / Гл. ред. А. М. Прохоров. – 2-е изд. – М.: Сов. энциклопедия, 1982. – 1600 с.

10. Стратегический менеджмент [Электронный ресурс]: курс лекций // Бухгалтерский учет в торговле / АО «Аудит-Оптим»: электрон. журн. – М.: Изд-во «OPTIM.RU», 1997. – № 3. – http://www.optim.ru.

11. *Цыпук, А.М.* Экономическая устойчивость и подходящая технология [Текст]: отчет о НИР / А. М. Цыпук [и др.] // Изв. ун-та Йоэнсуу. – Йоэнсуу: Изд-во ун-та Йоэнсуу, 2000. – Вып. 115. – С. 61–83.

Петрозаводский государственный
университет

Поступила 23.03.05

A.V. Rodionov

Efficiency Assessment of Forest Stock Development

New technique for efficiency assessment and comparison of variants of forest stock development according to the integral factor of profitability and resources consumption (in natural expression) is described. Examples of using technique for efficiency determination of different improvement felling and forest regeneration technologies are considered.

УДК 630*443.3

Б.П. Чураков, Е.С. Лисов

Чураков Борис Петрович родился в 1939 г., окончил в 1962 г. Московский лесотехнический институт, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой общей экологии Ульяновского государственного университета, почетный работник высшего образования РФ. Имеет более 100 печатных работ в области лесной фитопатологии и микологии.

Лисов Евгений Сергеевич родился в 1980 г., окончил в 2002 г. Ульяновский государственный университет, консультант комитета по аграрной политике, природопользованию и экологии Законодательного Собрания Ульяновской области.

ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ МИКОРИЗ НА САМОСЕВ ДУБА ЧЕРЕШЧАТОГО В ДУБРАВАХ УЛЬЯНОВСКОЙ ОБЛАСТИ*

Проанализировано развитие плотности микоризы у подроста дуба черешчатого в зависимости от различных факторов.

Ключевые слова: микориза, самосев дуба, дубрава, симбиоз, микоризообразование, плотность микоризы, тип леса.

Известно, что 95 % наземных растений в той или иной форме сожительствуют с грибами, образуя микоризу [6, 8]. Микориза повышает всасывающую способность корней, что позволяет растениям затрачивать меньше энергии на ветвление корней, поскольку функции корневых волосков берут на себя гифы гриба [9].

Помимо обмена элементами органического и минерального питания между растением-хозяином и микоризным грибом существуют тонкие гормональные взаимоотношения, регулирующие симбиоз [7]. С одной стороны, растение выделяет большое количество веществ, влияющих на рост и морфогенез микоризных грибов. Эти вещества вызывают смену тропизмов у микоризных грибов и другие реакции. С другой стороны, грибы внедряют

* Исследования выполнены при финансовой поддержке научно-технической программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники». Проект № 10.01.033.

ряд ростовых веществ (таких, как органические кислоты), обладающих гормоноподобным действием на растение-хозяина. Преимущества взаимовыгодны и состоят в том, что гриб обеспечивает растениям возможность использовать биогенные элементы непосредственно из органического вещества, сокращая их оборот в лесных биогеоценозах. В свою очередь, гриб получает от растения растворимые углеводы, которые используются им на микоризообразование, развитие почвенного мицелия и плодоношение.

В течение длительной эволюции многие древесные породы вступили в тесные симбиотические взаимоотношения с другими организмами. В частности, они образуют со многими шляпочными грибами микоризу. Существует мнение, что поток энергии, идущий через микоризу, является главным направлением пищевой цепи лесных растительных сообществ [7].

Анализ литературных данных [2, 4, 5] показывает, что значительная часть работ посвящена морфо-анатомическим особенностям строения микориз, собранных в природе или полученных в стерильных лабораторных условиях. В работах, основанных на полевых материалах, особое внимание уделено лишь некоторым параметрам микоризообразования. Поэтому проблема комплексного изучения процесса микоризообразования в естественных условиях в зависимости от различных экологических условий является очень важной и актуальной.

Известно, что дуб – порода, обладающая высокой физиологической адаптивностью. Поглощающие корневые системы дуба тесно связаны с состоянием листового аппарата и очень чутко реагируют на существенную потерю листвы в результате поражения мучнистой росой.

Цель наших исследований – изучение микоризных окончаний у самосева дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) в дубравах Кузоватовского лесхоза Ульяновской области в зависимости от влияния мучнистой росы, рекреационных нагрузок и лесорастительных условий. Всего обследовано 165 сеянцев дуба трехлетнего возраста.

Исследования самосева дуба проводили в трех типах леса: дубняках снытьево-осоковом, снытьево-ясменниковом и разнотравном. Для определения степени микотрофности самосева в каждом типе леса были выкопаны по 5 трехлетних дубков, всего 15 шт. В лабораторных условиях корневую систему сеянцев промывали под струей воды и окрашивали фуксином. Затем на боковых корешках 2-го и 3-го порядков под микроскопом подсчитывали плотность микориз, т. е. число микоризных окончаний на 100 мм длины корешка. У каждого сеянца обследовали не менее 500 мм длины корня. Опыт проводили в 5-кратной повторности по числу сеянцев. Результаты изучения плотности микоризных окончаний в зависимости от типа леса представлены в табл. 1.

Результаты исследований показывают, что степень микоризообразования у трехлетнего самосева дуба выше в дубняке разнотравном, который характеризуется лучшими лесорастительными условиями, чем дубняк снытьево-ясменниковый и особенно снытьево-осоковый.

Антропогенные нагрузки существенно влияют на все стороны жизнедеятельности лесных экосистем. Изучена плотность микоризных окончаний самосева дуба в трех типах леса в зависимости от стадии рекреационной дигрессии. Поскольку в исследованных насаждениях не было полностью деградированных и нетронутых лесов, то I и V стадии рекреационной дигрессии не выделяли. В трех типах леса по трем стадиям дигрессии взято и проанализировано 45 сеянцев дуба, результаты исследований представлены в табл. 1.

Полученные данные показывают, что рекреационные нагрузки заметно влияют на степень микотрофности самосева дуба. По мере усиления рекреационной дигрессии насаждений плотность микоризных окончаний

Таблица 1

Дубняк	Плотность микориз			
	шт. на 100 мм	по стадиям дигрессии		
		II	III	IV
Снытьево-осоковый	25,11±0,41	27,95±0,23	23,87±0,41	20,79±0,22
Снытьево-ясменниковый	29,23±0,32	30,71±0,32	26,76±0,22	22,06±0,23
Разнотравный	35,54±0,32	34,98±0,52	28,52±0,31	24,05±0,31

уменьшается. Это связано по-видимому, с увеличением плотности почвы, нарушением структуры лесной подстилки и аэрации, что, в свою очередь, влияет на жизнеспособность и активность мицелия грибов-симбиотрофов. По другим литературным данным [1], загрязнение атмосферы, наоборот, способствует развитию микоризообразования. Такое противоречие может быть вызвано различием изучаемого антропогенного влияния. Уплотнение почвы и разрушение лесной подстилки оказывает более пагубное воздействие на корневую систему, чем загрязнение воздуха, которое затрудняет транспирацию листьев и компенсируется интенсивным развитием корневой системы, в том числе микоризообразованием.

Данные табл. 1 подтверждают также сделанный вывод о том, что по мере улучшения лесорастительных условий от дубняка снытьево-осокового к разнотравному плотность микоризных окончаний увеличивается.

Согласно работе [7], поток энергии, идущий через микоризу, считается главным направлением пищевой цепи в лесных экосистемах. Поэтому важно знать влияние микоризы на биологическую продуктивность лесных насаждений. Поскольку последняя определяется приростом деревьев по высоте и диаметру, то естественно желание выявить влияние активности микоризообразования на морфометрические показатели самосева дуба.

Изучено влияние плотности микоризных окончаний на прирост сеянцев дуба по высоте. В трех типах леса замерены годичные приросты трехлетнего самосева дуба в 10-кратной повторности, т. е. обследовано 30 сеянцев. Затем сеянцы были выкопаны и определена плот-

ность микоризных окончаний. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Из данных таблицы видно, что по мере повышения плотности микоризных образований годичный прирост самосева дуба по высоте увеличивается. Из полученных данных видно, что каждый тип леса характеризуется определенными лесорастительными условиями, влияющими на плотность микориз у самосева дуба черешчатого. С ростом плотности микориз увеличивается всасывающая поверхность корневой системы, что положительно сказывается на приросте и развитии сеянцев.

Таблица 2

Дубняк	Прирост сеянцев, мм, в зависимости от плотности микориз		
	26,5…30,0	30,5…35,0	35,5…40,0
Снытьево-осоковый	22…28	25…30	26…33
Снытьево-ясменниковый	26…30	27…32	28…35
Разнотравный	32…34	33…36	34…38

2

Таблица 3

Дубняк	Плотность микориз, шт. на 100 мм, по степеням поражения				
	I	II	III	IV	V
Снытьево-осоковый	31,23±0,23	28,54±0,21	26,43±0,23	22,42±0,22	20,12±0,12
Снытьево-ясменниковый	34,67±0,31	30,51±0,22	28,21±0,12	24,72±0,11	21,98±0,11
Разнотравный	38,72±0,34	36,12±0,32	33,67±0,22	28,78±0,21	23,87±0,30

Снижение функциональной активности кроны, вызванное интенсивным развитием мучнистой росы (возбудитель *Microsphaera alphitoides* Griff. et M.), может послужить толчком к падению устойчивости и вызвать усыхание дерева. Поэтому важно изучить активность микоризообразования в зависимости от степени поражения самосева дуба мучнистой росой.

В исследованиях использована 5-балльная шкала зараженности листьев дуба мучнистой росой: I – растение не поражено болезнью, II –поражено до 25, III – до 50, IV – до 75, V – до 100 % листьев.

Для анализа взяты по 5 трехлетних сеянцев дуба для каждой стадии зараженности листьев в трех типах леса, всего 75 сеянцев. Результаты исследований представлены в табл. 3.

Наши данные позволяют констатировать, что с увеличением степени поражения листьев мучнистой росой микоризная активность корней самосева дуба снижается. Полученные результаты не совпадают с литературными данными [3], согласно которым корневая система отвечает активным микоризообразованием на естественную и искусственную дефолиацию. Расхож-

дение можно объяснить тем, что увеличение образования микоризных корней в результате дефолиации является стресс-толерантной стратегией в устойчивости древостоя. В результате развития мучнистой росы фотосинтез не прекращается, а лишь снижается его интенсивность. Растения же на нужды симбионтов расходуют 10 … 50 % валового первичного продукта фотосинтеза, и замедление образования органического углерода в результате поражения листьев пагубно влияет на процесс микоризообразования и дерево в целом.

Выводы

Образование микориз активнее идет в тех типах леса, которые характеризуются наиболее сложными структурой и внутренними связями (в данном случае в дубняке разнотравном).

Антропогенное влияние через уплотнение почвы и разрушение лесной подстилки отрицательно сказываются на микоризообразовании дуба черешчатого.

Сеянцы с наибольшей плотностью микориз развиваются лучше и быстрее, чем слабомикоризные или немикоризные, которые погибают на второй-третий год роста.

Фитопатогенные грибы (*Microsphaera alphitoides* Griff. et M.), снижая активность фотосинтеза, уменьшают плотность микоризы, тем самым ослабляют растение и делают его беззащитным перед возбудителями других заболеваний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Веселкин, Д.В.* Реакция эктомикориз хвойных на техногенное загрязнение [Текст]: автореф. дис. … канд. биол. наук / Д.В. Веселкин. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 12 с.

2. *Лобанов, Н.В.* Микотрофность древесных растений [Текст] / Н.В. Лобанов.– М.: Сов. наука, 1953. – 216 с.

3. *Мамаев, В.В.* Влияние дефолиации крон дуба на ростовую активность поглощающих корней [Текст] / В.В. Мамаев, В.В. Рубцов, И.А. Уткина // Лесоведение. – 2001. – № 5. – С. 43–49.

4. *Селиванов, И.А.* Методы количественной характеристики микосимбиотрофизма растений [Текст] / И.А. Селиванов // Микориза и другие формы консортивных связей в природе: межвуз. сб. науч. тр. – Пермь: ПГПИ, 1987. – 104 с.

5. *Шемаханова, Н.М.* Микотрофия древесных пород [Текст] / Н.М. Шемаханова. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 374 с.

6. *Dexheimer, J.* Les interfases des mycorhizes [Text] / J. Dexheimer, J.-C. Pargeney // Bull. Soc. Gof. Fr. Actual. Bot. – 1991. – 138, N 3-4. – P. 243–255.

7. *Godala, N.* Regulation of mycorrhizal infection by normal factors produced by hosts and fungi [Text] / N. Godala // Experientia. – 1991. – 47. N 4. – P. 331–340.

8. *Gonsalves, M.T.* Fungus micorricos: Componentes relevantes do mecossistema [Text] / M.T. Gonsalves, V.A. Martins-Loucao: Inrorme 2 Encorta pac. Ecol. Soc. Port. Ecol., Coimbra, 3-5 dez., 1997 //Rev. boil. (Port). – 1998. – 16, N 1-4. – P. 31–57.

9. *Hetrick, B.A.D.* Mycorrhizas and root architecture [Text] / B.A.D. Hetrick // Experientia. – 1991. – 47, N 4. – P. 355–362.

Ульяновский государственный
университет

Поступила 28.12.04

B.P. Churakov, E.S. Lisov

Influence of Mycorrhizas' Density on English Oak Self-seed in Oak Forests of Ulyanovsk Region

Development of mycorrhiza's density of English oak undergrowth depending on different factors is analyzed.

УДК 630*232.318

В.В. Петрик

Петрик Виталий Васильевич родился в 1952 г., окончил в 1976 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой лесных культур и механизации лесохозяйственных работ Архангельского государственного технического университета. Имеет более 50 печатных работ в области прижизненного лесопользования.

СВЯЗЬ СМОЛОПРОДУКТИВНОСТИ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ С НЕКОТОРЫМИ МОРФОЛОГИЧЕСКИМИ ПРИЗНАКАМИ ШИШЕК И СЕМЯН

Рассмотрена связь смолопродуктивности с морфологическими признаками шишек и семян, указывающими на способность сосны обыкновенной выделять живицу.

Ключевые слова: смолопродуктивность, сосна обыкновенная, отбор, шишки, семена.

Для доказательства существования биологических форм сосны обыкновенной различной смолопродуктивности необходимо найти морфологические признаки, указывающие на способность деревьев выделять живицу. Такие признаки можно установить при исследовании шишек и семян полученных от сосен высокой и низкой смолопродуктивности [1, 2, 9–12].

Материал для исследования собирали на пробных площадях (ПП) 59, 60, 61 (Мезенский лесхоз, притундровая подзона тайги) в сосняке черничном и на ПП 63, 64 (Плесецкий лесхоз, средняя подзона тайги) в сосняке вересковом. Смолопродуктивность деревьев определяли по общепринятой методике, затем деревья разделяли на три категории: высоко-, средне- и низкосмолопродуктивные. Зимой у деревьев противоположных категорий – высоко- и низкосмолопродуктивных – собирали шишки, из которых извлекали семена.

Образцы для анализа отбирали согласно ГОСТ 13056.1–67. Чистоту, массу 1000 семян, энергию прорастания, всхожесть, число семядолей определяли по ГОСТ 13056.2–67; ГОСТ 13056.4–67 и ГОСТ 13056.6–97.

При исследовании шишек и, частично, семян использовали методику Л.Ф. Правдина [9], основные положения которой заключаются в следующем. В числе морфологических признаков шишек изучали их длину, ширину, строение поверхности семенной чешуи, окраску.

Длину и наибольшую ширину шишек измеряли штангенциркулем. Отношение длины к ширине показывает форму шишек: продолговатая (2,5 … 3,0), широкая (2,0 … 2,5), яйцевидная (1,5 … 2,0), круглая (1,0 … 1,5). По длине шишки разделяли на три группы: крупные – 44 … 48, средние – 40 … 44 и мелкие – менее 40 мм. Средние длину и ширину определяли сначала для каждого дерева, а затем для отдельных групп.

По форме апофизов выделяли три формы: плоская (гладкая поверхность семенной чешуи), выпуклая (семенная чешуя в виде пирамидки), крючковатая (в виде крючка). В пределах выпуклой формы апофиза выделены семенные чешуи слабо- и сильновыпуклой формы [12], эти группы приняты нами за основу при изучении изменчивости формы апофиза.

Все разнообразие шишек по их окраске было сведено в три группы: серые, коричневые и бежевые.

По цвету семян систематики выделяют формы сосны с черными семенами, желтыми, пятнистыми или пестрыми, коричневыми и бежевыми [9].

Из семян с низко- и высокосмолопродуктивных деревьев взяты образцы на проращивание. Показатели качества семян приведены в табл. 1.

Семена высокосмолопродуктивных сосен имеют более высокую энергию прорастания, абсолютную и техническую всхожесть. Техническая всхожесть на ПП 63 и абсолютная на ПП 64 одинаковая у сосен высокой и низкой смолопродуктивности.

Таблица 1

Показатели	Пробная площадь				
	59	60	61	63	64
Энергия прорастания, %	18,8 / 6,0	22,8 / 16,2	26,0 / 14,8	50,3 / 38,0	65,8 / 43,5
Всхожесть, %:					
техническая	50,8 / 34,0	44,0 / 36,3	51,0 / 27,8	60,5 / 60,5	72,0 / 50,3
абсолютная	67,0 / 41,7	59,1 / 49,1	66,6 / 43,5	95,3 / 90,3	92,9 / 92,6
Масса 1000 семян, г	4,40 / 4,48	4,48 / 4,55	4,44 / 4,50	3,82 / 3,91	5,21 / 3,91
Распределение всходов, %, по числу семядолей:					
3	2 / 2	12 / 1	6 / 7	0 / 0	1 / 0
4	11 / 14	10 / 13	14 / 13	0 / 5	6 / 13
5	32 / 38	30 / 43	19 / 39	16 / 27	28 / 36
6	47 / 39	39 / 36	44 / 39	70 / 55	51 / 35
7	8 / 6	8 / 7	15 / 0	14 / 13	14 / 16
8	0 / 1	1 / 0	2 / 2	0 / 0	0 / 0
Представленность всходов с 6…8 семядолями, %	55 / 46	48 / 43	61 / 41	84 / 68	65 / 51

Примечание. В числителе показатели для высокосмолопродуктивных сосен; в знаменателе – для низкосмолопродуктивных.

Значительных изменений массы 1000 семян нами не выявлено, хотя семена, как правило, несколько тяжелее у низкосмолопродуктивных деревьев, и лишь на ПП 64 – у высокосмолопродуктивных. Различия по массе 1000 семян определяются в основном генетическими факторами, и в разные репродуктивные годы ранг деревьев обычно сохраняется [5].

Посевные качества семян из сосняка верескового значительно выше, чем из черничного. Это, по-видимому, связано с климатическими различиями: Плесецкий лесхоз расположен в средней подзоне тайги, где достаточно теплое и продолжительное лето; Мезенский – в притундровой подзоне, климат здесь весьма суровый, лето холодное и короткое.

Отдельные деревья и популяции производят потомство с различным числом семядолей: от 3 до 8 шт.; очень редко встречаются всходы с 2 и 9 семядолями [4, 6, 10, 12].

В.Я. Попов и В.М. Жариков [4] в своих исследованиях установили, что число семядолей в значительной степени определяет пути развития ассимиляционного аппарата растений, проводящей системы корня, смолоносной системы хвои и луба и, в итоге, возможности накопления органического вещества. Активность роста сосны увеличивается от 4- к 8-семядольным особям. Генетически более совершенны сосны с 6 … 8 семядолями [8]. Они более способны к устойчивому проявлению повышенной охвоенности, имеют лучше развитые проводящую систему корня и смолоносную систему хвои и луба. Таким образом, признак числа семядолей является маркером наследственных свойств, и его можно использовать в ранней диагностике и при генетическом анализе структуры популяций хвойных пород [4, 6].

Отбор проб, подготовку к проращиванию и проращивание семян проводили согласно действующим стандартам – ГОСТ 13056.1–67 и ГОСТ 13056.6–97. Результаты определения приведены в табл. 1.

Распределение всходов по числу семядолей подчиняется закону нормального распределения, наибольшее количество вариант сосредоточено в центральных ступенях. Представленность всходов с 6 … 8 семядолями в потомстве у деревьев приведена в табл. 1.

В испытательных культурах лучшей энергией роста обладают деревья 6–8-семядольных линий [7]. В возрасте 20 … 29 лет их объем ствола в среднем на 15 … 38 % выше, чем у деревьев 4–5-семядольных линий, в хвое и лубе осевого побега больше смоляных ходов. Все это свидетельствует о генетической обусловленности числа семядолей.

Полученные данные показывают, что 6–8-семядольных всходов больше у семян высокосмолопродуктивных сосен. Можно предположить, что потомство этих деревьев будет активнее расти за счет лучшего развития ассимиляционного аппарата, проводящей системы корня и смолоносной системы хвои и луба. Следовательно, от таких деревьев можно ожидать повышенного выхода живицы.

Наши исследования не позволили выявить отличий в окраске семян у деревьев разной смолопродуктивности. Во всех случаях преобладали пестрые или пятнистые семена (90 … 92 %), редко встречались бежевые.

Таблица 2

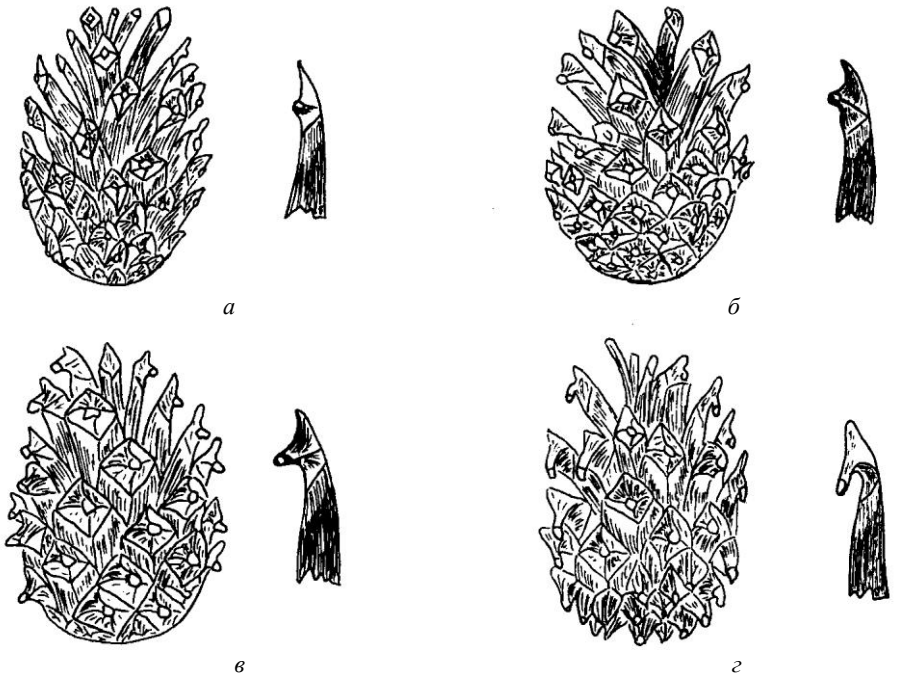
Признак	Форма апофиза			
	крючковатый	сильновыпуклый	слабовыпуклый	плоский
Мезенский лесхоз				
Процент деревьев	18 / 47	20 / 28	57 / 12	5 / 13
Средний размер шишек, см:				
длина	4,9 / 4,3	4,0 / 4,2	4,3 / 3,8	4,0 / 3,7
ширина	2,6 / 2,3	2,3 / 2,3	2,2 / 2,0	2,1 / 2,0
Преобладающая форма шишек	Яйцевидная / Яйцевидная			
Преобладающая окраска шишек	Серая / Коричневая			
Среднее число семян в шишке, шт.	14,7 / 18,4			
Плесецкий лесхоз				
Процент деревьев	16 / 45	14 / 43	57 / 10	13 / 2
Средний размер шишек, см:				
длина	3,8 / 3,2	3,9 / 3,2	3,7 / 3,0	3,2 / 3,1
ширина	1,9 / 1,7	2,1 / 1,7	1,9 / 1,6	1,7 / 1,6
Преобладающая форма шишек	Яйцевидная / Яйцевидная			
Преобладающая окраска шишек	Серая / Коричневая			
Среднее число семян в шишке, шт.	8,1 / 13,7			

Примечание то же, что в табл. 1.

По-видимому, последствия перекрестного опыления разных форм сосны сильнее проявляются в окраске семян, чем в морфологических признаках шишек. Для деревьев любой категории смолопродуктивности характерно преобладание семян типичной для данного района окраски [1].

Результаты изучения шишек деревьев различной смолопродуктивности сведены в табл. 2.

Как видим, у сосен высокой и низкой смолопродуктивности встречаются все четыре формы строения семенной чешуи шишек, но в разной степени. Строение семенной чешуи шишек в пределах даже одной группы сильно варьирует от дерева к дереву (см. рисунок). У высокосмолопродуктивных сосен явно преобладают шишки со слабовыпуклым апофизом, у низкосмолопродуктивных – с крючковатым и сильновыпуклым. Однако брать этот морфологический признак за основной при выделении высоко- и низкосмолопродуктивных деревьев нецелесообразно, так как шишки у сосны формируются в



Форма апофиза шишек: *а* – плоская; *б* – слабовыпуклая; *в* – сильновыпуклая; *г* – крючковатая

течение 3 лет, и неизвестно, что повлияло на изменение апофиза – степень сомкнутости дерева или различия в погодных условиях [3].

Шишки сосен высокой смолопродуктивности крупнее в среднем на 0,6 … 1,1 см, особенно в притундровой подзоне тайги, хотя, по литературным данным [10, 12], как правило, с увеличением географической широты средняя длина шишек уменьшается. Такие различия, по-видимому, связаны с существованием районов с мелкими, средними и крупными размерами шишек [9].

Шишки сосен высокой и низкой смолопродуктивности преимущественно яйцевидные как в Мезенском, так и в Плесецком лесхозе.

Как мы уже отмечали, все разнообразие шишек по цвету было сведено в три группы: коричневые, серые и бежевые. Определен процент шишек различных окрасок у сосен разных категорий смолопродуктивности. В сосняке вересковом у высокосмолопродуктивных сосен 50 % шишек имели серый цвет, 31 % – коричневый, 19 % – беж; у низкосмолопродуктивных соответственно 33, 50 и 17 %. Близкие результаты получены в сосняке черничном. Цвет шишек сосны варьирует, как и другие признаки.

Часто шишки с крючковатым апофизом бывают коричневыми, с выпуклым – серыми, с плоским – бежевыми. Окраска зрелых шишек иногда специфична для географических рас [9].

Различие между соснами высокой и низкой смолопродуктивности проявилось и в выходе семян. В пределах одного дерева он зависит от размеров шишек, в крупных семян больше, с уменьшением размера шишек выход последовательно снижается.

Среднее число семян в шишках низкосмолопродуктивных сосен выше, чем у высокосмолопродуктивных. Это может быть связано с массой 1000 семян, которая несколько больше у деревьев низкой смолопродуктивности (см. табл. 1).

Таким образом, проведенное исследование подтверждает существование в различных географических районах, форм сосны обыкновенной низкой и высокой смолопродуктивности, отличающихся по морфологическим признакам. Признаки шишек и семян можно положить в основу отбора высокосмолопродуктивных форм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Высоцкий, А.А.* Выбраковка низкосмолопродуктивных деревьев при формировании насаждений сосны целевого назначения [Текст] / А.А. Высоцкий // Отбор и его использование в улучшении лесных пород: сб. науч. тр. – Воронеж: НИИЛГиС, 1994. – С. 54–60.

2. *Высоцкий, А.А.* Биологические особенности деревьев сосны обыкновенной высокой и низкой смолопродуктивности [Текст] / А.А. Высоцкий // Генетико-селекционные основы улучшения лесов: сб. науч. тр. – Воронеж: НИИЛГиС, 1999. – С. 106–129.

3. *Парамонов, Е.Г.* Влияние подсочки на жизнедеятельность насаждений [Текст] / Е.Г. Парамонов. – М.: Лесн. пром-сть, 1983. – 72 с.

4. *Попов, В.Я.* Селекционные основы семеноводства сосны и ели на Европейском Севере [Текст] / В.Я. Попов, В.М. Жариков // Селекция и семеноводство хвойных пород на Европейском Севере. – Архангельск, 1990. – С. 3–17.

5. *Попов, В.Я.* К вопросу о плодоношении и качестве потомства форм сосны с разной массой семян [Текст] / В.Я. Попов, П.В. Тучин, Д.Х. Файзулин // Материалы отчет. сессии по итогам науч.-исслед. работ за 1993 год. – Архангельск: АИЛиЛХ, 1994. – С. 22–24.

6. *Попов, В.Я.* Система селекции сосны обыкновенной на Европейском Севере России [Текст] / В.Я. Попов // Вопросы лесоводства на Европейском Севере: сб. науч. тр. – Архангельск, 1997. – С. 68–73.

7. *Попов, В.Я.* Создание лесосеменных плантаций сосны обыкновенной второго порядка [Текст] / В.Я. Попов, Д.Х. Файзулин // Лесовосстановление на Европейском Севере: материалы финляндско-российского семинара, который состоялся в Вуокатти в Финляндии 28.9 – 2.10.1998 / Э. Мялкенен, Н.А. Бабич, В.И. Крутов, И.А. Маркова. – VATAAN TUTKIMUSKUS – Науч. центр Ватаа, 2000. – 227 с.

8. *Попов, В.Я.* Создание плантаций сосны обыкновенной семенного происхождения на селекционной основе [Текст] / В.Я. Попов, П.В. Тучин, Д.Х. Файзулин // Экологические проблемы Севера. – Архангельск, 2002. – С. 72–85. – (Межвуз. сб. науч. тр. / АГТУ; Вып. 5).

9. *Правдин, Л.Ф.* Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция [Текст] / Л.Ф. Правдин. – М.: Наука, 1964. – 191 с.

10. *Проказин, Е.П.* Селекция смолопродуктивных форм сосны обыкновенной [Текст] / Е.П. Проказин // Опыт и достижения по селекции лесных пород. – М.: Изд-во Минсельхоза СССР, 1959. – Вып. 38. – С. 125–186.

11. *Проказин, Е.П.* Создание высокосмолопродуктивных сосновых насаждений на селекционной основе [Текст] / Е.П. Проказин, А.В. Чудный. – М.: ЦБНТИлесхоз, 1969. – 20 с.

12. *Шульгин, В.А.* Отбор и разведение сосен высокой смолопродуктивности [Текст] / В.А. Шульгин. – М.: Лесн. пром-сть, 1973. – 87 с.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 16.04.04

V.V. Petrik

Link of Resin-productivity of Scotch Pine with Some Morphological Characters of Cones and Seeds

The link of resin-productivity with morphological characters of cones and seeds proving the ability of Scotch pine to release turpentine.

УДК 630*24:385.1

Д.А. Корепанов

ЛЕСОВОДСТВЕННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСУШЕНИЯ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Приведены данные о производительности осушаемых сосновых древостоев в зависимости от давности осушения и типа болотной залежи.

Ключевые слова: осушение, производительность древостоя, давность осушения, тип болота, рубки ухода.

Классическим примером высокой эффективности гидролесомелиорации является осушение в 40-х гг. XIX в. низинного болота Сулланда в Ленинградской области, где на месте сосняка Va класса бонитета в настоящее время произрастают сосновые древостои I–II классов [5]. Близкий эффект получен в 1912 г. при осушении сосняков на низинном болоте Лебедань в современной Республике Марий Эл. С этой информацией хорошо согласуются данные об осушении переходного болота Лычное в Кировской области с сосновым лесом Va класса бонитета [3]. Здесь ныне произрастают древостои II–III классов бонитета. В то же время осушаемое с 1868 г. верховое болото Кирсовое не дало лесоводственного эффекта; производительность произрастающего на нем сосняка осталась той же (Va–Vб классы).

Приведенные данные показывают, что высокий лесоводственный эффект при осушении может быть получен, если объектом мелиорации оказываются болота низинного или переходного типов. В зонах южной тайги и смешанных лесов некоторый эффект дает также осушение сосняков на болотах мезоолиготрофного типа [4]. Таким образом, пока нет определенности в оценке эффективности осушения заболоченных сосняков в средних широтах Европейской России.

Проанализированы результаты осушения 1964–1965 гг. на Быстрицком лесоболотном стационаре. Осушение осуществлено в 1967–1968 гг. на площади 3200 га. Наблюдения вели в течение 40 лет. Учеты проводили через 10 лет: один – до, три – после осушения. Обследовали молодняки, средневозрастные и спелые древостои в местообитаниях мезоолиготрофного, мезотрофного и евтрофного типов заболачивания.

На пробных площадях проводили перечислительную таксацию с рубкой и разделкой модельных деревьев, замеры уровня грунтовых вод, агрохимический анализ почв и грунтовых вод, описание живого напочвенного покрова. На верховом болоте заложен эксперимент с удобрениями.

Результаты наблюдений на пробных площадях верхового болота приведены в таблице. Согласно данным, производительность осушенных

Период наблюдения	Состав пород	Средний возраст, лет	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Класс бони-тета	Пол-нота	Запас, $м^3$/га	Густота древостоев, шт./га	
								растущих	сухостойных
Мезоолиготрофное болото									
До осушения	10С	35	5,5	6,3	IV,5	0,40	38	3900	30
После осушения	10С	46	7,9	8,2	IV,1	0,78	96	3770	870
	10С	52	11,0	11,2	III,7	0,78	132	2640	1160
	10С	66	14,2	16,4	III,1	0,83	217	1760	293
	10С	74	17,8	20,6	II,2	0,90	242	1075	525
До осушения	10С	80	7,9	8,0	Va	0,52	52	2630	60
После осушения	10С	90	9,7	9,5	Va	0,52	75	1830	70
	10С	96	11,7	9,8	Va	0,57	81	1250	250
	10С	108	13,1	10,7	Va	0,82	129	1078	202
До осушения	10С	92	10,2	7,3	Va	0,65	73	2250	72
После осушения	10С	105	10,9	9,7	Va	0,68	90	1964	199
	10С	112	13,1	10,0	Va	0,72	111	1433	225
	10С	125	15,8	15,0	V,2	0,71	125	1147	349
	10С	133	17,9	17,7	IV,4	0,74	179	1083	516

Окончание таблицы

Период наблюдения	Состав пород	Средний возраст, лет	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Класс бони-тета	Пол-нота	Запас, $м^3$/га	Густота древостоев, шт./га	
								растущих	сухостойных
Мезотрофное болото									
До осушения	9С1Б	39	7,1	10,2	IV,9	0,62	108	5150	–
После осушения	9С1Б	54	10,9	12,0	III,3	1,24	231	4750	850
	9С1Б	61	13,5	17,0	II,7	1,02	258	2834	1766
	9С1Б	73	17,1	22,2	I,7	0,95	338	1966	517
	8С2Б	81	18,3	23,0	I,8	0,95	286	800	266
До осушения	10С, ед.Б	50	10,4	10,7	IV,8	0,55	80	2230	–
После осушения	10С, ед.Б	61	13,8	13,4	III,5	0,80	158	1700	120
	10С, ед.Б	73	15,4	16,6	III,3	0,56	146	1700	260
	9С1Б 7Б2Е1С	90	24,7	21,0	II,5	0,51	176	1060	260
До осушения	10С	110	18,3	14,9	V,0	0,69	177	829	54
После осушения	10С	124	20,3	16,1	IV,8	0,77	198	770	110

	10С	131	22,4	19,6	IV,2	0,70	228	604	129
	10С	143	25,4	24,6	III,0	0,98	280	479	200
	10С	151	25,4	24,6	III,5	0,52	224	354	235
	10Б, ед.Е,С								
Осушаемое болото									
До осушения	8С2Б,ед. Ив,Ос	30	7,8	6,0	IV,2	0,52	46	2545	–
После осушения	6С3Б1Ив,ед.Ос	44	11,3	10,4	III,5	0,46	120	1835	262
	7С3Б, ед.Ос	51	14,3	16,4	II,0	0,91	194	1663	100
	9С1Б, ед.Ос	63	19,8	25,2	I,5	1,03	391	993	156
	8С2Б, ед.Ос	71	24,7	26,0	I,6	1,00	340	900	85
	7Б2Е1С								
До осушения	9С1Б	54	16,5	18,4	II,8	1,16	280	1823	189
После осушения	10С+Б	68	18,2	23,0	I,2	0,73	332	990	190
	9С1Б	75	21,0	24,6	I,0	1,02	390	973	377
	10С, ед.Б,Е	87	24,4	27,0	I,0	1,25	450	605	276
	9С1Б, ед.Е	95	25,0	26,5	I,5	1,38	509	721	210
До осушения	5С2Е3Б	150	29,0	23,0	III,6	1,36	484	1022	211
После осушения	5С2Е3Б	163	28,7	23,8	III,3	1,03	347	733	198

молодых сосняков через 40 лет возросла с IV,5 до III,1–II,2 классов. Осушение же спелого сосняка практически не дало лесоводственного эффекта. Это объясняется пониженной толерантностью высоковозрастной сосны, утрачивающей жизненный потенциал при резком изменении гидрологического режима. Сказалась также низкая зольность осушенных торфяных почв. В испытавшем стресс древостое идет дифференциация стволов и изреживание.

Значительно выше эффект осушения сосняков, произрастающих в условиях переходных болот (см. таблицу). Здесь производительность молодняков повысилась с IV до II класса бонитета. Некоторое замедление роста в последнее время объясняется усиливающимся эффектом перенаселения. Тренд роста продуктивности мог быть обеспечен при проведении рубок ухода или приема выборочной рубки в древостое высокой полноты [1, 2]. Продуктивность осушенного спелого сосняка, достигшего за 25 лет III класса бонитета, в последнем десятилетии снизилась. Причина наметившейся депрессии та же, что и на верховом болоте.

Высокий лесоводственный эффект получен при осушении сосняков, произрастающих на низинных болотах (см. таблицу). Исключением снова стали спелые древостои, однако в них, в отличие от предыдущих типов местообитаний, главной причиной снижения темпов роста было заиление осушительной сети и сильный вывал деревьев [3]. Осушение спелых и перестойных древостоев в условиях евтрофного типа заболачивания, как и дру-

гих типов, не дало положительных результатов, запас стволовой массы здесь даже снизился.

Таким образом, подтверждается известное по многим публикациям общее положение: эффективность гидролесомелиорации тем выше, чем лучше трофность почв и меньше стартовый возраст древостоя. На переходных и мезоолиготрофных болотах спелые древостои после осушения следует вырубать, а вырубки оставлять под естественное заращивание. На участках с низинным типом заболачивания при отсутствии предварительного возобновления необходимо проводить лесокультурные работы или реконструкцию малоценных лиственных молодняков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Залесов, С.В.* Рубки ухода на Урале и пути повышения их лесоводственной и экономической эффективности [Текст] / С.В. Залесов, Н.А. Луганский // Ускорение социально-экономического развития Урала. – Свердловск, 1989. – С. 89–100.

2. *Залесов, С.В.* Влияние выборочных рубок на рост подроста ели в осушаемых болотных древостоях [Текст] / С.В. Залесов, В.П. Волокитин, Д.М. Корсуков // Леса Урала и хозяйство в них. – Екатеринбург, 2002. – Вып. 22. – С. 3–8.

3. *Корепанов, А.А.* Влияние осушения на экологию произрастания леса [Текст] / А.А. Корепанов, Н.А. Дружинин. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1994. – 208 с.

4. *Корепанов, С.А.* Влияние осушения мезоолиготрофных болот на экологию и рост леса [Текст]: науч. изд. / С.А. Корепанов, Д.А. Корепанов. – Йошкар-Ола: АНИИУЛБП, 2002. – 120 с.

5. *Пьявченко, Н.И.* Основы гидролесомелиорации [Текст] / Н.И. Пьявченко, Е.Д. Сабо. – М.: Гослесбумиздат, 1962. – 380 с.

Уральский государственный
лесотехнический университет

Поступила 10.04.06

D.A. Korepanov

Forestry Efficiency of Pine Stands Drainage in Taiga Zone of Area between Volga and Kama

Data on productivity of drained pine stands depending on drainage remoteness and bog bed type are provided.

УДК 630*182.3

М.Н. Егоров

Егоров Михаил Николаевич родился в 1938 г., окончил в 1960 г. Уральский лесотехнический институт, в 1984 г. Воронежский государственный университет, доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории лесной селекции ФГУП «Научно-исследовательский институт лесной генетики и селекции». Имеет более 60 печатных работ в области фенетики и селекции древесных растений.

ФЕНОТИПИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЕСТЕСТВЕННОГО ДРЕВОСТОЯ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В ЦЕНТРАЛЬНОМ ЧЕРНОЗЕМЬЕ (УСМАНСКИЙ БОР)

Проанализирована фенотипическая структура и продуктивность сформировавшегося спелого соснового древостоя по комплексу структурных признаков. Вскрыт ряд закономерностей в формировании, строении и достоверности различий между селекционными категориями сосны обыкновенной, выявленными по рассмотренным признакам на основе нового фенетического подхода.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, фенотипическая структура, селекционные категории, продуктивность.

Как естественно-исторический феномен любая популяция обладает только ей присущими особенностями, прежде всего структурированностью – количественным соотношением гено- или фенотипов. Несмотря на успехи в изучении структуры популяций многих видов, популяции лесных древесных пород исследованы недостаточно [6]; неизвестен уровень их генотипического разнообразия по многим признакам, особенно количественным, наиболее сложным и ценным с хозяйственной точки зрения. У большинства видов древесных пород структура популяций фактически не рассматривалась, хотя назрела острая необходимость в проведении таких исследований [2, 7]. Большинству видов древесных растений свойственен значительный полиморфизм, в связи с чем важно изучить генотипический состав популяций и условий, обеспечивающих их устойчивость, что позволяет определить направление действия естественного отбора и принципы оценки особей в целях селекции [5]. При этом появляется возможность более глубоко познать эволюцию и объективно выделить внутривидовые категории. Актуальность этой проблемы была отмечена и нами [3, 4].

Известные трудности при изучении древесных растений на генетическом уровне возникают в силу длительности смены поколений и растянутости опытов по направленному скрещиванию и анализу в нескольких поколениях. Однако неотложность селекционной работы на достаточно надежной генетической основе вынуждает изыскивать новые подходы по реализации программ селекции. Достаточно отметить, что популяционно-

генетически изученные виды составляют ничтожно малую долю (около 0,007 %) [7]. Определяющую роль здесь должна сыграть фенетика, основанная на выделении и учете дискретных альтернативных, наследственно обусловленных признаков-фенов как качественной, так и количественной природы их происхождения, позволяющая с большей точностью при меньших усилиях дать представление о том, на какие фенотипические группировки распадается вся совокупность особей. Именно в широте охвата фенами генотипа заключается одно из основных преимуществ фенотипического подхода в изучении генотипической структуры популяций [8].

Материал и методика. Объектом исследования служила сосна обыкновенная VII класса возраста из Усманского бора (Воронежский лесхоз, Борское лесничество, кв. 10, тип леса сосняк дубовый ($С_д$), тип лесорастительных условий – судубрава свежая ($С_{2с}$). Пробная площадь заложена в полевой период 2001 г. в сосняке естественного происхождения, у каждого из 200 деревьев комплекса определяли качественные и количественные структурные признаки. Наряду с этим исследовали также объем ствола, общую высоту, высоту поднятия грубой корки и до первого живого сука, диаметры ствола и кроны, а также таксономический показатель уровня развития, предложенный З. Хельвигом [9], служащий для статистической характеристики множества объектов (для нашего случая деревьев). Весь экспериментальный материал обрабатывали статистически на ЭВМ [1].

Результаты и обсуждение. Фенотипическая характеристика соснового древостоя бора приведена в таблице, из которой видно, что группы деревьев в зависимости от тех или иных структурных признаков расположились в определенной последовательности; выявлена также достоверность (или недостоверность) различий между ними.

3 По положению в древостое ранги деревьев по всем рассматриваемым признакам снижаются от господствующих к согосподствующим и угнетенным, причем различия достоверны для всех трех категорий по всем показателям за исключением высоты поднятия грубой корки между господствующими и согосподствующими, угнетенными ($t_ф$ равно 0,6 и 1,9).

По плотности кроны не выявлено достоверных различий (за исключением трех сравнений: между густой и средней густоты кронами по объему ствола ($t_ф$ = 2,4), диаметру ($t_ф$ = 2,6) и диаметру кроны ($t_ф$ = 2,8).

По архитектонике кроны различия достоверны по высоте между особями с шаровидной, яйцевидной и конусовидной кронами ($t_ф$ равно 3,3 и 3,9); по высоте поднятия грубой корки – между деревьями с яйцевидной и аморфной кронами ($t_ф$ = 2,9); по высоте до первого живого сука – между деревьями с шаровидной и яйцевидной, конусовидной, аморфной и цилиндрической кронами ($t_ф$ равно 4,6; 4,8; 2,3 и 3,5); по диаметру кроны – между деревьями с аморфной, яйцевидной и шаровидной ($t_ф$ равно 2,4 и 2,0).

По строению коры лидирующие позиции занимают в основном формы сосны с пластинчатой корой; достоверность различий по объему ствола налицо между деревьями с пластинчатой и пластинчато-чешуйчатой, чешуйчато-пластинчатой и чешуйчатой корой ($t_ф$ равно 3,1; 3,5 и 3,7), по вы-

соте деревьев – между пластинчатой и чешуйчатой корой ($t_ф$ = 2,0), по диаметру ствола – между пластинчатой и пластинчато-чешуйчатой, чешуйчато-пластинчатой и чешуйчатой формами ($t_ф$ равно 3,2; 3,7 и 3,6).

По толщине коры ранговое расположение форм сосны по мере снижения показателей выдерживается в последовательности: с толстой, средней толщины и тонкой корой, причем достоверность различий проявляется между этими группами деревьев по объему ствола и его диаметру ($t_ф$ равно 3,1 и 3,1 и $t_ф$ = 3,3 и 3,2).

По цвету коры лидирующее положение по объему ствола занимает форма с коричнево-желтоватым оттенком, замыкающее – с бледно-желтым; достоверное различие выявлено по высоте до живого сука между категориями сосен с желтой и коричнево-желтоватой и бледно-коричневой корой ($t_ф$ равно 2,4 и 4,8), а также между желто-коричневой и коричнево-желтоватой, бледно-коричневой и бледно-желтой ($t_ф$ равно 3,4; 6,5 и 3,2).

По диаметру кроны различия достоверны между бледно-коричневой, коричнево-желтоватой и желто-коричневатой корой ($t_ф$ равно 2,2 и 2,0), для остальных показателей и вариаций различия недостоверны.

По мере снижения толщины сучьев формы расположились в последовательности: с толстыми, средней толщины и тонкими сучьями; достоверность различий обнаруживается между этими формами по объему ствола ($t_ф$ равно 3,1 и 6,6), диаметру ствола ($t_ф$ равно 3,2 и 6,7), диаметру кроны ($t_ф$ равно 3,4 и 5,1) и между формами с сучьями средней толщины и тонкими – по объему ствола ($t_ф$ = 5,4), диаметру ($t_ф$ = 5,0) и диаметру кроны ($t_ф$ = 2,9), по высоте деревьев между формами с толстой и тонкой корой ($t_ф$ = 2,1).

По очищаемости ствола от сучьев по его объему лидируют деревья со средней очищаемостью, затем с плохой и хорошей; достоверность же различий выявлена по диаметру ствола между деревьями с хорошей, средней и плохой очищаемостью ($t_ф$ равно 2,6 и 2,1), по диаметру кроны – между хорошей и плохой ($t_ф$ = 3,4).

По показателю уровня развития ранговое расположение форм выдержано в последовательности: лучшие, средние и худшие деревья; достоверность различий всех показателей выявляется за исключением высоты до живого сука и трех вариантов сравнений средних деревьев с худшими по высоте ствола ($t_ф$ = 1,4) и диаметру кроны ($t_ф$ = 1,9) и лучшими – по высоте поднятия грубой корки ($t_ф$ = 1,5).

Таким образом, фенетический подход позволяет разбить всю выборку деревьев на подмножества-кластеры и выявить перспективные с селекционной точки зрения особи для дальнейшего использования в генетико-селекционном анализе при отборе хозяйственно-ценных форм. Эффективность такого подхода к классификации деревьев по предложенным для анализа признакам и показателям очевидна по результатам исследований, при которых отчетливо выделяются определенные селекционные категории деревьев как по кроне, коре, сучьям, так и по показателю уровня развития, образуя три класса развития: лучшие, средние и худшие. Закономерности в

строении насаждений, выявленные при изучении внутривидовой изменчивости, необходимо учитывать при рубках ухода, направленных на отбор продуктивных форм и вырубку малопродуктивных деревьев. Реализация этих мероприятий позволит создать базовый селекционный задел и правильно ориентировать дальнейшие исследования по созданию высокопродуктивных насаждений сосны обыкновенной – одного из основных лесообразователей страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Доспехов, Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) [Текст] / Б.А. Доспехов. – 4-е изд. – М.: Колос, 1979. – 416 с.

2. *Драгавцев, В.А.* Методы анализа формообразования древесных растений на основе изучения изменчивости черного саксаула [Текст]: автореф. дис. … канд. биол. наук / В.А. Драгавцев. – Алма-Ата, 1962. – 31 с.

3. *Егоров, М.Н.* Изучение фенофондов и фенотипической структуры природных и искусственных насаждений древесных растений как назревшая проблема в лесном хозяйстве страны [Текст] / М.Н. Егоров // Фенетика популяций: тез. докл. материалов III Всесоюз. совещания 7-8 февраля 1985 г. – М., 1985. – С. 64–65.

4. *Егоров, М.Н.* Сосна обыкновенная в природе и культуре (сравнительный биоэкологический анализ) [Текст] / М.Н. Егоров; НИИЛГиС. – Воронеж, 1994. – 437 с. – Деп. в ВНИИЦлесресурс 21.06.94, № 930–лх94.

5. *Ирошников, А.И.* Структура популяций хвойных пород южной Сибири [Текст] / А.И. Ирошников // Тр. ИЭРиЖ УНЦ АН СССР. – 1974. – Вып. 90. – С. 30–35.

3* 6. *Петров, С.А.* Некоторые проблемы генетики популяций древесных растений [Текст] / С.А. Петров // Там же. – С. 41–45.

7. *Яблоков, А.В.* Фенетика. Эволюция, популяция, признак [Текст] / А.В. Яблоков. – М.: Наука, 1980. – 136 с.

8. *Яблоков, А.В.* Введение в фенетику популяций. Новый подход к изучению природных популяций [Текст] / А.В. Яблоков, Н.И. Ларина. – М.: Высш. шк., 1985. – 160 с.

9. *Hellwig, Z.* Zastosowanie metody taksonomicznej do typologicznego podzialu krajow ze wzgledu na poziom ich rozwoju i strukture wykwalifikowanych kadr [Text] / Z. Hellwig. – Przeglad Statistyczny, 1968, N 4.

ФГУП «Научно-исследовательский институт
лесной генетики и селекции»

Поступила 30.01.03

M.N. Egorov

Phenotypic Structure of Natural Stand of Scots Pine in Central Chernozem Area (Usman Pine Forest)

Phenotypic structure and productivity of formed mature pine stand is analyzed according to a set of structural features. A number of regularities in the formation, structure and

reliability of differences among selection categories of Scots pine discovered based on features of new phenotypic approach is revealed.

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 630*375.1

А.Ю. Ширнин

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОДЪЕМА ПЕРЕДНЕГО КОНЦА ПАЧКИ ХЛЫСТОВ ПРИ ЛЕБЕДОЧНОЙ ТРЕЛЕВКЕ*

Приведена математическая зависимость расстояния от места подъема переднего конца хлыстов до мачты от объема пачки, представлены теоретическая и экспериментальная кривые этой зависимости.

Ключевые слова: трелевка хлыстов, тяговый канат, математическая зависимость, регрессионное уравнение.

По заявленному в патенте [1] способу трелевку хлыстов (деревьев) осуществляют в два этапа. На первом используют лебедку, установленную на раме пакетировочно-трелевочной машины (ПТМ), и опорный блок на грейферном захвате манипулятора ПТМ, через который пропускают тяговый канат и который поднимают манипулятором на заданную высоту с упором в дерево-мачту. Первый этап комбинированной трелевки исключает движение ПТМ по пасечным волокам, что обеспечивает сохранность подроста и допускает разработку переувлажненных лесосек.

На втором этапе деревья, хлысты или сортименты трелюют ПТМ по магистральному волоку на лесопогрузочный пункт в полуподвешенном, полупогруженном или погруженном положении в зависимости от типа ПТМ и принятого технологического процесса.

Экспериментальные исследования [3] показали, что с увеличением высоты закрепления опорного блока (высоты мачты) возрастает расстояние от мачты до начала подъема переднего конца хлыстов, что обеспечивает свободное перемещение (без упора в пни) трелюемой пачки. С увеличением объема трелюемой пачки это расстояние уменьшается в соответствии с полученным регрессионным уравнением (при высоте установки блока 6 м):

$$L = 83{,}878 - 2{,}4755\,M - 0{,}0942\,M^2. \qquad (1)$$

* Работа выполнена по государственному контракту № 02.442.11.7334 при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям в рамках Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям науки и техники» на 2002–2006 гг.

Цель нашего исследования – получить математическую зависимость, позволяющую определить значение L при всем многообразии влияющих на процесс факторов, а также проверить адекватность полученной модели экспериментальным данным.

Спроектируем на оси x и y (рис. 1) силы, действующие при трелевке по горизонтальному волоку:

$$\sum X = F_{тр} - Z\cos\varphi = 0;$$

$$\sum Y = Z\sin\varphi - G + N = 0, \qquad (2)$$

где $F_{тр}$ – сила сопротивления движению пачки по волоку, Н;

Z – сила натяжения каната, Н;

φ – угол между канатом и волоком;

G – сила тяжести пачки, Н;

N – реакция силы тяжести, Н.

Силу сопротивления движению пачки хлыстов по волоку определяем по уравнению

$$F_{тр} = \mu N, \qquad (3)$$

где μ – коэффициент сопротивления движению.

Вертикальную составляющую силы натяжения каната находим из выражения

$$P = Z\sin\varphi.$$

Расстояние от места подъема переднего конца пачки до мачты равно

$$L = \frac{H}{\mathrm{tg}\varphi}, \qquad (4)$$

где H – высота мачты, м.

Из уравнения (2) находим

$$N = G - Z\sin\varphi = G - P. \qquad (5)$$

Подставляя (5) в выражение (3), получаем

$$F_{тр} = \mu(G - P) = Z\cos\varphi.$$

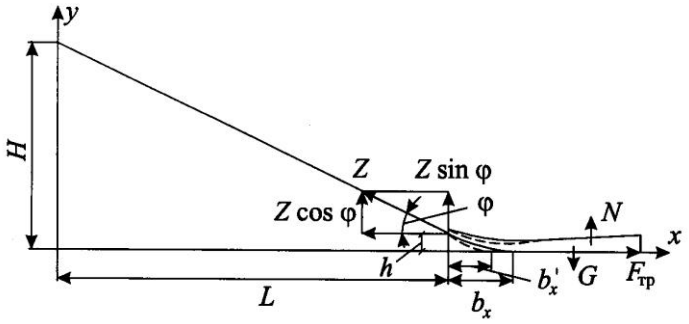


Рис. 1. Схема сил, действующих на пачку при ее перемещении по волоку

Исходя из приведенных формул, tgφ определяем по формуле

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{Z\sin\varphi}{Z\cos\varphi} = \frac{P}{\mu(G-P)}. \qquad (6)$$

Подставляя (6) в формулу (4), получаем

$$L = \mu H\left(\frac{G}{P} - 1\right). \qquad (7)$$

В работе [2] Г.Н. Петруша определяет нагрузку на опору от вершин хлыстов (P) в статическом состоянии. Длина приподнятой части хлыста обозначена b'_x (рис. 1). Далее он рассматривает процесс движения, при котором на хлыст кроме силы P ($Z\sin\varphi$) действует сила T ($Z\cos\varphi$), спрямляющая изогнутую ось хлыста за счет противодействия равной и противоположно направленной силы сопротивления движению. При этом длина приподнятой части хлыста возрастает до b_x, происходит перераспределение нагрузок (в сторону увеличения) от хлыста на грунт и на трелевочное средство. В работе [2] получена формула для определения вертикальной составляющей P' при перемещении одного хлыста:

$$P' = \frac{\gamma\pi d_0{}^2 b'_x}{48}\left(\frac{(1+K)^2}{K^2} + 2\right) + \frac{\mu h\left(G - \frac{\gamma\pi d_0{}^2 b'_x}{48}\left(\frac{(1+K)^2}{K^2} + 2\right)\right)}{b_x f}. \qquad (8)$$

Здесь γ – объемный вес древесины, Н/м^3;

d_0 – диаметр хлыста в верхнем отрубе, м;

K – параметр размеров и положения хлыста,

$$K = \frac{1}{1 + m_0 b'_x},$$

где m_0 – величина, зависящая от геометрических размеров хлыста,

$$m_0 = \frac{t}{d_0};$$

t – сбег хлыста;

h – высота подъема переднего конца, м;

$G = M\gamma$;

b_x – длина поднятой части хлыста в движении м;

f – коэффициент, учитывающий увеличение b_x и незначительное увеличение P'.

Уравнение (8) получено для одного хлыста. Чтобы получить значение P, которое учитывало бы всю пачку хлыстов, необходимо P' умножить на число хлыстов n, которое определяется делением объема пачки M на средний объем хлыста V. В результате получаем следующее выражение:

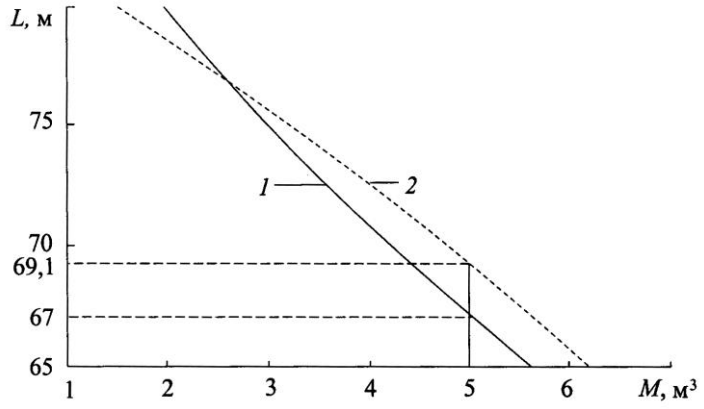


Рис. 2. Графики зависимости расстояния от места подъема переднего конца хлыстов до мачты от объема пачки хлыстов: *1* – экспериментальная; *2* – теоретическая кривая

$$P = \frac{\gamma \pi d_0{}^2 b'_x M}{48V}\left(\frac{(1+K)^2}{K^2}+2\right) + \frac{M\mu h\left(M\gamma - \frac{\gamma \pi d_0{}^2 b'_x}{48}\left(\frac{(1+K)^2}{K^2}+2\right)\right)}{b_x fV}. \quad (9)$$

Подставляя выражение (9) в формулу (7), после преобразований имеем

$$L = \mu H \frac{V(b_x f)}{\frac{\pi d_0{}^2 b'_x b_x f}{48}\left(\frac{(1+K)^2}{K^2}+2\right) + \mu h\left(M - \frac{\pi d_0{}^2 b'_x}{48}\left(\frac{(1+K)^2}{K^2}+2\right)\right)} - 1 \cdot \quad (10)$$

На рис. 2 представлены теоретический и экспериментальный графики на основе формул (10) и (1). Теоретическая кривая построена при следующих значениях: $\mu = 0{,}25$; H = 6 м; $\gamma = 8430$ Н/м^3; d_0 = 0,05 м; t = 0,024; b'_x = 2,6 м; $b_x = 3{,}3$ м; h = 0,005 м; f = 1,28; V = 0,33 м^3. Экспериментальная кривая построена при значении коэффициента корреляции r = 0,9968.

Из рис. 2 видно, что максимальное расстояние между кривыми имеет место при объеме пачки 5 м^3 и равно 2,1 м, что в процентном отношении составляет 3,2 %.

Таким образом, математическая зависимость (10) адекватна результатам экспериментальных исследований. Она позволяет находить расстояния от мачты до места подъема переднего конца пачки в разных природно-производственных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2224417 Российская Федерация, МКИ[7] А 01 G 23/02. Способ и машина для трелевки [Текст] / Ширнин Ю.А., Шестаков Я.И.,. Ширнин А.Ю; заявитель и патентообладатель Марийск. гос. техн. ун-т. – № 2002110040; заявл. 16.04.02; опубл. 27.02.04, Бюл. № 16. – 8 с.

2. *Петруша, Г.Н.* Некоторые вопросы взаимодействия хлыстов с трелевочными механизмами [Текст] / Г.Н. Петруша // Тр. ЛТА. – Л., 1959. – № 83. – С. 83–98.

3. *Ширнин, А.Ю.* Экспериментальные исследования канатной подтрелевки [Текст] / А.Ю. Ширнин // Лесн. вестн. – 2006. – № 1. – С. 72–75.

Марийский государственный
технический университет

Поступила 29.05.06

A.Yu. Shirnin

Investigation of Lifting Process for Front End of Tree Lengths Bundles in Drum Logging

Mathematical dependence of distance from place of lifting the front end of tree lengths to mast on the bundle volume is provided; theoretical and experimental curves of this dependence are given.

УДК 532.5:624.164.7

А.Н. Вихарев, П.Н. Гагарин

Вихарев Александр Николаевич родился в 1961 г., окончил в 1987 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры водного транспорта леса и гидравлики Архангельского государственного технического университета. Имеет около 60 печатных трудов в области водного транспорта леса.

Гагарин Павел Николаевич родился в 1959 г., окончил в 1983 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической механики Архангельского государственного технического университета. Имеет около 30 печатных трудов в области водного транспорта леса и гидромеханики.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТА ВБЛИЗИ РАБОТАЮЩЕГО АНКЕРА

Для расчета напряженного состояния сыпучих сред (грунтов) предложена альтернативная модель приведения физической сущности полей течений к силовым полям.

Ключевые слова: потенциальные поля, аналогия, сжимающее напряжение, плотность количества движения, анкерная опора.

Во многих инженерных и научных задачах применяют моделирование физических процессов с помощью теории потенциального поля (или метода конформного отображения). Его используют в основном в гидро- и аэромеханике для предсказания поведения течений в различных условиях: при расчете скоростей, давлений, сил сопротивления тел при их обтекании, определении подъемных сил крыльев, присоединенных масс и т. д. Здесь неизбежны допущения о жидкости как потенциальной среде, хотя таковой она не является, в первую очередь из-за наличия вязкости. В ряде задач наблюдают отклонения полученных теоретических результатов от истинных. В этом случае на базовую потенциальную модель налагают эмпирические данные, а также условия, учитывающие реальные свойства среды.

С учетом возможных допущений и последующей корректировки этот метод, на наш взгляд, можно применять и к расчету силовых полей в сплошных средах. Так, авторами были вычислены формы грунтовых призм скольжения при работе анкерных опор (на лесосплаве, в строительстве и т. д.). Расчетные кривые в плоской задаче удовлетворительно совпали [1] с

опытными данными при различных глубинах заложения анкеров, углах приложения вектора силы и углах внутреннего трения грунта. Как известно, в рамках классической механики грунтов расчет линий скольжения сопровождается значительными трудностями.

Для определения форм линий скольжения далее методом численного интегрирования касательных напряжений на поверхности призмы находили держащую силу с учетом реальных характеристик грунтов.

При расчете напряженных состояний грунтов вблизи работающего анкера возникла необходимость проведения аналогии силовых полей с потенциальными течениями. Но в основной теории потенциалов и теории потенциальных течений аналоговые характеристики имеют разную физическую сущность и размерность. Например, сила входит в аналогию со скоростью, а потенциальная энергия – с расходом или «потенциалом скорости». В некоторых задачах такая постановка затрудняет понимание физики явлений. Например, векторное сложение скоростей потенциальных потоков не соответствует реальным процессам. Складывать можно только квадраты скоростей или плотности количества движения.

В настоящей работе не ставится цель – внести коррективы в классическую теорию потенциальных полей. Приведен лишь вариант применения этой теории, в том числе в рамках моделей механики сплошных сред.

Изложим кратко отдельный фрагмент классической постановки теории.

Силовое поле называют потенциальным, если в каждой точке существует силовая функция U. Обычно она имеет размерность энергии Дж = = Н·м. Скалярное поле U образуется поверхностями уровней, где U = const, или поверхностями равных потенциалов Π = const (в плоских схемах соответственно линиями равных потенциалов). Силовые линии располагаются по нормали n к этим поверхностям. Нормальный вектор силы $\overline{F}_n$ в любой точке поля равен:

$$\overline{F}_n = \frac{\partial U}{\partial n} = -\frac{\partial \Pi}{\partial n} = -\mathrm{grad}_n \Pi . \qquad (1)$$

Для потенциального поля в любой точке ротор вектора силы

$$\mathrm{rot}\,\overline{F} = 0 . \qquad (2)$$

Как видим, в силовом поле производной от силовой функции U или от потенциальной энергии Π является сила $\overline{F}$. Понятие силового поля применимо к определенной точке, телу или системе тел, имеющих собственную или приведенную массу (коэффициент инерции). При существовании силового поля в сплошной среде следует рассматривать его действие на поверхностную или линейную плотность массы, т. е. на нормальную к силовым линиям площадку или линию. Тогда формула (1) для силового поля приобретает вид, характерный для полей:

пространственных:

$$\sigma_n = \frac{1}{b^2}\frac{\partial U}{\partial n} = -\frac{1}{b^2}\frac{\partial \Pi}{\partial n} = -\frac{1}{b^2}\,\mathrm{grag}_n \Pi ; \qquad (3а)$$

и плоских:

$$\sigma_n = \frac{1}{b}\frac{\partial U}{\partial n} = -\frac{1}{b}\frac{\partial \Pi}{\partial n} = -\frac{1}{b^2}\,\mathrm{grag}_n \Pi\,, \qquad (3б)$$

где σ_n – нормальное сжимающее напряжение от источника потенциальной энергии в сплошной среде, имеющее размерность соответственно Н/м^2 и Н/м;

b – некоторый характерный линейный размер (масштабная единица длины).

Нормальный компонент напряжений распределяется по силовым линиям и может быть представлен как вектор

$$\vec{\sigma}_n = \vec{n}_0 \sigma_n\,, \qquad (3в)$$

где $\vec{n}_0$ – нормальный единичный вектор к поверхностям или линиям уровня.

В потенциальных полях течений, имеющих одну и ту же математическую основу с силовыми полями, в качестве силовой функции U используют аналогичную величину Φ – потенциал скорости. Здесь существуют поверхности (или линии) равных потенциалов, где Φ имеет размерность объемного (м^3/с) или плоского расхода (м^2/с), а не энергии. Тогда в качестве градиента выступает нормальная скорость и формула (1) принимает вид

$$\overline{\upsilon}_n = \frac{\partial \Phi}{\partial n} = -\mathrm{grad}_n \Phi\,. \qquad (4)$$

Линии тока (аналогичные силовым линиям) определяются функцией тока ψ, которые в каждой точке поля пересекаются с линиями равных потенциалов по нормали.

Потенциальное поле течений W находят по формуле

$$W = \Phi + i\psi. \qquad (5)$$

При суммировании N полей ($k = 1, \ldots, N$) получают скалярную сумму

$$W = \sum_{k=1}^{N} W_k\,, \qquad (6)$$

которая отражает суммарное поле и моделирует различные гидромеханические процессы.

Суммарное поле градиентов можно найти также векторным сложением полей:

$$\vec{\sigma}_n = \sum_{k=1}^{n} \vec{\sigma}_{nk}\,. \qquad (7)$$

В теории потенциальных полей существует множество классических моделей (поступательный поток, источник, сток, диполь и др.), которые позволили решить ряд задач в области гидромеханики. Эти модели, на наш взгляд, можно применять и к расчету напряженных состояний сыпучих сред вблизи источника потенциальной энергии (анкеры, основания фундаментов и т. д.). Тогда необходимо эти поля привести к единой размерности, так как потенциал Φ не только не соответствует потенциальной энергии по физической сути, но и предполагает противоположное направление линий тока (от меньших значений Φ к большим).

В качестве варианта вместо указанного потенциала следует использовать аналоговую силовую функцию U или потенциальную энергию $П$ с размерностью Дж. Тогда поле течений определяют воображаемыми поверхностями или линиями уровня. Здесь справедливы формулы (3а) и (3б). Нормальные напряжения σ_n имеют смысл не скорости потока υ_n, а нормального компонента давлений p_n. На основании известных уравнений Эйлера и Бернулли давление в полях течений преобразуют в динамическую характеристику – скоростной напор или плотность потока количества движения (с коэффициентом 1/2):

$$\sigma_n^* = \frac{\rho^* \upsilon_n^2}{2};$$

$$\vec{\sigma}_n^* = \vec{n}_0 \sigma_n^*, \qquad (8)$$

где ρ^* – плотность жидкости, кг/м^3 или кг/м^2 соответственно для объемных и плоских полей.

Таким образом, динамическая характеристика поля течений σ_n^* приобретает размерность напряжений. Это поле в указанной интерпретации соответствует аналогичному полю распределения скоростей в классическом варианте. Важно отметить, что здесь выполняется закон сохранения количества движения, который не соблюдается в классических полях потенциальных скоростей.

В качестве примера возьмем поле W (вида «источник»), которое распространяется установившимся течением из одной точки по всем направлениям нормали n. Тогда плотность потока количества движения соответственно равна:

для объемных течений

$$\sigma_n^* = \frac{\rho^* \upsilon_n^2}{2} = \frac{a}{n^2}; \qquad (9а)$$

для плоских

$$\sigma_n^* = \frac{\rho^* \upsilon_n^2}{2} = \frac{a}{n}, \qquad (9б)$$

где a – параметр, зависящий от интенсивности источника;

n – нормальная координата поля течения, имеющая начало в «источнике», выраженная в масштабных линейных единицах.

Струйное затопленное течение можно приближенно моделировать как пространственный или плоский сектор от поля типа «источник». При этом зависимости (9а) и (9б) наблюдаются в распределении плотности потока количества движения в моделируемых или реальных струях [2], исходящих из объемного или плоского источника. В случае осесимметричной струи зависимость (9а) обратно пропорциональна n^2, а в случае плоской (9б) – обратная линейная.

Таким образом, по аналогии можно моделировать поле сжимающих напряжений от точечной или полосовой нагрузки (бесконечной длины),

действующей на сплошную сыпучую среду. Нормальные сжимающие напряжения в этих условиях ведут себя так же, как плотность потока количества движения соответственно формулам (9а) и (9б) [4].

Поле нормальных (вертикальных) сжимающих напряжений от массива грунта образуется горизонтальными поверхностями или линиями равных потенциальных энергий. Силовые линии направлены вертикально вверх от больших значений *П* к меньшим. Это поле не является потенциальным, поэтому здесь авторы применяют термин «квазипотенциальное поле» [3]. Его отличают от потенциального поля типа «равномерный поступательный поток» интегрирующим множителем η, имеющим в пространстве различные значения.

Зададим масштабную единицу напряжений σ_0 в массиве грунта формулой

$$\sigma_0 = \rho g H, \tag{10}$$

где ρ – плотность сыпучей среды;

g – ускорение свободного падения;

H – глубина заложения опоры (или мнимого источника), моделирующей действие полосовой нагрузки (струи).

Интегрирующий множитель примем равным

$$\eta = \frac{H - y}{H} = \frac{H - n}{H}, \tag{11}$$

где y (или n) – вертикальная координата поля, восходящая от уровня глубины H.

Отвлекаясь от выражения для силовой функции или потенциальной энергии на различных глубинах грунтового массива, запишем формулу для поля нормальных (вертикальных) сжимающих напряжений в виде

$$\vec{\sigma}_n = \sigma_0 \eta \vec{n}_0 = \rho g (H - y)\vec{n}_0 = \rho g (H - n)\vec{n}_0. \tag{12}$$

Таким образом, распределение $\vec{\sigma}_n$ имеет характер гидростатического закона.

Суммирование полей напряжений от анкера (сектора источника) и массива грунта по аналогии с полями течений позволяет рассчитывать формы линий скольжения грунтовых призм при работе анкера. Расчет подробно изложен в работе [1]. Там же дан вариант расчета держащей силы анкера при различных грунтовых условиях и геометрических параметрах заложения.

Приведенный вариант интерпретации механики полей течений, на наш взгляд, может служить основой для решения ряда других физических задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вихарев, А.Н.* Квазипотенциальное моделирование механических характеристик работы анкера в грунтах [Текст] / А.Н. Вихарев, П.Н. Гагарин // Совершенствование техники и технологии лесозаготовок и транспорта леса: сб. науч. тр.

сотрудников факультета природных ресурсов, посвящ. 70-летию АГТУ и ФПР. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 1999. – С. 76–87.

2. *Ландау, Л.Д.* Теоретическая физика [Текст]: учеб. пособие. В 10 т. Т. 6. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – 4-е изд., стер. – М.: Наука, 1988. – 736 с.

3. *Смирнов, В.И.* Курс высшей математики [Текст]. В 5 т. Т. 2. / В.И. Смирнов. – М.: Наука, 1974. – 655 с.

4. *Цытович, Н.А.* Механика грунтов (краткий курс) [Текст] / Н.А. Цытович: учеб. для вузов. – 3-е изд., доп. – М.: Высш. шк., 1979. – 272 с.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 05.12.05

A.N. Vikharev, P.N. Gagarin

Simulation of Soil Stress near Working Anchor

The alternative model of bringing physics of flow fields to force fields is proposed to calculate the stress state of loose media (soils).

УДК 630*3.001

В.Н. Коршун

Коршун Виктор Николаевич родился в 1956 г., окончил в 1980 г. Сибирский технологический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования лесного оборудования Сибирского государственного технологического университета. Имеет более 90 печатных работ в области проектирования технологических машин, САПР.

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ

Предложена многокомпонентная модель лесной почвы как механического предмета труда и опорной поверхности движения лесных машин.

Ключевые слова: почва лесная, механические свойства, многокомпонентное моделирование.

Лесные почвы обладают наименее поврежденной структурой и по механическим свойствам существенно отличаются от сельскохозяйственных. При конструировании лесных машинно-тракторных агрегатов необходимо знать динамические входные воздействия от почвы на рабочие органы и движители машин.

Лесная почва как механический предмет труда и среда движения машин обладает вертикальной и горизонтальной структурой. Смоделируем вертикальную структуру лесной почвы в виде двухкомпонентной среды с единичными включениями (рис.1, *а*). Свойства компонент существенно разнятся. Минеральное основание лесной почвы *1* является случайной поверхностью, простирается до недеформированного горизонта и оценивается

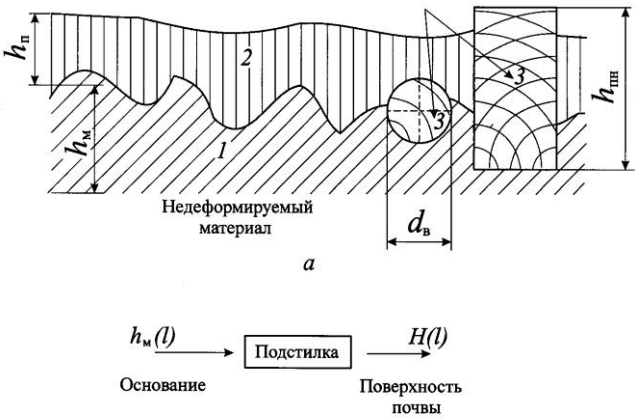


Рис. 1. Вертикальная структура модели лесной почвы (*а*) и схема динамической системы (*б*)

толщиной $h_м$. Лесная подстилка *2* толщиной $h_п$, состоящая из живого напочвенного покрова, опада и нижележащего слоя перегнивших растительных остатков, находящихся в различной стадии разложения, формируется также под влиянием целого ряда случайных факторов. Единичные включения *3* представлены совокупностью корней диаметром $d_в$ и пней высотой $h_{пн}$. Очевидно, что поверхность лесной почвы носит случайный характер. В зимнее время к двум компонентам добавляется третья – снег. При моделировании взаимодействия опорных элементов лесных машин с почвой зимой следует использовать трехкомпонентную модель. Движение транспортных машин по заснеженной местности смоделировано в работе [5].

Взаимосвязь двух случайных функций – высоты микронеровностей минерального основания $h_м(l)$ и толщины подстилки $h_п(l)$ – определяет высоту микронеровностей лесной почвы $H(l) = h_м(l) + h_п(l)$ (где l – длина пути). Функция $H(l)$ также является случайной. Представим поверхность лесной почвы как выход динамической системы, входом которой является минеральное основание (рис. 1, *б*). Свойства динамической системы можно оценить по ее реакции на динамическое воздействие. Чаще всего свойства динамических систем оценивают по их реакции на входе в виде дельта-функции (функция Дирака):

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases}, \qquad (1)$$

где t – время.

Пусть Δl – задержка системы по l на реакцию системы на входе в виде дельта-функции, тогда для устойчивой системы $v(\Delta l, l) = v(\Delta l)$, где $v(\Delta l)$ – весовая функция системы при всех l. Параметры системы примем постоянными, тогда свойства системы, преобразующей вход в выход, не зависят от характера входного воздействия. Таким образом, можно записать

$$H(l) = \int_0^\infty v(\Delta l) h_м(l - \Delta l) dl \,. \qquad (2)$$

Выражение (2) справедливо при всех зависимостях $h_м(l)$, которые в настоящее время достаточно исследованы при описании опорных сред движения сельскохозяйственных и лесных машин. Очевидно, что при антропогенном и техногенном воздействии на почву данные зависимости претерпевают изменения. По утверждению П.М. Мазуркина, статистические законы нормального распределения для почв в данном случае изменяются [10].

Поскольку параметры динамической системы (2) постоянны, линейны и устойчивы, то поданная на вход системы стационарная функция даст на выходе также стационарную функцию. Установлено, что случайная функция микронеровностей минерального основания лесных почв, не подвергавшихся техногенному воздействию, является стационарной с нормальным распределением [9], поэтому поверхность лесной почвы будет такой же функцией.

Согласно теории вероятностей корреляционная функция поверхности лесной почвы связана с корреляционными функциями минерального основания зависимостью

$$R_{HH}(l) = R_{h_м h_м}(l) + R_{h_п h_п}(l) - R_{h_м h_п}(l) - R_{h_п h_м}(l), \quad (3)$$

где $R_{h_м h_п}(l)$, $R_{h_п h_м}(l)$ – взаимные корреляционные функции основания и высоты лесной подстилки.

Параметры распределения микронеровностей лесных почв как опорных сред движения машин приведены в работах [1, 3, 6]. В них микрорельеф лесной почвы определяли с целью получить статистические параметры опорной поверхности как входного воздействия на движители лесных машин. Исследования касались главным образом волоков как трасс движения лесозаготовительных машин. Однако лесохозяйственные машины могут функционировать на нераскорчеванных и раскорчеванных вырубках, под пологом леса, на расчищенных площадях, старопахотных, сильно задернелых почвах, торфяниках и болотах, пригородных почвах и территориях, подвергшихся интенсивному техногенному и антропогенному воздействию. Характер микронеровностей на указанных площадях различен. Входные параметры на рабочие органы почвообрабатывающих машин как динамических систем определены только для сельскохозяйственных площадей.

Для нахождения статистических характеристик минерального основания лесной почвы $h_м(l)$ в 2000–2003 гг. проведено ее экспериментальное исследование как предмета труда и среды движения лесохозяйственных агрегатов. Профили трасс замеряли перед проходом лесохозяйственного агрегата и после обработки почвы. Параметры измеряли с помощью измерительного комплекса, выполненного на базе персонального компьютера с аналогово-цифровым преобразователем. Шаг квантования принимали равным 1 м. Данные вводили в компьютерную систему в виде структурированного файла данных.

На рис. 2 показаны микропрофили раскорчеванной трехлетней вырубки с засыпанными ямами от пней (категория грунта – 4 удара плотномера ДорНИИ, влажность 24 %, сильное задернение).

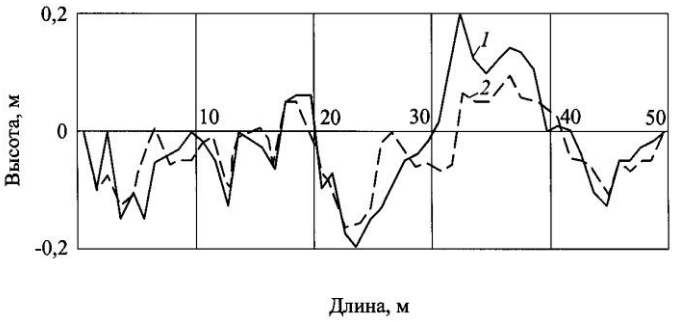


Рис. 2. Микропрофили минерального основания лесной почвы: *1* – перед проходом машинно-тракторного агрегата; *2* – после прохода фрезы

Статистическая обработка позволила получить корреляционные функции для оценки входного воздействия на формирование поверхности лесной почвы. Анализ опубликованных исследований позволяет на основе статистических моделей прогнозировать микропрофиль лесной почвы как механический предмет труда и среду движения машин. Для определения вероятностных характеристик поверхности лесной почвы как механического предмета труда необходимо определить параметры передаточных функций лесной подстилки. Если рассматривать лесную почву в системе машина – местность, то к основным параметрам подстилки следует относить: зависимость ее деформации от нормальной нагрузки от рабочих органов машин, сопротивление сдвигу, плотность, жесткость и упругость. Рабочие органы машин взаимодействуют со всеми компонентами динамической системы лесной почвы, механические свойства которых различаются. Воздействия минерального основания и подстилки на рабочие органы и опорные элементы машин носят стационарный характер, а единичные включения (корни, погребенная древесина, камни, пни) создают дискретные импульсные нагрузки. Импульсные воздействия от единичных включений (корни) аппроксимируются при компьютерном моделировании функцией Дирака, а препятствия прямоугольной формы (пни) – функцией Хевисайда.

Динамическую систему (рис. 2) моделировали на основе метода конечных элементов (МКЭ) с помощью программных средств MATLAB-6.1 (MathWorks, Inc.), приложение SIMULINK. Свойства компонента *1* (см. рис. 1, *а*), по механическим характеристикам аналогичного грунтам, рассматривали в виде двухфазной среды. Одну фазу моделировали элементами с упругими линейными характеристиками (жесткий скелет грунта), другую – в виде несжимаемой жидкости.

Горизонтальную структуру лесной почвы моделировали в графическом редакторе AutoCAD, представленном нами в работе [8].

Механические свойства лесной подстилки, являющейся промежуточной компонентой лесной почвы, изучены слабо. Для расчета параметров подстилки может быть предложена следующая методика:

1) входными величинами являются микропрофиль минерального основания и данные о типах насаждений, время и место движения машины по лесной почве, среднегодовое количество осадков;

2) по входным данным прогнозируют среднюю толщину (математическое ожидание) подстилки $h_п$ (см. рис. 1);

3) моделируют физико-механические параметры подстилки (при сдвиге и смятии) в зависимости от плотности при взаимодействии с опорными элементами машин;

4) на основании микропрофиля и свойств подстилки моделируют ансамбль реализаций (геометрические и физико-механические параметры) поверхности лесной почвы как среды движения машин;

5) в соответствии с полученными данными моделируют взаимодействие рабочих органов и опорных элементов с лесной почвой и определяют реализацию входного воздействия на машину.

Толщина подстилки существенно зависит от времени года, поэтому ее параметры прогнозируют на конкретную дату и место движения машины. Обработка данных А.С. Аткина, Л.И. Аткиной, Н.И. Германовой, Е.Д. Коробова, Н.Т. Спициной и других авторов [2, 4, 11] позволила выявить значения статистических характеристик толщины лесной подстилки как случайного процесса. Установлено, что на формирование поверхности лесной почвы существенно влияет частота колебаний минерального основания и толщина подстилки, причем с ростом средней толщины подстилки $h_п$ уменьшается высота преобладающих неровностей почвы. Статистическая обработка позволила выявить модель формирования неровностей лесной почвы, рассчитать значения высот и длин неровностей поверхности лесной почвы. Было установлено колебание толщины подстилки относительно среднего значения. Применяли гармоническую корреляционную модель $h_п = h_п(l)$ вида

$$h_п = K_0 \sin(l + K_1) + K_2, \qquad (4)$$

где $h_п$ – текущее значение толщины подстилки;

l – длина пути реализации процесса;

K_0, K_1, K_2 – коэффициенты в корреляционных моделях.

Сравнение данных, прогнозируемых по корреляционным моделям (4) и полученных А.С. Аткиным [2], показало их удовлетворительную сходимость, относительная среднеквадратичная ошибка не превысила 12 %. В результате обработки данных в системе MathCAD определен спектральный состав неровностей поверхности почвы и толщины подстилки. Все это дало возможность составить математические зависимости для компьютерного моделирования микропрофиля лесной почвы.

При взаимодействии с рабочими органами и движителями лесных машин подстилка деформируется и свойства ее изменяются. Для описания поведения подстилки при сжатии применяли модель упруго-пластической среды Друккера – Прагера. Ее использовали для определения деформации почвы [12]. Расчеты, проведенные по этой модели в системе MathCAD, показали, что на начальных этапах нагружения лесной почвы ходовыми системами болотных тракторов, удельное давление на почву которых не превышает 30 кПа (ДТ-75Б), при толщине подстилки 15 см, деформации на почву не передаются и гусеницы тракторов не погружаются в ее минеральную часть (рис. 3).

При взаимодействии рабочих органов машин с лесной почвой подстилка уплотняется, для определения плотности может быть использована формула

$$\rho_i(h_i) = c_0 + c_1(\rho_{i-1})\delta^{-1} + c_2(\rho_{i-1})^2\delta^{-2} + c_3(\rho_{i-1})^3\delta^{-3}, \qquad (5)$$

где ρ_{i-1} – плотность лесной подстилки до i-го этапа деформирования, на первом шаге расчетов принимается плотность недеформированной подстилки;

δ – относительная деформация подстилки, определяемая по модели Друккера – Прагера), $\delta = h_{пi} / h_п$;

$h_п$ – толщина подстилки до деформирования;

c_j – коэффициенты аппроксимации.

Из рис. 3 видно, что на деформирование лесной почвы существенно влияет плотность подстилки. Многие исследователи утверждают, что распределение плотности подчиняется нормальному закону. Однако плотность опада и подстилки зависит от многих факторов. Она не является стационарной функцией и имеет тенденцию к росту со временем. Случайная функция $\rho(t)$ плотности может быть представлена как сумма случайной стационарной функции ρ, не зависящей от времени, и математического ожидания $M_\rho(t)$, изменяющегося по временам года: $\rho(t) = \rho + M_\rho(t)$. Для березняков уплотнение подстилки зависит от мощности опада и времени, прошедшего с момента максимального листопада. Проведенные эксперименты [12] позволяют составить следующее уравнение:

$$M_\rho(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \qquad (6)$$

где t – порядковый номер дня, отсчитываемый от начала листопада;

a_i – коэффициенты аппроксимации.

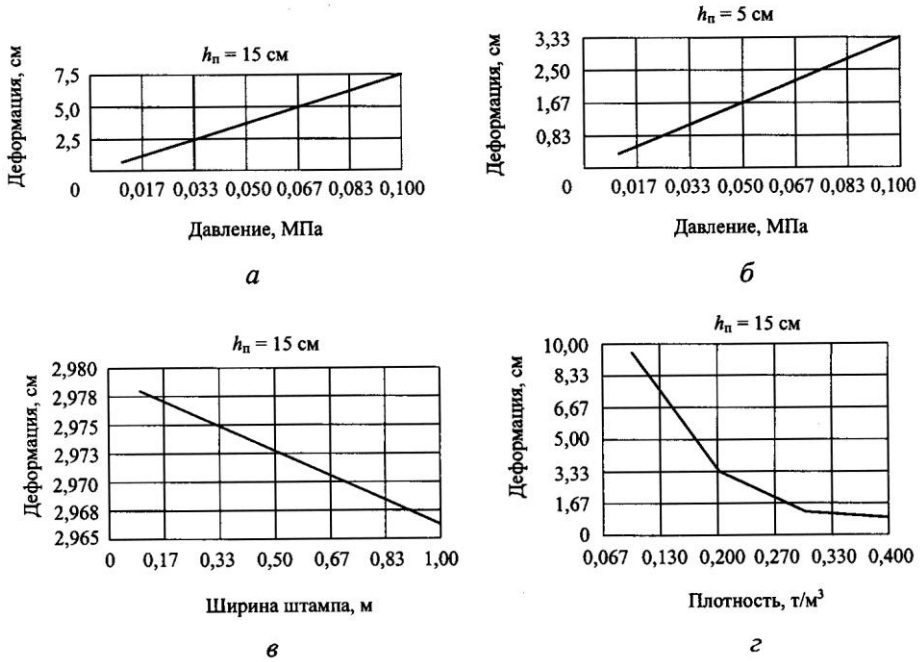


Рис. 3. Графики зависмости деформации подстилки: *а*, *б* – от давления; *в* – от ширины штампа, *г* – от плотности почвы

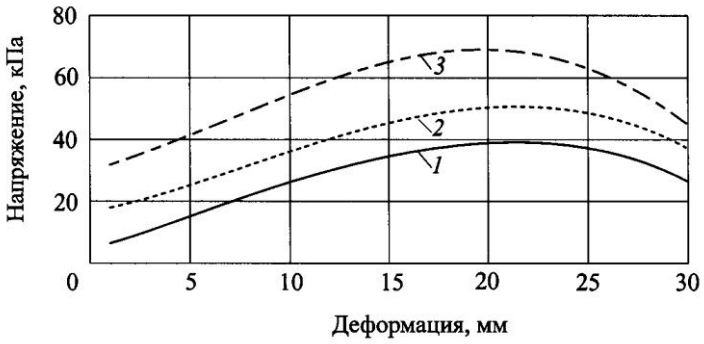


Рис. 4. Графики сопротивления подстилки при сдвиге: *1* – предельное сопротивление 4 кПа; *2* – 12 кПа; *3* – 30 кПа

Влажность подстилки моделируют как нормально распределенную величину с математическим ожиданием и средним квадратичным отклонением для конкретного района производства лесохозяйственных работ. Анализ и обработка литературных данных позволяют прогнозировать плотность подстилки в зависимости от климатических районов и типа древостоя.

В процессе взаимодействия рабочих органов машин с лесной почвой изменяется плотность подстилки не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлении. Аналогичное явление имеет место при исследовании работы движителей лесных машин. При сдвиге грунта его деформирование часто описывается степенным уравнением

$$\tau(s) = \tau_0 + (\tau_п - \tau_0)(1 - e^{-aSo} + bS_o^{c}e^{-dSo}), \qquad (7)$$

где $\tau(s)$ – текущее значение касательных напряжений в материале, Па;

τ_0 – начальное значение удельного сопротивления сдвигу;

$\tau_п$ – предельное сопротивление сдвигу;

S_0 – относительный сдвиг, $S_0 = S / S_п$;

S – абсолютный сдвиг, м;

$S_п$ – сдвиг почвы при предельном сопротивлении сдвигу;

a, b, c – коэффициенты пропорциональности, рассчитываемые в результате обработки экспериментальных данных.

На рис. 4 приведены результаты исследований сопротивления лесной подстилки при сдвиге, выполненные на модели (7).

Проведенные расчеты показывают, что плотные почвы (суглинок, глина) с ненарушенной структурой при возрастании сдвига вначале уплотняются, и касательная сила увеличивается до максимума. В этот момент достигают максимума силы внутреннего сцепления. Затем происходит срыв почвы при преодолении сил внутреннего сцепления, и касательная сила снижается до значений, обусловленных силами внутреннего трения. У рыхлых, несвязных и пластичных грунтов (сухой песок, почва вспаханная) внутреннего сцепления почвы нет, поэтому с ростом деформации сдвига

касательная сила линейно возрастает до значений, обусловленных внутренним трением. Лесная подстилка по характеру аналогична структурным почвам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александров, В.А.* Моделирование технологических процессов лесных машин [Текст] / В.А. Александров. – М.: Экология, 1995. – 257 с.

2. *Аткина, Л.И.* Особенности накопления подстилок в лесных сообществах [Текст] / Л.И. Аткина, А.С. Аткин // Почвоведение. – 2000. – № 8. – С. 1004–1008.

3. *Варава, В.И.* Расчет и конструирование упругих систем транспортных машин [Текст] / В.И. Варава. – М.: Лесн. пром-сть, 1975. – 144 с.

4. *Германова, Н.И.* Разложение опада как показатель интенсивности круговорота элементов в лесных насаждениях Южной Карелии [Текст] / Н.И. Германова // Лесоведение. – 2000. – № 3. – С. 30–35.

5. *Донато, И.О.* Роторно-винтовые машины. Основы теории движения [Текст] / И.О. Донато [и др.] – Н. Новгород: НПК, 2000. – 451 с.

6. *Гостев, Б.П.* Основы динамики лесовозного подвижного состава [Текст] / Б.П. Гостев, В.И. Мельников. – М.: Лесн. пром-сть, 1967. – 220 с.

7. *Коршун, В.Н.* Основные физико-механические и технологические свойства опавших листьев [Текст] / В.Н. Коршун // Машины и орудия для механизации лесозаготовок и лесного хозяйства: межвуз. сб. науч. тр. – Л.: ЛТА, 1984. – С. 50–52.

8. *Коршун, В.Н.* Моделирование движения агрегата по вырубке [Текст] / В.Н. Коршун // Математическое моделирование, компьютерная оптимизация технологий, параметров и систем управления лесного комплекса: межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГЛТА, 2002. – Вып. 7, ч. 1. – С. 61–64.

9. *Мазуркин, П.М.* Биотехническое проектирование [Текст] / П.М. Мазуркин. – Йошкар-Ола: МарПИ, 1994. – 348 с.

10. *Сабанцев, Ю.Н.* Статистическое моделирование лесоэкономических данных [Текст] / Ю.Н. Сабанцев, П.М. Мазуркин. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001. – 390 с.

11. *Ушакова, Г.И.* Влияние экологических условий на скорость и характер разложения лесной подстилки [Текст] / Г.И. Ушакова // Почвоведение. – 2000. –№ 8. – С. 1009–1015.

12. *Vario, J.* Simulating soil deformation using a critical-state model [Text] / J. Vario // Europ. J. Soil. Sc. – 1997. – Vol. 48, N. 1. – P. 59–70.

Сибирский государственный
технологический университет

Поступила 26.12.03

V.N. Korshun

Principles of Forest Soil Mechanics

Multicomponent model of forest soil as mechanical labor object and bearing surface of forest machines movement is offered.

УДК 531.7

Д.Л. Нерадовский

Нерадовский Денис Леонидович родился в 1979 г., окончил в 2002 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант кафедры теоретической механики АГТУ. Имеет 1 печатную статью в области строительства и реконструкции зданий.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛИНЫ ЗАГЛУБЛЕННЫХ В ГРУНТ СВАЙ

Описан способ экспериментального определения длины сваи, основанный на распространении волн напряжений вдоль нее.

Ключевые слова: свая, заглубление, акустика, спектральный анализ, преобразование Фурье.

При проведении работ по реконструкции и ремонту зданий и сооружений обычно требуется знать величину заглубления свай в грунт основания. Ввиду давности постройки зданий, необходимые данные проектной документации часто оказываются утраченными. При проведении ремонтных работ, в частности определении несущей способности свайного основания, их требуется восстановить.

Цель статьи – разработать методику экспериментального определения длины свай, заглубленных в грунт, с помощью движущейся звуковой волны на свае заданной длины.

Определение длины свай основано на распространении волн напряжений вдоль них. Волна напряжения, генерируемая ударом (молотком и т. п.), идет вдоль сваи, отражается от границ раздела сред и возвращается обратно. Явление повторяется до тех пор, пока энергия удара не рассеется. Скорость распространения волны зависит от плотности и качества материала сваи, а также от наличия инородных включений.

Длина сваи может быть определена по времени, необходимому для прохождения ударной волны от точки удара до нижнего конца сваи, и времени возврата волны. Это время связано с резонансной частотой сваи. Измерив время отражения или резонансную частоту и скорость волны напряжений, можно рассчитать длину сваи.

Для испытаний необходимо использовать: ударник (молоток); акселерометры для регистрирования отклика сваи; модуль преобразования, состоящий из усилителя, аналого-цифрового преобразователя; персональный компьютер для анализа полученных данных (рис. 1). Индуцированная ударом волна напряжений должна иметь достаточную энергию для прохождения ее до конца сваи и возврата к началу.

В процессе исследований установлено, что непосредственный удар по свае генерирует наиболее подходящую волну напряжений. Скорость распространения волны фиксируют датчики, находящиеся на боковой поверхности свай и расположенные на определенном расстоянии друг от друга. По замерам скорости волны и времени ее отражения рассчитываем длину сваи.

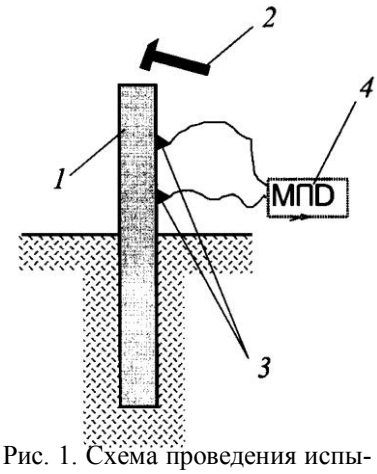


Рис. 1. Схема проведения испытаний: *1* – свая; *2* – молоток; *3* – датчики; *4* – модуль преобразования

Вид отражения волны от нижнего конца сваи зависит от характеристик граничных сред. В момент прохождения волны напряжения через границу раздела двух сред часть начальной волны отражается от этой границы, вторая проходит дальше. Амплитуда отраженной волны зависит от угла падения на границу раздела и максимальна при значении угла 90°.

Разность акустических сопротивлений сред (R) находим по формуле

$$R = Z_1 - Z_2 . \qquad (1)$$

Здесь Z_1, Z_2 – акустическое сопротивление соответственно первой и второй среды,

$$Z_1 = c_1\rho_1; \qquad Z_2 = c_2\rho_2 ,$$

где c_1, c_2 – скорость распространения волны в первом и втором материале;

ρ_1, ρ_2 – плотность первого и второго материала.

Разность фаз между прямой и отраженной волнами составляет половину периода [2]. Акустические сопротивления грунтов и конструкционных материалов свай приблизительно одинаковы, т. е. $R > 0$. Скорость распространения волны напряжений и скорость звука можно считать равными, тогда в качестве датчиков правомерно использовать микрофоны.

При рассмотрении реальных физических процессов приходится иметь дело с функциями, не являющимися периодическими в строгом математическом смысле. Можно отметить две основные причины, по которым реальные колебательные процессы в принципе не могут быть строго периодическими. Первая – это всевозможные случайные процессы, которые воздействуют на колебательную систему совершенно непредсказуемо, «нарушая» ее строгую периодичность. Вторая связана с наличием диссипативных сил, приводящих к затуханию колебаний вследствие потерь энергии. Анализ полученных данных будем проводить с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Пусть после возбуждения ударной волны один из микрофонов записал сигнал, показанный на рис. 2. Применяя БПФ, можем получить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) сигнала – (рис. 3). На АЧХ явно

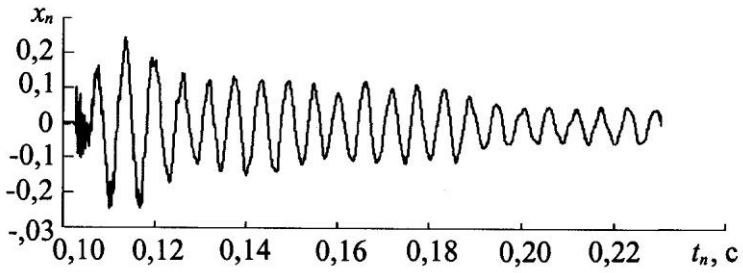


Рис. 2. Полученный сигнал

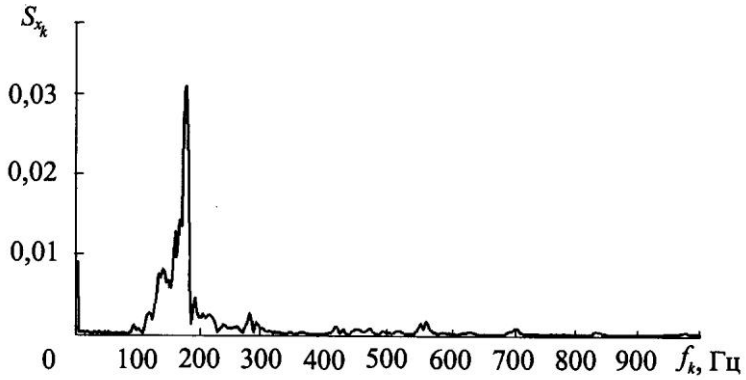


Рис. 3. АЧХ сигнала

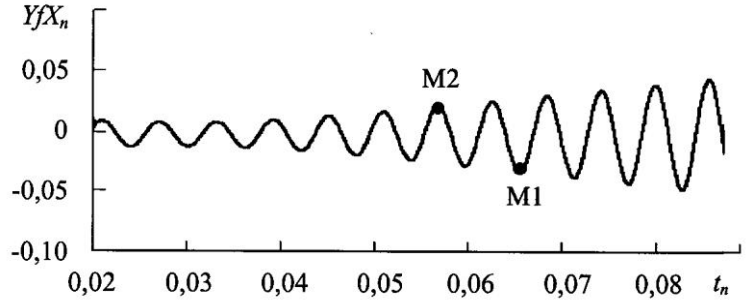


Рис. 4. Сигнал после фильтрации: M1 – прохождение прямой волны; M2 – прохождение отраженной волны

наблюдается амплитудный пик на частоте 175 Гц. Используя полосовой фильтр 170 … 180 Гц, удалим ненужные составляющие сигнала и произведем обратное преобразование Фурье (рис. 4). Время прохождения волны напряжений вдоль сваи, отражения и возврата можно определить как интервал между двумя точками M1 и M2 на графике.

Точность замера расстояния между датчиками сильно влияет на точность определения скорости волны и все результаты в дальнейшем. Зная скорость распространения волны напряжений и время ее прохождения, можно определить длину сваи по формуле:

$$l = ct, \qquad (2)$$

где c – скорость распространения волны напряжений;

t – время прохождения волны напряжений вдоль сваи, отражения и возврата.

На основании изложенного можно сформулировать следующие направления работы.

1. Провести эксперимент с забитыми в грунт сваями с целью определить методику проведения замеров, точность метода и накопления статистической информации.

2. Увеличить число датчиков, замеряющих колебания, что позволяет повысить точность измерений, в том числе и скорости волны.

3. Разработать теоретическую базу для определения возможных дефектов в свае, а также их местонахождения.

Основные сведения о рядах Фурье и их преобразованиях приведены в работе [1].

Самостоятельная реализация алгоритмов БПФ представляет собой весьма трудоемкую задачу. Тем не менее практически все современные математические пакеты и научно-инженерные прикладные программы имеют в своем распоряжении встроенные функции, реализующие тот или иной алгоритм БПФ. Пакет Mathcad содержит большой набор подобных функций. Приведем некоторые из них.

CFFT(y) – осуществляет прямое дискретное преобразование Фурье (ДПФ) вектора y. Функция возвращает вектор g, содержащий столько же элементов, сколько исходный вектор y.

ICFFT(g) – осуществляет обратное ДПФ вектора g.

FFT(y) – осуществляет прямое ДПФ вектора y. Элементы вектора y должны быть вещественными, а количество элементов N кратно 2^m . Функция возвращает вектор g, содержащий $1 + 2^{m-1}$ элементов.

IFFT(g) – осуществляет обратное ДПФ вектора g, соответствующее функции FFT.

Примеры использования этих функций рассмотрены ниже.

Спектр сигнала $y(t)$ определяют как модуль результата прямого дискретного преобразования Фурье в зависимости от частоты f_k:

$$S(f_k) = |g(f_k)|. \qquad (3)$$

Если исследуемый сигнал оказывается вещественным, что наблюдается в большинстве случаев, спектр, определяемый выражением (3), является зеркально симметричным (двухсторонним) относительно центральной точки $k^* = (N - 1)/2$, поэтому для его графического изображения и последующего исследования достаточно первых $(N - 1)/2$ амплитуд (односторонний спектр). На практике часто используют односторонний спектр, амплитуды гармоник которого равны удвоенным амплитудам двухстороннего спектра, кроме амплитуды нулевой гармоники (постоянной составляющей, сохраняющей свое значение). Преимущество одностороннего спектра состоит в том, что в результате нормировки (умножения на 2) его амплитуды совпадают с амплитудами гармонических составляющих самого сигнала.

Спектр мощности представляет собой квадрат АЧХ:

$$SP(f_k) = |g(f_k)|^2. \quad (4)$$

Он имеет размерность спектральной плотности энергии на единицу частоты, а интегрирование в заданном диапазоне частот дает соответствующую мощность. На графике спектра мощности сильнее выделены основные пики, а малые колебания приглушены.

Важными характеристиками частотного анализа являются разрешение по частоте и ширина полосы спектра.

Разрешение по частоте. Этот показатель определяет, насколько близко расположенные спектральные составляющие могут быть выделены из исходного сигнала. Частотный шаг спектральных характеристик равен $1/T$, где T – временной интервал реализации сигнала (время наблюдения). Следовательно, разрешение по частоте может быть увеличено при возрастании длительности анализируемого участка сигнала.

Ширина полосы. Верхняя граница полосы анализируемого спектра определяется частотой выборки сигнала f_s и равна $f_s/2$, а нижняя граница равна разрешению по частоте $1/T$. Частотный диапазон результатов спектрального анализа от $1/T$ до $f_s/2$ называется шириной полосы.

Элементы цифровой обработки сигналов. Фильтрация сигналов с применением ДПФ (Фурье-фильтрация). Под фильтрацией подразумевается выделение полезного сигнала из его смеси с мешающим сигналом — шумом. Наиболее распространенный тип фильтрации – частотная. Она состоит в удалении из сигнала спектральных составляющих в заданном диапазоне частот. Если известна область частот, занимаемая полезным сигналом, достаточно выделить ее и подавить области, занятые шумом.

Фильтры – это частотно-избирательные устройства, которые пропускают или подавляют сигналы, лежащие в определенных диапазонах (или полосах) частот. Фильтры классифицируются по принципу действия, виду частотной характеристики и ее свойствам. По принципу действия фильтры делят на два класса: аналоговые и цифровые. Аналоговые фильтры конструируют в виде электронных схем с использованием резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, транзисторов, операционных усилителей и других элементов. Работа цифровых фильтров начинается уже после преобразования аналогового сигнала в цифровую форму и обеспечивается вычислительными и программными средствами.

По виду частотной характеристики различают четыре типа фильтров (рис. 5):

– низких частот (ФНЧ), пропускающие нижние частоты и подавляющие верхние;

– верхних частот (ФВЧ), пропускающие верхние частоты и подавляющие нижние;

– полосовые (ПФ), пропускающие определенный частотный диапазон;

– режекторные (РФ), подавляющие колебания в заданном частотном диапазоне.

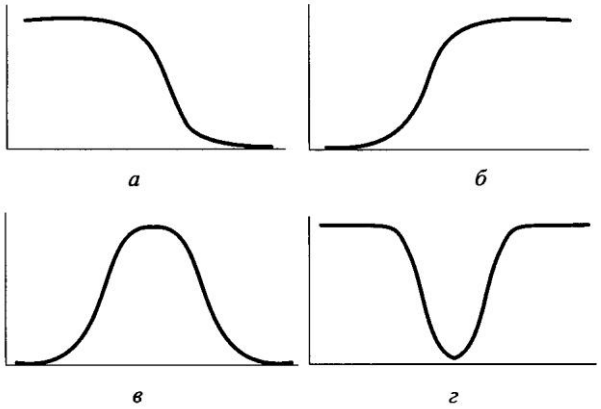


Рис. 5. Примеры АЧХ различных фильтров: *а* – нижних частот; *б* – верхних частот; *в* – полосовой; *г* – режекторный

Фурье-фильтрация. Использование преобразований Фурье позволяет не только получать информацию о спектре сигнала, но также осуществлять синтез сигнала по заданному спектру. Это открывает огромные возможности для компьютерной (цифровой) обработки сигналов, в частности для их фильтрации. Метод Фурье-фильтрации заключается в следующем: сначала посредством прямого преобразования Фурье вычисляют спектр сигнала, затем из него удаляют ненужные частотные составляющие, после чего осуществляют синтез сигнала применением обратного преобразования Фурье.

Роль фильтров в этом случае могут играть различные математические функции, графики которых имеют вид, аналогичный АЧХ обычных аналоговых фильтров, либо ступенчатые функции, обеспечивающие практически бесконечную крутизну среза.

Пример спектрального анализа и Фурье-фильтрации сигнала с помощью функций FFT и IFFT. Ниже представлен документ Mathcad, иллюстрирующий определение АЧХ спектра сигнала на основе дискретного преобразования Фурье.

Сгенерируем зашумленный сигнал, состоящий из трех составляющих:

полезные составляющие сигнала:

$$Y_n := A\sin(2\pi f_2 t_n)\, e^{-\gamma_2 t_n};$$

$$X_n := A\sin(2\pi f_1 t_n)\, e^{-\gamma_1 t_n};$$

паразитная составляющая сигнала (шум):

$$P_n := 4\cos(rnd(n)).$$

В этих формулах

$$t_n := n\frac{T}{N-1},$$

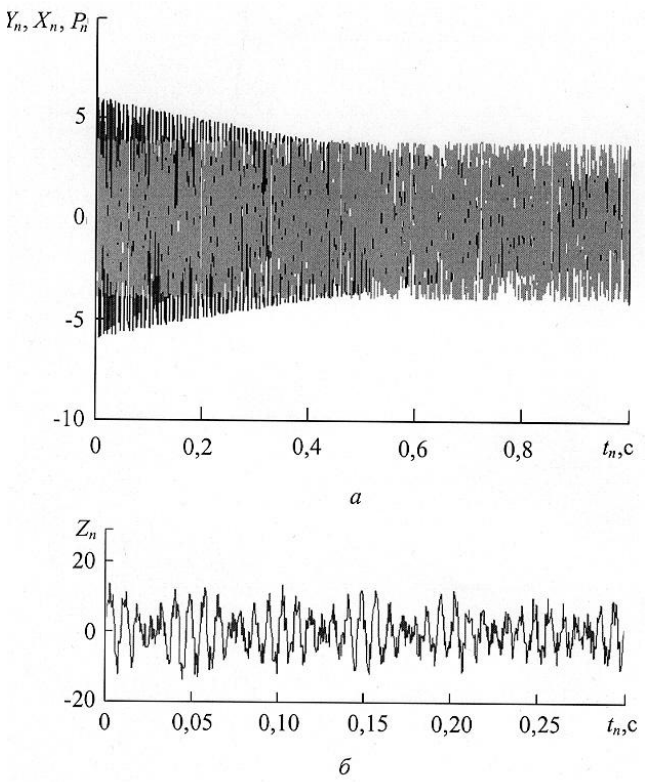


Рис. 6. Составляющие генерируемого сигнала (*а*) и сгенерированный сигнал (*б*)

n: = 0, …, N–1;
N – число точек, N : = 4096;
T – временное окно, T: = 2;
f – собственная частота, f_1: = 130; f_2: = 110;
γ – коэффициенты затухания, γ_1: = 1; γ_2: = 3;
A – начальная амплитуда, A: = 6;
$rnd(x)$ – функция Mathcad случайных чисел.

На рис. 6, *а* представлены фрагменты сигналов, составляющие зашумленный сигнал $Z = X + Y + P$, на рис 6, *б* – сумма трех составляющих.

Прямое преобразование Фурье: $g = \mathrm{FFT}(Z)$; амплитудный спектр: $S = 2\left|\vec{g}\right|$; шкала частот (Гц): $k = 0, ..., last(g)$; $f_k = \dfrac{k}{T}$.

На рис. 7 показана АЧХ зашумленного сигнала. Здесь отчетливо видны два пика на частотах 110 и 130 Гц. Кроме этого, на всем частотном диапазоне наблюдаются небольшие хаотические всплески.

Дальнейшее продолжение документа Mathcad иллюстрирует фильтрацию сигнала методом Фурье-фильтрации. Для этого используют сдвоенный полосовой фильтр (рис. 8) с полосами пропускания 108 … 112 и

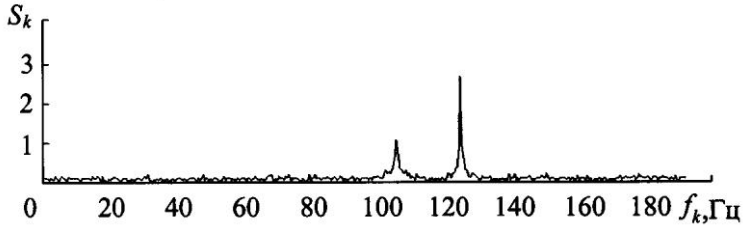


Рис. 7. АЧХ спектра

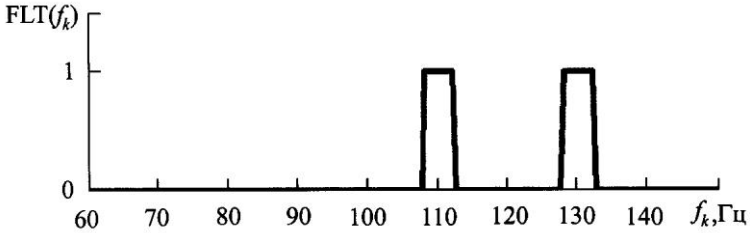


Рис. 8. АХЧ полосового фильтра

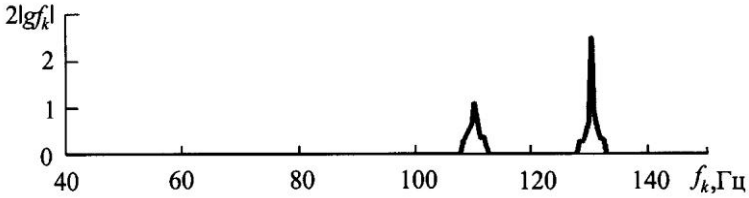


Рис. 9. АХЧ сигнала после фильтрации

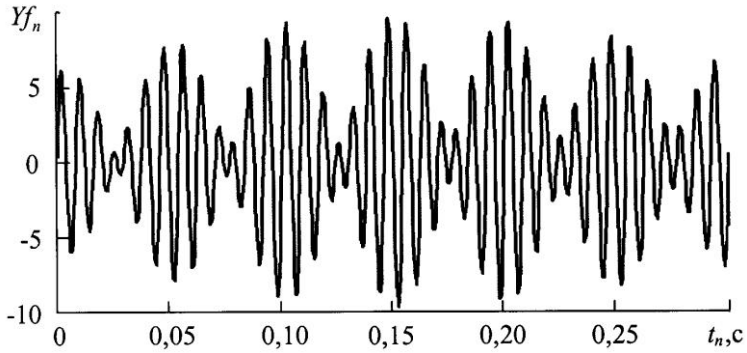


Рис. 10. Сигнал после фильтрации (фрагмент)

128 … 132 Гц, описанный в виде ступенчатой функции FLT(*f*) при помощи встроенной функции Mathcad «*if*». Удаление из спектра ненужных составляющих осуществляют умножением рассчитанного спектра на функцию FLT(*f*). Удаление из спектра ненужных составляющих осуществляют умножением рассчитанного спектра на функцию FLT(*f*).

Для этого зададим АХЧ полосового фильтра:

$$\mathrm{FLT}(f) := if(128 \le f \le 132, 1, 0) + if(108 \le f \le 112, 1, 0).$$

Удаляем из спектра ненужные составляющие (рис. 9):

$$gf_k := g_k \, \mathrm{FLT}(f_k).$$

Обратное преобразование Фурье (синтез сигнала (рис. 10)):

$$Yf := \mathrm{IFFT}(gf).$$

Использование АЧХ сигнала, полученной дискретным преобразованием Фурье с последующим выделением резонансных частот и обратным преобразованием Фурье, позволяет эффективно отделять (отфильтровать) полезный сигнал от паразитных «шумов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев, Е.Н.* Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам [Текст] / Е.Н. Васильев, И.П. Гуров. – СПб.: БХВ – С.-Петербург, 1998. – 280 с.

2. *Детлаф, А.А.* Справочник по физике [Текст] / А.А Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Наука, 1964. – 848 с.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 09.03.05

D.L. Neradovsky

Technique for Experimental Determination of Soil-Buried Piles Length

Method of experimental determination of pile length based on stress wave transmission along it is described.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.047.3:66.047.92

Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин

Сафин Руслан Рушанович родился в 1977 г., окончил в 1999 г. Казанский государственный технологический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры переработки древесных материалов КГТУ. Имеет более 70 печатных работ в области сушки капиллярно-пористых коллоидных тел.

Хасаншин Руслан Ромелевич родился в 1981 г., окончил в 2003 г. Казанский государственный технологический университет, аспирант кафедры переработки древесных материалов КГТУ. Имеет 10 научных работ в области деревообработки.

Сафин Рушан Гареевич родился 1950 г., окончил в 1973 г. Казанский химико-технологический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой переработки древесных материалов Казанского государственного технологического университета. Имеет более 200 печатных работ в области исследований тепло-массообменных процессов, разработки технологических процессов, протекающих при понижении давления, энергосберегающих, безотходных технологий и оборудования.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В РАЗРЯЖЕННОЙ СРЕДЕ

Рассмотрен процесс конвективной сушки пиломатериалов в разряженной среде и предложена математическая модель.

Ключевые слова: сушка, древесина, вакуум, расчет.

Сушка древесины является одним из самых энергоемких процессов в деревообрабатывающей промышленности. Она значительно увеличивает себестоимость продукции вследствие высокой продолжительности процесса и больших тепловых потерь в окружающую среду. Применение вакуумных

технологий позволяет сократить продолжительность сушки и использовать пониженные температуры.

При реализации вакуумных способов возникают существенные трудности с подводом тепла в условиях понижения давления. Такие известные способы подвода тепла в вакууме, как ТВЧ- и СВЧ-энергия, являются дорогостоящими и не позволяют достичь равномерной влажности пиломатериалов по сечению штабеля. Контактные методы известны трудоемкостью и неудовлетворительным качеством вследствие развития по сечению пиломатериала трех различных зон влагосодержания. Наиболее перспективны в области вакуумной сушки древесины способы, использующие конвективный теплоподвод. Для широкого спектра пиломатериалов можно выделить метод конвективной сушки древесины при стационарном пониженном давлении. Его основное технологическое отличие состоит в том, что сушка происходит при постоянном подводе тепла конвекцией в разряженной среде. При этом можно использовать более низкие температуры, что приводит к существенному снижению энергетических затрат, уменьшает деструкцию древесины и не изменяет ее цвет.

Конвективная сушка пиломатериалов при стационарном пониженном давлении состоит из трех стадий. Первую стадию начинают подогревом пиломатериалов с помощью калориферов и вентилятора (рис. 1). Она происходит при атмосферном давлении.

Тепловой баланс процесса прогрева сушильного агента от калорифера можно представить в следующем виде:

$$K\Delta F_{кал}d\tau = \frac{c_{\mu_{ср}}}{\mu_{ср}}\rho_{ср}V_{св}dT_{ср}, \qquad (1)$$

где K – коэффициент теплопередачи, Дж/(м^2 · с · К);

Δ – движущая сила процесса теплопередачи, К;

$F_{кал}$ – площадь калорифера, м^2;

τ – продолжительность прогрева;

$c_{\mu_{ср}}$ – молярная теплоемкость, Дж/(кмоль · К);

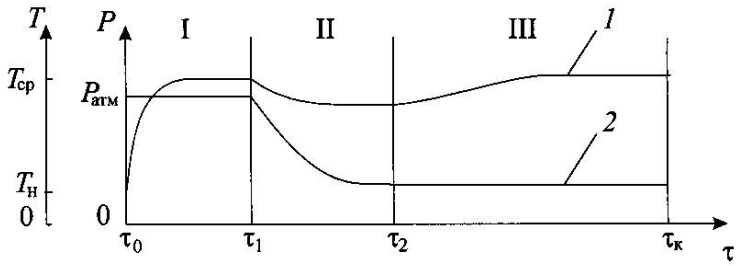


Рис. 1. Схема ведения конвективной сушки пиломатериалов при стационарном пониженном давлении в среде горячего воздуха: *1* – изменение температуры *T*; *2* – давления *P*; I – период прогрева, II – сушка при понижении давления, III – сушка в вакууме

$\mu_{ср}$ – молекулярная масса среды, кг/ кмоль;

$\rho_{ср}$ – плотность среды, кг/м^3;

$V_{св}$ – свободный объем аппарата, м^3;

$T_{ср}$ – температура среды в аппарате, К.

Левая часть уравнения (1) характеризует приток тепла от калорифера, правая – изменение внутренней энергии теплоносителя.

Из уравнения (1) получим

$$\frac{dT_{ср}}{d\tau} = \frac{K\Delta F_{кал}\mu_{ср}}{\rho_{ср}V_{св}c_{\mu_{ср}}} .$$

При прохождении вдоль высушиваемого материала теплоноситель охлаждается. Запишем в прямоугольных координатах дифференциальное уравнение теплопроводности в движущейся среде [3]:

$$\frac{\partial T_{ср}}{\partial \tau} + \omega_{\ell}\frac{\partial T_{ср}}{\partial x} + \omega_{y}\frac{\partial T_{ср}}{\partial y} + \omega_{z}\frac{\partial T_{ср}}{\partial z} = a_{ср}\Delta T_{ср} + \frac{Q_V}{c_{ср}\rho_{ср}} , \qquad (2)$$

где ℓ – длина пиломатериала, м;

$a_{ср}$ – коэффициент температуропроводности среды, м^2/с;

$c_{ср}$ – удельная теплоемкость среды, Дж/(кг · К);

Q_V – сток тепла от среды к пиломатериалу.

Пренебрегая молекулярной теплопроводностью, для одномерной задачи неустановившегося процесса из уравнения (2) получим:

$$c_{ср}\rho_{ср}\left(\frac{\partial T_{ср}}{\partial \tau} + \omega_{\ell}\frac{\partial T_{ср}}{\partial x}\right) = Q_V , \qquad (3)$$

где $Q_V = \alpha\left(T_{ср} - T_{мат}\right)\frac{F_{мат}}{V_{св}}$;

α – коэффициент теплоотдачи, Дж/(м^2 · с · К);

$T_{мат}$ – температура материала пилы, К;

$F_{мат}$ – площадь пиломатериала, м^2.

Подставляя (4) в (3), после некоторых преобразований имеем соотношение для определения изменения температуры агента сушки при его прохождении через штабель пиломатериалов:

$$\frac{\partial T_{ср}}{\partial \tau} = \frac{\alpha\left(T_{ср} - T_{мат}\right)F_{мат}}{c_{ср}\rho_{ср}V_{св}} - \omega_{\ell}\frac{\partial T_{ср}}{\partial \ell} .$$

Для описания тепломассопереноса внутри пиломатериала воспользуемся дифференциальными уравнениями А.В. Лыкова [4]. Применительно к одномерной симметричной пластине и при отсутствии фазовых превращений внутри материала для однокомпонентной жидкости его можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial U_{мат}}{\partial \tau} = a_m\left(\frac{\partial^2 U_{мат}}{\partial x^2}\right) + a_m\delta\left(\frac{\partial^2 T_{мат}}{\partial x^2}\right); \qquad (6)$$

$$\frac{\partial T_{\text{мат}}}{\partial \tau} = a_{\text{т}} \left(\frac{\partial^2 T_{\text{мат}}}{\partial x^2} \right); \qquad (7)$$

где $U_{\text{мат}}$ – влагосодержание материала, кг/кг;

a_m – коэффициент массопроводности, м^2/с;

δ – относительный термоградиентный коэффициент, 1/К;

$a_{\text{т}}$ – коэффициент температуропроводности тела, м^2/с.

Решение системы (5) – (7) находим при следующих краевых условиях: начальные

$$U_{\text{нач}}(0; x) = U_0;$$
$$T_{\text{мат}}(0; x) = T_{\text{мат}\,0};$$
$$T_{\text{ср}}(0; \ell) = T_{\text{ср}\,0};$$

граничные

$$j_{\text{пов}} - \beta(\rho_{\text{рав}} - \rho_{\text{пов}}) = 0;$$
$$\alpha(T_{\text{ср}} - T_{\text{мат}}) = -\lambda \left. \frac{\partial T_{\text{мат}}}{\partial x} \right|_{x=0};$$
$$T_{\text{ср}}(\tau; \ell) = T_{\text{ср}}(\tau - 1) + \Delta T_{\text{ср}}(\Delta\tau),$$

где $j_{\text{пов}}$ – поток массы с поверхности влажного материала, кг/(м^2 · с);

β – коэффициент массоотдачи, м/с;

$\rho_{\text{рав}}$ – равновесная плотность, кг/м^3;

$\rho_{\text{пов}}$ – плотность паров на поверхности материала, кг/м^3;

λ – коэффициент теплопроводности материала, Дж/(м · с · К);

$T_{\text{ср}}(\tau - 1)$ – температура среды в предыдущий момент времени, К.

При достижении определенного значения температуры внутри пиломатериала начинается стадия вакуумирования ($\tau = \tau_1$). На стадии сушки при постоянно возрастающем вакууме и непрерывной циркуляции сушильного агента через материал происходит удаление свободной влаги под действием градиентов давления, влажности и температуры.

Если все пиломатериалы в штабеле находятся в одинаковых условиях, запишем уравнение материального баланса по пару для процесса понижения давления:

$$j_{\text{пов}} F_{\text{мат}} d\tau - Q_{\text{с.п}} \rho_{\text{п}} d\tau = V_{\text{св}} d\rho_{\text{п}}. \qquad (8)$$

В уравнении (8) первый член левой части выражает приток пара в парогазовую смесь за счет его испарения с поверхности влажного материала; второй ($Q_{\text{с.п}}$) – отвод пара из аппарата в вакуумную линию; правая часть представляет изменение парциальной плотности пара в парогазовой смеси в аппарате.

Для газа аналогично запишем уравнение материального баланса, но при отсутствии притока газа в парогазовую смесь:

$$-Q_{\text{с.г}} \rho_{\text{г}} d\tau = V_{\text{св}} d\rho_{\text{г}}. \qquad (9)$$

В уравнениях (8) и (9) фигурируют объемные производительности системы удаления пара $Q_{с.п}$ и системы удаления газа $Q_{с.г}$. Обычно при сушке с понижением давления сушильная камера подключается к вакуумному насосу через конденсатор, который работает как своеобразный насос по пару. Очевидно, что в этом случае объемная производительность системы удаления пара будет складываться из объемных производительностей вакуумного насоса и конденсатора:

$$Q_{с.п} = Q_н + Q_к,$$

а объемная производительность системы удаления газа равна объемной производительности вакуумного насоса:

$$Q_{с.г} = Q_н.$$

Объемные производительности конденсатора $Q_к$ и вакуумного насоса $Q_н$ определяют из следующих выражений [1, 7]

$$Q_к = \frac{S_к K \Delta}{r \rho_{ср}};$$

$$Q_н = \frac{V_{св}}{\tau_1} \ln \frac{P_{атм}}{P_{ост}},$$

где $S_к$ – поверхность теплопередачи конденсатора, м^2;

r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;

$P_{атм}$ – атмосферное давление, Па;

$P_{ост}$ – остаточное давление в аппарате, Па.

Плотность парогазовой смеси $\rho_{п(г)}$ связана с ее давлением $p_{п(г)}$ уравнением Менделеева–Клапейрона:

$$\rho_{п(г)} = \frac{p_{п(г)} \mu_{п(г)}}{R T_{ср}}, \qquad (10)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль · К);

$\mu_{п(г)}$ – молекулярная масса парогазовой смеси, кг/кмоль.

Продифференцировав выражение (10), получим

$$d\rho_{п(г)} = \mu_{п(г)} \frac{T_{ср} dp_{п(г)} - p_{п(г)} dT_{ср}}{R T_{ср}^2}. \qquad (11)$$

Площадь поверхности материала определим из выражения

$$F_{мат} = 2(s + b)\ell z^*, \qquad (12)$$

где s, b, ℓ – толщина, ширина и длина образца, м;

z^* – количество образцов в аппарате, шт.

Подставив выражения (10) – (12) в уравнения (8) и (9), после некоторых преобразований получим дифференциальные уравнения изменения давления над пиломатериалами:

по пару

$$\frac{dp_{\text{п}}}{d\tau} = \frac{2(\varepsilon + b)\text{R}T_{\text{ср}}}{V_{\text{св}}\mu_{\text{п}}} j_{\text{пов}} - p_{\text{п}}\left(\frac{Q_{\text{сп}}}{V_{\text{св}}} - \frac{1}{T_{\text{ср}}}\frac{dT_{\text{ср}}}{d\tau}\right);$$

по газу

$$\frac{dp_{\text{г}}}{d\tau} = p_{\text{г}}\left(\frac{1}{T_{\text{ср}}}\frac{dT_{\text{ср}}}{d\tau} - \frac{Q_{\text{с.г}}}{V_{\text{св}}}\right).$$

Изменение температуры среды определим из теплового баланса паровой фазы:

$$\rho_{\text{ср}}c_{\text{ср}}V_{\text{св}}dT_{\text{ср}} = \alpha(T_{\text{мат}} - T_{\text{ср}})F_{\text{мат}}d\tau - Q_{\text{сп}}\rho_{\text{ср}}c_{\text{ср}}T_{\text{ср}}d\tau +$$
$$+ c_{\text{ср}}F_{\text{мат}}j_{\text{пов}}T_{\text{ср}}d\tau + c_{\text{ср}}\rho_{\text{ср}}T_{\text{ср}}Q_{\text{кал}}d\tau, \qquad (13)$$

где $Q_{\text{кал}}$ – объемная производительность калорифера.

Левая часть уравнения (13) характеризует изменение теплосодержания паровой фазы; первый член правой части – подвод или отвод тепла за счет теплообмена с поверхности влажного материала; второй – отвод тепла с удаляемыми в вакуумную линию парами; третий – приток тепла с парами влаги, удаляемыми из материала; четвертый – приток тепла из калорифера.

Полное давление среды определяем по закону Дальтона [2]:

$$P_{\text{ср}} = p_{\text{п}} + p_{\text{г}},$$

где $p_{\text{п}}$, $p_{\text{г}}$ – соответственно давление пара и газа в аппарате, Па.

Поделив (13) на $d\tau$ и подставив в него (10), после некоторых преобразований получим дифференциальное уравнение изменения температуры паровой среды:

$$\frac{dT_{\text{ср}}}{d\tau} = \left[\frac{\alpha F_{\text{мат}}\text{R}(T_{\text{мат}} - T_{\text{ср}})}{c_{\text{ср}}V_{\text{св}}(\rho_{\text{п}}\mu_{\text{п}} + p_{\text{г}}\mu_{\text{г}})} - \frac{Q_{\text{сп}}}{V_{\text{св}}} + \frac{F_{\text{мат}}\text{R}T_{\text{ср}}j_{\text{пов}}}{V_{\text{св}}(\rho_{\text{п}}\mu_{\text{п}} + p_{\text{г}}\mu_{\text{г}})} + \frac{Q_{\text{к}}}{V_{\text{св}}}\right]T_{\text{ср}}.$$

Для описания тепломассопереноса внутри материала воспользуемся дифференциальными уравнениями А.В. Лыкова [4]:

$$\frac{\partial U_{\text{мат}}}{\partial\tau} = a_m\left(\frac{\partial^2 U_{\text{мат}}}{\partial x^2}\right) + a_m\delta\left(\frac{\partial^2 T_{\text{мат}}}{\partial x^2}\right) + \frac{k_{\text{р}}}{\rho_0}\left(\frac{\partial^2 P_{\text{мат}}}{\partial x^2}\right); \qquad (14)$$

$$\frac{\partial T_{\text{мат}}}{\partial\tau} = a_m\frac{r\varepsilon}{c}\left(\frac{\partial^2 U_{\text{мат}}}{\partial x^2}\right) + \left(a_{\text{т}} + \frac{r\varepsilon}{c}a_m\delta\right)\left(\frac{\partial^2 T_{\text{мат}}}{\partial x^2}\right) + a_m\frac{r\varepsilon}{c}\delta_{\text{р}}\left(\frac{\partial^2 P_{\text{мат}}}{\partial x^2}\right); \qquad (15)$$

$$\frac{\partial P_{\text{мат}}}{\partial\tau} = \left(a_{\text{р}} - a_m\frac{\varepsilon}{c_{\text{р}}}\delta_{\text{р}}\right)\left(\frac{\partial^2 P_{\text{мат}}}{\partial x^2}\right) - a_m\frac{\varepsilon}{c_{\text{р}}}\left(\frac{\partial^2 U_{\text{мат}}}{\partial x^2}\right) - a_m\frac{\varepsilon}{c_p}\delta\left(\frac{\partial^2 T_{\text{мат}}}{\partial x^2}\right), \qquad (16)$$

где $k_{\text{р}}$ – коэффициент фильтрационного переноса, с;

ρ_0 – плотность абсолютно сухого тела, кг/м^3;

ε – критерий парообразования;

c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг · К);

$\delta_р$ – коэффициент фильтрационного потока влаги, м · с^2/кг;
$a_р$ – коэффициент конвективной фильтрационной диффузии, м^2/с;
$c_р$ – коэффициент емкости влажного воздуха в материале, м · с^2/кг.

Начальные условия для влаготеплопереноса в процессе понижения давления представляют собой поля температуры и влагосодержания после стадии прогрева.

Граничные условия для момента времени τ_1, соответствующего началу стадии вакуумирования, запишем в виде следующих выражений [6]:

$$U_{пов} = a^* \left(\frac{P}{P_{нас}} \right)^n ; \tag{17}$$

$$-\lambda \frac{\partial T_{мат}}{\partial x}\bigg|_{x=0} = j_{пов} r + T_{мат} j_{пов} c_п + \alpha \left(T_{мат} - T_{ср} \right); \tag{18}$$

$$p_{мат}\big|_{x=0} = p_{ср}, \tag{19}$$

где a^*, n – коэффициенты в уравнении изотермы Фрейндлиха.

Поток влаги к поверхности массообмена определим из соотношения

$$j_{пов} = \rho_0 \left(a_m \frac{\partial U_{мат}}{\partial x}\bigg|_{x=0} + a_m \delta \frac{\partial T_{мат}}{\partial x}\bigg|_{x=0} + \frac{k_р}{\rho_{ср}} \frac{\partial P_{мат}}{\partial x}\bigg|_{x=0} \right).$$

Далее следует стадия сушки пиломатериалов при фиксированном остаточном давлении в аппарате, где температура в камере повышается до определенного режимного значения. При вакуумной сушке тепломассоперенос внутри материала описывается системой уравнений (14) – (16) при краевых условиях (17) – (19).

Для проверки математической модели на адекватность была использована экспериментальная установка, позволяющая сушить древесину при стационарном пониженном давлении. Установка включала обогреваемую вакуумную камеру, внутри которой расположены калориферы, вентилятор и экраны, формирующие аэродинамический тракт циркуляции сушильного агента. Камера соединена через кожухо-трубчатый конденсатор с вакуумным насосом. В установке предусмотрены приборы регистрации и автоматизации режимных параметров процесса. На рис. 2 представлены результаты экспериментального исследования удаления влаги из соснового образца толщиной 50 мм при начальной влажности 85 %, температуре сушильного агента 348 К и скорости циркуляции 5 м/с. Полученные кривые характеризуют расчетные значения изменения влажности древесины во времени, точками обозначены опытные данные.

Из представленных на рис. 2 зависимостей видно, что продолжительность классической конвективной сушки древесины сосны в камере почти в 2 раза выше, чем при вакуумных режимах.

Проверкой на адекватность установлено, что максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 19 % [5].

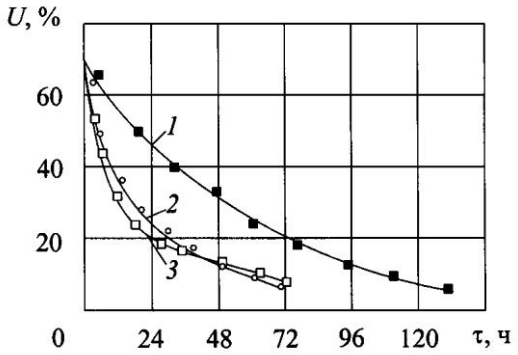


Рис. 2. Кинетические кривые сушки древесины сосны при T = 348 К: *1* – P =10^5 Па; 2 – 7· 10^4; *3* – 5 ·10^4 Па

Как видно из рис. 2, с уменьшением остаточного давления P и падением влагосодержания U ниже 25 % происходит снижение скорости сушки. Поэтому целесообразно к концу процесса сушки постепенно повышать давление среды.

Полученные результаты позволяют определить рациональные режимные параметры данного способа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исаев, С.М.* Теория тепломассообмена [Текст] / С.М. Исаев, И.А. Кожинов, В.И. Кофанов. – М.: Высш. шк., 1979. – 495 с.

2. *Касаткин, А.Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

3. *Луканин, В.Н.* Теплотехника [Текст] / В.Н. Луканин, Г.М. Шатров, Г.М. Камфер. – М: Высш. шк., 2002. – 671 с.

4. *Лыков, А.В.* Теория сушки [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.

5. *Спиридонов, В.П..* Математическая обработка физико-химических данных [Текст] / В.П. Спиридонов, А.А. Лопаткин. – М.: МГУ, 1970. – 222 с.

6. *Шубин, Г.С.* Сушка и тепловая обработка древесины [Текст] / Г.С. Шубин. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 336 с.

7. *Шумский, К.П.* Вакуумные аппараты и приборы химического машиностроения [Текст] / К.П. Шумский. – М.: Машиностроение, 1974. – 576 с.

Казанский государственный
технологический университет

Поступила 11.01.05

R.R. Safin, R.R. Khasanshin, R.G. Safin

Process Mathematical Model of Sawn-wood Convection Drying in Discharged Medium

The process of convection drying for sawn wood in the discharged medium is viewed and the mathematical model is proposed.

УДК 674.8

В.И. Малыгин, А.Е. Смаглов

Малыгин Владимир Иванович родился в 1952 г., окончил в 1979 г. Университет Дружбы народов им. П. Лумумбы, доктор технических наук, профессор, действительный член АИН РФ, проректор по научной работе Севмашвтуза – филиала СПб. ГМТУ. Имеет более 100 научных работ в области математического моделирования физических процессов при резании.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ТЕПЛОФИЗИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Разработана методика оценки точности вычисления полей температур при представлении решения уравнения теплопроводности в тригонометрических и экспоненциальных рядах.

Ключевые слова: точность вычислений, дереворежущий инструмент, уравнения теплопроводности, оптимальность конструкции, математическая модель.

Задача выбора оптимальной конструкции дереворежущего инструмента на стадии проектирования как самого инструмента, так и технологического процесса является весьма актуальной. Это обусловлено необходимостью обеспечения качества изделий деревообработки и эффективностью использования дереворежущего инструмента. Особую значимость при этом приобретает изучение тепловых процессов, протекающих в инструменте. В процессе деревообработки тепло, образующееся при резании материалов с низкой теплопроводностью, практически в полном объеме идет на нагрев инструмента. Поэтому решение задач, связанных с учетом температурных деформаций, изменением режущих свойств, представляет научный интерес. Одним из путей их решения является создание математической модели, позволяющей проводить качественную оценку конструкции инструмента на стадии проектирования.

Рассматривая математическое моделирование тепловых полей в режущем инструменте, прежде всего, следует подобрать размерность задачи таким образом, чтобы она наиболее точно описывала протекающие в нем процессы. В качестве модели формы сборного инструмента целесообразно принять тела ограниченных размеров, поскольку необходимо учитывать теплообмен по всем поверхностям режущего ножа. Моделирование полуограниченными телами здесь будет не совсем корректно, так как теплообмен в стыке существенно отличается от теплообмена в сплошной среде. Особенностью решения задачи теплопроводности для ограниченных тел является то, что оно представляется в виде рядов, например тригонометрических. Таким образом, точность практических вычислений будет определяться числом членов частичного ряда, удерживаемых при расчете. Можно показать, что число членов ряда, которые необходимо удерживать для обеспечения

заданной точности, зависит от вида функции, на основе которой построен ряд. Для этого сравним два ряда: построенных на основе тригонометрических и на основе экспоненциальных функций. Первый образуется при решении дифференциального уравнения теплопроводности в виде ряда Фурье по тригонометрическим функциям либо лежит в основе интегральных преобразований. Второй наиболее простой способ – решение в виде экспоненциального ряда и его конструирование методом источников [2]. Во втором случае решение получают с помощью функций влияния, которые составляют с учетом воздействия каждого источника. Это воздействие может быть представлено как в виде экспоненциальной зависимости[1], так и в виде ряда Фурье, что дает основу для сравнения.

Рассмотрим некоторые особенности исследуемых рядов. Получение решения в экспоненциальных рядах основано на использовании метода источников [2]. Что касается тригонометрических рядов, то по своей природе они ориентированы на описание периодических процессов. Использование тригонометрических рядов для описания непериодических процессов, в том числе и распространения теплоты, возможно, и не составляет особого труда, однако физический смысл при этом утрачивается. Тем не менее, тригонометрические ряды могут быть получены для задач с весьма сложными краевыми условиями. Экспоненциальные ряды этого достоинства лишены – даже для сравнительно простых краевых условий (например для задачи, рассматриваемой в данной работе) решение становится весьма громоздким, а для более сложных его не удается найти.

Посмотрим, как связана величина n-го члена ряда с его номером для обоих случаев. Для экспоненциального ряда, полученного методом источников, величина члена ряда убывает пропорционально экспоненте квадрата его номера, для тригонометрического – пропорционально произведению экспоненты квадрата номера на его синус (косинус). Казалось бы, если члены тригонометрического ряда убывают быстрее, то и сходиться он должен раньше, однако это не так. Выясним, как связана величина члена ряда с координатой. В экспоненциальном ряду связь с координатой такая же, как и с номером – пропорциональность с экспонентой квадрата координаты, в тригонометрическом – с синусом (косинусом) координаты. Если фундаментальное решение дифференциального уравнения теплопроводности есть экспоненциальная связь температуры с квадратом расстояния, то становится очевидным, что тригонометрические ряды лишь приближают то решение, которое экспоненциальные ряды дают сразу и точно. Однако сравнение будет неточным, если не учитывать связь величины члена ряда со временем. Если для сходимости экспоненциального ряда эта связь не имеет большого значения в силу его знакопостоянности, то в знакопеременном тригономет-

[1] Это ничто иное, как фундаментальное решение уравнения теплопроводности для мгновенного точечного источника, действовавшего в неограниченном пространстве.

рическом ряду время определяет «размах колебаний» членов ряда. Чем меньше время, тем больше размах (пропорционально exp(– t)). Отсюда следует, что для получения результата с заданной степенью точности в тригонометрическом ряду нужно удерживать существенно больше членов, по крайней мере, для малых промежутков времени. Определению числа членов в том и другом случае и посвящена данная работа.

Рассмотрим задачу в относительно простой постановке, которая позволит проиллюстрировать особенности обоих типов решений. Исследуем распространение тепла в стержне при заданных температурах на его концах (первая краевая задача). Имеем уравнение теплопроводности

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

при следующих граничных и начальном условиях:

$$u\big|_{x=0} = \psi_1(t); \quad u\big|_{x=l} = \psi_2(t);$$

$$u\big|_{t=0} = \varphi(x),$$

где $u(x, t)$ – температура в точке с координатой x в момент времени t; $\psi_1(t)$, $\psi_2(t)$, $\varphi(x)$ – заданные функции.

Для того чтобы показать различную сходимость исследуемых рядов, достаточно рассмотреть переходный процесс при стационарных краевых условиях, в то время как нестационарные условия затрудняют проявление особенностей их поведения. Примем следующие значения краевых функций: единичная температура на левом конце стержня $\psi_1(t) = 1$; нулевая температура на правом конце стержня $\psi_2(t) = 0$; нулевая начальная температура $\varphi(x) = 0$. В этом случае решение может быть получено в следующем виде:

в тригонометрических рядах [1]

$$u(x,t) = V(x,t) - \frac{2\left(\sum\limits_{n=1}^{\infty} \frac{e^{\left(-\left(\frac{n\pi\alpha}{l}\right)^2 t\right)} \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right)}{n}\right)}{\pi}; \qquad (1)$$

в экспоненциальных рядах [2]

$$u(x,t)=V(x,t)-\left(\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left(\operatorname{erf}\left(\frac{1(+2l\,n-x)}{2\sqrt{t}\;\alpha}\right)l\pi+\operatorname{erf}\left(\frac{1(-l+2l\,n-x)}{2\sqrt{t}\;\alpha}\right)x\pi+\right.\right.$$

$$+\operatorname{erf}\left(\frac{1(-l+2l\,n-x)}{2\sqrt{t}\;\alpha}\right)l\pi+2\mathrm{e}^{\left(-\frac{1(+2l\,n-x)^2}{4t\alpha^2}\right)}\alpha\sqrt{\pi}\sqrt{t}+$$

$$+2n\operatorname{erf}\left(\frac{1(+2l\,n-x)}{2\sqrt{t}\;\alpha}\right)l\pi-x\operatorname{erf}\left(\frac{1(+2l\,n-x)}{2\sqrt{t}\;\alpha}\right)\pi-$$

$$-2\mathrm{e}^{\left(-\frac{1(-l+2l\,n-x)^2}{4t\alpha^2}\right)}\alpha\sqrt{\pi}\sqrt{t}-2\operatorname{erf}\left(\frac{1(-l+2l\,n-x)}{2\sqrt{t}\;\alpha}\right)nl\pi-$$

$$\left.\left.-2\operatorname{erf}\left(\frac{1(l\,n-x)}{2\sqrt{t}\;\alpha}\right)\pi\,l\right)/(2\pi\,l)\right), \qquad (2)$$

где $V(x, t) = \psi_1 + (\psi_2 - \psi_1)x/l$ – «квазистационарная» температура, которая в нашем случае будет отражать поле температур после установления теплового равновесия.

Как было сказано выше, точность вычислений по формулам (1) и (2) сильно зависит от времени в самом начале переходного процесса. Определим величину этого промежутка времени. При реальных процессах циклического резания (фрезерование, пиление дисковыми пилами) продолжительность цикла напрямую зависит от частоты вращения шпинделя станка. Так, при частоте вращения n = 1000 об/мин цикл нагружения составляет 0,06 с, при n = 3000 об/мин – 0,02 с, при n = 6000 об/мин – 0,01 с. Необходимо отметить, что длительность теплового импульса составляет лишь незначительную часть цикла нагружения. Казалось бы, решать уравнение теплопроводности лучше для мгновенно действующего источника, в этом случае решения (1) и (2) были бы значительно проще. Это было возможно, если бы имелся всего один цикл нагружения. На практике число циклов достаточно велико и температура режущей кромки устанавливается около некоторой средней величины, которая в нашем случае соответствует квазистационарной температуре. Таким образом, моделирование реального теплового поля первой краевой задачей предпочтительней, чем исследование распространения мгновенного теплового импульса. Кроме того, решения (1) и (2) могут быть легко модернизированы для более сложных краевых условий, чем те, которые отражены в данной работе.

Рассмотрим зависимость точности вычислений от числа удерживаемых членов ряда.

На рис. 1 показан характер изменения температуры во времени для двух видов решений, представленных в экспоненциальных и тригонометрических рядах. Для тригонометрических рядов амплитуда колебаний

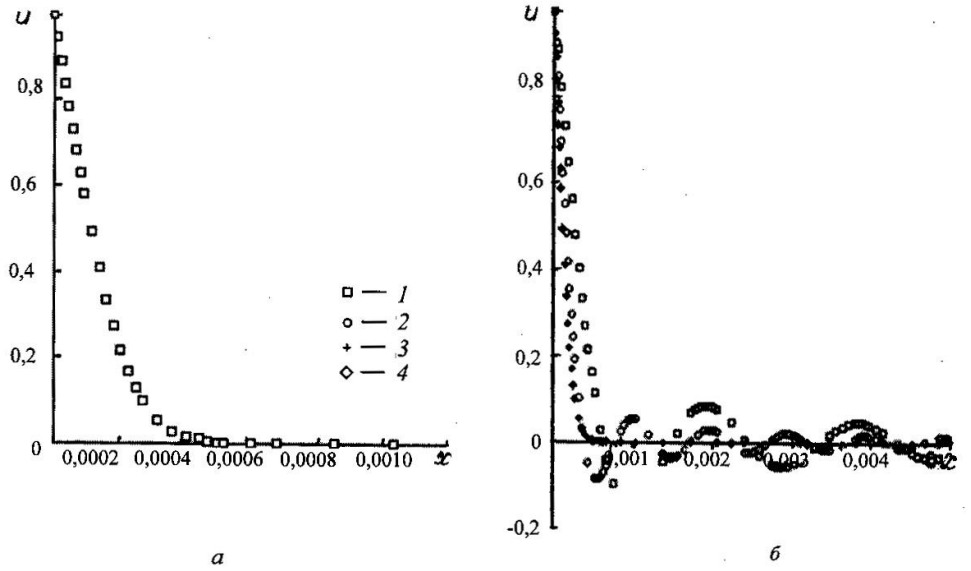


Рис. 1. Распределение температуры в стержне для различных моментов времени при решении в экспоненциальных (*а*) и тригонометрических (*б*) рядах (для числа членов ряда n = 10): *1* – 0,001 с, *2* – 0,005, *3* – 0,010, *4* – 0,020 с

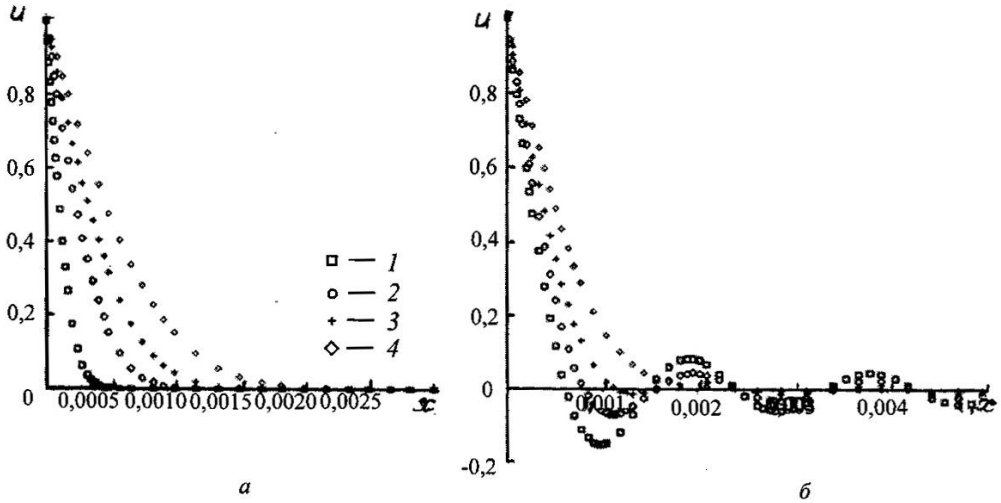


Рис. 2. Распределение температуры в стержне в момент времени t = 0,001 с для различного числа удерживаемых членов ряда при решении в экспоненциальных (*а*)(*1* – n = 5; *2* – 10; *3* – 25; *4* – 50) и тригонометрических (*б*) (*1* – n = 10; *2* – 20; *3* – 50; *4* –100) рядах

уменьшается с ростом времени. Практический интерес представляют именно малые промежутки времени.

На рис. 2 показана зависимость температуры стержня от числа удерживаемых членов ряда n. Точность вычисления по решению в экспоненциальных рядах для малых промежутков времени практически не зависит от n, поэтому для практических расчетов в данной задаче можно принять $n = 5$. Для тригонометрических рядов отклонения становятся сравнительно малыми только при $n > 50$. Таким образом, непосредственные вычисления подтверждают выше сказанное о том, что для тригонометрических рядов существует сильная зависимость между точностью вычислений и промежутком времени при постоянном числе удерживаемых членов ряда n.

Нами предложена следующая методика выбора числа удерживаемых членов ряда при проведении расчетов в тригонометрических рядах. Допустим, что для данной задачи существует и известно решение как в тригонометрических, так и в экспоненциальных рядах. Как показано выше, точность вычислений по решениям в экспоненциальных рядах для быстротекущих процессов слабо зависит от числа удерживаемых членов ряда. Зададимся некоторым числом удерживаемых членов экспоненциального ряда n, при котором будем считать найденное решение точным (в нашем примере достаточно было принять $n = 5 \ldots 10$). Тогда относительную погрешность вычислений в тригонометрических рядах определим по формуле

$$\delta(x,t) = \frac{\left| u_{\exp}(x,t) - u_{trig}(x,t,m) \right|}{u_{\exp}(x,t)}, \qquad (3)$$

где $u_{\exp}(x, t)$ – температура в точке x в момент времени t, определенная по решению в экспоненциальных рядах;

$u_{\text{trig}}(x, t, m)$ – температура в точке x в момент времени t, определенная по решению в тригонометрических рядах для числа удерживаемых членов ряда m.

Отсюда, задаваясь различными значениями m, можно подобрать его таким, чтобы удовлетворить требуемой точности вычислений в соответствии с формулой (3)*.

Выводы

1. При практических вычислениях для быстротекущих процессов по решениям дифференциального уравнения теплопроводности экспоненциальный ряд сходится быстрее, чем тригонометрический.

2. Если постановка задачи допускает получение решений в тригонометрических и в экспоненциальных рядах, то в силу существенно более быстрой

* На самом деле, формула (3) дает несколько завышенные значения (что идет в запас), поскольку частичная сумма исследуемого экспоненциального ряда меньше полной.

сходимости экспоненциальных рядов может быть получена оценка точности вычислений по решению в тригонометрических рядах по формуле (3).

3. Оценку точности вычислений, проведенную по изложенной методике, можно экстраполировать и на задачи, для которых нет решений в экспоненциальных рядах, однако это остается пока недоказанным. Основанием для подобного утверждения служит то, что для различных краевых условий форма решения в тригонометрических рядах остается практически неизменной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кошляков, Н.С.* Уравнения в частных производных математической физики [Текст] / Н.С. Кошляков [и др.]. – М.: Высш. шк., 1970.

2. *Положий, Г.Н.* Уравнения математической физики [Текст] / Г.Н. Положий. – М.: Высш. шк., 1964.

Севмашвтуз

Поступила 20.04.04

V.I. Malygin, A.E. Smaglov

Assessment of Computing Accuracy in Thermal Physics Tasks when Designing Wood-cutting Tool

Method of computing accuracy assessment of temperature fields when presenting solution of thermal conductivity equation in trigonometric and exponential sequences is developed.

УДК 674.812.002.612.2:621.822.5

В.А. Шамаев, Р.В. Скориданов, В.В. Постников

Шамаев Владимир Александрович родился в 1950 г., окончил в 1972 г. Воронежский государственные университет, доктор технических наук, профессор кафедры древесиноведения Воронежской государственной лесотехнической академии. Имеет более 160 печатных трудов в области древесиноведения и модифицирования древесины.

Скориданов Роман Виталиевич родился 1979 г., окончил в 2001 г. Воронежскую государственную лесотехническую академию, аспирант кафедры древесиноведения Воронежской государственной лесотехнической академии. Имеет более 5 печатных трудов в области древесиноведения и модифицирования древесины.

Постников Валерий Валентинович родился в 1945 г., окончил в 1968 г. Воронежский политехнический институт, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Воронежской государственной лесотехнической академии. Имеет более 90 печатных трудов в области физики твердого тела.

ПОЛУЧЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ С ВЫСОКИМИ ПРОЧНОСТНЫМИ СВОЙСТВАМИ

Разработан метод трехстороннего прессования, позволяющий получать модифицированную древесину с высокими физико-механическими свойствами.

Ключевые слова: модифицированая древесина, прессованная древесина, прочность, плотность, твердость, импульсное магнитное поле.

Улучшение физико-механических свойств древесины за счет модифицирования [1, 2, 5] направлено на расширение областей ее применения. В настоящее время актуальна разработка новых способов повышения прочностных свойств модифицированной древесины с привлечением современных технологий и оборудования.

Как известно [4], натуральная древесина является конструкционным материалом сравнительно невысокой прочности. Ее прочность можно повысить, путем прессования заполнив пустоты, составляющие 30 … 80 % объема, армирующими наполнителями, в основном полимерами и металлами, а также древесным веществом [6].

На рис. 1 показана связь между пределом прочности при сжатии вдоль волокон и плотностью для различных пород древесины.

Как видно из рис. 1, если бы существовала натуральная древесина с плотностью древесинного вещества 1530 кг/м^3, то ее прочность могла бы составить 230 МПа. Для модифицированной древесины, полученной методом прессования, с плотностью, близкой к плотности древесинного вещества, показатель прочности должен быть существенно ниже из-за нарушенной при уплотнении структуры. Однако, как показали наши исследования, он также достигает 230 МПа. Это связано с тем, что в древесине плотностью 1500 … 1530 кг/м^3 нет условий для изгиба волокон при сжатии из-за монолитности структуры.

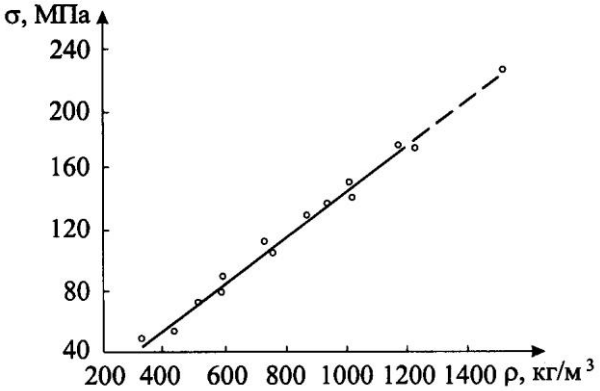


Рис. 1. Зависимость предела прочности при сжатии вдоль волокон σ от плотности ρ

Главным условием получения высокопрочной прессованной древесины является сохранение ее микроструктуры (без повреждений) во время прессования. Ранее исследованиями разных ученых была установлена оптимальная степень прессования, при которой наблюдается наименьший процент микроразрушений в древесине [3, 5, 6]. При торцовом (вдоль волокон) прессовании древесины степень уплотнения составляет 5 … 7 %, при радиальном и тангенциальном – не более 29 … 30 %. В конечном итоге, получаемый материал достигает степени прессования 65 … 67 %.

С учетом этих данных и положений теории прессования П.Н. Хухрянского нами [5] разработан метод трехстороннего прессования древесины.

Сущность метода. Черновые заготовки древесины березы или граба влажностью 3 … 5 % пропитывают пластификатором (10 %-й раствор аммиака) до содержания 4 … 6 % от массы сухой древесины. Подсушивают при температуре 40 … 45 °С до влажности 5 … 6 % и помещают в специальную прессформу для последовательного трехстороннего прессования (рис. 2, *а*). Прессформу вместе с заготовкой прогревают в течение 30 … 40 мин

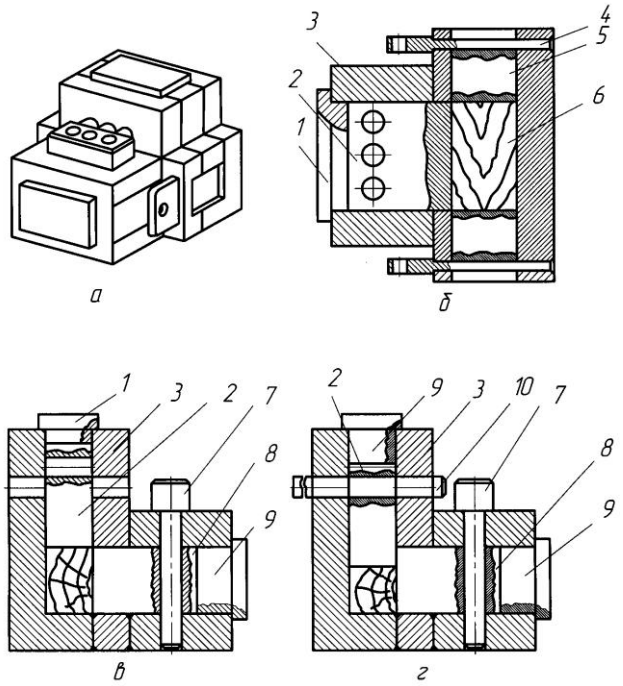


Рис. 2. Прессформа трехстороннего прессования: *а* – общий вид; *б* – прессование вдоль волокон; *в* – радиальное прессование; *г* – тангенциальное прессование; *1* – фиксирующие накладки; *2* – давитель тангенциальный; *3* – прессформа; *4* – фиксаторы торцовые; *5* – вкладыши; *6* – древесина; *7* – гребенка-фиксатор; *8* – давитель радиальный; *9* – пуансоны; *10* – пальцы-фиксаторы

при температуре 130…135 °С и прессуют последовательно вдоль волокон в радиальном и тангенциальном направлениях до плотности 1500 … 1530 кг/м^3.

Прессование древесины вдоль волокон осуществляют на гидравлическом прессе ГРМ-1 с пульсирующей нагрузкой; степень прессования 5 … 6 %, нагрузка 20 … 30 МПа, частота 300 … 400 циклов/мин с амплитудой 0,5 … 0,6 мм (рис. 2, *б*). Такое уплотнение древесины позволяет ликвидировать (сплющить) максимальное количество пор в древесине, сохраняя в целости клеточные стенки. Волокна древесины при этом принимают волнообразную форму (гофрируются) по всей длине. Помещение образца в прессформу препятствует возникновению поперечных деформаций, вследствие которых происходит выпячивание боковых стенок древесины. Деформации возникают при стандартном определении предела прочности на сжатие вдоль волокон.

Далее прессование происходит на 400-тонном прессе в радиальном направлении волокон до степени прессования 29 % при давлении 10 … 20 МПа (рис. 2, *в*). На этой стадии, при прессовании пластифицированной аммиаком древесины, оболочки клеток и сосудов деформируются,

происходит уменьшение их полостей, принимающих овальную форму. Сердцевинные лучи волнообразно изгибаются. Гофрированные волокна, образовавшиеся после прессования вдоль волокон, распрямляются.

Заключительное уплотнение в тангенциальном направлении волокон до степени прессования 15 … 29 % (в зависимости от начальной плотности заготовок) протекает под воздействием повышенных нагрузок (давление 450 … 500 МПа (рис. 2, *г*)). Происходит максимальное уплотнение древесных волокон, клеток, сосудов и разных микрополостей. Сердцевинные лучи распрямляются. После уплотнения на 65 % микростроение древесины уменьшается в размерах и практически не изменяется по форме.

Для фиксации формы спрессованные заготовки, не извлекая их из прессформы, подвергают термообработке при температуре 120 … 130 °С в течение 2,0 … 2,5 ч.

Прочностные свойства полученной этим способом прессованной древесины в среднем на 15 … 20 % выше, чем у наиболее прочных образцов от традиционных методов. Прессованный материал обладает высокими физико-механическими свойствами:

Плотность ……...1500 кг/м^3
Влажность …… 1 … 3 %
Предел прочности при сжатии вдоль волокон ……...230 МПа
« поперек волокон ……167 МПа
Твердость торцовая ……255 МПа
Объемное разбухание при влагопоглощении ……..11 %
Водопоглощение за 30 сут ……35 %

На полученных образцах был проведен эксперимент, целью которого было выявить эффект увеличения твердости модифицированной древесины после воздействия на нее слабых импульсных магнитных полей (ИМП).

Воздействие ИМП проводили при комнатной температуре (T = 300 К) симметричными треугольными импульсами N = 3000 шт. длительностью 10 мкс (время воздействия 60 с) и частотой следования 10 мс (магнитная индукция B_0 = 0,3 Тл). ИМП создавали периодическим разрядом батареи конденсаторов через низкоиндуктивный соленоид, который во время обработки разогревался до температуры ~340 К, и контролировали по току заряда в цепи соленоида и напряжению индукции на тестовой катушке индуктивности.

Во время экспозиции образцы ориентировали в соленоиде таким образом, чтобы волокна древесины располагались параллельно или перпендикулярно направлению поля. Наибольший эффект изменения торцовой твердости получен на образцах, у которых во время воздействия ИМП силовые линии поля параллельны волокнам образцов. Так, при облучении образцов вдоль волокон торцовая твердость увеличивалась на 15 … 20 %, поперечная – на 3 … 5 %. При облучении в направлении, перпен-

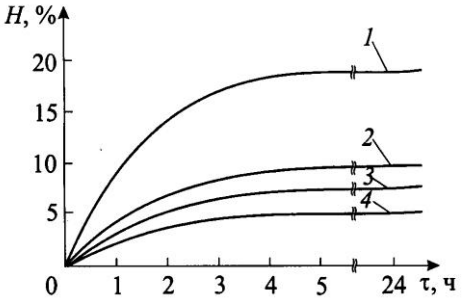


Рис. 3. Процент увеличения твердости *H* древесины трехстороннего прессования: *1, 3* – торцовая твердость; *2, 4* – поперечная твердость; *1, 4* – древесина обработана вдоль волокон; *2, 3* – поперек волокон

дикулярном волокнам, торцовая твердость возрастала на 5 … 7 %, поперечная – на 7 … 9 %. После воздействия ИМП твердость образцов продолжала возрастать и достигала своего максимума через время τ = 5 … 6 ч после обработки (рис. 3).

Предел прочности полученной прессованной древесины при сжатии превышает 200 МПа, т.е. равняется показателям для стали 3 и бронзы ОЦС 5-5-5. Такая прочность значительно расширяет возможную сферу ее применения как конструкционного материала, заменителя черных и цветных металлов, текстолита и др. Например, изготовленные из прессованной древесины подшипники скольжения для прокатных и проволочных станов способны заменить такие дорогостоящие материалы, как баббит, бронза, текстолит. При этом срок службы узлов трения и самих подшипников из прессованной древесины существенно увеличивается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Винник, Н.И.* Модифицированная древесина [Текст] / Н.И. Винник. – М.: Лесн. пром-сть, 1984. – 160 с.

2. ГОСТ 24329–80. Древесина модифицированная. Способы модификации [Текст]. – Введ. 07.01.81. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 27 с.

3. *Рыдченко, Г.Д.* Двустороннее прессование древесины [Текст] / Г.Д. Рыдченко // Исследование конструкций и физ.-мех. свойств материалов: науч. тр. – Воронеж: ВЛТИ, 1967. – Т. 31,2. – С. 25–28.

4. *Уголев, Б.Н.* Древесиноведение с основами лесного товароведения: учеб. для вузов [Текст] / Б.Н. Уголев. – М.: Лесн. пром-сть, 1986. – С. 208.

5. *Хухрянский, П.Н.* Дерево вместо металла [Текст] / П.Н. Хухрянский. – Воронеж, 1954. – 44 с.

6. *Шамаев, В.А.* Химико-механическое модифицирование древесины [Текст] / В.А. Шамаев. – Воронеж: ВГЛТА, 2003. – 260 с.

Воронежская государственная
лесотехническая академия

Поступила 1.06.04

V.A. Shamaev, R.V. Skoridanov, V.V. Postnikov

Producing Modified Timber with High Strength Properties

Method of trilateral pressing allowing to produce modified timber with high physico-mechanical properties is developed.

УДК 577.15: 674.815.

Д.А. Кадималиев, В.В. Ревин, Н.А. Атыкян, В.В. Шутова

Кадималиев Давуд Алиевич родился в 1952 г., окончил Мордовский государственный университет, доктор биологических наук, профессор кафедры биотехнологии Мордовского госуниверситета. Автор более 50 научных работ в области биотехнологии композиционных материалов, иммобилизованных биокатализаторов.

Ревин Виктор Васильевич родился в 1949 г., окончил Мордовский государственный университет, доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой биотехнологии Мордовского госуниверситета. Автор более 120 научных работ в области биотехнологии композиционных материалов, структуры и функций биологических мембран.

Атыкян Нелли Альбертовна родилась в 1974 г., окончила Мордовский госуниверситет, кандидат биологических наук, доцент кафедры биотехнологии. Автор более 10 научных работ в области биохимии и биотехнологии биодеградации растительного сырья, получения микробных полисахаридов (декстран, ксантан).

Шутова Виталина Викторовна родилась в 1970 г., окончила Мордовский госуниверситет, кандидат биологических наук, ст. преподаватель кафедры биотехнологии. Автор более 20 научных работ в области биохимии и биотехнологии биодеградации растительного сырья, получения микробных полисахаридов (декстран, ксантан), технологии молочного призводства.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕССОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ОТХОДОВ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ, ОБРАБОТАННЫХ ГРИБОМ *P. TIGRINUS*[*]

[*] Работа выполнена при поддержке программы Министерства образования и науки РФ (РНП. 2.1.1.7708) и гранта Роснауки (РН–19/001/079).

Установлено, что плиты, изготовленные из отходов древесины, обработанных грибом *P. tigrinus*, по прочности не уступают промышленным образцам и выделяют значительно меньше формальдегида.

Ключевые слова: отходы древесины, древесные пластики, лигнолитические грибы, формальдегид.

Технологические процессы изготовления многих композиционных материалов из отходов древесины (ДСП, ДВП, клееная фанера, и др.) предусматривают применение в качестве связующих фенолформальдегидных смол. При эксплуатации эти материалы и их отходы выделяют в атмосферу большое количество формальдегида и других токсичных веществ, ухудшая экологическую ситуацию [3, 4, 13]. Поэтому проблема снижения токсичности выпускаемых отечественной промышленностью композиционных материалов весьма актуальна. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы является биотехнологический способ получения плит без применения синтетических смол, основанный на обработке отходов растительного сырья лигнолитическими грибами. При этом лигноцеллюлозные субстраты приобретают пластифицирующие свойства, что позволяет изготавливать на их основе древесные плиты [2, 5, 15]. Между тем биодеградация лигнина также может привести к образованию токсичных веществ, которые в дальнейшем могут выделяться в окружающую среду. Однако в литературе практически отсутствуют конкретные данные, подтверждающие экологическую безопасность таких плит.

Цель нашей работы – изучение экологических характеристик промышленных образцов древесных плит (контроль), изготовленных с применением смол, и опытных образцов, изготовленных биотехнологическим способом (в лабораторных условиях) без синтетических связующих.

Для плит без синтетических связующих использовали отходы растительного сырья – сосновые и березовые опилки и стебли хлопчатника (гузапая). Гриб *Panus (Lentinus) tigrinus* штамм 317 (ВКМ F-3616 D), разрушающий лигнин, выделен и селекционирован на кафедре биотехнологии Мордовского госуниверситета и депонирован во Всероссийской коллекции микроорганизмов [12]. Посевной материал выращивали в две стадии. На первой стадии маточные колбы с грибом культивировали в глубинных условиях на среде Чапека – Докса с лигносульфонатом (15 г/л) и сахарозой (20 г/л). На второй стадии посевной материал переносили в колбы вместимостью 500 мл, содержащие модифицированную среду Кирка [19] с соевой мукой (5 г/л) и целлолигнином (4 г/л). Колбы засевали материалом из маточных колб по 10 мл на 100 мл жидкой питательной среды и помещали на 6 сут в качалку при частоте вращения 235 об/мин.

Далее проводили твердофазное культивирование на сосновых и березовых опилках и гузапае. Для этого навески субстратов помещали в растильные кюветы слоем в 3…4 см, засевали из расчета 100 мл инокулята на

25 г опилок и культивировали 9 сут при температуре t = 25 … 27 °С. Затем растильные кюветы с проросшими субстратами высушивали до влажности 7 … 10 % в термостате при t = 40…50 °С. Субстраты с биомассой (масса 70 г) загружали в пресс-форму (5×15 см) и проводили горячее прессование на вулканизационном гидравлическом прессе ВП-9030 М при t = 120 … 180 °С и давлении p = 3 … 5 МПа в течение 1,5 … 2,0 мин на 1 мм толщины. У полученных таким образом плит определяли показатели физико-механических и экологических свойств: предел прочности при изгибе, выделение в воздух фенола, формальдегида, аммиака, метанола [1, 7, 11].

Контролем служили промышленные образцы плит, полученные из сосновых опилок с применением смол.

Проведенные исследования показали, что предварительная обработка грибом *P. tigrinus* улучшает физико-механические свойства плит, изготовленных из отходов растительного сырья. Такой эффект можно объяснить высокой лигнолитической способностью гриба *P. tigrinus,* обусловленной синтезом внеклеточных ферментов лигнолитического комплекса [6, 10]. Под воздействием этих ферментов происходит модификация лигниновой компоненты древесины, образуется большое количество реакционноспособных групп, прежде всего фенольных гидрооксильных, которые при прессовании на фоне высоких температур образуют прочные связи между частицами древесины [5, 9].

Таблица 1

Показатели физико-механических свойств опытных и промышленных образцов плит

Продолжительность обработки, сут	Прочность при изгибе, МПа, образцов			
	обработанных *P. tigrinus*			необработанных (контроль)
	Сосна	Береза	Гузапая	
0	7,6±0,2	9,0±0,3	7,0±0,2	20,2±0,7
3	26,0±0,8	18,7±0,7	15,4±0,7	
6	19,1±0,7	11,4±0,6	14,0±0,7	
9	10,2±0,6	5,3±0,4	8,2±0,6	

Качество плит зависело как от условий обработки, так и от вида сырья (табл. 1). Лучшие показатели имели плиты из отходов, обработанных в течение 3 сут. Это связано с тем, что более длительная обработка приводит к резкому снижению содержания лигнина и других полимеров [9, 18] и, как следствие, нарушению структуры субстрата. Полученные плиты различаются по показателям прочности, что связано с особенностями исходного сырья, но не уступают плитам, изготовленным по традиционным технологиям с применением синтетических связующих [16].

Анализируя количество выделяемых в атмосферу токсичных веществ, установили, что как промышленные, так и опытные образцы плит не выделяют в воздух детектируемых количеств фенола и метанола, хотя они могут присутствовать в обработанном грибами сырье при разрушении лиг-

нина ферментами. По-видимому, при прессовании в условиях повышенных температур они вовлекаются в процессы конденсации и полимеризации с образованием прочных химических связей, что препятствует их эмиссии в окружающую среду.

Установлено, что количество формальдегида, выделяемого в воздух опытными образцами, колеблется в пределах от 0,008 до 0,014 мг/м^3, зависит от вида сырья и длительности обработки и значительно ниже ПДК (табл. 2). Различия в количестве формальдегида, выделяемого опытными образцами плит, вероятно, связаны с особенностями строения лигнина из различного растительного сырья и процессами биодеградации. При разру-

Таблица 2

Выделение формальдегида опытными и промышленными образцами плит

Продолжительность обработки, сут	Концентрация формальдегида, мг/м^3, выделяемого образцами				ПДК формальдегида, мг/м^3
	обработанными *P. tigrinus*			необработанными (контроль)	
	Сосна	Береза	Гузапая		
3	0,008±0,001	0,010±0,001	0,006±0,001	0,240±0,012	0,035
6	0,008±0,001	0,012±0,001	0,008±0,001		
9	0,012±0,001	0,016±0,001	0,011±0,001		

Таблица 3

Выделение аммиака опытными и промышленными образцами плит

Продолжительность обработки, сут	Концентрация аммиака, мг/м^3, выделяемого образцами				ПДК аммиака, мг/м^3
	обработанными *P. tigrinus*			необработанными (контроль)	
	Сосна	Береза	Гузапая		
3	0,033±0,003	0,043±0,003	0,041±0,003	0,017±0,004	0,200
6	0,048±0,003	0,062±0,004	0,089±0,004		
9	0,089±0,003	0,092±0,004	0,101±0,004		

шении лигнина лигнолитическими ферментами появляется большое количество разнообразных продуктов, в том числе формальдегид или его предшественники, из которых при прессовании на фоне высоких температур может образоваться формальдегид [8, 20]. Кроме того, эти же вещества в больших количествах образуются в процессе метаболизма клеток [14, 17].

Доля формальдегида и его предшественников в воздухе определяется, прежде всего, интенсивностью роста клеток и глубиной процесса биодеградации. Нами ранее было показано, что разложение грибом *P. tigrinus* лигнина березы идет интенсивнее, чем лигнина сосны и гузапаи [9, 18]. Поэтому плиты, изготовленные из березовых опилок, выделяют больше формальдегида, чем плиты из отходов сосны и хлопчатника.

Количество аммиака, выделяемого промышленными и опытными образцами, было ниже ПДК, однако обнаружены различия (по абсолютным значениям) между отдельными образцами (табл. 3).

Выделение аммиака контрольным образцом относительно невысокое. Оно связано с наличием незначительных количеств мочевины в составе синтетических связующих. Количество аммиака, выделяемого опытными образцами, выше, чем контрольным образцом, и колеблется в пределах от 0,033 до 0,101 мг/м^3. Относительно высокая эмиссия аммиака связана, прежде всего, с наличием в субстрате белков, при разложении которых под действием прессования и высоких температур образуется аммиак.

Таким образом, предварительная обработка отходов растительного сырья грибом *P. tigrinus* позволяет изготавливать экологически безопасные плиты без использования токсичных связующих. Они выделяют в воздух формальдегида значительно меньше, чем промышленные образцы на основе синтетических смол.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабичева, А.Ф.* Газохроматографическое определение фенола и формальдегида в воде, водных вытяжках и воздухе [Текст] / А.Ф. Бабичева, Г.Ф. Дрегваль // Гигиена и санитария. – 1990. – № 2. – С. 90–91.

2. *Болобова, А.В.* Новая технология получения экологически чистых строительных материалов на основе ферментативной биодеструкции древесных отходов [Текст] / А.В. Болобова // Прикладная биохимия и микробиология. – 1999. – Т. 35. – № 5. – С. 590–595.

3. *Губернский, Ю.Д.* Эколого-гигиенические аспекты организации мониторинга живой среды [Текст] / Ю.Д. Губернский, Н.В. Калинина, А.И. Мельникова // Гигиена и санитария. – 1997. – № 1. – С. 46–49.

4. *Ильницкий, А.П.* Канцерогенная опасность в доме [Текст] / А.П. Ильницкий. – Владимир: ВладМО, 1996. – 20 с.

5. *Кадималиев, Д.А.* Влияние прессования на свойства лигнина древесины сосны, обработанной грибом *P. tigrinus* [Текст] / Д.А. Кадималиев, В.В Ревин, В.В. Шутова // Химия раст. сырья. – 2001. – № 3. – С. 111–118.

6. *Кадималиев, Д.А.* Особенности ферментов лигнолитического комплекса гриба *P. tigrinus* BKM F-3616D: тез.докл. I съезда микологов России (11–14 апр. 2002 г.) [Текст] / Д.А. Кадималиев, В.В. Ревин, Н.А. Атыкян. – М., 2002. – С. 298.

7. Методические указания на определение вредных веществ в воздухе [Текст]. – М.: ЦРИА «Морфлот», 1981. – С. 218–222.

8. Общая органическая химия: учебник в 8 т. [Текст] / – М.: Химия, 1981. – Т.1. – 736 с.

9. *Ревин, В.В.* Модификация лигнина древесины грибом *P. tigrinus* [Текст] / В.В Ревин [и др.] // Прикладная биохим. микробиология. – 2002. – Т. 38, № 5. – С. 450–453.

10 . *Ревин, В.В.* Выделение и свойства пероксидазы, продуцируемой грибом *P. tigrinus* [Текст] / В.В. Ревин [и др.] // Биохимия. – 2000. – Т. 65, № 11. – С.1305–1309.

12. *Ревин, В.В.* Свидетельство о депонировании микроорганизма *Panus (Lentinus) tigrinus* (Bulliard:Fries) Fries, 317 [Текст] / В.В. Ревин [и др.]. – Регистр. номер ВКМ F-3616D; присвоен 05.03.1998.

11. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. инструкция-РД 52.04. 186-89 [Текст]. – М.: Гигиена, 1990. – С.485–487.

13. *Сидоренко, Г.И.* Изучение аллергических факторов окружающей среды [Текст] / Г.И. Сидоренко, Е.В. Печенникова // Гигиена и санитария. – 1997. – № 1. – С. 49–52.

14. *Скутнивская, Г.И.* Загрязнение атмосферы формальдегидом [Текст] / Г.И. Скутнивская, Г.Г. Дульцева. – Новосибирск, 1995. – 60 с.

15. *Соломатов, В.И.* Создание строительных биокомпозитов из древесного и другого растительного сырья. Сообщение 1. Теоретические предпосылки и принципы [Текст] / В.И. Соломатов, В.Д. Черкасов // Строительство. – 1997. – № 1–2. – С. 27–32. – (Изв. высш. учеб. заведений).

16. *Шварцман, Г.М.* Производство древесностружечных плит [Текст] / Г.М. Шварцман, Д.А. Щедро. – М., 1987. – 280с.

17. *Шлегель, Г.* Общая микробиология [Текст] / Г. Шлегель; пер. с англ. М.: Мир, 1987. – 422 с.

18. *Шутова, В.В.* Получение прессованных материалов из гузапаи, обработанной лигнолитическим грибом [Текст] / В.В. Шутова, В.В. Ревин, Д.А. Кадималиев // Биотехнология на рубеже двух тысячелетий: материалы межд. конф., Саранск 12–15 сент. 2001 г. – Саранск: Изд-во Мордовского гос. ун-та, 2001. – С. 56–58.

19. *Eggert, C* The ligninolytic system of the white – rotfungus *Pycnoporus cinnabarinus*: Purification and characterization of laccase [Text] / C. Eggert, U. Temp, L.K-F. Eriksson // Appl. Environ. Microbiol. – 1996. – Vol. 62, N 4. – P. 1151–1158.

20. *Kirk, T.K.* Enzymic combustion. The microbial degradation oflignin [Text] / T.K Kirk, R.L Farrell //Ann. Rev. Microbiol. – 1987. – Vol. 71. – P. 465–505.

Мордовский государственный
университет

Поступила 25.02.03

D.A. Kadimaliev, V.V. Revin, N.A. Atykyan, V.V. Shutova

Ecological Characteristics of Compressed Materials from Wastes of Plant Raw Material Treated by *P. Tigrinus* Fungus

It is set that boards produced from wood waste treated by *P. tigrinus* fungus don't yield to industrial samples and discharge much less formaldehyde.

УДК 630*24 + 634.081

Е.С. Мельников, А.А. Смирнов

Мельников Евгений Сергеевич родился в 1950 г., окончил в 1976 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой лесоводства С.-Пб. ГЛТА. Имеет более 40 работ по вопросам комплексного ухода за лесом.

Смирнов Алексей Александрович родился в 1979 г., окончил в 2002 г. С.-Петербургскую государственную лесотехническую академию, аспирант кафедры лесоводства С.-Пб. ГЛТА. Имеет 5 печатных работ по вопросам влияния лесохозяйственных мероприятий на качество древесины.

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОГО УХОДА НА КАЧЕСТВО ДРЕВЕСИНЫ ВЫСОКОПРОДУКТИВНЫХ ЕЛЬНИКОВ

При изучении влияния длительного (30 лет) воздействия комплексного ухода за высокопродуктивными ельниками установлено, что показатели качества древесины ели европейской не имеют отличий от контрольных или превосходят их.

Ключевые слова: комплексный уход за лесом, ель, классы и коэффициенты формы древесного ствола, показатели полнодревесности, толщина коры, базисная плотность древесины, запасы сухого вещества в древостое.

Повышение продуктивности лесов и их ускоренное выращивание органически связаны с необходимостью формирования древесины целевого назначения. Выявление закономерностей изменчивости качества древесины в связи с влиянием рубок ухода и внесения удобрений в целевых насаждениях позволит более обоснованно подойти к разработке программ комплексного ухода за лесом.

Всесторонняя оценка качества древесных стволов ели европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) в связи с длительным последействием комплексного ухода является одной из задач биологического древесиноведения и несомненно представляет теоретический и практический интерес.

Исследования проводили на постоянных пробных площадях (ПП) серий 10 и 11, заложенных в 1973/74 гг. сотрудниками лаборатории лесоводства ЛенНИИЛХ под руководством проф. С.Н. Сеннова в Государственном

опытном лесном хозяйстве “Сиверский лес” Ленинградской области. На ПП были выделены секции: контрольная (К), разреженная рубками ухода (РУ), разреженная и удобренная – комплексный уход (КУ).

В табл. 1 представлена краткая характеристика объектов.

Возраст преобладающей породы (ель) в начале экспериментов составлял 35…40 лет. На ПП-10 тип леса – ельник черничник, II класс бонитета; на ПП-11 – ельник кисличник, Iа класс бонитета.

Запасы вычисляли по таблицам объемов стволов и разрядам высот после регулярного проведения сплошных перечетов.

Для определения влияния ухода на базисную плотность древесины и характеристики формы ствола ели в каждой из секций отбирали по 6 модельных деревьев средней ступени толщины (категории крупности) [3]. Кроме того, для получения более полной информации о древостое, в каждой из секций дополнительно отбирали модели из более тонких и более толстых ступеней толщины: по одному дереву из ступени толщины 0,6; 0,8; 1,2 и 1,4 среднего диаметра. Так характеризуется укрупненное распределение деревьев по ступеням толщины [1]. Диаметры стволов модельных деревьев после спиливания измеряли в двух взаимно перпендикулярных направлениях на относительных высотах (через 0,1 высоты *H*). При определении базисной плотности на этих же высотах отбирали образцы для определения толщины коры. Измеряли протяженность живой кроны модельных деревьев.

Таблица 1

Характеристика постоянных пробных площадей в 1973/74 гг. (числитель) и 2003/04 гг. (знаменатель)

Пробная площадь	Секция	Номер секции	Год*	Состав	Запас древесины, м^3/га	Полнота (2003/04 гг.)	Общая производительность, м^3/га
ПП-10	К	10-1	–	8Е1Б1Ос+С / 6Е1С2Ос1Б	223 / 433	1,10	223 / 556
	РУ	10-2	1974 (25), 1983 (22) / –	10ЕедС,Б,Ос / 10Е едС	167 / 345	0,60	219 / 530
	КУ	10-3	1974 (30), 1983 (23) / 1974, 1979,1986	8Е1С1Б+Ос / 9,5Е0,5С едБ	144 / 367	0,66	214 / 554
ПП-11	К	11-1	–	9Е1Б / 8Е2Б	404 / 563	1,08	404 / 804
	РУ	11-2	1973 (22), 1993 (17) / –	9Е1Б / 7Е3Б	283 / 531	0,98	355 / 781
	КУ	11-3	1973 (24), 1993 (16) / 1973, 1983	9Е1Б / 8,5Е1,5Б	297 / 550	0,92	393 / 888

* В числителе приведены сведения о годе рубки (в скобках – процент запаса), в знаменателе – о годе внесения удобрений.

Объем ствола определяли по сложной формуле срединного сечения, сбег ствола, коэффициенты и классы формы, видовые числа (старое – в на-

чале опытов, 1973/74 гг., новое – через 30 лет, 2003/04 гг.) – по общепринятым методикам.

При обработке данных находили следующие средние величины: для 6 моделей из средней ступени толщины, для 10 моделей из разных ступеней толщины, для 2 тонкомерных и 2 крупномерных деревьев в каждом варианте опыта.

В качестве удобрения на опытных участках применяли гранулированную мочевину (карбамид), вносимую в дозе 150 кг/га по д.в. азота за один прием. Повторяемость внесения двух-трехкратная с интервалом в 5…10 лет. Туки разбрасывали вручную по поверхности почвы после разреживания древостоя.

При внесении азотных удобрений в разреженные ельники прирост древостоя начинает быстро повышаться. Причем положительное влияние удобрений, внесенных неоднократно в течение 10…12 лет, проявляется и через 10, и 20, и 30 лет после начала ухода. Общая производительность древостоев (запас древесины) после комплексного ухода достигала уровня контроля через 10…20 лет на обоих участках, в ельнике кисличном через 30 лет после начала ухода превышала этот уровень на 10 % (табл. 1).

Дополнительный текущий прирост определяли каждые 5 лет как разницу между накопленными запасами древостоев – пройденного комплексным уходом и разреженного без применения удобрений. Абсолютная прибавка прироста за 30 лет в ельнике черничном и кисличном соответственно составляла 55 и 96 $м^3$/га. При этом на разреженной секции 11-2 значительная итоговая доля березы по сравнению с удобренным вариантом 11-3, где дополнительные ресурсы в основном были потреблены елью (табл. 1), обусловлена, при одинаковых исходных характеристиках древостоев, значительно лучшим ее ростом впоследствии.

Величина относительного сбега стволов ели на обеих секциях с уходом в нижней части ствола (до 0,3 *H* включительно) имеет слабую тенденцию к увеличению в ельнике черничном по сравнению с контролем. Это можно объяснить усилением ветроустойчивости деревьев путем увеличения диаметра в основании ствола (на высоте груди) в условиях сильного разреживания древостоя. В средней и верхней частях ствола в варианте с комплексным уходом сбег относительно контроля уменьшается, что свидетельствует об улучшении формы ствола. В варианте с разреживанием (секция 10-2) сбег на высоте 0,4…0,7 *H* в среднем остается на уровне контроля, а на высоте 0,8…0,9 *H* возрастает, т. е. четко проявляются преимущества комплексного ухода перед обычным разреживанием.

В ельнике кисличном подобные закономерности не выявлены. Здесь на всех высотах, начиная с 0,1 *H*, сбег средних моделей на опытных секциях имеет тенденцию к снижению по сравнению с контролем. По-видимому, при меньшей интенсивности разреживания по сравнению с ПП-10 и достаточно высокой полноте у деревьев снижается потребность в усилении ветроустойчивости.

Изменения сбега относительно контроля в большинстве случаев не превышают ±3…4 % и статистически недостоверны (для 6 средних моделей). Лишь на относительной высоте 0,7…0,9 *H* на разреженных секциях обоих участков наблюдаются прямо противоположные по знаку, значительные и достоверные по отношению к контролю изменения сбега. По-видимому, это связано с особенностями разрастания крон деревьев.

У крупных деревьев в ельнике черничном на разреженных секциях наблюдается улучшение формы ствола на высоте 0,1…0,7 *H*. Сбег по сравнению с контролем у них возрастает лишь на высоте 0,8…0,9 *H*, что также может быть связано с разрастанием крон. В то же время четко прослеживается усиление основания ствола – сбег здесь заметно увеличивается по сравнению с контролем. Мелкие деревья во многом ведут себя на опытных секциях аналогично средним: отсутствие увеличения сбега на уровне пня, улучшение формы в средней и верхней частях. Таким образом, при сильном разреживании происходит перераспределение прироста между деревьями разного рангового положения. Крупные деревья в основном повышают свою ветроустойчивость, остальные – прирост стволовой древесины. Структурная перестройка в древостое обеспечивает адекватность приспособительной реакции к изменившимся условиям среды и, в конечном счете, повышение его устойчивости.

В ельнике кисличном и для крупных, и для мелких деревьев характерно некоторое ухудшение формы ствола по всей высоте дерева. Но с учетом сбега средних деревьев общая тенденция состоит в отсутствии каких-либо значительных изменений в форме ствола на участках с относительно небольшой интенсивностью разреживания древостоев и быстрым восстановлением полноты.

По многим показателям формы ствола средние деревья на участках с уходом в ельнике черничном имеют тенденцию к улучшению формы по сравнению с контролем (табл. 2). По-видимому, это можно объяснить довольно длительным сроком, прошедшим после рубки. По С.Н. Сеннову [6], уменьшение густоты древостоя может привести к кратковременному ухудшению формы ствола, увеличению его сбежистости. Однако длительные наблюдения, как указывает автор, позволили зафиксировать восстановление ухудшенной формы ствола у оставленных деревьев.

Результаты наших исследований дают сходную картину. Данные табл. 2 показывают, что в ельнике черничном показатели формы ствола ели из средней ступени толщины на ухоженных секциях не имеют достоверных отличий от контроля, которые не превышают ±2…3 %. Прослеживается тенденция улучшения формы ствола на секции с КУ по сравнению как с К, так и (в большинстве случаев) с РУ.

Коэффициенты и классы формы мелких деревьев в ельнике черничном на опытных секциях имеют четкую тенденцию к улучшению по сравнению с контролем. У крупных деревьев это проявляется лишь для нижней и средней частей дерева. На вершине крупные деревья становятся более сбежистыми, по-видимому, в связи с особенностями роста крон.

В ельнике кисличном показатели формы ствола средних деревьев имеют тенденцию к улучшению по всему стволу на секции с разреживанием. В варианте с комплексным уходом они близки к контрольным (табл. 2). Показатели формы ствола по мелким и крупным моделям в целом также соответствуют контрольным.

Таким образом, действительный относительный сбег ствола, коэффициенты и классы формы у деревьев ели на экспериментальных секциях в ельниках черничном и кисличном в целом практически не отличаются от контроля или даже имеют тенденцию к улучшению.

Полнодревесность крупных деревьев, как правило, снижена на секциях с уходом по сравнению с контролем (табл. 3).

Таблица 2

Характеристика формы ствола средних модельных деревьев (абсолютные значения / процент к контролю)

Показатель	Значение показателя у деревьев на секции пробной площади					
	К		РУ		КУ	
	ПП-10	ПП-11	ПП-10	ПП-11	ПП-10	ПП-11
q_0	1,253/100	1,270/100	1,243/99,2	1,252/98,6	1,230/98,2	1,230 / 96,9
q_1	0,910/100	0,883/100	0,889/97,6	0,902/102,2	0,895/98,3	0,883/100,0
q_2	0,730/100	0,735/100	0,741/101,5	0,745/101,4	0,743/101,7	0,731/ 99,5
q_3	0,474/100	0,492/100	0,463/97,7	0,514/104,5	0,488/102,8	0,489 / 99,4
$q_{2/1}$	0,802/100	0,832/100	0,834/103,9	0,838/100,7	0,830/103,5	0,829 / 99,7
$q_{3/1}$	0,521/100	0,558/100	0,521/100,0	0,569/102,0	0,545/104,6	0,554 / 99,3

Таблица 3

Полнодревесность стволов ели спустя 30 лет с начала опытов

Категория крупности деревьев	Видовое число / процент к контролю у деревьев на секции пробной площади					
	К		РУ		КУ	
	ПП-10	ПП-11	ПП-10	ПП-11	ПП-10	ПП-11
Начало опытов (старое видовое число)						
Крупные	0,519/100	0,530/100	0,540/104,0	0,527/99,4	0,510/98,3	0,534/101,0
Средние	0,549/100	0,526/100	0,546/99,5	0,565 /107,0	0,545/ 99,3	0,524/ 99,6
Мелкие	0,556/100	0,588/100	0,596/107,2	0,574/97,6	0,590/106,0	0,589/100,0
Через 30 лет (новое видовое число)						
Крупные	0,601/100	0,591/100	0,565/94,0	0,584/98,8	0,571/95,0	0,587/99,3
Средние	0,571/100	0,592/100	0,577/102,0	0,606/102,0	0,578/101,0	0,586 / 99,0
Мелкие	0,576/100	0,610/100	0,611/106,1	0,600/98,4	0,627/109,0	0,614/101,0

Это снижение особенно заметно в новом видовом числе на опытных вариантах ПП-10, где проведено более сильное разреживание. Напротив, видовые числа мелких стволов в среднем на 6…9 % выше, чем на контроле. Деревья средней ступени толщины на экспериментальных секциях обоих участков по видовым числам близки к контролю. В большинстве случаев отклонения находятся в пределах ± 1 %.

При выявлении отличий в полнодревесности стволов средней ступени толщины на секциях с комплексным уходом по сравнению с рубкой ухо-

да обнаруживается следующее. В ельнике черничном видовые числа на обеих секциях одинаковы, отличий нет. В ельнике кисличном полнодревесность заметно выше (на 3,4…7,8 %) на разреженной секции, хотя различия статистически недостоверны. Возможно, внесение удобрения в относительно богатую почву не улучшило ни формы стволов ели средней ступени толщины, ни и их полнодревесности. В то же время полнодревесность крупных и мелких деревьев в общем имеет тенденцию к увеличению на секциях с комплексным уходом, особенно по новому видовому числу.

На секциях с уходом толщина коры выше в черничнике по сравнению с кисличником (у средних деревьев – на 17…18 %, хотя эти различия недостоверны).

При сильном разреживании в ельнике черничном толщина коры возрастает на экспериментальных секциях относительно контроля, причем сильнее всего у мелких деревьев (на 39…45 %), меньше – у крупных (на 4…21 %). Деревья средней ступени толщины занимают среднее положение (18…24 %), но это увеличение также статистически недостоверно. Таким образом, наблюдается тенденция к “выравниванию” толщины коры у деревьев разной крупности при проведении ухода за лесом. Наиболее толстая кора характерна для секции с комплексным уходом.

При относительно слабом разреживании древостоя (ельник кисличный) толщина коры возрастает в значительно меньшей степени по сравнению с контролем. У крупных стволов даже имеется тенденция к снижению этого показателя. В этом случае более толстая кора отмечена в варианте с комплексным уходом по сравнению с разреженным вариантом без внесения удобрений.

Относительная протяженность живой кроны на контрольных секциях растет от мелких деревьев к крупным. На секциях с уходом по сравнению с контролем средние деревья увеличивают протяженность кроны, но достоверно – лишь в ельнике черничном (на 19…25 %). При сильном разреживании выявляется тенденция к большей протяженности кроны в удобренном варианте по сравнению с разреженным неудобренным.

Увеличение толщины коры и протяженности живой части кроны является реакцией древостоя на разреживание, что сопряжено с изменениями микроклимата и условий среды. Увеличивается разность экстремальных температур на поверхности стволов – более толстая кора обеспечивает защиту камбия. Разреживание создает лучшие условия для освещенности крон, включая и их нижние части, поэтому протяженность крон возрастает. Изменения в кроновом пространстве, т.е. в горизонтальной структуре древостоя, связанные с его разреживанием, компенсируются “подвижками” в вертикальной структуре кроновой фитомассы (увеличение протяженности крон). Удобрение в большей мере способствует повышению продуктивности фотосинтеза за счет увеличения объема крон на секциях с комплексным уходом. И это также один из механизмов восстановительной сукцессии и структурной перестройки в древостое.

Результаты статистической обработки данных по базисной плотности древесины отдельных деревьев ели показали, что точность опыта в большинстве случаев составляет 1…2 %, коэффициент вариации – 2…5 %. Различия между контролем и опытными секциями недостоверны на 5-процентном уровне. Тем не менее прослеживается тенденция к увеличению плотности на секциях с уходом по сравнению с контрольной на обоих участках. По 6 средним моделям это увеличение составило 0,8…3,7 %, по 10 моделям – 1,6…2,8 %.

После установления средней плотности деревьев каждой категории (крупные, средние и мелкие) для повышения точности определения среднюю плотность древесины насаждений рассчитывали как средневзвешенную по запасам соответствующих категорий [3]. Средневзвешенная плотность в пределах каждой из секций была принята нами за 100 % (табл. 4).

Показатели средневзвешенной плотности очень близки на обоих участках, но все же они несколько ниже в более богатых условиях местопроизрастания (в ельнике кисличном), что соответствует данным [3]. Плотность древесины, определенная по шести средним моделям, несколько больше отличается от средневзвешенной, чем определенная по десяти моделям. В первом случае отклонения составляют от –1,7 до +3,3 %, во втором – 0… +2 %.

Таблица 4

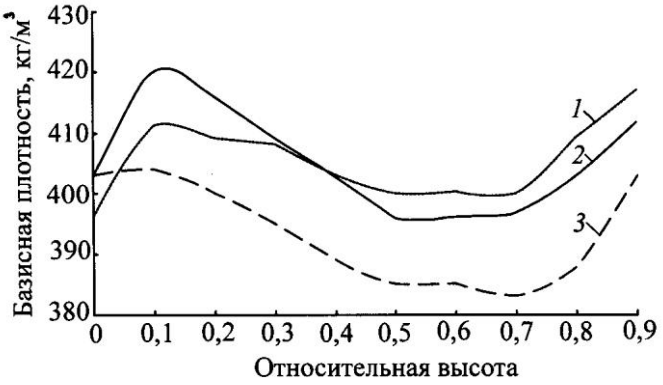
Сравнение базисной плотности, определенной по шести (числитель) и десяти (знаменатель) моделям

Секция	Номер секции	Запас древесины разной категории крупности, %			Средне-взвешенная плотность		Средняя плотность	
		Крупные	Средние	Мелкие	кг/м^3	%	кг/м^3	%
К	10-1	47	24	29	396	100	392/396	99,0/100,0
РУ	10-2	53	25	22	400	100	403/403	100,8/100,8
КУ	10-3	52	25	23	402	100	395/402	98,3/100,0
К	11-1	48	22	30	394	100	397/396	100,8/100,5
РУ	11-2	50	27	23	399	100	412/407	103,3/102,0
КУ	11-3	54	25	21	401	100	402/404	100,2/100,7

В наиболее разреженных вариантах обоих участков увеличивается амплитуда колебаний плотности древесины отдельных деревьев. По-видимому, решающее влияние на варьирование плотности оказывает ветровая нагрузка, резко усиливающаяся в отношении отдельных деревьев, которые вынуждены создавать необходимую прочность ствола за счет увеличения плотности древесины. С другой стороны, деревья, находящиеся в сравнительно комфортных (в отношении ветра) условиях, формируют большую по протяженности и низкоопущенную крону, которая способствует более активному нарастанию ширины годичных слоев, равномерному распределению плотности вдоль ствола и в целом ее снижению.

В ельнике черничном отмечено снижение плотности древесины в нижней половине ствола в направлении от комля к середине (0,4…0,6 *H*), а затем ее возрастание к вершине (см. рисунок). При этом нижняя половина ствола на секциях с уходом в среднем имеет более высокую плотность по сравнению с контролем, по-видимому, вследствие необходимости усиления ветроустойчивости. Верхняя часть ствола на секции с комплексным уходом имеет плотность, несколько сниженную по отношению к контролю, тогда как на секции с разреживанием наблюдается заметное ее увеличение. Наименьшие различия плотности между секциями наблюдаются на уровне пня и на середине ствола, наибольшие – в нижней половине ствола (0,1…0,3 *H*), а также в верхней части кроны (0,7…0,9 *H*).

В ельнике кисличном выявляется отчетливая тенденция возрастания плотности на опытных секциях по всей высоте ствола, за исключением его основания (см. рисунок), где происходит наибольшее увеличение ширины годичных колец. Таким образом, как на разреженных, так и на удобренных участках средневозрастных ельников, различающихся по богатству условий местопроизрастания, составу древостоев, интенсивности разреживаний, выявлена общая тенденция к увеличению плотности древесины по сравнению с контролем. По-видимому, одной из важнейших причин такого результата является возраст начала разреживаний. Имеются данные, свидетельствующие о том, что разреживания, проводимые в молодом древостое, приводят к



а

б

Распределение плотности древесины в продольном направлении ствола в ельнике кисличном (*а*) и черничном (*б*) (по 10 модельным деревьям): *1* – КУ, *2* – РУ, *3* – К

увеличению процента ранней древесины и, как следствие, к уменьшению плотности в годы, следующие за разреживанием. В средневозрастных древостоях ускоренный прирост, следующий за разреживанием, осуществляется на основе более равномерного баланса между ранней и поздней древесиной, что может привести к некоторому увеличению плотности [3]. Нашими исследованиями также выявлена тенденция к повышению доли поздней древесины в ухоженных вариантах, при одновременном увеличении ширины годичных слоев.

Эффективность лесохозяйственных мероприятий невозможно достаточно точно определить объемными показателями прироста древесины [3]. Необходимо знать содержание сухого вещества в древостое на основе базисной плотности древесины.

В табл. 5 приведен расчет содержания стволового древесинного вещества в абсолютно сухом виде по данным базисной плотности на момент последней таксации (2003/04 гг.). Для ели (Е) расчет проведен по категориям крупности деревьев в различных вариантах опыта.

Таблица 5

Содержание сухого вещества в стволовой древесине

7

Порода	Категория крупности деревьев	Запас древесины, м³/га			Базисная плотность, кг/м³			Содержание сухого вещества, т/га		
		К	РУ	КУ	К	РУ	КУ	К	РУ	КУ
		Ельник черничник, 65 лет, II класс бонитета								
Е	Крупные	130	180	183	384	381	391	50	69	72
	Средние	66	85	88	392	403	395	26	34	35
	Мелкие	80	75	81	419	442	435	34	33	35
	Итого Е	276	340	352	-	-	-	110	136	142
С	–	37	5	12	400	400	400	15	2	5
Ос	–	77	-	-	375	-	-	29	-	-

Б	–	43	-	3	490	-	490	21	-	2
	Итого Е+С+Ос+Б	433	345	367	-	-	-	175	138	149
	Отпад+рубка	123	76+109	60+127	385	385	385	47	71	72
	Всего	556	530	554	-	-	-	222	209	221
	Ельник кисличник, 65 лет, Iа класс бонитета									
Е	Крупные	224	182	257	389	385	389	87	70	100
	Средние	103	98	119	397	412	402	41	40	48
	Мелкие	140	85	100	399	414	425	56	35	43
	Итого Е	467	365	476	-	-	-	184	145	191
Б	–	96	166	74	490	490	490	47	81	36
	Итого Е + Б	563	531	550	-	-	-	231	226	227
	Отпад+рубка	241	71+179	67+271	385	385	385	93	96	130
	Всего	804	781	888	-	-	-	324	322	357

В категорию средних деревьев условно включены деревья из средней ступени толщины. Остальные категории образованы деревьями из нижних и верхних ступеней по отношению к средней. В табл. 5 также представлены данные по изъятой древесине на ухоженных секциях и отпаду за 30 лет. Для плотности сосны (С), березы (Б) и осины (Ос) приведены литературные данные.

Общее содержание сухого вещества (с учетом промежуточного пользования и отпада) в ельнике черничном во всех вариантах опыта составляет примерно одинаковую величину. Лишь на разреженной секции оно несколько ниже, по-видимому, вследствие некоторого “переруба” и усиленного отпада (полнота 0,6). Однако на опытных секциях в значительно большей мере представлены запасы сухого вещества ели – породы, за которой и проводили уход. Как уже указывалось, это явилось результатом стабилизации плотности древесины ели на уровне контроля в результате внутриструктурных перестроек и восстановительных процессов.

На разреженной секции в ельнике черничном сухая масса древесины ели больше контроля на 24 %, на удобренной – на 29 %. Кроме того, за два приема рубок ухода на ухоженных секциях получено дополнительно от 110 до 125 м^3 на 1 га древесины (преимущественно еловой).

В ельнике кисличном запасы сухого вещества ели примерно как у контроля. Но по сравнению с разреженной секцией содержание сухого вещества ели на удобренной секции выше на 32 %. Это объясняется тем, что на разреженной секции 11-2 увеличена доля березы по сравнению с березой на удобренном варианте 11-3, что обусловлено, при одинаковых исходных характеристиках древостоев, значительно лучшим ее ростом впоследствии. При этом так же, как и в ельнике черничном, на экспериментальных секциях значительно лучше качество древесных стволов, и за три приема рубок ухода получено дополнительно еловой древесины от 180 до 270 м^3 на 1 га.

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлено преимущество комплексного ухода перед разреживанием. Удобрения ускоряют восстановительные процессы в разреженном древостое и формируют

более устойчивую структуру насаждений. Под влиянием комплексного ухода осуществляется позитивная структурная перестройка как на уровне отдельных деревьев (показатели формы и полнодревесности ствола), так и на внутриструктурном уровне (плотность древесины). Выявленные закономерности подтверждают возможность реального, долговременного и устойчивого повышения производительности высокобонитетных еловых древостоев и увеличения выхода ценной товарной продукции на основе комплексного ухода, что делает его необходимым элементом системы ускоренного целевого лесовыращивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Крылов, В.Н.* Исследование физико-химических свойств древесины сосны обыкновенной из различных лесонасаждений как сырья для производства сульфатной небеленой целлюлозы [Текст]: автореф. дис. … канд. техн. наук / В.Н. Крылов. – Л., 1977. – 20 с.

2. *Мельников, Е.С.* Лесоводственные основы теории и практики комплексного ухода за лесом [Текст]: дис. …доктора с.-х. наук / Мельников Евгений Сергеевич. – СПб., 1999. – 377 с.

3. *Полубояринов, О.И.* Плотность древесины [Текст] / О.И. Полубояринов. – М.: Лесн. пром-сть, 1976. – 160 с.

4. *Полубояринов, О.И.* Оценка качества древесины в насаждении [Текст] / О.И. Полубояринов. – Л.: ЛТА, 1981. – 74 с.

5. *Полубояринов, О.И.* Древесиноведение (таблицы, формулы, графики). учеб. пособие [Текст] / О.И. Полубояринов. – СПб.: ГЛТА, 1997. – 28 с.

6. *Сеннов, С.Н.* Уход за лесом (экологические основы) [Текст] / С.Н. Сеннов. – М.: Лесн. пром-сть, 1984. – 128 с.

7. *Уголев, Б.Н.* Древесиноведение с основами лесного товароведения [Текст] / Б.Н. Уголев. – М.: МГУЛ, 2005. – 340 с.

С.-Петербургская государственная
лесотехническая академия
Поступила 29.05.06

E.S. Melnikov, A.A. Smirnov

Influence of Integrated Care on Wood Quality of High-productive Spruce Forests

When studying the influence of long-term exposure (30 years) to integrated care of high-productive spruce forests it is established that wood quality factors of common spruce don’t differ from bench marks or exceed them.

ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 630*86

Э.И. Гермер

Гермер Эмиль Исаакович родился в 1937 г., окончил в 1962 г. Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, доктор химических наук, директор по новой технике, технологии и науке Северо-Западной лесопромышленной компании. Имеет свыше 160 научных трудов в области химии и технологии варки целлюлозы, в настоящее время занимается технологией, химией и катализом новых и традиционных способов делигнификации древесины.

ИЗУЧЕНИЕ СУПЕРАКТИВНОГО КАТАЛИЗА КИСЛОРОДНО-ЩЕЛОЧНОЙ ДЕЛИГНИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ КОМПЛЕКСАМИ МЕТАЛЛОВ ПЕРЕМЕННОЙ ВАЛЕНТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ В КАЧЕСТВЕ МОДЕЛИ 1,10-ФЕНАНТРОЛИНАТА МЕДИ (II). 3. ПУТИ РЕАЛИЗАЦИИ КАТАЛИЗА И ЕГО МЕХАНИЗМ

Установлено, что суперактивный катализ окислительных процессов делигнификации может быть реализован за счет усиления активности металлов переменной валентности в составе комплекса, образования дополнительного количества лабильных активных центров в макромолекуле лигнина, а также транспорта электронов как внутри полисопряженной системы макромолекулы лигнина, так и, возможно, через токопроводящую среду, в качестве которой может выступать щелок, используемый для делигнификации. Предложена 5-ступенчатая реакционная схема, по которой реализуется суперактивный катализ окислительной (кислородной) делигнификации лигноцеллюлозного сырья.

Ключевые слова: окислительная делигнификация, катализ, комплексы, механизм катализа.

Пути реализации катализа делигнификации комплексами металлов переменной валентности (*МПВ*)

Открытию 1,10-фенантролината меди (II) (ФМ) в качестве суперактивного катализатора кислородно-щелочной (КЩ) делигнификации древесины и вообще лигноцеллюлозного сырья с высоким содержанием лигнина [5–7] предшествовала работа по изучению каталитического действия при этом способе делигнификации собственно 1,10-фенантролина, ускоряющего процесс в 1,5…3,0 раза в зависимости от условий и количества добавки [5, 20 и др.]. Именно при выяснении причин каталитического действия 1,10-фенантролина было установлено, что оно обусловлено его координаци-

ей со следовыми количествами меди (2…5 мг/кг), присутствующими в древесине в очень прочной связи преимущественно с лигнином. Столь низкое содержание меди (в сочетании с очень большой трудностью ее удаления из древесины, что препятствовало выполнению экспериментов по выяснению роли меди в ускорении КЩ делигнификации 1,10-фенантролином) затрудняло понимание того, что даже таких количеств активного металла в составе лигноцеллюлозного матрикса может быть достаточно для реализации его заметного каталитического действия. Однако с позиций химии катализа металлами переменной валентности (МПВ) и их комплексами (но не химии делигнификации) в этом ничего сверхестественного нет. Известно, что металлоферменты, моделями которых являются некоторые комплексы МПВ, превосходят активность соответствующих простых ионов в 10^4 – 10^7 раз [17], а некоторые редокс-превращения могут заметно катализироваться катионами меди или железа уже при их концентрации в растворе всего 10^{-6}…10^{-7} М [11 и др.]. В нашем случае содержание меди в количестве 2…5 мг/кг абс. сухой древесины даже при относительно высоком гидромодуле КЩ варки, равном 20, в пересчете на концентрацию меди в щелоке составляет (1,5…4,0) 10^{-6} М, т.е. входит в указанный интервал. Если при этом учесть, что катализ варочных процессов реагентами, растворенными в щелоке (как и сами эти процессы), согласно известной классификации Эммануэля и Кнорре, является *гетерофазным гомогенным,* когда, несмотря на наличие двух или трех фаз, участвующих в процессе, макромолекула протолигнина полностью окружена раствором, пропитавшим древесную матрицу, в котором исходно равномерно распределены молекулы (ионы) как варочных реагентов, так и катализатора, то становится ясно, что сделанное сопоставление вполне корректно.

Из изложенного выше следует, что механизмы каталитического действия собственно 1,10-фенантролина (phen) и ФМ во многом идентичны, различаясь лишь тем, что в первом случае имеет место координация иона меди, уже координированного с протолигнином в составе древесины, еще и с более активным лигандом – 1,10-фенантролином (благодаря высокому координационному числу меди), а во втором случае уже готовый комплекс – 1,10-фенантролинат меди (II) – координируется своим центральным ионом еще и с макромолекулой лигнина. В обоих случаях образуется комплексный аддукт принципиально одинаковой формулы [Lign…M^n…L_m], рассматривавшийся в работе [7].

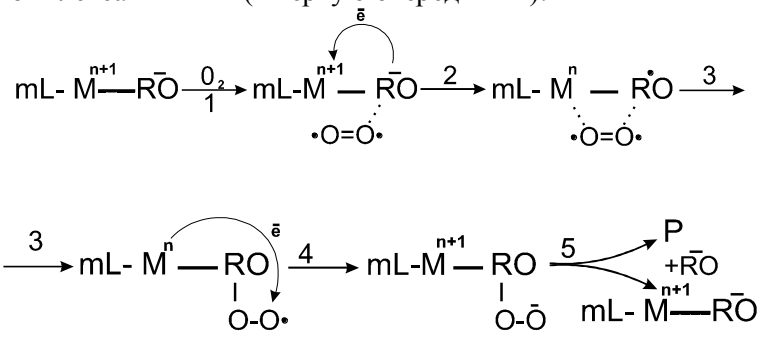
Количество активных центров, возникающих в лигнине в местах образования таких аддуктов, будет относительно невелико даже при катализе ФМ. В реальной КЩ варке для достижения высокого ускорения делигнификации в сочетании с сохранением ее селективности содержание Cu (II) в составе ФМ обычно находится в интервале всего 0,03…0,07 % от массы абс. сухой древесины при β = [phen]/[Cu] = 3,5…6,0. При катализе же только 1,10-фенантролином количество таких центров должно быть еще на пару порядков ниже в связи с отмечавшимся крайне незначительным содержанием меди в протолигнине древесины. В последнем случае необходимо еще

учесть и значительную прочность связи между медью, содержащейся в древесине изначально, и протолигнином. Это еще более затрудняет в данном случае предположение о значимой миграции в макромолекуле лигнина реакционных центров, в которых реализуется катализ редокс-превращений, усиливающих фрагментацию лигнина в процессе делигнификации древесины (подробнее см. ниже). Тем не менее, даже при катализе только 1,10-фенантролином ускорение КЩ делигнификации, как уже отмечалось, вполне значимо и составляет 1,5–3,0 раза.

Таким образом, можно утверждать, что значительную роль в катализе делигнификации комплексами МПВ играет не только возникновение дополнительных активных реакционных центров, но и транспорт электронов. Действительно, более подробное рассмотрение этого вопроса показывает, что активный катализ вполне возможен и при ограниченном числе дополнительных реакционных центров, если учесть, что в макромолекуле лигнина передача электронов, продуцируемых с участием центрального иона комплекса, способна реализовываться не только в пределах той фенилпропановой единицы (ФПЕ), с которой связана медь. При этом следует учесть, что макромолекула лигнина (или значительные ее участки) представляет собой полисопряженную систему. Это обусловливает делокализацию валентных электронов и возможность их переноса по цепи сопряжения к различным участкам макромолекулы лигнина [1]. Более того, перенос электрона на значительные расстояния возможен не только по цепи сопряжения полимера или его сопряженного участка, но и непосредственно через токопроводящую среду [16], каковой, безусловно, является варочный щелок. В несколько иных терминах лигнин вполне можно считать также и *"...биологической электронно-транспортной системой... Перенос же электрона на большие расстояния – наиболее типичное свойство таких систем"* [9].

Механизм катализа комплексами [3, 4, 18, 19, 21, 23]

Ниже, на схеме 1, представлен механизм катализа активными комплексами МПВ, базирующийся на результатах наших исследований каталитической КЩ делигнификации и работ других исследователей по окислению кислородом ряда фенольных и алифатических соединений, катализированных комплексами МПВ (в первую очередь ФМ):



Здесь L – лиганд; M^{n+1} и M^{n} – центральный ион (катион) комплекса в высшей и низшей степени окисления;

$R\bar{O}$ – ионизированная в щелочной среде фенольная структура макромолекулы лигнина с делокализованным отрицательным зарядом;

P – окисленные продукты фрагментации пероксидного интермедиата $RO – OO^{-}$, элиминируемые в щелок.

Рассмотрим отдельные стадии механизма, представленного на схеме 1.

Ступень 1. Сразу после начала варки происходит контакт кислорода с комплексным аддуктом mL...M^{n+1}... $R^{-}O$. При этом молекулярный кислород, как электрофил, имеет большое сродство к ионизированной форме субстрата ($R^{-}O$). Причем, вероятно, на степень реализации этого сродства оказывает заметное влияние наличие фенолят-аниона одновременно в виде четырех известных мезомерных форм. Последнее позволяет рассматривать его как карбанион с частичной локализацией отрицательного заряда на С-атомах ароматического ядра, находящихся в *орто*- и *пара*-положениях к фенольной группе ($OH_{ф}$). Карбанионы среди прочих анионных форм субстратов считаются наиболее активными в реакциях присоединения, в том числе и кислорода [12]. Предполагается, что они играют важную роль в процессах ферментативного окисления, катализируемого диоксигеназами, моделью которых при катализе окисления кислородом ряда соединений считается и ФМ [13]. Кроме того, существенному повышению реакционной способности анионов по отношению к кислороду способствует их координация на активных центрах ферментов, которым в разбираемом нами случае соответствует комплекс МПВ, в частности, связь анионной формы субстрата с центральным ионом комплекса. Не следует думать, что под влиянием кислорода в сфере центрального иона комплекса активируется только субстрат. Эта активация взаимна. Она приводит к тому, что координированный молекулярный кислород становится одним из наиболее сильных окислителей в жидкофазных реакциях [13].

Ступень 2. Значительное сродство к центральному иону активных комплексов МПВ испытывает и кислород. Это сродство обусловлено редокс-лигандными свойствами молекулярного кислорода, не обладающего неподеленными парами электронов для образования обычной (σ-донорной) координационной связи [9]. Вследствие этого, образование металл-кислородной связи донорно-акцепторного характера осуществляется при частичном переносе одного электрона от иона металла в восстановленной форме на разрыхляющую орбиталь молекулы кислорода, так как в восстановленной форме ионы переходных металлов зачастую имеют потенциально вакантные места для связывания редокс-лиганда. Поэтому образование обсуждаемой связи правильней отнести к *ступени 2*, причем к моменту, следующему за восстановлением центрального иона. При этом между центральным ионом и молекулой кислорода образуется промежуточный комплекс с переносом заряда (особенно характерный для меди, железа, кобаль-

та). Именно это взаимодействие, как предполагают Н.М. Эмануэль с сотрудниками, в основном ответственно за активацию кислорода по схеме 2:

$$M^{n+} + O_2 \longrightarrow M^{\overset{\delta+}{n}} \ldots \overset{\delta-}{O_2}\,.$$

Степень переноса заряда в этом интермедиате в значительной степени определяет активность катализатора при образовании свободного радикала на следующей стадии. В результате упомянутого частичного переноса заряда в активном промежуточном комплексе, образуемом на *ступени 2*, создаются условия для облегчения энергетически невыгодной первой стадии восстановления координированной молекулы кислорода (*ступень 3*) и обеспечивается ее необходимая ориентация относительно субстрата в этом комплексном аддукте.

Таким образом, благодаря сродству молекулярного кислорода как к субстрату, так и к центральному иону комплекса, которые, в свою очередь, связаны друг с другом координационными связями, в нашем случае (как и при окислении кислородом ряда алифатических и ароматических соединений, катализируемых комплексами МПВ) образуется трехкомпонентный комплексный аддукт [mLM^{n+1}-R^{-}O...O$_2$], в составе которого реализуется взаимная активация как субстрата, так и кислорода.

Говоря о восстановлении центрального иона как о важнейшем элементе данной стадии механизма по схеме 1, следует упомянуть о наших опытах по катализу КЩ делигнификации 1,10-фенантролинатом меди (I) (ФМ(I)) – $Cu^{+}(phen)_m$ (табл. 1).

Как видно из табл. 1, активность комплексов Cu(I) и Cu(II) при одном и том же лиганде одинакова. Не исключено, что в случае с ФМ(I) это обусловлено тем, что окисление идет также по схеме 1, но начальной стадией в этом случае является *ступень 3*. Фенокси-радикалы (RO), необходимые для образования промежуточного продукта *ступени 2*, в этом случае могут продуцироваться в щелочной среде по тому же механизму, что и при некаталитической КЩ варке. Однако известно, что Cu(I) очень легко окисляется

Таблица 1

Сравнительный катализ 1,10-фенантролинатами меди(I) и меди(II) делигнификации при КЩ варке [21]

Показатель	Значение показателя при варке			
	без добавки	с добавкой		
		phen	$Cu^{2+}(phen)_m$	$Cu^{+}(phen)_m$
Число Каппа	57,8	46,6	21,2	22,3
Выход, % от массы абс. сухой древесины	68,4	65,8	58,9	55,0

Примечание. [Cu(I)] = [Cu(II)] = $1{,}57 \cdot 10^{-5}$M (0,003 % от массы абс. сухой древесины); Cu(I) в виде Cu(CSN); продолжительность варок – 25 мин; остальные условия: опилки размером 0,2…0,3 мм; 7,5 г/л NaOH; гидромодуль 30; t = 150 °C; p_{O_2} = 2,94 МПа.

в Cu(II) кислородом с образованием весьма активного супероксид-аниона O_2, легко акцептируемого лигнином. Поэтому более вероятно, что при катализе ФМ(I) еще на самой ранней стадии Cu(I) в составе комплекса окисляется до Cu(II), чем и объясняется одинаковая активность сравниваемых комплексов.

Реализация *ступени 2* обсуждаемого механизма требует способности центрального иона достаточно быстро и обратимо менять свою степень окисления.

Используя для катализа ФМ, мы убедились в возможности достаточно интенсивной и глубокой кислородной делигнификации древесины даже при pH 4,8...6,8, неизменном в течение всего процесса (табл. 2). Некаталитическая же КЩ делигнификация при той же температуре варки (150...160 °С) весьма значительно замедляется уже при pH < 7,5, а при pH 7,0 вообще не может быть доведена до большой глубины, что связано с недостаточной степенью ионизации $OH_ф$. (Способность реализации КЩ варки при пониженном pH, выраженная менее резко, чем при варке с ФМ, отмечалась и при добавке одного 1,10-фенантролина [25], действующего по такому же механизму, но через координацию с медью, содержащейся в древесине).

Таблица 2

Кислородные варки осиновой стружки в водной среде при различной продолжительности процесса и pH [4]

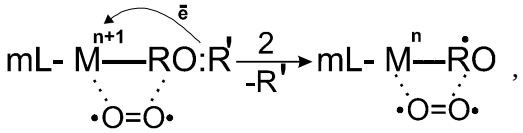
Показатель	Значение показателя при варке						
	без катализатора	с катализатором					
		Медь (II)		1,10-фенантролин		1,10-фенантролинат Cu(II)	
		1	*2*	*1*	*2*	*1*	*2*
Продолжительность варки при 150 °С, мин	70	70	200	70	200	70	200
pH 6,8							
Число Каппа	–	89,5	–	58,6	–	12,1	–
Выход, % от массы абс. сухой древесины	–	79,3	–	72,3	–	59,6	–
pH 5,8							
Число Каппа	99,4	–	–	83,7	12,4	56,5	9,7
Выход, % от массы абс. сухой древесины	86,1	–	–	81,4	52,3	71,5	45,0
pH 4,8							
Число Каппа	97,3	–	55,8	82,6	–	74,8	14,3
Выход, % от массы абс. сухой древесины	83,1	–	63,2	79,4	–	76,9	56,1

Примечание. pH 5,8 и 6,8 – буферная система бура–фосфат, pH 4,8 – бура–янтарная кислота; гидромодуль 100; [Cu(II)] = $6{,}3\cdot10^{-6}$ М (0,004 % от массы абс. сухой древесины); [phen] = $1{,}11\cdot10^{-3}$М; соли в расчете на NaOH – 10 г/л; p_{O_2} = 1,96 МПа.

Это позволяет предположить, что ослабление Н-О связи в фенольных группах лигнина вследствие активации последнего в составе упомянутого выше тройного комплекса столь значительно, что окислительное расщепление $OH_ф$ может быть реализовано посредством депротонирования при высокой температуре варки даже без ионизирующего воздействия щелочи. Сказанное выше хорошо согласуется с мнением ряда исследователей о важной роли депротонирования даже при полном отсутствии органических оснований при окислительном дегидрировании, в частности, комплексами меди с 1,10-фенантролином и α,α'-дипиридилом.

Вследствие значительного депротонирующего или дегидрирующего влияния обсуждаемых активных комплексов МПВ нельзя исключить возможность расщепления с их участием также и простой эфирной связи в алкилированных фенольных группах макромолекул лигнина, поскольку энергия этих двух типов связи относительно близка: 305...340 кДж/моль для О-Н связи в пространственно-затрудненных фенолах и 340...357 кДж/моль для С-О связи в простых эфирах. Как отмечалось выше, некоторые комплексы МПВ, в частности ФМ, считаются моделями оксигеназ. Последние же способны (например при ферментативном окислении алканов) расщеплять даже С-Н связи, энергия которых в алканах составляет около 418 кДж/моль, что значительно выше энергии диссоциации простой эфирной связи.

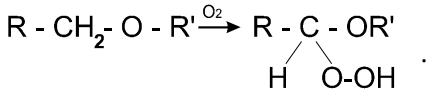
С учетом выше изложенного, *ступень 2* схемы 1 можно представить как схему 3:



где R' = H, Ar, Alk.

Таким образом, при реализации *ступени 2* по схеме 3 появляется новый канал образования феноксильных радикалов, через которые, главным образом, осуществляется процесс фрагментации лигнина при кислородной варке. Вероятнее всего, что превращения по схеме 3 начинают доминировать при кислородной делигнификации лишь в нейтральной или слабо кислой среде, когда ионизация $OH_ф$ весьма ограничена даже при высокой температуре варки.

С учетом выше изложенного, стабильность простых арил-арильных или арил-алкильных эфирных связей при каталитической КЩ варке все равно проблематична, поскольку известна реакция оксигенирования простых эфиров по схеме 4:



Эта реакция идет в обычных условиях медленно, но, вероятно, заметно ускоряется в результате активации как субстрата, так и кислорода под действием активного комплекса МПВ в составе упоминавшегося трехкомпонентного аддукта [mL – M^{n+1} – ROR' ... O_2]. Продукт же, получаемый по схеме 4, подобен пероксидным интермедиатам, через которые реализуется фрагментация лигнина при КЩ делигнификации.

Ступень 3 схемы 1 иллюстрирует рекомбинацию координированного молекулярного кислорода (бирадикала) со свободным электроном С-атома одной из мезомерных форм феноксi-радикала. В результате происходит диоксигенирование лигнина.

На *ступени 4* реализуется одноэлектронное восстановление свободно-радикального пероксидного интермедиата до относительно стабильной структуры анионного типа. При этом донор – центральный ион комплекса – возвращается в исходную (высшую) степень окисления. Образование и восстановление свободно-радикальных интермедиатов в схеме 1 происходит без выхода свободных радикалов в объем.

Ступень 5 иллюстрирует фрагментацию диоксигенированной структуры лигнина, координированной с комплексом МПВ. Эта фрагментация может идти непосредственно через пероксид-анионные структуры, а чаще – через их превращение в диоксетановые и эпокисные интермедиаты. Со *ступенью 5* и рассматриваемым механизмом катализа в целом связан вопрос о преобладании в процессе реальной каталитической варки тех или иных направлений в принципе обратимых параллельных реакций по схеме 5:

$$mL - M^{n+1} - R \rightleftarrows mL - R + M^{n+1}; \quad (1)$$

$$mL - M^{n+1} - R \rightleftarrows mL - M^{n+1} + R; \quad (2)$$

$$mL - M^{n+1} \rightleftarrows mL + M^{n+1}; \quad (3)$$

$$R + M^{n+1} \rightleftarrows R - M^{n+1}, \quad (4)$$

где R – структуры лигнина древесного остатка или щелока, способные координироваться с комплексом mL – M^{n+1} или (и) с соответствующим свободным катионом.

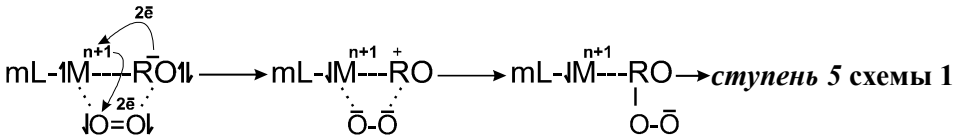
Как следует из схемы 5, представленные реакции предполагают различные варианты разрушения и образования вновь комплексов mL–M^{n+1}– R. Однако, вероятнее всего, степень реализации этих параллельных реакций неодинакова и их роль в катализе комплексами МПВ неравноценна. Легче всего допустить возможность реализации прямых и обратных реакций по схемам (1) и (3), поскольку с увеличением показателя β = [phen] / [Cu^{2+}] при [Cu^{2+}] = const активность добавки ФМ при варке возрастала (до определенного предела). Ясна и поэтому не нуждается в комментариях схема 4.

Элементарные расчеты показывают, что на 1 г-атом меди, добавленной в состав ФМ, приходится около 150–250 ФПЕ протолигнина. Поэтому

аномально высокая активность катализа, которую демонстрирует ФМ, позволяет предположить наличие реакции (2) с последующей реализацией реакции, обратной ей, но в новом месте локализации комплекса на макромолекуле лигнина древесного остатка. Однако, по-видимому, реакция (2) не получает при варке значительного развития, так как результаты нашей работы показали, что основное количество катализатора прочно удерживается на волокнах в течение всего процесса их делигнификации вплоть до перехода фрагментов лигнина, с которыми и связан катализатор, из твердой фазы в щелок [7]. Высокая прочность связи лигнина с ФМ, сочетающаяся в то же время с необычно высокой активностью последнего, вероятно, возможна только в том случае, если передача электронов между лигнином и центральным ионом комплекса осуществляется не только в пределах той ФПЕ, с которой координирован комплекс, но и по системе сопряженных связей макромолекулы лигнина, но и даже, что оказывается возможно, непосредственно через щелок. Более подробно этот вопрос обсуждался выше при рассмотрении каталитического действия добавки 1,10-фенантролина.

Достаточно важен вопрос о лимитирующей стадии кислородной делигнификации при его катализе комплексами МПВ. Учитывая биомиметический характер этого катализа, можно предположить, что по аналогии с окислением кислородом ряда ароматических субстратов в полной микросомальной системе [10] лимитирующей стадией рассматриваемого каталитического процесса, вероятнее всего, является одноэлектронное восстановление пероксид-радикала в перокси-анион в составе трехкомпонентного комплекса (*ступень 4* схемы 1). Известное же весьма активное каталитическое влияние обсуждаемых комплексов на разложение арилгидропероксидов и пероксидов вряд ли лимитирует каталитическую КЩ делигнификацию, поскольку, например, энергия О-О связи в этих соединениях (125...145 кДж/моль) значительно уступает энергии О-Н и О-R связи (см. выше) соответственно в свободных и алкилированных фенольных группах.

Необходимо рассмотреть и оценить вероятность реализации еще одного, в принципе возможного, механизма катализа комплексами МПВ, который имеет ряд общих черт с представленным выше механизмом по схеме 1 и кинетически неотличим от него, но реализуется посредством одновременного двухэлектронного переноса: внутри упоминавшегося трехкомпонентного комплекса происходит одновременная передача двух электронов от координированного карбаниона $R^{-}O$ на молекулу кислорода через центральный ион комплекса по схеме 6:

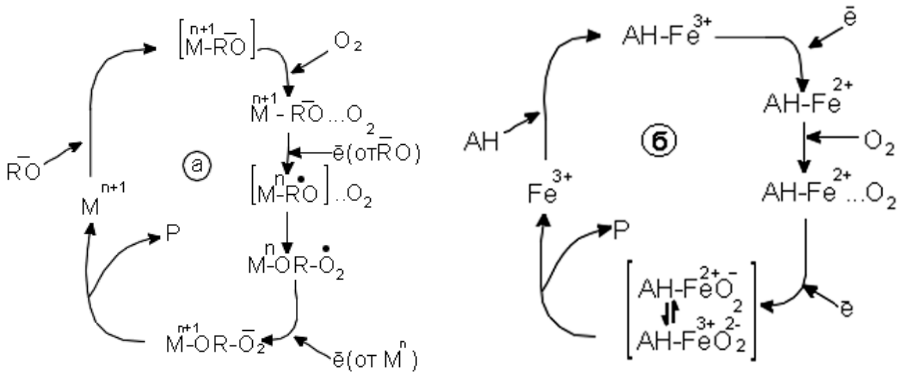


При этом в качестве интермедиата образуется карбоний-катион. Возможность образования подобных частиц в составе макромолекулы лигнина постулируется при некоторых его окислительных превращениях [22]. С точки зрения термодинамики двухэлектронное восстановление кислорода значительно выгоднее двух последовательных одноэлектронных переносов. Однако, как правило, такое восстановление кислорода не реализуется из-за запрета по спину (принцип Паули). В тоже время, по всей видимости, при катализе комплексами МПВ такие многоэлектронные реакции с участием кислорода возможны, так как запрет по спину снимается благодаря изменению валентного состояния центрального иона, в то время как суммарный спин системы не меняется (схема 6). При этом в качестве продукта получается пероксид такого же типа, как и в схеме 1 (*ступень 4)*.

Для нашей системы, по-видимому, более вероятен механизм с одноэлектронными переходами по схеме 1, поскольку механизм по схеме 6 предполагается лишь для апротонных сред, способствующих значительному увеличению донорной способности анионов. Следует также учесть, что в случае использования, например ФМ, одновременный перенос двух электронов по схеме 6 вероятнее при Cu(I), а не Cu(II) в качестве центрального иона (наш случай), поскольку донорная активность последней ниже. Кроме того, при повышенных температурах и одноэлектронное восстановление кислорода способно происходить с большими скоростями. Однако следует иметь в виду, что Cu(I) образуется в составе комплексного интермедиата и в обсуждаемом нами механизме с одноэлектронными переходами (схема 1, *ступени 2 и 3*). Кроме того, предполагается, что при окислении кислородом некоторых протонных органических соединений (например метанола) с участием комплексов МПВ (в частности α,α'dipy Cu(I)) в нейтральной среде (у нас слабо щелочная) окисление происходит по смешанному одно- и двухэлектронному механизму [8]. Поэтому и в нашем случае нельзя исключать возможность реализации такого смешанного механизма.

Весьма важен вопрос, связанный с биомиметическим характером обсуждаемого катализа комплексами кислородной делигнификации. Модельность его механизма механизму действия ферментных систем позволяет лучше понять причину необычно высокой для катализаторов делигнификации активности, проявляемой, в частности, ФМ. Это также делает возможным дальнейшее ее повышение путем достижения еще большего подобия действию ферментов при подборе центральных ионов, соединений-лигандов, а также при модификации последних введением заместителей. Выше уже отмечалось сходство некоторых характеристик и отдельных элементов механизма действия у обсуждаемых комплексных катализаторов и у таких ферментов, как оксигеназы, оксидазы и другие оксидоредуктазы. Каталитическое действие активных комплексов МПВ, в том числе и ФМ, при окислении молекулярным кислородом многих классов органических соединений рядом исследователей однозначно рассматривается как биомиметическое [10, 13–15 и др.]. Есть основание для использования подобной аналогии применительно к действию катализаторов этого типа в процессе КЩ

делигнификации. В этой связи сравним на схеме 7 механизм катализа КЩ делигнификации активными комплексами металлов переменной валентности (*а*) с механизмом действия ферментной системы микросом печени (*б*) – одной из наиболее известных в биохимии ферментных систем класса оксидоредуктаз [18]:



а *б*

Здесь обозначено АН – субстрат; M^n и M^{n+1} – комплекс МПВ в низшей и высшей степени окисления центрального иона; Р – продукты (остальные обозначения приведены на схеме 1).

Как видно из сопоставления механизмов *а* и *б* схемы 7, они почти подобны. Различие заключается лишь в том, что в механизме (*а*) два одноэлектронных перехода осуществляются внутримолекулярно, а в механизме (*б*) при окислении субстрата в составе фермент-субстратного комплекса АН–Fe(III) оба электрона поступают из трехкомпонентной системы, состоящей из цитохрома Р-450, фосфолипидов и редуктазы [10]. Есть еще одно непринципиальное отличие: в механизме *а* молекулярный кислород присоединяется к анионной форме субстрата (к которой он имеет высокое сродство даже безотносительно влияния активного комплекса МПВ) не после, как в механизме *б*, а до восстановления центрального иона комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Белькова, Л.П.* К характеристике системы полисопряженных связей, образующихся при термообработке лигнина [Текст] / Л.П. Белькова, Т.Н. Скрипченко, Г.Э. Домбург // Химия древесины. – 1984. – № 2. – С. 39–41.

2. *Гермер, Э.И.* Интенсификация кислородно-щелочной делигнификации лигноцеллюлозных материалов с помощью *о*-фенантролина. 4. Влияние pH варочного процесса на кинетику делигнификации [Текст] / Э.И. Гермер // Химия древесины. – 1992. – № 4. – 5. – С. 46–55.

3. *Гермер, Э.И.* Кинетика делигнификации при кислородно-щелочной варке с наиболее эффективными катализаторами [Текст] / Э.И.Гермер, А.А. Сиротенко // 2-я Междунар. науч.-техн. конф. “Pap-For’ 93 ”: информ. сообщения. – СПб., 1993. – С. 12 – 13, 69–70 (in Engl.).

4. *Гермер, Э.И.* Кислородная делигнификация древесины с добавкой суперкатализатора при необычно низких значения pH [Текст] / Э.И. Гермер // 4-я Междунар. науч.-техн. конф. “Pap-For’ 96”: информ. сообщения. – СПб., 1996. – С. 14 – 15, 60 – 61 (in Engl.).

5. *Гермер, Э.И.* Химизм и катализ кислородно-щелочной делигнификации древесины [Текст]: дис…д-ра хим. наук / Гермер Эмиль Исаакович – С.-Петербург, 1999. – 130 с.

6. *Гермер, Э.И.* Изучение суперактивного катализа кислородно-щелочной делигнификации древесины комплексами металлов переменной валентности с использованием в качестве модели 1,10-фенантролината меди (II). 1. Подход к изучению проблемы. Эффективность действия 1,10-фенантролината меди (II) // Лесн. журн. – 2006. – № 3. – С. 70 – 82. – (Изв. высш. учеб. заведений).

7. *Гермер, Э.И.* Изучение суперактивного катализа кислородно-щелочной делигнификации древесины комплексами металлов переменной валентности с использованием в качестве модели 1,10-фенантролината меди (II). 2.Основные факторы, характеризующие комплексное соединение и его способность быть катализатором редокс-процессов // Лесн. журн. – 2006. – № 3. – С. 82 – 89. – (Изв. высш. учеб. заведений).

8. *Горбунова, Н.В.* Одно-, двухэлектронные реакции ионов меди в процессах окисления: автореф. дис.…канд. хим. наук [Текст] / Горбунова Н.В. – М., 1976. – 25 с.

9. *Козлова, Н.В.* Активация кислорода металлоферментами и их моделями [Текст] / Н.В. Козлова, Ю.Н. Скурлатов // Успехи химии. – 1989. – Т. 58, № 2. – С. 234–249.

10. *Метелица, Д.И.* Активация кислорода ферментными системами [Текст] / Д.И. Метелица. – М.: Наука, 1982. – 256 с.

11. *Рогинский, В.А.* Фенольные антиоксиданты: реакционная способность и эффективность [Текст] / В.А. Рогинский. – М.: Наука, 1988. – 247 с.

12. *Сайкс, П.* Механизмы реакций в органической химии [Текст] / П. Сайкс; пер. англ. – М.: Химия, 1977. – 319 с.

13. *Скибида, И.П.* Каталитические системы на основе Cu^{I} и Cu^{II} как модели оксидаз и оксигеназ в реакциях окисления молекулярным кислородом [Текст] / И.П. Скибида, А.М. Сахаров // Российский химический журнал. – 1995. – Т. 39, № 1. – С. 14–31.

14. *Скурлатов, Ю.И.* Элементарные механизмы активации кислорода [Текст]: автореф. дис…. докт. хим. наук. / Скурлатов Ю.И. – М., 1981. – 48 с.

15. *Сычев, А.Я.* Каталитические реакции и охрана окружающей среды [Текст] / А.Я. Сычев [и др.]. – Кишинев: Штиинца, 1983. – 272 с.

16. *Чупка, Э.И.* Автокаталитические процессы при окислении лигнина в щелочных средах [Текст] / Э.И. Чупка [и др.] // Химия природных соединений. – 1988. – № 3. – С. 426–433.

17. *Яцимирский, К.Б.* Биологические аспекты координационной химии [Текст] / К.Б. Яцимирский [и др.]. – К.: Наук. думка, 1979. – 266 с.

18. *Germer, E.I.* Chemistry and Mechanism of catalysis of Oxygen-Alkaline Delignification by Some Complex Compounds [Text] / E.I. Germer // 5th European Workshop on Lignocellulosics and Pulp: Poster Presentation. – Aveiro, Portugal, 1998. – P. 33 – 38.

19. *Germer, E.I.* Effective catalysis of oxygen-alkaline wood delignification by the transition metals complexes [Text] / E.I. Germer // Intern. Conference “Cellucon’ 98”.

Pulp for Papermaking-Fibre and Surfase Properties: book of abstracts. – Turky, Finland, 1998. – P. 15.

20. *Germer, E.I.* Oxygen-alkaline delignification catalysis [Text] / E.I. Germer // Ligno-cellulosics – Science, Technology, Development and Use. – Ed.: J.F. Kennedy, G.O. Phillips, P.A. Williams; Ellis Hoorwood Ltd., 1992. – P. 227 – 237.

21. *Germer, E.I.* The catalytic oxygen pulping [Text] / E.I. Germer // Fourth European Workshop on Lignocellulosics and Pulp: proceedings. – Stresa, Italy, 1996. – Part 2, topic B. – P. 412 – 416.

22. *Gierer, J.* The chemistry of TCF bleaching [Text] / J. Gierer // 8-th Intern. Symp. of Wood and Pulping Chemistry. – Helsinki, Finland, 1995. – Vol. I. – P.285 – 291.

23. *Germer, E.I.* The essence of catalysis by transition metal complexes of the oxygen-alkali wood delignification [Text] / E.I. Germer // 9th Intern. Symp. on Homogeneous Catalysis: abstracts. – Jerusalem, Israel, 1994. – P. 228 – 229.

СПб. ОО «Экология и бизнес»
Поступила 24.01.05

E.I. Germer

Study of Superactive Catalysis of Acid-Alkaline Delignification of Wood by Complexes of Variable Valency Metals by Using 1,10-Phenanthrolinate Copper (II) as a Model. 3. Ways of Catalysis Realization and its Mechanism

It is established that superactive catalysis of delignification oxidation processes could be realized thanks to activity intensification of variable valency metals, formation of additional number of labile active centers in lignin macromolecule, as well as transportation of electrons both inside polyconjugate system of lignin macromolecule and, possibly, through conductivity medium, alkaline solution being used for delignification. Five-stage reaction scheme is proposed according to which superactive catalysis of oxidative (oxygen) delignification of lignocellulose raw material is realized.

УДК 541.64:547.992.3

А.П. Карманов, Д.В. Матвеев, Л.С. Кочева

Карманов Анатолий Петрович родился в 1948 г., окончил в 1971 г. Куйбышевский политехнический институт, доктор химических наук, заведующий кафедрой общей и прикладной экологии Сыктывкарского лесного института, Института химии Коми НЦ УрО РАН. Имеет более 250 печатных работ в области физикохимии полимеров, химии лигнина, нелинейной динамики, самоорганизации и фракталов.

Матвеев Дмитрий Владимирович родился в 1974 г., кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории физикохимии лигнина Института химии Коми НЦ УрО РАН. Имеет более 30 научных трудов в области нелинейной динамики, фрактального анализа, электронной микроскопии, изучения надмолекулярной структуры.

Кочева Людмила Сергеевна родилась в 1957 г., кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физикохимии лигнина Института химии Коми НЦ УрО РАН. Имеет более 120 печатных работ в области химии и технологии растительных веществ, структурной организации биополимеров, самоорганизации, электронной микроскопии.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИГНИНА КЛЕТОЧНЫХ ОБОЛОЧЕК НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ ДЕЛИГНИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ СИНЕРГЕТИКИ И НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ*

Изучены закономерности изменений лигнина клеточных оболочек древесины сосны на различных стадиях сульфатной делигнификации. Полученные лигнинные скелеты исследованы методом электронной микроскопии. Для количественной характеристики распределения лигнина во вторичной клеточной оболочке использованы методы синергетики и нелинейной динамики.

Ключевые слова: лигнин, надмолекулярная структура, сульфатная варка, электронная микроскопия, клеточные оболочки, лигнинные скелеты, древесина сосны, пока-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 04-03-96029).

затель Херста, фрактальная размерность, скейлинг, нелинейная динамика, синергетика.

В настоящее время в России, как и во многих других странах, сульфатная варка является доминирующим способом получения технической целлюлозы. Обладая рядом неоспоримых достоинств в сравнении с другими варочными процессами, она имеет такой недостаток, как низкая белизна целлюлозы, что требует значительных затрат на ее последующую отбелку. Это связано с особенностями локализации остаточного лигнина на волокнах растительной ткани после варки. Темный цвет обусловлен наличием значительного количества лигнина во внешних слоях клеточной оболочки. Сравнительное исследование надмолекулярной структуры лигнина клеточных оболочек древесины на разных стадиях делигнификации в процессе сульфатной варки позволяет установить закономерности и последовательность его извлечения из различных морфологических элементов растительной ткани.

Цель данного исследования – изучить изменения и дать количественную характеристику клеточных оболочек трахеид древесины сосны на различных стадиях сульфатной делигнификации.

Сульфатную варку образцов древесины (брусочки сечением 1x1 мм и длиной 10 мм) осуществляли в изотермических условиях при температуре T = 160 °С и высоком значении гидромодуля (1:100). Состав сульфатного белого щелока: гидроксид натрия – 0,82 М, сульфид натрия – 0,18 М. Продолжительность процесса делигнификации τ = 10, 20, 30, 45, 60 и 75 мин, степень делигнификации α изменялась от 13 до 60 %.

На рис. 1 приведена кинетическая кривая делигнификации древесины. Полулогарифмическая анаморфоза кинетической кривой представляет собой прямую. Это означает, что скорость растворения лигнина в каждый момент времени пропорциональна его концентрации. Аналогичный результат получен Вильдером и Далески [5], которые установили, что изотермическая щелочная варка древесины при 160 °С вплоть до глубоких степеней делигнификации протекает в соответствии с уравнением первого порядка. Приведенные данные показывают, что процесс делигнификации древесины в изотермических условиях при указанной температуре и неизменной концентрации щелочного реагента не осложнен заметными побочными процессами, в том числе процессами, которые квалифицируются как явления самоорганизации.

Из образцов древесины после варки готовили лигнинные скелеты путем обработки водным раствором периодата аммония (0,08 М, pH 7,0) при комнатной температуре в течение 7 сут, которые после обезвоживания пропитывали смесью метил- и бутилметакрилатов. Полимеризацию проводили в присутствии перекиси бензоила при T = 20 °С в течение 24 ч. Для приготовления поперечных ультратонких срезов лигнинных скелетов использовали ультамикротом УМТП-1. Оттенение – платино-палладиевый сплав.

Съемки проводили с помощью электронного микроскопа УЭМК-100к при рабочем напряжении 80 кВ. Степень увеличения – 10000×. Фотоизображения

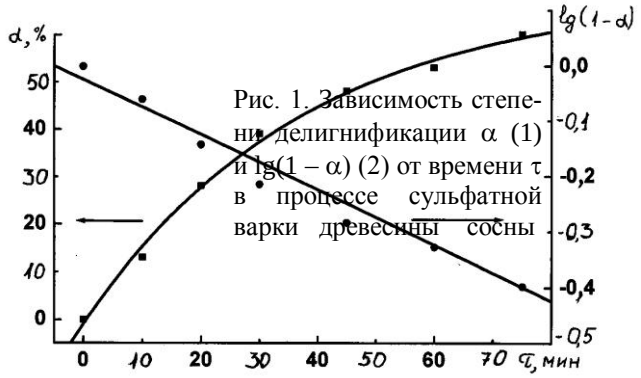


Рис. 1. Зависимость степени делигнификации α (1) и lg(1 – α) (2) от времени τ в процессе сульфатной варки древесины сосны

вводили в память компьютера в виде растровых изображений с разрешающей способностью 400 dpi при размере изображения 24×18 см, что соответствует размеру 3400×2756 пикселей. В качестве объекта сравнения готовили лигнинные скелеты из сосновой древесины (образцы Л-1, -2, и -3), степень делигнификации α = 0 %.

Традиционный подход к изучению изменений ультраструктуры лигнина клеточных оболочек заключается в визуальном анализе микрофотографий (рис. 2, 3). При продолжительности сульфатной варки 10 мин (Л-4)

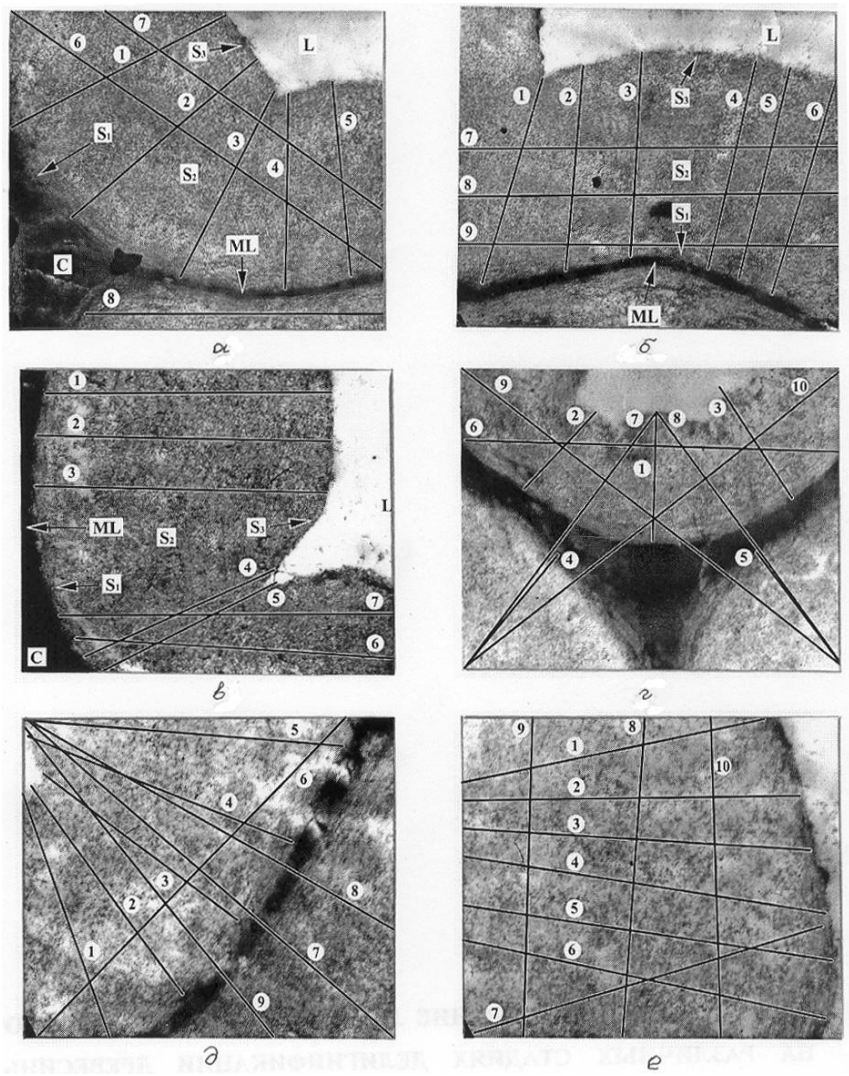


Рис. 2. Микрофотографии поперечного среза лигнинного скелета трахеиды сосновой древесины: *а* – Л-1; *б* – Л-2; *в* – Л-3; *г* – Л-4; *д* – Л-5; *е* – Л-6 (прямыми линиями показаны сечения, по которым производили сканирование; L – люмен, ML – сложная срединная пластинка, C – уголковое утолщение, S_1, S_2, S_3 – слои вторичной клеточной стенки)

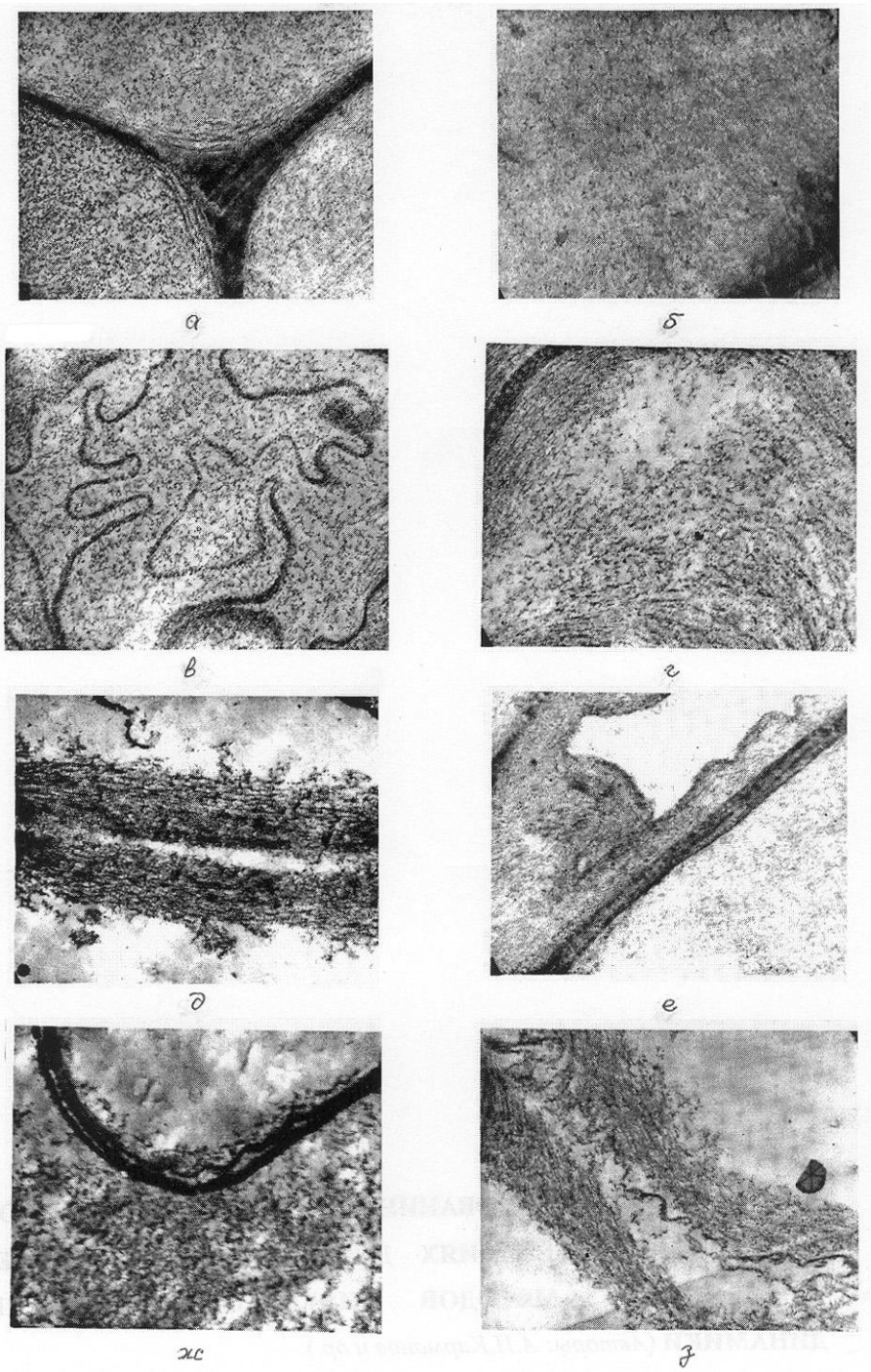


Рис. 3. Микрофотографии поперечного среза лигнинного скелета трахеиды частично делигнифицированной сосновой древесины: *а* – Л-7; *б* – Л-8; *в* – Л-9; *г* – Л-10; *д* – Л-11; *е* – Л-12; *ж* – Л-13; *з* – Л-14

из древесины удаляется 13 % лигнина. На этой стадии делигнификации видимые изменения ультраструктуры лигнина клеточных оболочек зафиксировать достаточно сложно. Однако можно отметить некоторое разрыхление вторичной клеточной оболочки, при этом во внешних слоях более четко просматриваются фибриллярные структуры.

После 20 мин варки (Л-5) наблюдается дальнейшее растворение лигнина (α = 28 %) и разрыхление наружного и центрального слоев вторичной клеточной стенки. Иногда отмечается повреждение межклеточного слоя. Через 30 мин варки растворяется более трети лигнина (Л-6 … -8), α = 39 %. Срединная пластинка (слой ML) остается достаточно компактной. Происходит дальнейшее удаление лигнина из основного слоя вторичной клеточной стенки S_2. Внутренний слой S_3, примыкающий к люмену, сохраняет высокую электронную плотность и устойчивость к варочному раствору. В наружном слое S_1 более четко просматривается его ламеллярная структура.

Варка в течение 45 мин (Л-9, -10) приводит к удалению почти половины лигнина древесины (α = 48 %). Микрофотографии поперечных срезов свидетельствуют о значительной делигнификации слоя S_2. Лигнин вторичной клеточной оболочки находится в набухшем состоянии и образует аморфную слабо структурированную пористую массу, причем в слое S_1 лигнинный скелет образует плотные ламеллярные структуры, в слое S_2 – редкую сетку из агрегированных частиц. По истечении 60 мин (α = 53 %) отмечены существенные изменения всех слоев клеточной оболочки (Л-11 … -13). Разрушение межклеточного слоя ML очень неравномерное. Он или сохраняется почти полностью, или частично растворяется, при этом смежные первичные оболочки разъединяются. Внутренний слой S_3 является более электронно-плотным, чем слой S_2.

После варки в течение 75 мин (Л-14) удаляется 60 % всего лигнина древесины. Наблюдается интенсивное разрыхление и растворение межклеточного слоя и межклетников и разъединение волокон (смежных трахеид). Первичная оболочка часто имеет форму жгута, оторвавшегося от вторичной оболочки. Все слои вторичной клеточной стенки достаточно рыхлые, но компактность основного слоя S_2 сохраняется.

Проведенный выше анализ надмолекулярной структуры лигнина клеточных оболочек свидетельствует о значительных изменениях в трахеидах древесины в процессе сульфатной варки. Однако недостатки подобного анализа очевидны. Для получения объективной картины необходим просмотр большого количества микрофотографий, при этом информация носит качественный характер.

Для выявления закономерностей изменения надмолекулярной структуры лигнина в процессе щелочной делигнификации вычислено распределение микрочастиц лигнина по размерам. Как видно из (рис. 4), в процессе делигнификации микрочастицы постепенно растворяются и разрушаются, причем на начальных стадиях их количество уменьшается наиболее быстро.

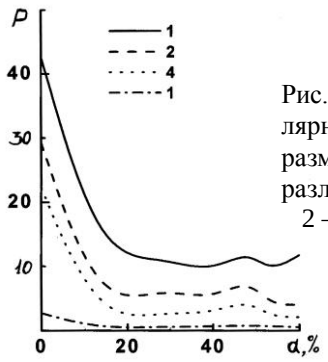


Рис. 4. Зависимость количества надмолекулярных частиц P (шт./мкм^2) лигнина разного размера от степени делигнификации α при различной длине волны: 1 – 10…20 нм; 2 – 20…40; 3 – 40…100; 4 – 100…200 нм

Процентное соотношение микрочастиц разного размера (табл. 1) показывает, что происходит относительное увеличение доли микрочастиц малого размера и, соответственно, уменьшение доли более крупных частиц.

Следующий этап работы состоял в установлении закономерностей распределения лигнина и количественных параметров его структурной упорядоченности [1]. Для решения этой задачи микрофотографии лигнина клеточных оболочек вводили в память компьютера в виде массива данных $h(x,y)$, где h – интенсивность исследуемого объекта в точке с координатами *x, y*. Сечение по некоторой прямой $y = kx + b$ (на рис. 2 сечения обозначены цифрами) дает денситограмму – пространственный ряд (рис. 5).

Процедура анализа денситограмм состояла в следующем. Во-первых, по набору величин h, характеризующих концентрацию лигнина в N эквидистантных точках по пространственной оси x, строили псевдофазовые портреты методом Паккарда (рис. 5, врезки). Во-вторых, вычисляли функции Хевисайда. В-третьих, находили корреляционные размерности псевдофазовых портретов. Реализация данного алгоритма позволяет ответить на вопрос: порядок или бесструктурный хаос?, а также установить параметры

Таблица 1

Закономерности распределения микрочастиц лигнина по размерам в зависимости от степени делигнификации

Образец	Степень делигнификации, %	Доля, %, микрочастиц размером, нм			
		10…20	20…40	40…100	100…200
Л-1, -2, -3	0	46	30	21	3
Л-4	13	70	20	8	2
Л-5	28	53	31	13	3
Л-6, -7, -8	39	55	26	15	4
Л-9, -10	48	48	31	18	3
Л-11, -12, -13	53	57	24	14	5
Л-14	60	64	22	11	3

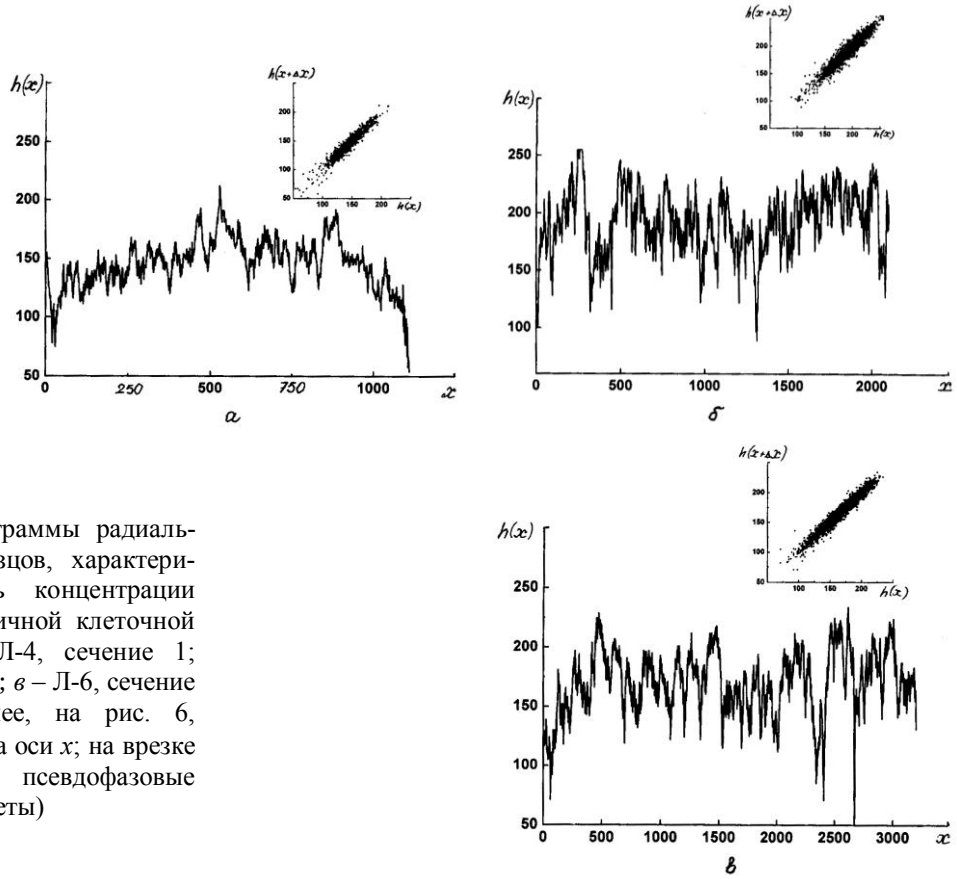


Рис. 5. Денситограммы радиальных серий образцов, характеризующие уровень концентрации лигнина во вторичной клеточной оболочке: *а* – Л-4, сечение 1; *б* – Л-5, сечение 3; *в* – Л-6, сечение 4 (здесь и далее, на рис. 6, 1 мкм ~ 600 ед. на оси *x*; на врезке – двумерные псевдофазовые портреты)

порядка типа фрактальных размерностей, если система оказывается упорядоченной.

Как видно из рис. 5, 6, где представлены денситограммы вторичной клеточной оболочки образцов древесины, подвергнутых сульфатной варке в течение определенного времени, надмолекулярная структура характеризуется внешне хаотическим распределением лигнина как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях. Аналогичные картины хаотического распределения лигнина были зафиксированы для структуры его исходных препаратов [2]. Распределение точек на двухмерных псевдофазовых портретах также является визуально хаотическим, при этом их плотность убывает к периферии псевдофазового пространства.

Для идентификации закономерностей распределения этих точек в координатах $h(x+\Delta x)$, $h(x)$ и выявления возможного внутреннего порядка системы использован алгоритм Грассбергера–Прокаччиа с определением корреляционных функций Хевисайда:

$$C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^{N} \Theta\left(r - \left|x_i - x_j\right|\right),$$

где N – число точек траектории;

Θ – функция Хевисайда,

$$\Theta(r) = \begin{cases} 1, \text{ если} > 0 \\ 0, \text{ если} \le 0 \end{cases};$$

r – заданное расстояние, на котором ведется подсчет точек;

$\left| x_i - x_j \right|$ – расстояние от i-й до j-й точки;

x_i – точка фазовой траектории с координатами

$$\left(h(x), h(x+\Delta x), h(x+2\Delta x), ..., h(x+(D-1)\Delta x)\right);$$

D – пространство вложения.

В результате вычислений была показана выполнимость уравнения

$$\log C(r) = d_c \log(r),$$

где d_c – корреляционная размерность.

Это означает, что интегральная корреляционная функция анализируемой системы является инвариантной мерой, т. е. распределение множества точек в псевдофазовом пространстве подчиняется принципу скейлинга и фрактальным закономерностям. Таким образом, можно определить фрак-

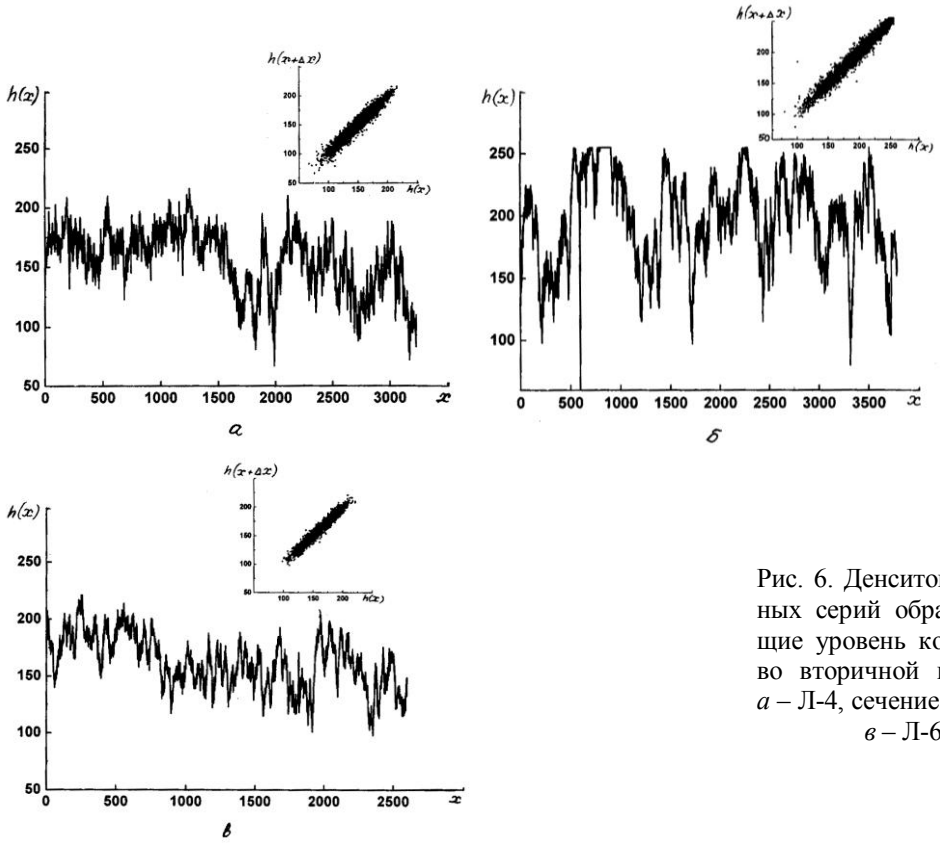


Рис. 6. Денситограммы тангенциальных серий образцов, характеризующие уровень концентрации лигнина во вторичной клеточной оболочке: *а* – Л-4, сечение 6; *б* – Л-5, сечение 6; *в* – Л-6, сечение 8

Таблица 2

Характеристики ультраструктуры лигнина вторичных клеточных оболочек

Образец	H	$d_c(2)$	$d_c(3)$	$d_c(a)$
Исходная древесина				
Л-1	0,83/0,89	1,84/1,84	2,87/2,95	5,14/5,16
Л-2	0,86/0,87	1,87/1,84	2,87/2,97	5,25/5,29
Л-3	0,88/0,87	1,90/1,89	2,80/2,92	4,81/5,06
Среднее значение показателя	0,86/0,88	1,87/1,85	2,85/2,95	5,07/5,17
Частично делигнифицированная древесина				
Л-4	0,90/0,93	1,94/1,80	2,86/2,95	5,07/5,85
Л-5	0,89/0,87	1,85/1,93	2,88/2,35	4,64/3,10
Л-6	0,87/0,90	1,95/1,96	2,96/2,95	5,61/6,21
Среднее значение показателя	0,88/0,90	1,88/1,90	2,82/2,75	4,90/5,05

Примечание. В числителе приведены значения показателей для радиальных сечений, в знаменателе – для тангенциальных сечений.

тальные размерности (в данном случае определяли корреляционную размерность d_c) по наклону прямолинейных участков зависимости $C(r) = f(r)$. Результаты расчетов этих размерностей для двух- и трехмерных псевдофазовых портретов $d_c(2)$ и $d_c(3)$ представлены в табл. 2.

Размерности двухмерных псевдофазовых портретов $d_c(2)$, как оказалось, являются величинами дробными (нецелыми) и практически совпадают для всех образцов ~ (1,90), тогда как размерность трехмерных псевдофазовых траекторий $d_c(3)$ изменяется в пределах от 2,86 до 2,35 в зависимости от степени делигнификации древесины при среднем значении 2,82 (радиальное направление) и 2,75 (тангенциальное направление). Для исходных образцов наблюдается меньший разброс значений (табл. 2).

Как известно [3], для низкоразмерных систем корреляционная размерность фазовых траекторий в пространствах вложения более 3-4 практически перестает расти и зависимость размерности от D выходит на плато. С теоретической точки зрения, асимптотическое значение $d_c(a)$ и представляет собой искомую величину истинной размерности исследуемой системы (аттрактора).

Как видно из рис. 7, в отличие от теоретических представлений зависимость d_c от D не выходит на асимптотическое значение, а постепенно возрастает при всех значениях D, хотя при $D > 5$ скорость возрастания значительно меньше, чем при $D < 5$. По-видимому в данном случае имеет место суперпозиция малоразмерного аттрактора и некой

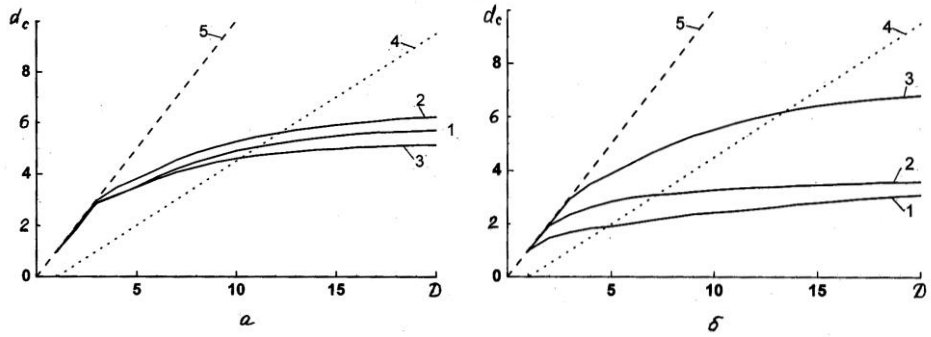


Рис. 7. Зависимость корреляционной размерности d_c от размерности пространства вложения D для радиальных (*а*) и тангенциальных (*б*) сечений образцов: *1* – Л-4; *2* – Л-5; *3* – Л-6; *4* – прямая теоремы Такенса; *5* – зависимость для случайного процесса типа «белый шум»

хаотической компоненты. Размерность аттрактора в этом случае можно определить по зависимостям, представленным на рис. 7, применив теорему Такенса. Из полученных результатов, представленных в табл. 2, следует, что величина размерности аттрактора $d_c(a)$ изменяется в сравнительно широких пределах от 3,10 до 6,25 при среднем значении 4,90 (для радиальных серий) и 5,00 (для тангенциальных серий). Следует отметить, что взаимосвязь между $d_c(a)$ и степенью делигнификации достаточно сложная. Для установления природы этой взаимосвязи необходимо проведение более масштабных исследований.

На рис. 8 представлен график, характеризующий взаимосвязь между значениями корреляционной размерности вторичной клеточной оболочки в радиальном $d_{c.р}$ и тангенциальном $d_{c.т}$ направлениях для всех образцов. Как следует из рис. 8, между этими параметрами наблюдается линейная зависимость (наклон равен 1,2 ± 0,3). Это означает, что надмолекулярная структура клеточных оболочек в терминах корреляционных размерностей в тангенциальном и радиальном направлениях одинаковая как до, так и после сульфатной варки.

Наличие фрактальной структуры лигнина клеточных оболочек подтверждается также определением показателя Херста (H), который является статистической характеристикой структуры и определяется согласно уравнению

$$R/S = (\tau/2)^H ,$$

где R – размах накопленного отклонения от среднего значения;

S – стандартное отклонение (корень квадратный от дисперсии);

τ – временной интервал [4].

Значения $0{,}5 < H < 1{,}0$ характерны для систем с так называемым детерминированным хаосом, т. е. для систем, в которых имеется фрактальная упорядоченность. Для случайного беспорядочного сигнала-шума величина

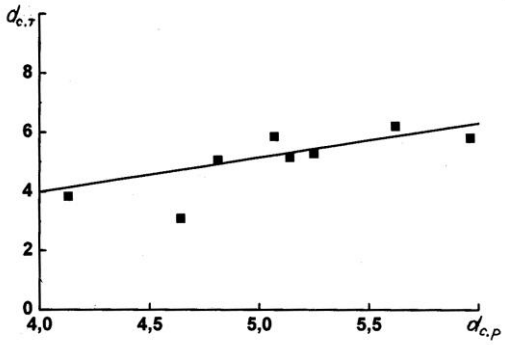


Рис. 8. Зависимость корреляционной размерности аттракторов тангенциальных пространственно временных серий от значения корреляционной размерности аттракторов радиальных серий для образцов Л-1…-8

H = 0,5[4]. Значения показателя H для пространственно-временных серий лигнификации клеточных оболочек приведены в табл. 2.

Можно проанализировать изменение параметра Херста при изменении степени делигнификации. Для образца с минимальной степенью делигнификации (α = 13 %) показатель H = 0,90, с максимальной – 0,88. При этом среднее значение H по всем образцам составляет 0,88, что совпадает с величиной H для исходных образцов (табл. 2). Этот результат, а также вышеприведенные данные, свидетельствуют о том, что процесс сульфатной делигнификации демонстрирует простое, с точки зрения динамики, поведение.

Таким образом, изученные закономерности изменений, полученные количественные характеристики клеточных оболочек трахеид древесины сосны на различных стадиях сульфатной делигнификации и сравнительный анализ лигнинных скелетов до и после сульфатной варки дали возможность установить, что на всех стадиях процесса лигнин клеточных оболочек сохраняет структурную упорядоченность фрактального типа. Это подтверждается выполнимостью принципа самоподобия и нецелой корреляционной размерностью псевдофазовых траекторий в пространствах любой размерности. Показано, что в условиях варки не наблюдаются сложные явления, приводящие к возникновению новых типов упорядоченных пространственно-временных структур.

Полученные результаты могут найти применение при совершенствовании варочных процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карманов, А.П.* Самоорганизация и структурная организация лигнина [Текст] / А.П. Карманов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – 270 с.

2. *Карманов, А.П.* Характеристика лигнина клеточных оболочек [Текст] / А.П. Карманов, Д.В. Матвеев, Ю.Б. Монаков // Высокомолекул. соединения. – 2000. – Т. 42 (А), № 7. – С. 1213-1220.

3. *Николис, Г.* Познание сложного [Текст] / Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Наука, 1990. – 344 с.

4. *Федер, Е.* Фракталы [Текст] / Е. Федер. – М.: Мир, 1991. – 151 с.

5. *Wilder, H.* Delignification rate studies [Text] / H. Wilder, E. Daleski. // TAPPI. – 1965. – Vol. 48, N 5. – P. 293–297.

Сыктывкарский лесной институт
Институт химии Коми НЦ УрО РАН

Поступила 05.07.05

A.P. Karmanov, D.V. Matveev, L.S. Kocheva

Investigation of Cell Membranes Lignin at Different Stages of Wood Delignification by Using Synergy and Nonlinear Dynamics Methods

Regularities of changes in pine cell membranes lignin at different stages of sulphate delignification are studied. The produced lignin skeletons are investigated by electron microscopy method. Synergy and non-linear dynamics methods are used for the quantitative characteristics of lignin distribution in the secondary cell membrane.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 368

Г.А. Кируца

Кируца Галина Алексеевна родилась в 1946 г., окончила в 1969 г. Казанский финансово-экономический институт, доцент кафедры финансов и кредита Архангельского государственного технического университета. Имеет 8 печатных работ по проблемам функционирования банковской системы, развития потребительского кредитования.

КРАТКОСРОЧНОЕ КРЕДИТОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Обоснована необходимость привлечения краткосрочных кредитов банка, приведен обзор технологий кредитования, применявшихся в условиях командно-административной системы управления экономикой, а также используемых в настоящее время при кредитовании предприятий лесопромышленного комплекса.

Ключевые слова: банки, кредитоспособность, кредитный риск, финансовый анализ.

В последнее время лесопромышленный комплекс (ЛПК) все чаще привлекает внимание Президента и Правительства РФ. В апреле 2006 г. в г. Сыктывкаре состоялось крупное отраслевое совещание с участием Президента В.В. Путина. Снижение доли РФ на мировых лесных рынках при наличии ресурсов, составляющих четверть запасов планеты, естественно, вызывает озабоченность. В свою очередь, представители лесных регионов высказали Президенту ряд просьб о государственной поддержке ЛПК. Весьма желательно большее внимание к ЛПК со стороны банковского сектора. Ниже рассмотрены некоторые проблемы кредитования этих специфических отраслей на примере Архангельской области.

Крупнейшими предприятиями комплекса в области являются Архангельский, Котласский и Соломбальский целлюлозно-бумажные комбинаты. В него входят также леспромхозы, деревообрабатывающие предприятия и производства. В структуре комплекса доминируют целлюлозно-бумажная и деревообрабатывающая промышленность, на долю которых приходится соответственно 60 и 26 % его товарной продукции. Достаточно высока доля продукции ЛПК области в общем объеме производства лесопродукции в Российской Федерации: по деловой древесине – 11, пиломатериалам – 12, товарной целлюлозе – 33, производству бумаги и картона – 36%. Продукция предприятий ЛПК остается главной составляющей экспортной части товарооборота в зоне деятельности Архангельской таможни.

Однако по общим финансовым результатам крупных и средних предприятий, согласно отчетным данным на 01.01.05 г., более половины из

них (57,9 %) имели убытки на общую сумму 542,8 млн р., в том числе по лесозаготовительным предприятиям соответственно 63 % и 258 млн р., деревообрабатывающим – 55 % и 274,2 млн р., предприятиям целлюлозно-бумажной промышленности – 25 % и 10,6 млн р. Финансовый результат (прибыль), начиная с отчета на 01.01.03 г., имеет тенденцию роста и на 01.01.05 г. составила 1817,4 млн р. Рентабельность продаж и реализованной продукции, наиболее полно отражающая эффективность работы, составила 7,9 и 8,6 %, что соответственно на 11 и 15 пунктов ниже значений на 01.01.01 г..

Необходимость использования предприятиями ЛПК заемных средств, в том числе банковских кредитов, обусловливают следующие факторы.

1. Сезонность деятельности. Лесозаготовительные предприятия в IV и I кварталах заняты заготовкой и вывозкой древесины, т. е. производят наибольшие затраты; предприятия деревообрабатывающей отрасли могут испытывать потребность в заемных средствах в период навигации и доставки древесины по воде, а также до поступления выручки от реализации произведенной продукции.

2. Особенности экономики и отдаленность многих предприятий от административных центров, зависимость от климатических условий.

3. Возникновение форс-мажорных обстоятельств в виде неравномерных поступлений материальных ценностей от поставщиков, образование сверхнормативных запасов сырья и материалов, транспортные проблемы.

4. Необходимость обновления производственных фондов ввиду высокой степени износа действующих.

5. Низкая доходность лесопромышленного комплекса при высоких ввозных пошлинах на современное оборудование, что сдерживает развитие отрасли и снижение издержек производства.

Объектами кредитования у предприятий ЛПК являются затраты на приобретение топлива, электроэнергии, запасных частей, оплату труда и обязательных платежей в бюджет и внебюджетные фонды, по транспортировке и хранению продукции, создание запасов древесины, восполнение недостатка собственных оборотных средств, вызванного разрывом между временем произведения затрат и поступлением выручки от продаж, при этом дебиторская задолженность предприятий составляет более половины стоимости оборотных активов, причем имеет тенденцию роста. В источниках формирования активов кредиты банка достигают 50 %, в кредитных портфелях коммерческих банков задолженность предприятий ЛПК значительна.

В структуре кредитного портфеля коммерческих банков по кредитам, предоставленным юридическим лицам, промышленность занимает около 60 %, из них по предприятиям лесопромышленного комплекса – до 70 %. Наиболее крупным кредитором является Сбербанк РФ.

В условиях плановой экономики кредитование предприятий производилось по отдельным и специальным ссудным счетам при возникновении

потребности в средствах, а задолженность погашалась по мере поступления выручки от реализации продукции. Обеспечением кредита являлись товарно-материальные ценности и расчетные документы, подтверждающие отгрузку продукции и получение денежных средств в будущем (аккредитивы, расчетные чеки, платежные требования). При этом устанавливалась предельная сумма (контрольная цифра) кредитования в виде выходного лимита задолженности. Таким образом, применялась достаточно простая процедура кредитования.

В настоящее время кредитные отношения строятся на унифицированной основе по единым правилам и без учета индивидуальных отраслевых особенностей и потребностей тех или иных предприятий-заемщиков. Сроки кредита устанавливаются исходя из планового движения денежных средств, без учета сезонности производства, внешних факторов, влияющих на необходимость привлечения заемных средств, а срок предоставления краткосрочных кредитов не превышает 1,5 года.

В современной российской практике сформирована новая система кредитования, совершенствуются технологии выдачи и погашения кредита, изменена система обеспеченности выданных кредитов. Используются следующие способы предоставления кредитов: разовая выдача по отдельному ссудному счету, открытие кредитной линии, т. е. заключение соглашения, по которому заемщик приобретает право на получение и использование в течение обусловленного срока денежных средств, кредитование банковского счета клиента-заемщика в виде оплаты расчетных документов при недостаточности или отсутствии на нем денежных средств – «овердрафт» (за исключением расчетных документов, предусматривающих погашение ранее возникших обязательств по кредитным договорам).

Однако остается довольно длительным процесс рассмотрения документации и принятия решения банком о выдаче кредита, велика процентная ставка. Отчасти это можно объяснить наличием кредитного риска, т. е. потери ссудной стоимости вследствие неисполнения заемщиком обязательств по ссуде перед коммерческим банком в соответствии с условиями договора либо существования реальной угрозы такого неисполнения.

Для покрытия возможных потерь (расходов), связанных с невозвратом или неполным возвратом кредитов, банки вынуждены в момент выдачи кредита создавать, а в последующем корректировать резервы на возможные потери по ссудам, размер отчислений которых напрямую зависит от финансового положения заемщика, обслуживания долга банку и качества принятого обеспечения по кредитному договору.

Для оценки кредитного риска коммерческие банки проводят финансовый анализ заемщика, т. е. устанавливают реально сложившееся правовое и хозяйственно-финансовое положение с точки зрения возможности, целесообразности предоставления ему кредита и определения размера отчислений для создания резервов на возможные потери по ссудам.

При комплексной оценке кроме этого учитывают такие параметры, как правоспособность, репутация (кредитная история), качество управления

деятельностью предприятия, место на рынке и внешние экономические условия деятельности.

Используя данные статистического сборника территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Архангельской области «Лесная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность Архангельской области. 1998-2004 годы», на основании методики определения кредитоспособности заемщика одного из коммерческих банков, расположенных в регионе, определим класс кредитоспособности предприятий лесопромышленного комплекса. Для этого сгруппируем показатели в таблицу.

Показатели финансовой устойчивости по данным отчетности

Показатель	Предприятия					
	лесозаготовительные		деревообрабатывающие		целлюлозно-бумажные	
	на 01.01.04 г.	на 01.01.05 г.	на 01.01.04 г.	на 01.01.05 г.	на 01.01.04 г.	на 01.01.05 г.
Коэффициент абсолютной ликвидности, %	5,4	11,7	8,7	8,5	21,1	10,7
Промежуточный коэффициент покрытия (быстрой ликвидности), %	27,4	35,4	45,1	42,2	95,6	87,6
Коэффициент текущей ликвидности, %	55,2	69,8	86,4	77,7	135,4	121,7
Коэффициент автономии, %	6,6	10,9	28,0	20,1	62,3	58,4
Рентабельность продаж, %	Не рент.	Не рент.	11,7	5,2	9,1	11,3
Рентабельность деятельности предприятия, %	«	«	13,2	5,5	10,0	12,8
Класс кредитоспособности	3	3	2	3	2	2

Как видим, предприятия лесозаготовительной и деревообратывающей промышленности имеют третий класс кредитоспособности, согласно методике банка их кредитование связано с повышенным для банка риском; предприятия целлюлозно-бумажной промышленности имеют второй класс, их кредитование требует взвешенного подхода.

Основной причиной повышенного кредитного риска является убыточность предприятий и значительный размер дебиторской задолженности, которая по состоянию на 01.01.05 г. занимает половину стоимости оборотных средств, в том числе по лесозаготовительным предприятиям 32,3%, деревообрабатывающим 41,3, целлюлозно-бумажным 57,2 %.

Обслуживание кредитов составляет значительную долю доходов банка и соответственно расходов заемщика.

Проценты по кредиту от заемщика поступают, как правило, ежемесячно и реже по индивидуальному графику уплаты. Это вызвано недопущением разрывов между уплатой банком налога на прибыль и фактическим получением дохода, так как налог уплачивается по факту начисления платы за кредит.

Кроме этих платежей большинство филиалов банков, расположенных на территории Архангельской области, практикуют взимание комиссий. Последние стандартно делятся на два типа: взимаемые при (до) выдаче кредита (за рассмотрение кредитной заявки, открытие лимита кредитования, осуществление предкредитной проверки предлагаемого в залог обеспечения, открытие ссудного счета и т. д.), а также взимаемые в течение действия кредитного соглашения (за ведение ссудного счета, осуществление проверок сохранности заложенного имущества). Таким образом, банк часто декларирует заемщику номинально более низкую процентную ставку за кредит, а в абсолютном выражении это выглядит противоположным образом. Следует, однако, отметить, что в условиях достаточно сильной конкуренции на рынке банковских кредитных услуг для крупного и среднего заемщика, в том числе и предприятий лесопромышленного комплекса, перечень таких комиссий сокращен, а некоторыми филиалами банков отменен. При этом размер платы за пользование заемными средствами остается значительным. Ряд заемщиков имеют возможность привлечь средства от филиалов крупных банков, в том числе иностранных, процентная ставка которыми установлена ниже сложившейся в регионе, особенно по кредитам в иностранной валюте, но большинство заемщиков привлекают кредиты по ставке, установленной кредитной политикой банка.

Таким образом, целесообразно внести некоторые изменения в практику краткосрочного кредитования.

1. Для предприятий лесопромышленного комплекса в период возрастания затрат, связанных с сезонностью заготовок древесины, предоставлять кредиты в форме возобновляемой кредитной линии, т. е. при возникновении потребности в заемных средствах на основании генерального соглашения с банком предоставлять их в виде траншев. Это сократит время и объем документации на оформление кредита в банке, заемщик имеет экономию по выплате процентов за кредит, а также возможность планировать на перспективу финансовые потоки.

При наличии вертикально интегрированных холдингов целесообразно установить лимит кредитной линии в целом по холдингу с распределением между предприятиями, входящими в его состав.

Для снижения кредитного риска в обеспечение кредита банком могут быть приняты запасы древесины, транспортные средства, гарантии ее потребителей, экспортные контракты и т. п.

2. Для предприятий, получающих сырье и поставляющих значительный объем поставок готовой продукции в период навигации, предоставлять кредиты в форме невозобновляемой кредитной линии, так как период кредитования у них, как правило, короче, чем у лесозаготовительных предпри-

ятий.

3. Заемщикам предусматривать в договорах поставки (контрактах) аккредитивную форму расчетов. В этом случае расчетные документы, подтверждающие получение денежных средств в будущем, могут быть приняты в обеспечение кредита. Такой способ позволит значительно упростить процедуру получения кредита и снизить кредитный риск как банка-кредитора, так и поставщика-заемщика. Это можно отнести и к расчетам посредством чеков и векселей.

4. Для снижения реальной к взысканию задолженности целесообразно использовать финансирование под уступку денежных требований (факторинг). Коммерческий банк, проверив кредитоспособность контрагентов по сделке, приобретает денежные требования, оплатив поставщику аванс и взяв на себя риск неоплаты. Этот способ финансирования целесообразно использовать малым и средним предприятиям, не имеющим достаточного имущества для передачи его в залог при получении кредита.

Леспромхозы, передавшие древесину лесосплавным организациям для сплава, также могут оформить в банке финансирование под уступку требований за древесину.

Настало время отказаться от прорекламированного Банком России в августе 1998 г. обязательного зачисления валюты ссуды на расчетный счет заемщика и ввести забытый способ кредитования по типу использования специальных ссудных счетов. Суть этого способа в регулярном кредитовании предприятий по мере возникновения у заемщика потребности в финансовых ресурсах путем оплаты его расчетных документов со счета, а погашение кредита – по мере поступления выручки на этот счет. Использование специальных ссудных счетов позволит лесопромышленным предприятиям получать необходимые суммы именно тогда, когда они испытывают в них потребность, а банк будет регулировать остаток ссудной задолженности в зависимости от размера обеспечения.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 23.03.06

G.A. Kirutsa

Short-term Crediting of Forest-industrial Enterprises

Necessity of attracting short-term bank credits is substantiated, survey of crediting technologies applied in the conditions of command-administrative system fщк economics administration is provided, as well as the ones used at present when crediting forest-industrial enterprises.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

УДК 669.14.018.27

С.И. Думанский

Думанский Сергей Игоревич родился в 1981 г., окончил в 2002 г.Архнгельский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры эксплуатации автомобилей и машин лесного комплекса, аспирант кафедры теоретической механики АГТУ. Имеет 5 печатных работ.

ВИБРОИЗОЛЯЦИЯ ЛЕСОПИЛЬНЫХ РАМ С ПОМОЩЬЮ ПЛАСТИНЧАТЫХ АМОРТИЗАТОРОВ

Предложен способ виброизоляции лесопильных рам; приведена конструкция амортизаторов и режимы термической обработки пружинного сплава.

Ключевые слова: вибрации, лесопильные рамы, пластинчатые амортизаторы, режимы обработки.

При работе лесопильного и деревообрабатывающего оборудования возникают вибрации различной частоты и амплитуды. Для повышения долговечности оборудования и увеличения точности обработки сырья применяют различные виды виброизоляторов (амортизаторы, демпферы) [3].

Во время работы оборудования частота колебаний составляет 5 … 1000 Гц, а амплитуда – 50 … 0,01 мм. Например, низкочастотные вибрации возвратно-поступательно движущихся пильных рам создают упругое поле радиусом сотни метров, в которое попадают не только операторы станка, но и окружающие строения, в результате этого снижается ресурс зданий и конструкций [2,5].

В лесопильных цехах основной источник вибраций – лесопильные рамы. Рабочий орган механизма – пильная рамка – приводится в возвратно-поступательное движение от центрального кривошипно-шатунного механизма или внецентрального, дезаксиального. Основными силами, возбуждающими колебания лесопильных рам, являются силы инерции механизма резания [5].

Низшие главные частоты собственных колебаний станин в направлении подачи бревна – 10 … 16 Гц, в перпендикулярном направлении –

6 … 9 Гц. В направлении подачи они близки к удвоенной частоте возмущающей силы 10 … 12 Гц, в перпендикулярном направлении – к частоте возмущающей силы 5 … 6 Гц, что является одной из главных причин колебаний станин лесопильных рам в направлении подачи с двойной частотой вращения коленчатого вала, в перпендикулярном направлении – с частотой вращения коленчатого вала [2].

Впередирамные тележки имеют преимущественно вертикальные и продольные колебания. Их источниками служат: неравномерная скорость подачи бревна в лесопильную раму, вызываемая силами отбоя при пилении; вертикальные колебания бревна, возбуждаемые силами резания, и междуэтажного перекрытия, передающиеся от фундаментов лесопильной рамы и при сбросе бревна или бруса с транспортера.

По комплексу эксплуатационных свойств (диапазон демпфируемых колебаний, выносливость, постоянство характеристик на протяжении эксплуатации, способность работать в агрессивных средах и в широком диапазоне температур) для деревообрабатывающего оборудования перспективны пластинчатые амортизаторы-демпферы. Они представляют собой пакеты гофрированных металлических пластин, иногда заполненных демпфирующей жидкостью (масло, жидкость на кремниевой основе).

Материал этих пластин в значительной степени определяет весь комплекс эксплуатационных свойств амортизаторов. Виброизоляторы, применяемые в лесной, деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной промышленности, помимо высоких упругих и демпфирующих свойств, должны обладать повышенными коррозионной и теплостойкостью. Этим требованиям полностью удовлетворяет достаточно распространенный сплав Ni-Cr-Ni-Al марки 36НХТЮ. Однако для получения высоких упругих свойств этого сплава необходимо в процессе его термической обработки сформировать особое структурное состояние, характеризующееся повышенной однородностью и единым прерывистым механизмом образования избыточной γ'-фазы.

Сравнительные испытания свойств сплава 36НХТЮ с различным структурным состоянием показали, что в случае формирования однородной структуры с прерывистым выделением упрочняющей γ'-фазы реализуется наиболее высокий комплекс свойств, включающий предел упругости, сопротивление усталостному разрушению, релаксационную стойкость [4]. Одновременно мелкозернистая структура способна повысить также и запас пластичности сплава [4].

Для сплава 36НХТЮ известны способы механико-термической обработки, обеспечивающие получение необходимой мелкозернистой структуры [1]. Их реализация связана с двумя условиями: использование холоднодеформированного сплава с обжатием не менее 50 %; применение режимов скоростной термической обработки. Последнее условие трудно выполнить, используя обычное печное оборудование. Это сдерживает применение рекомендованных схем обработки.

Весьма перспективной для выполнения операций скоростного нагрева тонколистовых заготовок может оказаться скоростная термическая обработка. Основные преимущества нагрева проходящим током: высокая скорость нагрева (до $1 \cdot 10^4$ °С/с); возможность осуществлять безокислительный нагрев; обеспечение высокой скорости охлаждения; точное воспроизведение всего цикла обработки в автоматическом режиме.

Для проведения исследований (а в перспективе для использования в промышленных технологических процессах термической обработки при изготовлении упругих элементов) был выбран электроконтактный нагрев. Этот вид нагрева, являясь ресурсосберегающим и экологически чистым, позволяет управлять всеми параметрами термообработки и формообразования (штамповка и прокатка): скоростью и температурой нагрева, продолжительностью изотермической выдержки. Электроконтактный нагрев легко вписывается в производственный процесс изготовления большинства видов упругих элементов из ленты и проволоки; может обеспечивать нагрев по заданной программе и быть совмещен с операциями формообразования.

Анализ проведенных исследований показал, что применение скоростного нагрева при рекристаллизации сплава 36НХТЮ позволяет с высокой точностью управлять размером зерна аустенита и степенью его однородности. Следовательно, есть возможность реализовать механизм прерывистого распада твердого раствора при последующем старении (см. таблицу).

Реализация прерывистого распада во всем объеме создает структурное состояние, характеризующееся максимальным уровнем упругих и усталостных свойств при умеренной релаксационной стойкости.

Применение режимов, обеспечивающих прохождение полного непрерывного распада, создает структуру, имеющую после старения более низкие упругие и усталостные свойства, но повышенную стабильность всего комплекса эксплуатационных свойств при высоких (до 200 °С) температурах.

Абсолютный максимум свойств может быть достигнут в результате реализации схемы скоростной термообработки «на возврат».

Использование оптимальных режимов скоростной термической обработки при изготовлении упругих элементов позволило осуществить конструкцию применяемых для лесопильного оборудования пластинчатых амортизаторов, имеющих следующие характеристики:

Статическая нагрузка……..21 кН
Статическая жесткость……1600 кН/м
Динамическая жесткость…….2000 кН/м
Собственная частота колебаний…….4,5…5,5 Гц
Коэффициент демпфирования (потерь)…….0,1…0,2
Перепад по общему уровню вибраций
в диапазоне частот 5 … 1000 Гц……25 дБ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рахштадт, А.Г.* Исследование путей интенсификации процесса прерывистого распада в дисперсионно-твердеющем аустенитном сплаве 36НХТЮ [Текст] / А.Г. Рахштадт, О.М. Ховова, А.В. Кан //Диффузия; фазовые превращения, механические свойства металлов и сплавов. – М.: Изд-во ВЗМИ, 1980. – С. 28–39.

2. *Санников, А.А*. Вибрация зданий и фундаментов лесопильных рам [Текст] / А.А.. Санников. – М., 1966. – 300 с.

3. *Санников, А.А.* Пути снижения колебаний лесопильного оборудования [Текст] / А. А.Санников – М.: Лесн. пром-сть, 1980. – 160 с.

4. *Суховаров, В.Ф*. Механико-термическая обработка сплавов, стареющих по механизму прерывистого выделения [Текст] / В.Ф. Суховаров [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 1975. – Т.40, вып. 6. – С.1268–1272.

5. *Филькевич, В.Я.* Динамика лесопильных рам [Текст] / В.Я. Филькевич. – М., 1968. – 230 с.

Архангельский государственный
технический университет
Поступила 13.06.06

S.I. Dumansky

Vibration Insulation of Frame Saws by Block Shock-absorbers

The method of vibration insulation for frame saws is offered; shock-absorbers' structure and modes of thermal treatment for spring rafting are provided.

УДК 621.181:662.612

В.К. Любов

Любов Виктор Константинович родился в 1954 г., окончил в 1976 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики Архангельского государственного технического университета. Имеет более 150 публикаций в области совершенствования энергохозяйств промышленных предприятий.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭНЕРГОХОЗЯЙСТВ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрены основные проблемы, снижающие эффективность работы теплогенерирующего оборудования предприятий лесопромышленного комплекса, и возможные пути их решения.

Ключевые слова: лесопромышленный комплекс, интинский уголь, шлакование поверхностей нагрева, древесные отходы, топливно-энергетический комплекс, топочная камера, котлоагрегат, оксиды азота и серы, низкотемпературная вихревая технология.

Важнейшими проблемами энергетики лесопромышленного комплекса являются модернизация и замена морально устаревшего и физически изношенного оборудования, доля которого с каждым годом увеличивается. Экономически выгодно техническое перевооружение проводить с сохранением существующих элементов установки и обязательным повышением экологических показателей оборудования на базе новых методов сжигания топлива и прогрессивных конструктивных решений. Особое место занимает вопрос экологически безопасной утилизации отходов производства. Современное состояние окружающей среды и перспектива дальнейшего увеличения использования низкокачественных углей уже сейчас заставляют шире использовать такие виды топлив и технологии производства энергии, которые в наибольшей степени отвечают экологическим требованиям [1, 2, 5, 7, 9, 10, 14–20].

Среди каменных углей, поступающих в Архангельскую область, относительно дешевые угли Печорского бассейна играют доминирующую роль (92 … 95 %). Однако сжигание данных углей (особенно интинского) в топках котлов, работающих по схеме прямоточного факела, сопровождается интенсивным шлакованием поверхностей нагрева, что приводит к недовыработке станциями тепловой и электрической энергии. Вследствие этого, вопрос повышения эффективности сжигания углей Печорского бассейна и

сильношлакующих углей ряда других месторождений страны имеет большое хозяйственное значение. Для решения данной проблемы можно использовать низкотемпературную (НТВ) и низкоэмиссионную (ВИР) вихревые технологии сжигания топлива [18, 20]. Данные технологии позволяют реализовать метод ступенчатого сжигания топлива, снизить на 150 … 200 °С уровень максимальных температур в топочной камере. За счет этого существенно снижается образование оксидов азота и устраняется шлакование радиационных поверхностей нагрева. Многократная циркуляция газотопливного потока в нижней вихревой зоне повышает степень связывания оксидов серы «активными» компонентами минеральной части топлива и эффективность использования сорбентов, вводимых в топочную камеру.

Архангельская область включена в список наиболее загрязненных регионов России. В то же время она является крупнейшим в Европе производителем лесной продукции и обладает большими запасами некондиционных отходов от предприятий лесопромышленного комплекса (ЛПК). С экологической и экономической точек зрения наиболее целесообразно использовать их в качестве энергетического топлива [3, 4, 10, 11, 15].

Древесина – самый древний вид топлива, однако проблема эффективного сжигания древесных отходов до сих пор остается актуальной во всем мире. Это связано с тем, что отходы переработки биомассы относятся к трудносжигаемым топливам ввиду высокой влажности и крайне неоднородного гранулометрического состава [3, 4]. Поэтому необходимо проводить работы по дальнейшему совершенствованию топочного процесса утилизационно-энергетических котлов.

В топливном балансе Архангельской области имеем: топочного мазута ~ 33,7 %, каменного угля ~ 31,8 %, природного газа ~ 28,0 %, биотоплива (дрова, отходы деревообработки, торф) ~ 6,5 %.

Значительным резервом для Архангельской области являются ее леса, которые занимают около 40 % территории. В настоящее время объем лесозаготовок в области достигает 12 … 13 млн м^3/год, а загрузка производственных мощностей ЛПК составляет ~ 66 %. При переработке древесины на предприятиях ЛПК в год образуется 2,9 … 4,0 млн пл. м^3 древесных отходов в виде коры, опилок, отсева щепы. Они сосредоточены в местах переработки древесины, их энергетический потенциал – 18,4 … 25,2 млн ГДж/год [14, 15]. При заготовке древесины в лесах ежегодно остается от 3,5 до 5,0 млн пл. м^3 древесных отходов в виде веток, сучьев, древесной зелени и вершин, которые традиционно не используются. Они вызывают загрязнение лесов, повышают их пожароопасность и способствуют размножению вредителей. Кроме того, при санитарных рубках леса, расчистке придорожных полос и просек под линии электропередач образуется еще около 0,5 млн пл. м^3 биотоплива в год.

Таким образом, суммарный годовой объем древесных отходов в области составляет 6,9 … 9,5 млн пл. м^3, их энергетический потенциал – 44,0 … 60,3 млн ГДж/год. Из этого объема в настоящее время в качестве топлива используют только около 1 млн пл. м^3 древесных отходов. Учитывая,

что ЛПК области имеет тенденцию стабильного развития, а также наличие незагруженных мощностей, объем заготовок древесины будет увеличиваться до 23 … 24 млн пл. $м^3$/год. Это вызовет значительное увеличение объемов отходов, образующихся при заготовке и переработке древесины. Сравнение энергетического потенциала неиспользуемых древесных отходов и годовых потребностей области в тепловой энергии позволяет считать задачу преимущественного обеспечения региона тепловой энергией за счет сжигания отходов вполне реальной при условии перестройки системы лесопользования [14, 15].

Перспективные направления широкого вовлечения древесных отходов в энергетический комплекс региона:

1. Строительство мини-ТЭЦ на древесных отходах [15]. Возможны различные технологические схемы реализации этого. Они требуют значительных капитальных затрат, но позволяют производить более дешевую тепловую и электрическую энергию, а также обеспечивать энергонезависимость предприятия от внешних энергоисточников.

2. Модернизация существующих теплогенерирующих установок, работающих на древесных отходах. В настоящее время в области реализованы одиннадцать различных технологических схем энергетического использования древесных отходов. Они имеют разную степень апробации, большинство из них обладает значительным резервом повышения энергоэкологоэкономических показателей работы [2, 7, 9].

3. Перевод котлоагрегатов, работающих на жидком или газообразном топливе, на сжигание горючего газа, полученного при термической переработке древесных отходов в газогенераторных установках.

4. Получение высококачественного экологически чистого топлива путем гранулирования или брикетирования древесных отходов и замена каменного угля на гранулы или брикеты, что позволит значительно повысить технико-экономические показатели работы котельных и обеспечит существенное улучшение экологической обстановки в регионе, однако потребует значительных начальных капитальных затрат [11].

5. Увеличение энергетического использования древесных отходов путем модернизации котлоагрегатов ТЭЦ блок-станций предприятий целлюлозно-бумажной и гидролизной промышленности на низкоэмиссионные схемы сжигания с активной аэродинамикой топочного объема [2, 7, 9, 10, 14, 15, 17, 18, 20]. К данным схемам, прежде всего, следует отнести НТВ- и ВИР-технологии сжигания топлива, схему кипящего слоя, а также слоевихревые и факельно-вихревую схемы.

6. Перевод котлоагрегатов, работающих на жидком или газообразном топливе, на сжигание отходов лесопиления путем применения высокофорсированных малогабаритных предтопков [1, 16, 19].

Успешное энергетическое использование отходов, образующихся при переработке древесного сырья, а также огромных запасов лигнина, накопленных в отвалах гидролизных заводов (более 14 млн т) [3], возможно только на основе надежного и отвечающего современным требованиям теп-

логенерирующего и вспомогательного оборудования, предназначенного для работы на этом виде низкокачественного топлива.

При сжигании твердых топлив важной проблемой является снижение выбросов твердых частиц в окружающую среду, они занимают ведущую роль (42,5 %) в валовых выбросах предприятий малой энергетики. Это объясняется низкой степенью очистки (40 … 85 %) продуктов сгорания в применяемых золоуловителях, а также отсутствием газоочистных устройств на многих котлах, работающих на каменных углях и древесных отходах. Данные обстоятельства наносят существенный вред окружающей среде и здоровью людей, в некоторых случаях снижают качество продукции предприятий ЛПК и могут быть причиной пожаров. Поскольку показатели работы большинства действующих газоочистных устройств не отвечают современному уровню развития техники и требованиям принятого закона РФ «Об охране атмосферного воздуха» важной задачей совершенствования энергохозяйств предприятий ЛПК является поэтапная модернизация и во многих случаях замена устаревшего оборудования на современное. Внедрение высокоэффективных золоуловителей, особенно, на сжигающих биотопливо котлоагрегатах – важный шаг в реализации концепции экологически чистой ТЭС (котельной).

Ужесточение нормативов выбросов вредных веществ требует качественно нового подхода к проблеме их снижения за счет освоения новых технологий сжигания, широкого вовлечения в топливный баланс отходов переработки биомассы, разработки и внедрения эффективных систем очистки. Энергетическое использование древесных отходов открывает большие дополнительные возможности в плане охраны окружающей среды и создания экологически чистых производств. Реализация программы комплексного энергетического использования образующихся древесных отходов позволит экономить в год до 2 млн т условного топлива, уменьшить выбросы сернистого газа не менее чем на 50 тыс. т/год, а также снизить выбросы оксидов азота и летучей золы. К важным социальным аспектам энергетического использования отходов переработки биомассы относятся: создание новых рабочих мест в сопутствующих производствах, повышение комфортности проживания, а также усиление энергозащищенности региона.

Комплекс исследований, выполненных в ходе промышленного освоения НТВ- и ВИР-технологий для сжигания каменных углей и биотоплив, позволил:

разработать технические предложения по модернизации котлов БКЗ-220-100 и ПК-10 на НТВ-сжигание дробленых углей Печорского бассейна с повышением их номинальной производительности на 23 … 30 % и экологических показателей с запасом на их ужесточение в будущем;

создать при модернизации предпосылки разработки серии котлоагрегатов для сжигания дробленых углей на базе единичного модуля паропроизводительностью 100 … 105 т/ч;

отработать оптимальную схему реализации метода инжекции сорбента в топки НТВ- и ВИР-котлов, что значительно повысило эффективность использования сорбента (известняка).

Разработаны и внедрены на восьми котлоагрегатах новые низкоэмиссионные (слое-вихревые и факельно-вихревая) схемы сжигания биотоплив неоднородного гранулометрического состава с влажностью до 65 %, обеспечившие комплексное повышение экономических и экологических показателей, а также производительности котлов на 20 … 30 %. Выполненный комплекс работ по повышению эффективности сжигания биотоплив дал возможность получить годовой суммарный экономический эффект около 30 млн руб, значительно снизить валовые выбросы вредных веществ (NO_x – на 108 т/год, SO_2 – на 850 т/год, твердые частицы на 1200 т/год, парниковые газы (CO_2) – на 47 тыс. т/год), что оказало существенное влияние на экологическую ситуацию в регионе.

Значительный резерв экономии мазута, снижения выбросов оксидов азота и повышения надежности работы поверхностей нагрева достигается при использовании схемы ступенчатого сжигания, разработанной для котлоагрегатов ТГМ-84Б с применением рециркуляции дымовых газов. Она позволяет получить наибольший эффект (повышение кпд брутто ~ на 2 %, снижение эмиссии NO_x на 30 %, повышение сернокислотной точки росы на 11 °С) при работе данных котлов в диапазоне нагрузок 50 … 70 % от номинальной, годовая продолжительность которых может составлять до 3 тыс. ч. Данная схема способствует уменьшению затрат в случае перевода котлов на сжигание природного газа и может быть адаптирована к конструкции других газомазутных котлоагрегатов [8].

Основой для реализации программы совершенствования энергохозяйств предприятий ЛПК должна стать система энергоаудита, основанная на планировании энергосбережения [6]. Для развития системы энергоаудита разработан универсальный программно-методический комплекс [13], позволивший осуществить комплексный подход к оценке эффективности работы теплоэнергетического оборудования с учетом энергоэкологоэкономических факторов и параметров надежности. Комплекс повысил оперативность и точность определения составляющих теплового баланса теплогенерирующих установок, работающих как на одном виде топлива, так и на их смеси; обеспечил расчет теплообмена и горения, анализ работы газовых и воздушных трактов, обработку результатов теплотехнического и гранулометрического анализов топлив и их очаговых остатков; оценил надежность работы поверхностей нагрева с позиции низкотемпературной сернокислотной коррозии и техническое состояние оборудования по результатам вибродиагностики.

На основании реализации комплексного подхода к расчетам генерации NO_x и теплообмена в топке с учетом фактических характеристик рабочей среды и режимных факторов предложена уточненная методика расчета образования NO_x, прошедшая тестирование при испытании установок, работающих на разных видах топлива с различными схемами сжигания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горохов, С.Г.* Циклонный предтопок для сжигания древесных отходов / С.Г. Горохов, Э.Н. Сабуров, В.К. Любов // Лесн. журн. – 2004. – № 4. – С. 135–142. – (Изв. высш. учеб. заведений).

2. *Любов, В.К.* Анализ методов энергетического использования отходов переработки древесной биомассы / В.К. Любов, В.А. Дьячков // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: матер. II Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. – Вологда, 2000. – С. 225–227.

3. *Любов, В.К.* Исследование теплотехнических характеристик гидролизного лигнина / В.К. Любов [и др.] // Лесн. журн. – 1994. – № 2. – С. 135–137. – (Изв. высш. учеб. заведений).

4. *Любов, В.К.* Исследование теплотехнических характеристик древесных отходов и торфа / В.К. Любов, В.А. Дьячков // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. науч. тр./ СПб. ГТУРП. – СПб., 2001. – С. 240–248.

5. *Любов, В.К.* Комплексная оценка эффективности и надежности работы энергетического оборудования с целью продления его жизненного цикла / В.К. Любов // Интеграция САПР и систем информационной поддержки изделий: матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Архангельск: АГТУ, 2004. – С. 55–60.

6. *Любов, В.К.* Некоторые вопросы энергетического менеджмента / В.К. Любов, С.В. Любова // Проблемы лесного комплекса России в переходный период развития экономики: матер. Всерос. науч.-техн. конф. – Вологда: ВоГТУ, 2004. – С. 108–111.

7. *Любов, В.К.* Опыт сжигания высоковлажных отходов промышленности в топке безмельничного котлоагрегата / В.К. Любов [и др.] // Тепломассообмен при хим. превращениях: тр. I Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 3. М.: Изд-во МЭИ, 1994. – С. 163–168.

8. *Любов, В.К.* Повышение эффективности работы котлоагрегатов ТГМ-84Б / В.К. Любов, С.А. Телицын // Пленарные и общие проблемные доклады: тр. III Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 1. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – С. 159–161.

9. *Любов, В.К.*Повышение эффективности работы котлов, сжигающих древесные отходы / В.К. Любов, В.А. Дьячков // Свободная конвекция. Тепломассообмен при хим. превращениях: тр. II Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 3. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – С. 229–232.

10. *Любов, В.К.* Повышение эффективности энергетического использования древесных отходов / В.К. Любов [и др.] // Лесн. журн.– 1986. – № 4. – С. 117–119. – (Ив. высш. учеб. заведений).

11. *Любов, В.К.* Получение высококачественного топлива из отходов переработки биомассы / В.К. Любов, В.А. Дьячков, Е.П. Ильин // Повышение эффективности энергетических систем и оборудования: сб. науч. тр. к 70-летию АГТУ. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 1999. – С. 97–100.

12. *Любов, В.К.* Резервы энергосбережения в малой энергетике / В.К. Любов, В.А. Дьячков // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвузов. сб. науч. тр./ СПб. ГТУРП. – СПб., 2002. – С. 138–147.

13. *Любов, В.К.* Программно-методический комплекс для обработки результатов испытаний теплоэнергетического оборудования и расчета вредных выбросов /

В.К. Любов, В.А. Дьячков // Свободная конвекция. Тепломассообмен при хим. превращениях: тр. II Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 3. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – С. 225–228.

14. *Любов, В.К.* Уменьшение выбросов вредных веществ путем повышения экологических показателей работы котлоагрегатов и увеличения доли биотоплива в топливном балансе региона / В.К. Любов // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения: матер. Межд. конф. Т. 1. – Архангельск: Ин-т. экол. проблем Севера УрО РАН, 2002. – С. 200–204.

15. *Любов, В.К.* Уменьшение загрязнения окружающей среды путем повышения эффективности работы котлоагрегатов и увеличения доли биотоплива в топливном балансе региона / В.К. Любов, О.А. Любова // Успехи современного естествознания. – 2004. – №2. – С. 120–122.

16. Пат. 2196273 РФ. Циклонный предтопок: заявка 2001114059; заявл. 22.05.2001 / Сабуров Э.Н., Любов В.К., Горохов С.Г.; заявитель АГТУ.

17. Пат. 2220371 РФ. Топочное устройство для сжигания древесных отходов: заявка 2002101162; заявл. 08.01.2002 / Любов В.К.; заявитель АГТУ.

18. *Померанцев, В.В.* Опыт реконструкции котлов БКЗ на низкотемпературный способ сжигания твердых топлив / В.В. Померанцев [и др.] // Повышение эффективности ремонта и модернизации энергетического оборудования. Ч.1. – М., 1981. – С. 67–68.

19. *Сабуров, Э.Н.* Циклонное топочное устройство для сжигания отходов переработки древесной биомассы / Э.Н. Сабуров, В.К. Любов, С.Г. Горохов // Энергосбережение в теплоэнергетических системах: матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Вологда: ВоГТУ, 2001. – С. 15–17.

20. *Шестаков, С.М.* Особенности низкотемпературного вихревого сжигания немолотых бурых и каменных углей / С.М. Шестаков [и др.] // Горение органического топлива: матер. V Всесоюзн. конф. ИТФ СО АН СССР. Ч. 2. – Новосибирск: СО АН СССР, 1985. – С. 225–234.

Архангельский государственный
технический университет

Поступила 30.12.04

V.K. Lyubov

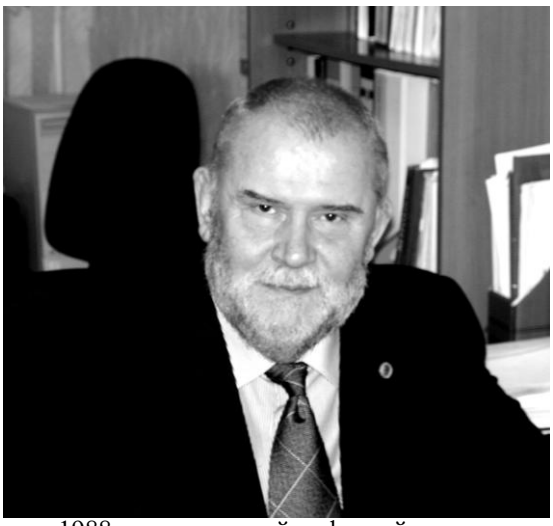
Improvement of Energy Departments of Forest Industrial Enterprises

The main problems reducing efficiency of heat-generating equipment of forest industrial companies and possible ways of their solution are analyzed.

ЮБИЛЕИ

УДК 06.091

Валерий Иванович Комаров
(к 60-летию со дня рождения)



Валерий Иванович Комаров родился 16 сентября 1946 г. в Воронежской области. После окончания с отличием в 1969 г. Ленинградской лесотехнической академии в 1972 г. он успешно защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Трудовую деятельность начал в 1972 г. ассистентом на кафедре технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского лесотехнического института, затем работал старшим преподавателем и доцентом этой кафедры. С 1985 г. исполняющий обязанности заведующего кафедрой, а с 1988 г. заведующий кафедрой технологии ЦБП. В 1994 г. В.И. Комарову присуждено звание профессора, а в 1999 г. – ученая степень доктора технических наук.

Профессор В.И. Комаров создал и успешно развивает новое научное направление – механика волокнистых целлюлозно-бумажных материалов, в рамках которого выполнены фундаментальные и прикладные исследования, позволившие разработать теорию деформировании и разрушения волокнистых целлюлозно-бумажных материалов; новые методики и методологию оценки качества данных материалов; математические модели для прогнозирования характеристик деформативности; алгоритм и программное обеспечение для обработки сложных для математического описания закономерностей; технологии производства небеленой целлюлозы, бумаги и картона с повышенными характеристиками деформативности, т.е. одной из важнейших задач отрасли – получение целлюлозно-бумажных материалов с заданными свойствами. Докторская диссертация В.И. Комарова отмечена ВАК РФ, как вносящая существенный вклад в науку и технологию химической переработки древесины.

Он автор более 360 научных трудов, учебника, 6 монографий и 13 учебных пособий. Ему присвоены звания заслуженного деятеля науки РФ, почетного работника высшего образования РФ, почетного работника лесной промышленности РФ. В.И. Комаров является действительным членом Академии проблем качества РФ, член-корреспондентом Российской Академии естественных наук, членом международной научной организации European Mechanics Society (EUROMECH), членом экспертного совета ВАК, заместителем председателя диссертационного совета

Д.212.008.02 Архангельского государственного технического университета и членом диссертационного совета Д.212.220.01 Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии, членом редколлегии журналов «Целлюлоза. Бумага. Картон» и «Лесной журнал. Известия высших учебных заведений». Награжден почетной серебряной медалью В.И. Вернадского РАЕН, является лауреатом премии им. М.В. Ломоносова администрации Архангельской области.

Научно-исследовательская работа его тесно связана с подготовкой высококвалифицированных кадров.

Руководимая В.И. Комаровым кафедра по рейтингу УМО Рособразования занимает центральное место в России среди кафедр, ведущих подготовку по специальности 2603.00. Под его руководством подготовлено и защищено 13 кандидатских диссертаций. Коллеги и ученики Валерия Ивановича отмечают его широкий научный кругозор, глубокие и разносторонние знания, педагогическое мастерство, демократичность и доброжелательность, требовательность к себе и другим.

Выражая самые искренние и добрые пожелания, поздравляем юбиляра и желаем ему крепкого здоровья, благополучия, новых творческих успехов.

Ректорат АГТУ,
редколлегия и редакция «Лесного журнала»

Administration of ASTU
Editorial Board and Editorial Staff of "Lesnoy Zhurnal"

Valery Ivanovich Komarov (By 60th Birthday)

УДК 06.091

Юрий Александрович Ширнин

8 октября 2006 г. исполнилось 60 лет со дня рождения и 33 года научно-педагогической деятельности доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой технологии и оборудования лесопромышленных производств Марийского государственного технического университета Юрия Александровича Ширнина.

Ю.А. Ширнин родился в степном крае, в с. Путятино Липецкой области, в семье учителей. После окончания семилетней школы в 1961 г. он поступил в Липецкий металлургический техникум, где успешно совмещал учебу с работой на металлургическом комбинате, затем служил в рядах Советской армии.

В 1968 г. поступил на лесоинженерный факультет Марийского политехнического института, который окончил с отличием в 1973 г. С тех пор вся его трудовая биография связана с лесным Марийским краем, МарПИ – МарГТУ. Молодой специалист три года работал на кафедре механизации лесоразработок и по совместительству заместителем секретаря комсомольской организации института. С 1976 г. по 1979 г. учился в аспирантуре Ленинградской лесотехнической академии под руководством проф. В.Г. Кочегарова.

После защиты кандидатской диссертации в 1979 г. ученый возвратился в родной вуз, где в течение многих лет преподает технологию и оборудование лесопромышленных производств – одну из ведущих дисциплин лесопромышленного факультета. Им подготовлены сотни инженеров-технологов, механиков для лесной промышленности. За время работы заведующим кафедрой ТОЛП с 1993 г. профессор Ю.А. Ширнин внес значительный вклад в развитие материально-технической базы кафедры, подготовку научно-педагогических кадров. По итогам конкурсов кафедра ТОЛП второй год занимает первое место среди 50 кафедр университета.

Ю.А. Ширниным создана научная школа в университете, его ученики успешно работают на различных кафедрах МарГТУ, УралГТУ, НПП «Старт» Росавиакосмоса. Научная деятельность Юрия Александровича связана с использованием технологий и оборудования малообъемных лесозаготовок и лесовосстановления, комплексного освоения участков лесного фонда, имитационного моделирования лесозаготовительных процессов. Под его руководством разработана Концепция развития лесного комплекса Поволжья до 2010 г. В настоящее время он является научным руководителем группы по разработке Концепции развития лесного комплекса Республики Марий Эл.

Профессором Ю.А. Ширниным опубликовано 220 научных работ, в том числе 4 монографии, 26 авторских свидетельств и патентов РФ, 15 научных пособий с грифом МО РФ и УМО. В 2005 г. совместно с группой ученых из Финляндии и России он являлся участником международного проекта, результатом которого стало издание учебного пособия в г. Йоенсуу «Промежуточное пользование лесом на северо-западе России». Под его руководством защищено 6 докторских и 9 канди-

датских диссертаций. В 1996 г. по его инициативе при МарГТУ открыт диссертационный совет Д212.112.02 по специальности 05.21.01. – «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства», где успешно защитили диссертации 30 кандидатов и 6 докторов технических наук из различных вузов и организаций.

За длительную трудовую деятельность и значительный вклад в развитие лесной науки и высшего образования Ю.А. Ширнину присвоены: ученое звание профессора по кафедре ТОЛП (1994 г.), почетное звание «Заслуженный деятель науки Республики Марий Эл» (1997 г.), он является Почетным работником высшего профессионального образования России (2002 г.), Почетным профессором МарГТУ (2005 г.).

В год своего 60-летия Юрий Александрович, как всегда, находится в гуще научных, производственных, учебных и общественных событий, полон интересных и амбиционных замыслов. От имени ректората Марийского государственного технического университета, многочисленных учеников и товарищей сердечно поздравляем Юрия Александровича Ширнина с прекрасным юбилеем и желаем крепкого здоровья, семейного счастья, полного благополучия в жизни, реализации намеченных творческих планов.

Е.М. Романов, А.И. Павлов,
А.Д. Кирсанов, П.Ф. Войтко
Марийский государственный
технический университет

E.M. Romanov, A.I. Pavlov, A.D. Kirsanov, P.F. Vojtko
Yury Alexandrovich Shirnin