

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

3

2006

ИЗДАТЕЛЬ – АРХАНГЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор – проф. **О.М. Соколов**  
Заместители главного редактора:  
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. **В.И. Мелехов**, проф. **М.Д. Мерзленко**, проф. **Е.Г. Мозолевская**, **В.В. Мусинский**, доц. **О. А. Неволин**, проф. **А.Н. Обливин**, проф. **В.И. Онегин**, проф. **Г.С. Ощепков**, проф. **А.В. Питухин**, проф. **С.М. Репях**, проф. **В.П. Рябчук**, проф. **Э.Н. Сабуров**, проф. **Е.Н. Самошкин**, проф. **В.Г. Санаев**, проф. **В.И. Санев**, проф. **В.А. Сулов**, проф. **Ф.Х. Хакимова**, проф. **В.Я. Харитонов**, 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» № 3

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

---

Сдан в набор 30.05.2006. Подписан в печать 26.06.2006. Заказ № 159  
Форм. бум. 70×108 1/16. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 15,8. Усл. кр.-отт. 15,8.  
Уч.-изд. л. 19,76. Тираж 1000 экз.  
Архангельский государственный технический университет

---

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

---

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



## СОДЕРЖАНИЕ

## ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- А.И. Соколов, В.А. Харитонов, Т.И. Кривенко.* Новые механизмы для обработки почвы на вырубках в условиях Карелии..... 7
- А.Л. Юрьева.* Влияние подготовки почвы и вида посадочного материала на рост и развитие лесных культур сосны..... 13
- Д.А. Корепанов.* Продолжительность подтопления почвенных горизонтов в основных типах хвойных насаждений Волжско-Камского междуречья... 20
- Л.М. Кавеленова.* К оценке экологического дискомфорта древесных видов-интродуцентов в городских насаждениях..... 25

## ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- Ф.А. Павлов, К.В. Доронин.* Оптимальная конфигурация транспортной сети лесных дорог с учетом формы выделов..... 31
- Н.А. Иванов, Е.А. Мясников.* Оценка вероятности преодоления вездеходом лесистой местности..... 36
- С.В. Никитин.* Особенности конструкции опрокидывателя для хранения легковых автомобилей..... 41

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- А.Г. Черных, Л.В. Ильюшенко.* Получение радиальных черновых заготовок... 46
- Ю.А. Варфоломеев, Л.А. Баданина.* Определение влагопроницаемости древесины по результатам производственных испытаний..... 51
- О.И. Бедердинова, Н.В. Коряковская.* Характеристики времени обслуживания потока необрезных пиломатериалов..... 59
- Л.С. Атрощенко.* Экспресс-сушка пиломатериалов..... 65

## ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- Э.И. Гермер.* Изучение суперактивного катализа кислородно-щелочной деглинификации 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)..... 70
- Э.И. Гермер.* Изучение суперактивного катализа кислородно-щелочной деглинификации 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..... 82
- А.М. Айзенштадт, М.В. Богданов, К.Г. Боголицын, А.А. Абросимова.* К вопросу об эффективном потенциале родственных лигнину фенолов..... 91
- Ф.Х. Хакимова, Т.Н. Ковтун, С.А. Шистеров.* Обессмоливание березовой бисульфитной целлюлозы на стадиях варки и отбелки..... 98
- Ю.В. Севастьянова, Л.А. Миловидова, Г.В. Комарова, Т.А. Королева.* Влияние условий сульфатной варки на содержание остаточного лигнина и групп тексенуровой кислоты в лиственной целлюлозе..... 103

*ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА*

- А.А. Вертман, Ю.И. Провоторов, В.И. Мелехов, В.Ж. Арнс.* К выбору стратегии освоения отдаленных регионов России..... 108
- Е.С. Романов, И.В. Лаврова.* Структуризация понятия доступности лесных ресурсов..... 120

*КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ УЧЕБНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ*

- В.И. Малыгин, Л.В. Кремлева, К.Л. Шестаков.* Проектные решения в технологии деревообработки..... 126
- В.В. Поляков.* Оптимизация управления целлюлозно-бумажным производством. 134

*КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ*

- А.Я. Найчук.* О несущей способности узлов деревянных клееных трехшарнирных арок..... 141
- Б.В. Лабудин, Р.П. Матвеев, Р.С. Санжаровский.* Устойчивость сжато-изогнутых стержней, усиленных титановыми элементами..... 145
- Т.М. Владимирова, О.М. Соколов, С.И. Третьяков.* Моделирование процесса ректификации и парциальной конденсации при разделении таллового масла..... 151



## CONTENTS

## FORESTRY

- A.I. Sokolov, V.A. Kharitonov, T.I. Krivenko.* New Mechanisms for Cultivation on Clearcuts in Conditions of Karelia..... 7
- A.L. Yurjeva.* Influence of Soil Preparation and Planting Material Type on Growth and Development of Pine Forest Cultures..... 13
- D.A. Korepanov.* Underflooding Duration of Soil Horizons in Main Coniferous Stand Types of Area between Volga and Kama..... 20
- L.M. Kavelenova.* To Ecological Discomfort Assessment of Wooden Species-Introduced Trees in Town Planting..... 25

## WOODEXPLOITATION

- F.A. Pavlov, K.V. Doronin.* Optimal Configuration of Transport Network of Forest Roads Taking into Account Plots Form..... 31
- N.A. Ivanov, E.A. Myasnikov.* Estimated Probability of Overcoming Woodland by Landrover..... 36
- S.V. Nikitin.* Peculiarities of Dump Structure for Storing Cars..... 41

## MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOODSCIENCE

- A.G. Chernykh, L.V. Iljushenkov.* Producing Radial Rough Workpieces..... 46
- Yu.A. Varfolomeev, L.A. Badanina.* Determination of Wood Moisture Resistance Based on Production Test..... 51
- O.I. Bederdinova, N. V. Koryakovskaya.* Processing Time Characteristics of Unedged Timber Flow..... 59
- L.S. Atroshchenko.* Express-drying of Sawn Timber..... 66

## CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

- E.I. Germer.* Studying Super Active Catalysis of Oxygen-alkaline Wood Delignification by Metal Groups of Variable Valency by Using 1.10-phenanthroline Copper (II) as Model. 1. Approach to Problem Research. 1.10-phenanthroline Copper (II) Performance..... 70
- E.I. Germer.* Studying Super Active Catalysis of Oxygen-alkaline Wood Delignification by Metal Groups of Variable Valency by Using 1.10-phenanthroline Copper (II) as Model. 2. Main Factors Characterizing Complex Compound and its Ability to be Catalyst of Redox-Processes..... 82
- A.M. Aisentshtadt, M.V. Bogdanov, K.G. Bogolitsyn, A.A. Abrosimova.* To Question of Effective Potential of Related-to-lignin Phenols..... 91
- F.Kh. Khakimova, T.N. Kovtun, S.A. Shisterov.* Derisination of Birch Bisulfite Pulp at Cooking and Bleaching Stages..... 98
- Yu.V. Sevastjanova, L.A. Milovidova, G.V. Komarova, T.A. Koroleva.* Influence of Sulfate Cooking on Residual Lignin Content and Groups of Hexuronic Acid in Hardwood Pulp..... 103

*ECONOMICS AND MANAGEMENT*

- A.A. *Vertman, Yu. I. Provotorov, V. I. Melekhov, V. Zh. Arens.* To Choosing Strategy of Remote Regions' Development in Russia..... 108
- E.S. *Romanov, I.V. Lavrova.* Structuring of Concept for Accessibility of Forest Resources..... 120

*COMPUTERIZATION OF TRAINING AND TECHNOLOGICAL PROCESSES*

- V.I. *Malygin, L.V. Kremleva, K.L. Shestakov.* Project Solutions of Woodworking Technology..... 126
- V.V. *Polyakov.* Optimization of Pulp-and-paper Production Management..... 134

*SUMMARIES AND EXCHANGE OF TEACHING*

- A.Ya. *Naychuk.* On Bearing Capacity of Units for Wooden Glued Laminated Three-hinged Arches ..... 141
- B.V. *Labudin, R.P. Matveev, R.S. Sanzharovsky.* Stability of Close-bent Rods Reinforced by Titanic Elements..... 145
- T.M. *Vladimirova, O. M. Sokolov, S. I. Tretyakov.* Simulation of Rectification Process and Partial Condensation in Tall Oil Separation..... 151





УДК 630\*232.216

***А.И. Соколов, В.А. Харитонов, Т.И. Кривенко***

Соколов Александр Иванович родился в 1944 г., окончил в 1971 г. Петрозаводский государственный университет, кандидат сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией лесовосстановления Института леса Карельского НЦ РАН. Имеет 77 печатных работ в области лесовосстановления.

**НОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ  
НА ВЫРУБКАХ В УСЛОВИЯХ КАРЕЛИИ**

Приведены результаты испытаний двух зарубежных почвообрабатывающих орудий (TTS-Дельта и TTS-20) на вырубках в условиях Карелии. Даны рекомендации по их применению.

*Ключевые слова:* вырубки, лесовосстановление, обработка почвы, почвообрабатывающие агрегаты.

Пересеченный рельеф местности Карелии, большая неоднородность механического состава почв и высокая их каменистость (завалуненность) ограничивают применение почвообрабатывающих орудий, выпускаемых в России, и отрицательно влияют на качество обработки почвы. Наиболее дешевым и простым способом обработки дренированных завалуненных почв на вырубках является удаление подстилки. На злаковых типах вырубков, которые являются основным лесокультурным объектом, оптимальная ширина полосы с удаленной подстилкой составляет 0,7 ... 1,0 м [1]. Для этих целей разработан и серийно выпускается покровосдиратель ПДН-1, который предназначен для обработки дренированных почв из-под ельников черничных и близких к ним типов леса [2]. Для создания культур посадкой крупномерным материалом в республике были сконструированы и изготовлены мелкими партиями лункообразователи Л-2 и Л-22 [3]. В настоящее время лесопользователи стали применять финские орудия с пассивными (TTS-20) и активными (TTS-Дельта) рабочими органами (табл. 1). Однако качество обработки почвы этими орудиями в условиях Карелии не исследовалось, нет практических рекомендаций по их рациональному использованию.

Нами проведена агротехническая оценка этих почвообрабатывающих агрегатов на злаковых типах вырубков в условиях южной Карелии, на

Таблица 1

## Техническая характеристика финских лесных покровосдирателей

Показатели	TTS-20	TTS-Дельта
Масса, кг	1150	3200
Дополнительная масса максимальная, кг	500	–
Диаметр диска, см	115	135
Число зубьев на диске, шт.	8	10
Длина одного зуба, см	26,5	26,5
Масса диска, кг	150	300
Вращение диска	Свободное	Принудительное
Мощность трактора, кВт	60	100
Производительность, га/ч	0,4...1,5	0,5...2,5

территории четырех лесхозов. Характеристика участков дана в табл. 2. Качество работы покровосдирателей оценивали общепринятыми методами по пяти категориям: 0 – почва не обработана; 1 – подстилка удалена частично (возможна только посадка, но не посев); 2 – минеральный горизонт обнажен полностью; 3 – подстилка и порубочные остатки перемешаны и собраны в кучу; 4 – подстилка повреждена зубьями покровосдирателя небольшими пятнами (ямки в почве). Частоту встречаемости и глубину залегания камней в верхних почвенных горизонтах определяли с помощью щупа.

На предприятиях Карелии покровосдиратели TTS-20 агрегируются с гусеничными тракторами Онежского тракторного завода и финскими колесными форвардерами. В Ладвинском лесхозе нами обследовано пять участков, где TTS-20 работал в агрегате с трактором ТЛТ-100-06. Значения ширины обработанных полос на всех участках были близки (табл. 3), изменяясь от 40 до 42 см (при установке регулировочного рычага на среднее регулировочное отверстие). Глубина обработанных полос колебалась от 10 до 17 см и варьировала сильнее (коэффициент вариации по ширине 9 ... 17 %, по глубине 18 ... 42 %). Качество обработки почвы на отдельных участках также существенно различалось. Протяженность полос с полностью удаленной подстилкой колебалась в пределах 33 ... 79 %. В отличие от ПДН-1, дающего ровную поверхность минерализованной полосы, TTS-20 образует волнистую поверхность, неоднородную по составу генетических горизонтов, что связано с различной конструкцией дисков у этих покровосдирателей. При неглубоком залегании камней и крупных корней зубья дисков покровосдирателя TTS-20 заглубляются частично, поэтому поверхностные горизонты почвы удаляются только в месте соприкосновения ее с зубом. В результате образуются ямки, глубина которых ограничена глубиной залегания камней. Посадка саженцев в таких местах, как правило, невозможна. Доля пропусков и мест с некачественно обработанной почвой на участках колебалась от 20 до 62 % (табл. 4). На качество обработки почвы TTS-20 существенно влияет породный состав бывшего древостоя, главным образом наличие ели. Один пропуск при наезде



Таблица 3

## Ширина и глубина полос, подготовленных дисковыми покровосдирателями

№ участка	Состав агрегата	Ширина		Глубина	
		$M \pm m$ , см	V, %	$M \pm m$ , см	V, %
1	ТЛТ-100 + TTS-20	40,10 ± 0,54	13	9,70 ± 0,24	25
2	«	42,20 ± 0,49	10	10,20 ± 0,51	42
3	«	41,50 ± 0,41	9	12,50 ± 0,32	24
4	«	39,40 ± 0,54	15	16,40 ± 0,27	18
5	«	40,70 ± 0,55	17	17,10 ± 0,33	24
6	FMG 1010 + TTS-20	37,90 ± 0,87	18	15,40 ± 0,43	21
7	Кокумс + Дельта	66,30 ± 0,99	14	12,10 ± 0,44	33
8	«	64,10 ± 1,68	14	14,00 ± 0,95	36
9	«	68,30 ± 1,09	13	13,50 ± 0,49	30

Таблица 4

## Качество обработки почвы лесными дисковыми покровосдирателями

Состав агрегата	Бывший тип леса	Категория обработки почвы				Сгребание подстилки в кучу
		Без обработки	Подстилка удалена			
			частично	полностью	местами (ямки)	
ТЛТ-100 + TTS-20	Ос. т-зл.	28,1	10,5	46,3	15,0	0,1
	Е. чер.	47,3	2,6	42,3	7,8	0
	«	30,1	1,5	57,1	11,3	0
	Е. кис.	12,1	4,7	72,5	10,2	0,5
	«	43,5	4,4	33,5	18,3	0,3
FMG 1010 + TTS-20 Кокумс + Дельта	Е. чер	25,9	0	57,7	15,5	0,9
	«	10,2	2,8	86,4	0	0,6
	С. бр.	24,6	3,1	70,5	0	0
	«	6,0	0,7	93,3	0	0

на пни и корневые лапы на вырубке из-под елового древостоя колебался от 0,3 до 4,5, из-под лиственного – от 0,6 до 2,7 м. Основными причинами пропусков и некачественной обработки почвы стали захламленность вырубков порубочными остатками, завалуненность, а на участках из-под древостоев с преобладанием ели – пни и корневые лапы (табл. 5).

В АО «Шуялес» покровосдиратель TTS-20 агрегатировался с форвардером FMG 1010. Обследованный участок – свежая рубка из-под ельника черничного. Диски орудия тракторист устанавливал с минимальным углом наклона, что объяснялось его стремлением снизить нагрузку на трактор. Наблюдения показали, что средняя ширина полос с полностью удаленной подстилкой составляла 38 см, средняя глубина 15 см, протяженность полос 58 %, доля пропусков и некачественно обработанных участков почвы 42 %. Основными причинами некачественной обработки почвы стали высокая каменистость почв (37 %) и порубочные остатки (30 %).

Таблица 5

## Причины некачественной обработки почвы

Состав агрегата	Бывший тип леса	Процент необработанной почвы					
		Всего	В том числе по причинам				
			Камни	Пни, корневые лапы	Порубочные остатки	Завал пласта	Прочие
ТЛТ-100 + TTS-20	Ос. т-зл.	43	31	15	33	0	21
	Е. чер.	55	21	54	12	0	13
	«	41	53	29	10	1	7
	Е. кис.	23	11	27	49	0	13
	«	62	26	21	41	0	12
FMG 1010 + TTS-20	Е. чер.	11	38	20	30	0	12
Кокумс + Дельта	«	25	4	64	17	4	11
	С. бр.	6	18	60	0	12	10
	«	42	7	69	13	0	11

Наблюдения за работой TTS-20 на вырубках с дренированными почвами показали, что при установке дисков на минимальный угол наклона средняя ширина полос с удаленной подстилкой равнялась примерно 35, на средний – 40, максимальный – 45 см. Однако в последнем случае порубочные остатки плохо сдвигаются в сторону, в процессе работы скапливаются перед дисками и перемещаются по ходу движения трактора. В результате диски не заглубляются в почву и образуются большие пропуски. При встрече с пнями диски разворачиваются, переходят через порубочные остатки, и орудие снова начинает работать нормально. В среднем при установке максимального угла наклона дисков доля пропусков увеличивалась на 10 % по сравнению со средним. Худшие результаты получены при установке минимального угла наклона дисков.

Оценка работы дискового покровосдирателя TTS-Дельта проводилась на территории Питкярантского лесхоза. Два участка были представлены сосняками брусничными на песчаной почве и один – ельником черничным на супесчаной. Результаты показали, что ширина полос, на которых удалена подстилка, в среднем колебалась от 64 до 68 см, глубина от 12 до 14 см. Связь данных показателей с типом леса не отмечена. Поверхность полос с удаленной подстилкой, как и у TTS-20, была неровной, их протяженность максимальна (70 ... 93 %). Доля пропусков и участков с некачественной обработкой почвы колебалась от 6 до 25 %, основной их причиной были пни и корневые лапы (60 ... 69 %). Активный привод вращения дисков у TTS-Дельта позволяет сдвигать мелкие порубочные остатки в сторону и в отличие от TTS-20 более равномерно удалять лесную подстилку. Но в местах скопления порубочных остатков иногда отмечались случаи завала обработанных полос подстилкой вместе с порубочными остатками. Обследованные на территории данного лесхоза участки отличались слабой степенью каменистости почв (3 ... 11 %), а средняя глубина залегания камней превышала 26 см. Наблюдения за работой орудия показали, что при минимальном

угле наклона дисков ширина полос составила 46, при среднем – 68, при максимальном – 70 см, глубина соответственно 14,2; 13,4 и 12,6 см, т. е. та же закономерность, что и у TTS-20.

В целом следует отметить высокую производительность и качество работы TTS-Дельта на нераскорчеванных вырубках. На вырубках с дренированными почвами этот покровосдиратель по производительности, качеству обработки почвы значительно превосходил другие испытанные орудия. Одновременно с обработкой почвы он проводил полосную расчистку, сдвигая порубочные остатки в сторону. Основным его недостатком является высокая стоимость импортного тракторного агрегата, что резко повышает себестоимость работ. По данным КарНИИЛПа, приведенные затраты на 1 га, рассчитанные по действующим нормам выработки на предприятиях, у агрегатов ТЛГ-100-06 + TTS-20 были в 1,7, FMG 1010 + TTS-20 – в 2,9, Кокумс + TTS-Дельта – в 5,2 раза выше, чем у агрегата ТДТ-55А+ПДН-1. Для сравнения отметим, что при замене импортного образца TTS-20 на его аналог – покровосдиратель ПД-2, изготовленный на Онежском тракторном заводе, затраты на 1 га снизились в 1,6 раза.

Таким образом, агротехническим требованиям при обработке почвы на злаковых вырубках в условиях южной Карелии наилучшим образом соответствовал покровосдиратель TTS-Дельта, агрегируемый с мощным форвардером. Одновременно с обработкой почвы он проводил полосную расчистку от порубочных остатков. Основным его недостатком является высокая стоимость, что значительно увеличивает затраты на 1 га. Покровосдиратель TTS-20 на злаковых вырубках из-под ельников черничных с каменистыми почвами в среднетаежной подзоне не обеспечивал качественной обработки почвы, поэтому применять его не рекомендуется, если не планируются агротехнические уходы с помощью гербицидов. Он может найти широкое применение в условиях северотаежной подзоны, где преобладают вырубки с легкими почвами, слабо зарастающие травянистой растительностью, а также в среднетаежной подзоне на вырубках из-под сосняков лишайниковых, вересковых и брусничных. Затраты на обработку почвы любым из изученных агрегатов оказались значительно выше, чем по нормативно-технологическим картам. Это указывает на недостаточное финансирование лесовосстановительных работ и отрицательно сказывается на качестве лесных культур.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Синькевич, М.С.* Искусственное восстановление леса на вырубках Европейского Севера [Текст] / М.С. Синькевич, В.И. Шубин. – Петрозаводск, 1969. – 180 с.
2. *Унт, В.Я.* Механизмы для создания культур ели на завалуненных почвах [Текст] / В.Я. Унт // Повышение эффективности лесовосстановительных мероприятий на Севере. – Петрозаводск, 1977. – С. 133–143.

---

3. *Цыпук, А.М.* Создание лесных культур посадкой под лункообразователь Л-2 [Текст] / А.М. Цыпук, А.Э. Эгипти, А.И. Соколов // Лесн. хоз-во. – 1990. – № 11. – С. 43–45.

Институт леса  
Карельского НЦ РАН

Поступила 17.05.03

*A.I. Sokolov, V.A. Kharitonov, T.I. Krivenko*

**New Mechanisms for Cultivation on Clearcuts in Conditions of Karelia**

The results of testing two foreign tillers TTS-Delta and TTS-20 on clearcuts in the conditions of Karelia are described. Recommendations for their application are provided.

---

УДК 630\*237.4

*А.Л. Юрьева*

### **ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ ПОЧВЫ И ВИДА ПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА РОСТ И РАЗВИТИЕ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР СОСНЫ**

Изучена периодичность роста и развития сосны обыкновенной в зависимости от подготовки почвы и вида посадочного материала.

*Ключевые слова:* лесные культуры, сосна обыкновенная, ритмы роста и развития, сеянцы, саженцы, закрытая и открытая корневые системы.

В 1997 г. при Петрозаводском государственном университете было организовано учебно-опытное лесничество площадью около 2500 га. По данным инвентаризации 1929 г., на его территории произрастали сосновые леса. Обследование 1998 г. показало преобладание лиственных насаждений, сформировавшихся на концентрированных вырубках 1930-х гг. Почвы сравнительно плодородны, более 75 % местообитаний оцениваются I–III классами бонитета. Наиболее плодородные участки заняты лиственными породами: в процессе лесовозобновления на вырубках прошлых лет возникали смешанные лиственные древостои, под пологом которых формировался второй ярус из ели. Значительную долю общего запаса составляют приспевающие и спелые еловые древостои, частично сформировавшиеся в результате выборочных рубок в сосняках. Налицо классическая смена сосны елью и малоценными лиственными породами. При проведении хозяйственных мероприятий в таких условиях необходимо в наиболее плодородных типах условий произрастания обеспечить восстановление хвойных пород, желателно сосны. Часто это возможно только при искусственном восстановлении.

Лесные культуры закладывают различными методами, с разными способами подготовки почвы, из различных видов посадочного материала. В Скандинавии накоплен опыт создания лесных культур посадкой сеянцев с закрытой корневой системой (ЗКС) по неподготовленной почве. В нашей стране чаще используется посадочный материал с открытой корневой системой (ОКС) по подготовленной почве, но применяются и контейнеризированные сеянцы. Среди лесных культур, созданных в Карелии посадочным материалом с ЗКС, отмечены как успешные, так и неудачные. Например, в условиях открытых болот и на побережье Ладожского озера в Питкярантском и Сортавальском районах они имели слаборазвитую деформированную корневую систему [5]. По-видимому, не все типы условий произрастания подходят для такого посадочного материала. В литературе отмечается, что для успешного укоренения сосны с закрытыми корнями почва должна быть хорошо дренируема, тогда образуется стержневая корневая система, обеспечивающая высокую устойчивость растений [2, 3]. Таким образом, появилась необходимость в изучении особенностей роста контейнеризированных се-

янцев и в разработке рекомендаций по их применению. Нужно сравнить их развитие также с развитием сеянцев с ОКС для выбора наиболее экологически и экономически выгодного посадочного материала.

Объекты и методы исследований. В 1999–2002 гг. проведены исследования особенностей роста лесных культур сосны обыкновенной, созданных на вырубке десятилетней давности в брусничном типе условий местопроизрастания на территории учебно-опытного лесничества ПетрГУ. Изучали культуры, созданные посадкой: однолетних сеянцев с ЗКС и подготовкой почвы; то же без подготовки почвы; двухлетних сеянцев с ОКС и подготовкой почвы; посевом с подготовкой почвы.

Исследования проводили поэтапно [1]:

1) изучение развития и ритмов роста лесных культур сосны в процессе онтогенеза: линейного и радиального роста надземной части и корневой системы; накопления сухого органического вещества различными органами растения; содержания влаги в тканях различных органов растения в течение сезона;

2) выяснение особенностей минерального питания саженцев сосны и накопления элементов минерального питания растений в течение сезона.

Результаты и их обсуждение. Сезонное развитие однолетних сеянцев (посевы) существенно отличается от старших, так как в первый год жизни они проходят несколько этапов органогенеза: семя – проросток – всход – сеянец. В течение 2000–2002 гг. сеянцы отставали в развитии от трех других вариантов, что обусловлено начальными условиями, хотя в 2002 г. по некоторым показателям (длина хвои, диаметр осевого побега) различия между ними и саженцами с ЗКС без подготовки почвы не достоверны.

Рост и развитие саженцев, как и однолетних сеянцев, происходят с определенной периодичностью. Практически по всем измеряемым показателям в 1999–2002 гг. лидировали саженцы с ЗКС и с подготовкой почвы (рис. 1). Приживаемость лесных культур оказалась выше у этого же варианта, без подготовки почвы – самая низкая (рис. 2), поэтому на второй год весной здесь проведено дополнение.

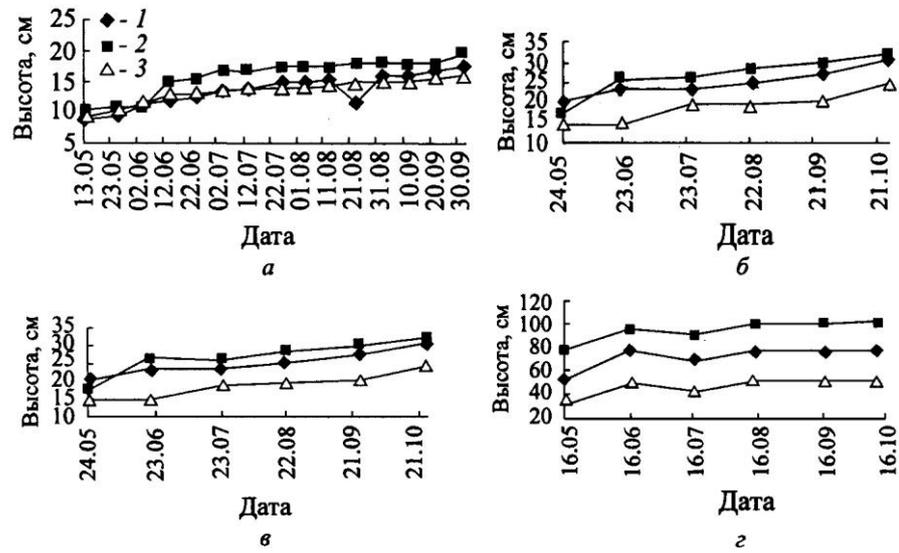


Рис. 1. Изменение высоты стволиков: а – 1999 г.; б – 2000 г.; в – 2001 г.; г – 2002 г.; 1 – ОКС; 2, 3 – ЗКС с подготовкой почвы и без нее

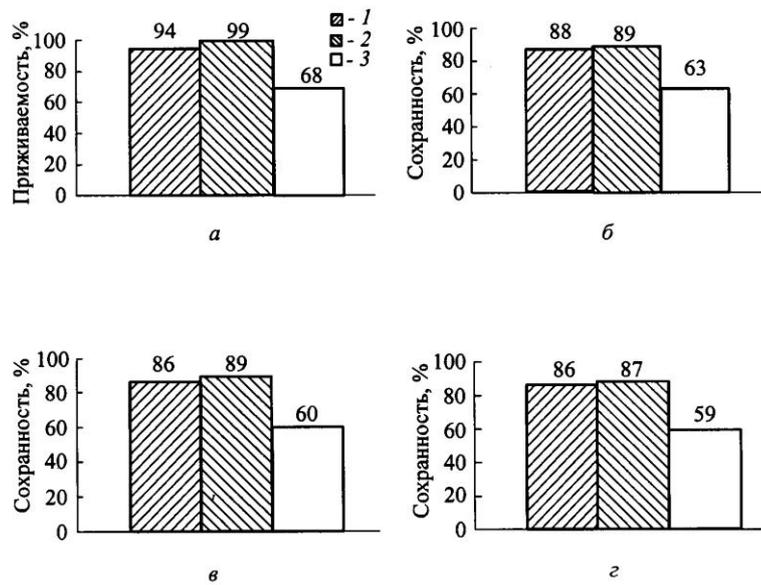


Рис. 2. Сохранность лесных культур. Обозначения см. на рис. 1

Анализ достоверности различий в 1999–2000 гг. показал, что:  
– саженцы с ОКС и ЗКС с подготовкой почвы развивались практически одинаково;

– у саженцев с ЗКС без подготовки почвы развитие в первый год после посадки шло медленнее, чем у остальных вариантов. К концу второго сезона роста достоверными остались различия по четырем показателям (высота, диаметр корневой шейки и осевого побега, число хвоинок), т. е. саженцы с ЗКС без подготовки почвы постепенно начали догонять в росте два других варианта.

Анализ различий в 2001–2002 гг. показал их достоверность:

– между саженцами с ЗКС с подготовкой почвы и без нее по всем, кроме двух показателей (длина и ширина хвои);

– между саженцами с ОКС и ЗКС без подготовки почвы практически по всем показателям на конец сезона вегетации в 2001 г. и в течение всего сезона вегетации в 2002 г.;

– по некоторым показателям между саженцами с ОКС и ЗКС с подготовкой почвы на конец сезона вегетации в 2001 г.;

– по высоте и диаметрам корневой шейки и осевого побега между саженцами с ОКС и ЗКС с подготовкой почвы в течение всего вегетационного периода в 2002 г., а по остальным показателям на конец сезона.

Во всех вариантах наблюдались два максимума накопления сухой массы ассимиляционным аппаратом: в конце июля – начале августа и в конце сентября. Накопление биомассы стволиков и корней шло постепенно, увеличиваясь к концу сезона (рис. 3). Более активно сухое вещество накапливалось у саженцев с ОКС и ЗКС с подготовкой почвы.

Итак, к концу 2000 г. саженцы с ЗКС без подготовки почвы постепенно догоняли в росте два других варианта. Но наметившаяся тенденция не подтвердилась в 2001–2002 гг., саженцы без подготовки почвы намного отставали в развитии практически по всем показателям в течение сезона роста. К концу вегетации в 2002 г. различия между саженцами с ЗКС без подготовки почвы и двумя другими вариантами достоверны по всем показателям кроме длины и ширины хвои. Полученные данные свидетельствуют о сильном влиянии подготовки почвы на рост и приживаемость культур. В нашем случае оно стало более заметным на четвертый год после посадки, т. е. усиливалось со временем.

В 1999–2001 гг. саженцы с ОКС и ЗКС с подготовкой почвы развивались практически одинаково, но в 2002 г. различия по высоте и диаметрам корневой шейки и осевого побега были достоверны в течение всего сезона, по остальным показателям – к концу сезона вегетации.

Сосна в отличие от ели не образует придаточных корней, поэтому любые повреждения корневой системы приводят к сильному ослаблению

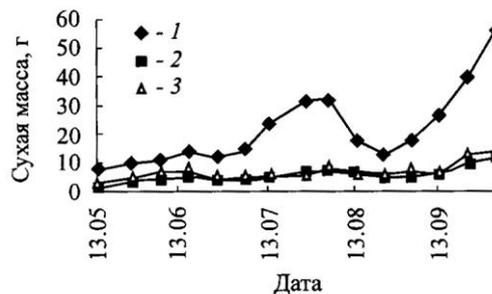


Рис. 3. Изменение сухой массы саженцев с ОКС в 1999 г.: 1 – хвоя; 2 – стволики; 3 – корни

сеянцев, а иногда их гибели [3]. У растений с ЗКС риск повреждения корней ниже, чем у сеянцев с ОКС. Наличие кома питательного субстрата обеспечивает также лучший рост саженцев с ЗКС [2, 4]. Возможно, эти факторы и сказались на лучшем развитии на четвертый год саженцев с ЗКС по сравнению с ОКС.

Минеральное питание сосны анализировали в 1999 г. на примере саженцев с ОКС [6, 7]. Определяли содержание азота, фосфора, калия, углерода и золы в отдельных частях растений (корни, стволы, хвоя). Для всех органов саженцев характерно максимальное накопление элементов питания к концу вегетационного периода (с 02.09.99). Калий и фосфор накапливались более равномерно, чем азот.

У хвои наблюдались два максимума в накоплении элементов минерального питания. Первый приходился на середину сезона вегетации (24.06–26.07.99), хотя для калия и фосфора он менее выражен. В этот период активно увеличивались линейные размеры саженцев и масса ассимиляционного аппарата. К концу сезона прекращался рост растений, и азот не нужен им в больших концентрациях, поэтому в августе снижалось содержание азота в хвое и стволиках. В сентябре – октябре концентрация азота в хвое и стволиках снова повышалась, что связано с подготовкой растений к зиме (рис. 4).

Содержание фосфора в хвое возрастало в июле, когда шло максимальное накопление биомассы, однако при ее увеличении в августе фосфора в хвое становилось несколько меньше,

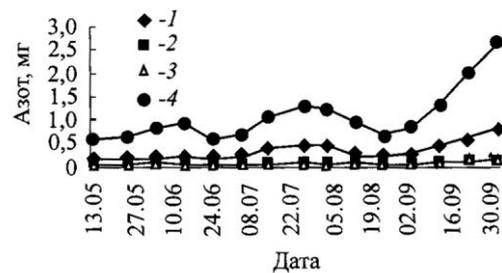


Рис. 4. Содержание азота в различных органах (1 – хвоя, 2 – стволы, 3 – корни) и в растении в целом (4)

к концу сезона вегетации его содержание вновь повышалось. Накопление калия в хвое аналогично, во второй декаде июня происходило его небольшое снижение.

Динамика накопления элементов минерального питания в стволиках и корнях сходна на протяжении всего сезона вегетации. У стволиков максимальное содержание азота наблюдалось в весенний период, когда их интенсивный рост еще не начался. Далее оно постепенно снижалось за счет усиленного роста стволиков, а также перераспределения питательных веществ внутри растения, их оттока на формирование хвои (июль). После прекращения роста хвои количество азота в стволиках стабилизировалось. Максимум углерода в стволиках приходился примерно на то же время, что и у хвои (04.07–03.08.99), а также на конец сезона вегетации. В корнях он накапливался равномерно в течение периода вегетации.

Максимум содержания азота в корнях приходился на сентябрь, когда значительно увеличиваются размеры корневой системы, а минимум на конец июня – начало июля. В августе, когда наблюдается активный рост новых корневых окончаний и корневой системы в целом, содержание азота в хвое существенно уменьшалось за счет оттока пластических веществ в корневые окончания. После одревеснения корней и стволиков, как уже говорилось, количество азота в хвое в сентябре увеличивалось.

Содержание фосфора в стволиках и корнях возрастало к 23.08.99 и оставалось стабильным до конца сезона, не копируя накопления биомассы, а изменяясь в соответствии с биологическими потребностями растения. Калий в стволиках и корнях накапливался постепенно в течение сезона, с 24.06.99 в стволиках его было немного больше, чем в корнях, к концу сезона (с 23.08.99) наблюдалась обратная картина. Общее содержание калия в растении к зиме существенно увеличивалось.

Содержание элементов минерального питания положительно коррелирует с накоплением сухого органического вещества. Так, между накоплением сухой массы саженцами сосны и содержанием в них фосфора и углерода выявлена прямая линейная связь. Высокий коэффициент корреляции позволяет использовать эту зависимость для прикладных целей. На определенном этапе органогенеза по изменению массы саженцев можно рассчитать их потребность в элементах минерального питания.

Подводя итоги исследований, проведенных в 1999 – 2002 гг., можно говорить о трех наиболее напряженных периодах в сезонном росте саженцев и сеянцев: усиленного роста побегов, формирования ассимиляционного аппарата и накопления сухой массы, осеннего накопления органического вещества, связанного с перезимовкой растений, а также о значительной роли подготовки почвы в первые годы после посадки.

Из двух представляющих практический интерес способов создания лесных культур посадкой – с ОКС по обработанной почве и с ЗКС без обработки почвы – на данном этапе по всем показателям лидировал первый. В то же время лесные культуры, созданные сеянцами с ЗКС и подготовкой почвы, имели лучшие показатели роста и приживаемость по сравнению с ОКС. На основании четырехлетних исследований рано делать окончательные выводы о необходимости подготовки почвы при использовании посадочного материала с ЗКС, но если в последующие годы эти саженцы будут по-прежнему первенствовать, то можно говорить о целесообразности этого варианта создания культур на супесчаных почвах в условиях брусничного типа леса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бейдеман, И.К.* Методика изучения фенологии растений и растительных сообществ [Текст] / И.К. Бейдеман. – Новосибирск: Наука, 1974. – 155 с.
2. *Жигунов, А.В.* Теория и практика выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой [Текст] / А.В. Жигунов. – СПб.: СПбНИИЛХ, 2000. – 293 с.
3. *Изверкова, И.М.* О развитии корневой системы контейнеризированных сеянцев сосны и ели в культурах [Текст] / И.М. Изверкова // Восстановление и мелиорация лесов Карелии: сб науч. тр. – 1983. – С. 55–60.
4. *Козлова, Т.И.* Влияние последствий деформаций корней ПМЗК сосны на их регенерацию и последующий рост в культурах [Текст] / Т.И. Козлова // Сосновые леса России в системе многоцелевого лесопользования: тез. Всерос. конф. ВЛТИ. – Воронеж, 1993. – С. 90–92.
5. *Маркова, И.А.* Основные факторы успешного роста лесных культур на Северо-Западе России [Текст] / И.А. Маркова // Лесовосстановление на Европейском Севере: материалы финляндско-рос. семинара по лесовосстановлению, 28 сентября – 2 октября 1998, НЦ ВАНГАА. – 2000. – С. 183–193.
6. *Наквасина, Е.Н.* О ритмах питания однолетних сеянцев ели в лесном питомнике [Текст] / Е.Н. Наквасина // Лесн. журн. – 1979. – № 2. – С. 12–16. – (Изв. высш. учеб. заведений).
7. *Щербаков, А.П.* Ритмы роста и питания древесных растений [Текст] / А.П. Щербаков // Физиологические основы роста древесных растений: сб. ст. – М., 1960. – С. 91–108.

Петрозаводский государственный  
университет

Поступила 17.05.03

*A.L. Yurjeva*

### **Influence of Soil Preparation and Planting Material Type on Growth and Development of Pine Forest Cultures**

Growth periodicity and development of Scots pine depending on soil preparation and type of planting material is studied.

УДК 630\*385.1

*Д.А. Корепанов*

### ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПОДТОПЛЕНИЯ ПОЧВЕННЫХ ГОРИЗОНТОВ В ОСНОВНЫХ ТИПАХ ХВОЙНЫХ НАСАЖДЕНИЙ ВОЛЖСКО-КАМСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ

Приведены данные о затоплении горизонтов почв в основных типах хвойных насаждений на избыточно увлажненных землях и его влиянии на производительность древостоев.

*Ключевые слова:* типы леса, режим почвенно-грунтовых вод, продолжительность подтопления, болота.

При оценке условий роста и развития хвойных древостоев на заболоченных землях, кроме данных о режиме грунтовых вод, важное значение имеют сведения о продолжительности нахождения корневых систем деревьев в перенасыщенной водой почве. В разных типах леса продолжительность подтопления почвенных горизонтов неодинакова, но повсеместно напрямую зависит от количества атмосферных осадков, выпадающих за вегетационный период.

Особо неблагоприятный режим почвенно-грунтовых вод (ПГВ), особенно в весенне-раннелетний период [2], наблюдается в еловых насаждениях травяно-болотной группы типов леса (табл. 1). Рассматриваемые

Таблица 1

**Продолжительность подтопления почвенных горизонтов  
в основных типах еловых насаждений, сут**

Горизонт, см	Кисличный	Бруснично-черничный	Черничный	Разнотравно-зеленомошный	Болотно-таволговый	Приручейный
Выше 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>0</u> 0	<u>31; 42</u> 46	<u>31; 51</u> 64	<u>31; 41</u> 61
0 ... 10	<u>9; 9</u> 9	<u>0</u> 0	<u>2; 2</u> 2	<u>31; 54</u> 74	<u>31; 58</u> 91	<u>31; 52</u> 75
11 ... 20	<u>15; 17</u> 17	<u>3; 3</u> 3	<u>10; 12</u> 12	<u>31; 60</u> 88	<u>31; 61</u> 105	<u>31; 61</u> 85
21 ... 30	<u>21; 27</u> 23	<u>7; 9</u> 9	<u>18; 23</u> 26	<u>31; 61</u> 100	<u>31; 61</u> 108	<u>31; 61</u> 96
31 ... 50	<u>31; 45</u> 53	<u>21; 31</u> 37	<u>30; 44</u> 66	<u>31; 61</u> 124	<u>31; 61</u> 135	<u>31; 61</u> 122
51 ... 75	<u>31; 60</u> 85	<u>31; 48</u> 71	<u>31; 60</u> 92	<u>31; 61</u> 150	<u>31; 61</u> 153	<u>31; 61</u> 153
76 ... 100	<u>31; 61</u> 97	<u>31; 61</u> 94	<u>31; 61</u> 117	<u>31; 61</u> 153	<u>31; 61</u> 153	<u>31; 61</u> 153

Примечание. Первое число – продолжительность подтопления в мае; второе – в июне; под чертой в мае – сентябре.

в таблице насаждения относятся к двум группам типов леса, существенно различающихся по условиям увлажнения. Если в зеленомошной группе режим ПГВ характерен для большей части лесных экосистем южной тайги, то три последних типа леса представляют полугидроморфную группу с устойчивым переувлажнением. По общей продолжительности подтопления обследованного почвенного профиля все рассматриваемые типы ельников в порядке улучшения условий составляют следующий ряд: болотно-таволговый, приручейный, разнотравно-зеленомошный, черничный, кисличный и бруснично-черничный.

Самая напряженная обстановка складывается в ельнике болотно-таволговом, где затопленным в весенне-летний период (51 день) оказался даже верхний 10-сантиметровый слой почвы. Наибольшее стояние воды в верхнем слое почвы болотно-таволгового типа отмечено на протяжении 64, приручейного – 61, разнотравно-зеленомошного – 46 дн. Нижний из наблюдаемых слоев (76 ... 100 см) был затоплен в течение 150 ... 153 дн., т. е. весь период наблюдений.

Верхний 10-сантиметровый слой почвы в насаждениях этой группы типов леса подтапливается весной почти 2 месяца. Уровень ПГВ держится на 51 ... 75 см в течение всего вегетационного периода. Особенно неблагоприятен режим в дождливое лето, когда талые воды стоят на поверхности почвы практически 2 месяца.

Наблюдения за режимом ПГВ показывают, что продолжительность подтопления почвенных горизонтов на глубоких торфяных почвах (травяно-болотной группы) носит черты общей высокой обводненности. Больших различий между типами леса этой группы не прослеживается. Существенно более благоприятен режим ПГВ в насаждениях кисличных и бруснично-черничных, обычно занимающих местообитания автоморфного типа.

Несколько иные результаты получены при изучении водного режима сосновых насаждений на глубоких торфяных почвах. Наблюдения здесь проводились в период интенсивного роста древостоев, что обеспечивало получение более корректных сравнительных данных [1].

Продолжительность подтопления почвенных горизонтов в течение сезона в сосняках показана в табл. 2. Существенно, что во всех изучаемых сосновых насаждениях этой формации отмечен период со стоянием вод выше земной поверхности. Но если в чернично-сфагновом типе условий он носил чисто символический характер (2 дн.), то в других колебался от 7 до 52 дн. Если в чернично-сфагновом, болотно-разнотравном, багульниково-сфагновом вода выше нулевой отметки стояла главным образом весной, то в осоково-сфагновом, осоково-тростниковом и травяно-сфагновом – примерно поровну весной и осенью.

Повсеместно различия между типами сосняков быстро нивелируются с глубиной горизонтов и на уровне 51 ... 75 см практически исчезают. Лишь в сосняке чернично-сфагновом период подтопления 51–75-сантиметрового слоя осенью на 9 дн. короче, чем во всех остальных сосновых насаждениях.



Наибольшая продолжительность подтопления отмечалась на торфяных почвах верхового типа заболачивания. Так, в сосняке пушицево-сфагновом почвенно-грунтовые и талые воды подтапливают поверхность почвы в течение 110 дн. и даже на 28 дн. выходят на поверхность. Горизонт почвы 11 ... 20 см затопляется в течение всего вегетационного периода. По существу корневая система древостоя здесь полностью находится в воде уже на глубине 10 см. Частично свободен от влаги только верхний 10-сантиметровый слой почвы-подстилки. За период вегетации в этом типе леса остается свободным от влаги в течение 43 дн. только верхний 10-сантиметровый слой, а горизонт 11 ... 20 см – 15 дн. Таким образом, лишь слой почвы глубиной 0 ... 10 см и кочки являются той микросредой, в которой может функционировать корневая система древесной растительности [1].

В сосняке кустарничково-сфагновом почвенно-грунтовые и талые воды затапливают поверхность почвы в течение 28 дн. Верхний 10-сантиметровый слой почвы подтапливается в мае и начале июня, нижележащие горизонты – в течение мая – июня. Обильные осадки в условиях сосняка кустарничково-сфагнового, как и в других типах леса, значительно увеличивают продолжительность подтопления почвенных горизонтов, независимо от класса возраста древостоя.

Весь основной период роста древесной растительности, приходящийся на май – июнь, верхний 10-сантиметровый слой почвы затопляется талыми водами почти полностью. Поверхность почвы покрыта водой в среднем 35 дн. В целом в течение вегетационного периода вода не стоит на поверхности почти 99 дн. Верхний 10-сантиметровый слой свободен от воды 42 дн., горизонт 11 ... 20 см – 12 дн., горизонт 21 ... 30 см затоплен полностью.

Такой же неблагоприятный режим увлажнения почв отмечен в сосняке травяно-сфагновом. В сосняке чернично-сфагновом продолжительность подтопления значительно меньше, чем в осоково-сфагновом и травяно-сфагновом. В весенний период ПГВ выходят на поверхность на незначительное время, верхний 10-сантиметровый слой подтапливается в течение 22 дн. Нижележащие горизонты в период наиболее интенсивного роста древесной растительности в мае – июне затоплены грунтовыми водами. Полностью затоплен в течение вегетационного периода слой почвы ниже 50 см. Горизонт 0 ... 10 см, где сосредоточена основная масса корней, свободен от влаги все лето, что позволяет древесной растительности на относительно бедных торфяных почвах расти вполне удовлетворительно (по III – IV классам бонитета).

Таким образом, сосняки на торфяных почвах верхового типа заболачивания отличаются крайне неблагоприятным режимом ПГВ, что наглядно проявляется в продолжительности затопления верхних корнеобитаемых горизонтов почвы талыми и грунтовыми водами, особенно в кустарничково-сфагновом и пушицево-сфагновом типах леса. Свободным от почвенной влаги остается незначительное время лишь верхний слой глубиной около 14 см, который в основном представлен очесом, бедным зольными веществами. Большое влияние на продолжительность подтопления почвенных горизонтов оказывают обильные летние осадки. Однако благодаря располо-

жению этого типа леса по окраинам болот здесь обеспечивается сравнительно быстрый сброс грунтовых вод.

В сосняках травяно-болотной группы (в местообитаниях низинного заболачивания) продолжительность подтопления почвенных горизонтов также неодинакова в разных типах насаждений. В болотно-разнотравном типе леса талые и ПГВ в весенний период выходят на поверхность на 13 дн., в сфагново-разнотравном – на 19 дн. Верхний 10-сантиметровый слой почвы в весенний период во всех насаждениях этой группы подтапливается полностью, в сосняке сфагново-разнотравном в мае – июне также слой 11 ... 20 см. Полное же подтопление почвенных горизонтов в течение вегетационного периода в сосняках этих типов наблюдается на глубине 20 ... 30 см. Несколько более благоприятен режим лишь в сосняках болотно-разнотравных.

Продолжительность переувлажнения почвенных горизонтов в этих типах леса различается в основном в летне-осенний период. Так, в сосняке болотно-разнотравном верхний 10-сантиметровый слой почвы подтапливается в течение 84 дн., в осоково-тростниковом почти в 2 раза дольше – 142 дн. Почвенные и талые воды выходят на поверхность в сосняке болотно-разнотравном на 15, в осоково-тростниковом – на 50 дн.

Наши исследования подтвердили известные данные о различиях водного режима в насаждениях разных типов и групп типов леса. Вместе с другими, прежде всего климатическими, факторами они определяют экологическую сущность рассматриваемых типов насаждений. Выявленные особенности режимов подтопления и дренирования грунтов открывают возможности для совершенствования гидромелиоративных мероприятий в заболоченных лесных ландшафтах Волжско-Камского междуречья.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вомперский, С.Э.* Биологические основы эффективности лесосошения [Текст] / С.Э. Вомперский. – М.: Наука, 1968. – 312 с.
2. *Пьявченко, Н.И.* Лесное болотоведение [Текст] / Н.И. Пьявченко. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 192 с.

Уральский государственный  
лесотехнический университет

Поступила 10.04.06

*D.A. Korepanov*

#### **Underflooding Duration of Soil Horizons in Main Coniferous Stand Types of Area between Volga and Kama**

Data related to flooding soil horizons in the main types of coniferous stands on excessively moistened soil and its influence on the stand productivity are provided.

УДК 625.77: 630\*181

**Л.М. Кавеленова**

Кавеленова Людмила Михайловна родилась в 1958 г., окончила в 1986 г. Самарский государственный университет, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии, ботаники и охраны природы Самарского государственного университета. Имеет 115 печатных работ в области экологии и экофизиологии растений, биоиндикации.



### **К ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ДИСКОМФОРТА ДРЕВЕСНЫХ ВИДОВ-ИНТРОДУЦЕНТОВ В ГОРОДСКИХ НАСАЖДЕНИЯХ**

Представлены результаты расчета ПЭД для некоторых интродуцентов в насаждениях г. Самары.

*Ключевые слова:* древесные растения, городские насаждения, экологический дискомфорт.

Воздействие человека на растительный покров приводит к синантропизации. Среди ее многочисленных негативных последствий значатся: вымирание некоторых видов растений, общее обеднение флоры, уменьшение генетического разнообразия отдельных видов, упрощение структуры, унификация, снижение продуктивности и стабильности растительного покрова [2, 3]. При замещении природных экосистем городскими территориями растительные сообщества либо полностью уничтожаются, либо претерпевают коренные изменения. Позднее, на одном из этапов развития города, могут проводиться работы по озеленению, целью которых является достижение определенного фитомелиоративного и эстетического эффекта. Если использовать предложенную Westhoff в 1952 г. (цит. по [3]) схему деления существующих экосистем и растительных сообществ на естественные, квазинатуральные (почти естественные, семикультурные), полукультурные и культурные, лесопарковые зоны города будут представлены квазинатуральными, а насаждения внутри города – полукультурными и культурными сообществами.

Анализ данных о формировании системы озеленения в различных городах [1, 4, 7, 8, 11 – 16 и др.] позволяет свести все существующее разнообразие к трем ведущим вариантам. Первый и наиболее традиционный вариант – воссоздание насаждений на месте экосистем, нарушенных в процессе освоения территории, строительства жилых и промышленных объектов, который мы предложили назвать креационным (от лат. *creatio* – созидание) [5].

Во-вторых, внутри городской территории неминуемо появляются участки, на которых после полного нарушения ранее существовавших растительных сообществ естественно формируются новые, в состав которых

первоначально будут входить лишь самые устойчивые, в массе – рудеральные виды. Для данного пути генезиса в научной литературе иногда используется термин, удачность которого можно оспорить, – «спонтанная растительность». Этот путь генезиса насаждений можно назвать волонтарным (от лат. *voluntarius* – доброволец, поступающий на службу).

В третьих, быстрый рост городской территории в XX в. зачастую приводил к смыканию пригородных населенных пунктов с городом и поглощению фрагментов естественных растительных сообществ, в различной мере подвергавшихся преобразованию в дальнейшем. Такой вариант генезиса насаждений можно назвать резидентным (от лат. *residens* – пребывающий).

Между названными типами формирования растительных группировок нет абсолютной границы. Как правило, развитие городских насаждений идет по крайней мере двумя из названных путей генезиса. Остаточные фрагменты естественных растительных сообществ (насаждения резидентного генезиса) под действием интенсивной высокой рекреационной нагрузки, утрачивая наиболее чувствительные к антропогенному воздействию виды, подвергаются внедрению устойчивых рудералов [14, 15], что может приводить к формированию резидентно-волонтарных растительных группировок. Подобные парковые массивы являются частью системы озеленения многих городов мира, где они называются городскими лесами [13]. Не менее распространены ситуации, когда в искусственном насаждении (креационного генезиса) под пологом древесной растительности, представленной высаженными экземплярами местных и интродуцированных видов, естественным путем формируется травостой либо различные виды внедряются в искусственно посеянный травостой (газон). В таком случае можно говорить о формировании креационно-волонтарных фитоценозов. Примером служат большинство скверов и парков, дендрарии, насаждения вокруг промышленных предприятий, больниц.

В креационно-волонтарных насаждениях древесные растения обычно подбирают и размещают произвольно, поэтому здесь могут быть широко представлены виды-интродуценты. Включение их в насаждения за пределами районов естественного обитания может ставить под сомнение успешное существование этих растений. Для заключения о возможности устойчивого роста и развития интродуцента в новых природных условиях необходимы многолетние наблюдения. При высокой изменчивости погодных условий в разные годы (с чем мы сталкиваемся, например, в континентальном климате лесостепи) прогноз результатов интродукции становится еще более затруднительным. В качестве вспомогательного приема мы предлагаем сравнивать экологические характеристики вида-интродуцента (креационного компонента насаждения) и естественно сформировавшегося в данном насаждении травостоя (волонтарный компонент насаждения). Сопоставление результатов позволяет обнаружить заметные расхождения условий в насаждениях с показателями экологического оптимума произрастающих здесь древесных растений. В этом случае, на наш взгляд, вполне правомерно говорить о возникновении определенного экологического дискомфорта, испытываемого

древесным видом. Мету возникающего экологического дискомфорта мы предлагаем оценивать с помощью несложной формулы [6], основанной на использовании одного из вариантов количественных балльных шкал, например экологических шкал Д.Н. Цыганова [10]. В данном сообщении продемонстрированы результаты ее применения для некоторых древесных видов, произрастающих в насаждениях г. Самары.

В течение 1990–2001 гг. проводились мониторинговые обследования компонентов системы озеленения г. Самары (насаждений внутригородских лесопарков, скверов, улиц). Оценивали состояние почвенного покрова, особенности положения в рельефе, микроклимат, уровень техногенного загрязнения, определяли видовой состав растений в сформировавшемся естественным путем травостое. Полученные списки видов использовали для оценки условий насаждений на территории города (переходная полоса от южной лесостепи к зоне настоящих степей) в зависимости от различных экологических режимов по шкалам Д.Н. Цыганова [9]: термоклиматического ( $Tm$ ), увлажнения почв ( $Hd$ ), переменной влажности почв ( $fH$ ), кислотности почв ( $Rc$ ), солевого режима почв ( $Tr$ ), богатства почв азотом ( $Nt$ ) и освещенности – затенения ( $Lc$ ). Выявленное таким образом экологическое пространство, в котором древесные виды находились в местных условиях, сравнивали с экологическим ареалом исследуемых древесных видов в зоне их экологического оптимума, оцененного Д.Н. Цыгановым для условий хвойно-широколиственных лесов. Рассчитывали соответствующие средние значения. Показатель экологического дискомфорта (ПЭД, %) определяли как меру несоответствия между экологическим ареалом и экологическим пространством по формуле [6]

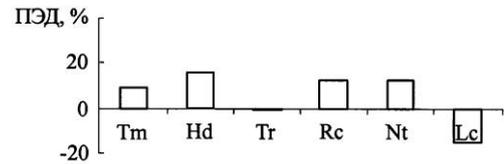
$$\text{ПЭД} = 100(A - B)/A,$$

где  $A$ ,  $B$  – значения фактора соответственно в экологическом ареале (оптимум для конкретного вида) и в исследуемом насаждении.

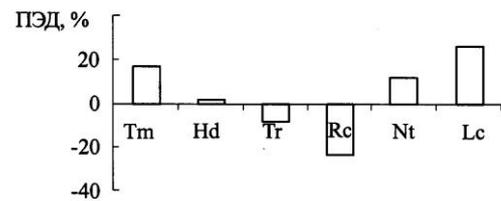
Результаты расчета ПЭД для некоторых видов-интродуцентов в условиях лесостепи (насаждения г. Самары) представлены на рис. *а*, *б*, *в*.

В зависимости от того, избыточно или недостаточно значение фактора в экологическом пространстве по сравнению с экологическим ареалом вида, ПЭД может принимать как положительное, так и отрицательное значения. При  $\text{ПЭД} > 0$  экологический оптимум вида оказывается выше, чем значение фактора в данном местообитании (уровень воздействия фактора недостаточен). Напротив, при  $\text{ПЭД} < 0$  уровень воздействия конкретного фактора в насаждении выше экологического оптимума вида (уровень воздействия фактора избыточен). Невысокий ПЭД по всем факторам означает приблизительное соответствие экологической валентности вида местным условиям, а выраженный дискомфорт по ряду факторов указывает на особенности местообитания, затрудняющие существование данного древесного вида в конкретных условиях. В качестве примера приведем результаты, полученные при расчете ПЭД для трех видов-интродуцентов, широко представленных в различных насаждениях г. Самары.

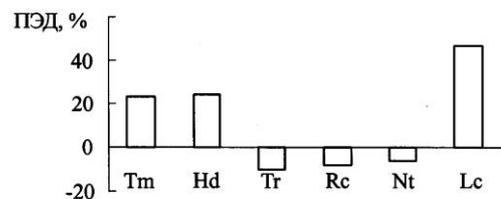
Интродуцент североамериканского происхождения ясень ланцетный, или зеленый (*Fraxinus lanceolata* Borkh.) в местных условиях (экологическом пространстве) сталкивается с дефицитом тепла, почвенного увлажнения, доступного азота в почве, а уровень освещения в насаждениях г. Самары для него избыточен (рис. а).



Липа крупнолистная (*Tilia platyphyllos* Scop.) в естественном ареале произрастает в Западной и Центральной Европе. В условиях лесостепи Среднего Поволжья экологический дискомфорт для данного вида вызывается некоторым дефицитом тепла и доступного азота в почве, тогда как ее потребности в почвенном увлажнении и солевом режиме почвы практически соответствуют местному экологическому пространству (рис. б).



Широко используемый в озеленении населенных мест каштан ложноконский (*Aesculus hippocastanum* L.), происходящий из южных районов Балканского полуострова, в условиях наших парковых насаждений сталкивается с большим дефицитом тепла и влаги, чем два предыдущих вида. Для него избыточен уровень растворимых солей и азота в почве, а также излишне высока реакция почвенного раствора (рис. в).



Показатели экологического дискомфорта для некоторых древесных видов в насаждениях г. Самары: а – ясень ланцетный; б – липа крупнолистная; в – каштан ложноконский

Основное условие, при котором эффективно применение данной формулы, – возможность оценки как условий, существующих в насаждении, так и экологических потребностей анализируемых видов с помощью соответствующих балльных шкал с большим размахом варьирования.

В городской среде достаточно широко распространено использование интродуцентов в озеленении. Так, в г. Самаре произрастают 164 вида и формы древесных и кустарниковых растений из 26 семейств и 64 родов, из них 37 местных видов и 127 (77 %) интродуцентов; 76 видов – деревья, 84 – кустарники, 4 – лианы [9], в других городах древесный компонент насаждений еще более разнообразен [12]. Предлагаемая нами формула может быть использована для прогноза перспектив развития вида-интродуцента в новых природно-климатических условиях. Для уже существующих насаж-

дений анализ ситуации с помощью ПЭД позволяет оценить соответствие экологической валентности древесного вида местному экологическому пространству и выработать комплекс агротехнических мероприятий, обеспечивающих устойчивость насаждений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахмедова, Е.А.* Региональный ландшафт: история, экология, композиция [Текст] / Е.А. Ахмедова. – Самара: Самар. кн. изд-во, 1991. – 246 с.
2. *Горчаковский, П.Л.* Тенденции антропогенных изменений растительного покрова Земли [Текст] / П.Л. Горчаковский // Ботанич. журн. – 1979. – Т. 64, № 12. – С. 1697–1713.
3. *Горчаковский, П.Л.* Антропогенная трансформация лугов и проблема охраны генетических ресурсов их флоры [Текст] / П.Л. Горчаковский, А.В. Абрамчук // Растительный покров антропогенных местообитаний. – Ижевск, 1988. – С. 130–144.
4. *Ишбирдин, А.Р.* Основные тенденции изменения флоры г. Уфы за последние 80 лет и ее причины [Текст] / А.Р. Ишбирдин, Л.М. Ишбирдина, А.Р. Миркин // Генетика, селекция и биотехнология лесных древесных и травянистых растений. – Уфа, 1993. – С. 101–104.
5. *Кавеленова, Л.М.* О значении природных комплексов урбосреды с позиций устойчивого развития и биомониторинга [Текст] / Л.М. Кавеленова // Вестн. Самар. гос. ун-та. – 2002. – Вып. 2 (24). – С. 144–151.
6. *Кавеленова, Л.М.* Оценка соответствия экологической валентности древесных видов к условиям степной зоны [Текст] / Л.М. Кавеленова, Н.М. Матвеев, С.А. Розно // Роль ботаничних садів в зеленому будівництві міст, курортних та рекреаційних зон: матеріали Міжнарод. конф., посв. 135-річчю Ботаніч. саду ОНУ ім. Мечникова. – Одеса, 2002. – Ч. 1. – С. 182–187.
7. *Мартыненко, В.А.* Растительный покров техногенных экотопов г. Сыктывкара и его окрестностей [Текст] / В.А. Мартыненко // Биологическое разнообразие антропогенно трансформированных ландшафтов европейского северо-востока России. – Сыктывкар, 1996. – С. 7–13.
8. *Полякова, Г.А.* Флора и растительность старых парков Подмосковья [Текст] / Г.А. Полякова. – М.: Наука, 1992. – 225 с.
9. *Розно, С.А.* Древесные и кустарниковые растения в озеленении г. Куйбышева [Текст] / С.А. Розно // Интродукция, акклиматизация, охрана и использование растений. – Куйбышев, 1985. – С. 168–172.
10. *Цыганов, Д.Н.* Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов [Текст] / Д.Н. Цыганов. – М.: Наука, 1983. – 197 с.
11. Экология Москвы: решения, проблемы, перспективы. – М., 1998. – 194 с.
12. *Якушина, Э.И.* Древесные растения в озеленении Москвы [Текст] / Э.И. Якушина. – М.: Наука, 1982. – 158 с.
13. *Konijnendijk, C.C.* A Short History of Urban Forestry in Europe [Text] / C.C. Konijnendijk // Journ. of Arboriculture. – 1997. – Vol. 23, Nr. 1.
14. *Kowarik, I.* Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf die spontane Vegetation (Farn- und Blütenpflanzen) [Text] / I. Kowarik, H. Sukopp // Angew. Bot. – 1984. – 58, Nr. 2. – S. 157–170.

15. *Smole, I.* O vplivu onesnaženega zraka na pritalno vegetacijo v gozdu [Text] / I. Smole // Zb. Gozd. in Les. – 1990. – 35. – P. 29–44.

16. *Summit, J.* Residential Tree Plantings and Care: A Study of Attitudes and Behavior in Sacramento, California [Text] / J. Summit, E.G. McPherson // Journ. of Arboriculture. – 1998. – Vol. 24, Nr. 2.

Самарский государственный  
университет

Поступила 12.03.03

*L.M. Kavelenova*

**To Ecological Discomfort Assessment of Wooden Species-Introduced  
Trees in Town Planting**

The estimation results of ecological discomfort indices for some introduced plants in their plantings in Samara are provided.





УДК 630\*37

**Ф.А. Павлов, К.В. Доронин**

Павлов Фридрих Алексеевич родился в 1934 г., окончил в 1957 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, старший научный сотрудник по специальности «Автомобильные дороги», профессор кафедры промышленного транспорта Архангельского государственного технического университета, член-корреспондент РАЕН, изобретатель СССР. Имеет более 80 печатных работ по проблемам создания эффективной лесотранспортной сети, ленточных дорожных покрытий.



Доронин Константин Владимирович родился в 1981 г., окончил в 2003 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант, ассистент кафедры промышленного транспорта АГТУ. Область научных исследований – транспортные системы, логистика, диагностика и проектирование систем бизнес-планирования, практическая оптимизация.



## **ОПТИМАЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ ЛЕСНЫХ ДОРОГ С УЧЕТОМ ФОРМЫ ВЫДЕЛОВ\***

В связи с изменением структуры лесопользования в междуречье р. Северной Двины и Пинеги показана необходимость пересмотра основ проектирования транспортных систем лесных предприятий. Разработана модель развития транспортной сети лесных дорог, позволяющая максимизировать эколого-экономический эффект лесопользования.

*Ключевые слова:* транспортная сеть, лесные дороги, оптимизация, делянки, «зеленая граница», усыхание древостоев.

Еловые древостои в лесных массивах междуречья р. Северной Двины и Пинеги достигли критического для данной территории возраста и по-

---

\* Исследования выполнены авторами по поручению департамента ЛПК администрации Архангельской области в 2002 г. при участии А.А. Митрофанова, В.Ф. Цветкова, Д.В. Трубина.

теряли свою биологическую устойчивость к отрицательным факторам внешней среды. Количество усыхающих деревьев, свежего и старого сухостоя составляет от 20 до 100 %. Применявшиеся здесь сплошнолесосечные рубки в данной ситуации не имеют смысла, так как древостои на оставляемых по срокам примыкания участках очень быстро погибают, не выполняя своих лесовосстановительных функций.

В соответствии с этим для обеспечения освоения таких лесов сформулированы следующие задачи исследований:

а) выполнить общее системное и параметрическое описание транспортной системы;

б) определить ее основные принципы в новых условиях лесопользования;

в) на основе выявленных принципов рационального лесопользования создать модель транспортной системы;

г) перейти к математической модели оптимального планирования, разработав алгоритм решения оптимизационной задачи;

д) найти целевую функцию и обосновать выбор управляющих переменных, определяющих адаптивность системы, ее органичность;

е) предложить механизм планирования транспортной системы на ПК, позволяющей реализовать теоретические принципы математической модели с помощью объектно-ориентированного программирования, обосновав их адекватность и приближенность к жизненным ситуациям;

ж) проанализировать и выявить основные принципы функционирования транспортной системы в процессе машинно-численного эксперимента.

Особо отметим уменьшение площади приспевающих древостоев как резерва для вовлечения их в промышленную эксплуатацию. На основании изучения динамики лесных ресурсов и складывающихся тенденций в лесопользовании можно сделать вывод: сокращение площадей неосвоенных лесов III группы, возрастающая их роль в охране окружающей среды и снижение продуктивности должны привести к регулированию режимов лесопользования в различных группах и категориях лесов. Поскольку между развитием лесного хозяйства и транспортом существуют тесные прямые и обратные связи, то очевидна необходимость рассмотрения основных принципов лесопользования.

Современный теоретический подход к проблеме должен иметь экологическую направленность. До настоящего времени при выборе оптимального варианта транспортной системы ориентировались на традиционный технико-экономический подход, при котором в качестве глобального критерия оптимизации проектного решения использовали минимум приведенных к расчетному году затрат на строительство, содержание дорог и эксплуатацию транспортных средств.

На основании работы [2] предложен другой подход к нарезке (разбивке квартала) делянок. Квартал делят не квадратным способом, а на природные выдела. Минусы такого метода – сложность определения границ делянок в натуре и дробление больших выделов; плюсы эколого-

экономические. Обычно сочетание этих плюсов встречается редко, но при данном способе оно поразительно устойчиво.

Большие выдела необходимо делить по «зеленой границе», т. е. отыскивать естественную линию, разделяющую выдел без потерь как экологических, так и экономических (рис. 1). «Зеленая граница» – это воображаемая линия, по которой делят крупные выдела: переломы рельефа, водоразделы, ручьи, границы болот, опушки леса.

Обсыхание происходит по всему периметру делянки неравномерно (равномерно только под действием естественной солнечной радиации), ибо основную роль в этом играют северные ветры. В результате больше других обсыхает северная часть делянки, воспринимающая основной удар, одинаково западная и восточная, менее всего южная. Помимо этого, ветровал происходит с северной стороны, так как границы делянок четкие, с ярко выраженными стенами леса, без естественного перехода (рис. 1).

При размещении транспортной сети по выделам во многом сохраняется известный принцип прокладки дорог по характерным точкам. Однако определение этих точек при существующем способе рубок по прямоугольным делянкам представляет известную сложность, особенно в разобренных лесных массивах. Наиболее доступна разбивка осваиваемого массива на  $N$  участков, каждый из которых по площади был бы равен осваиваемым выделам [3].

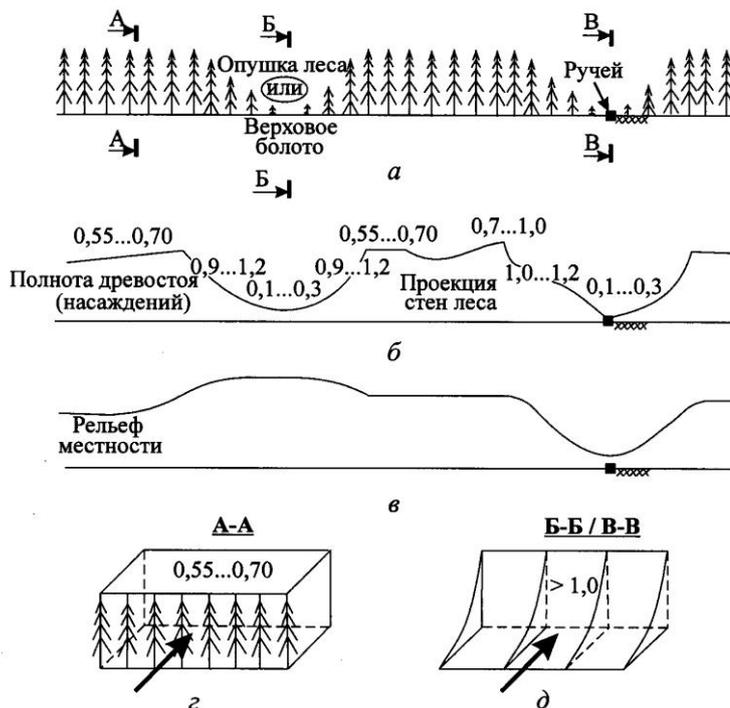


Рис. 1. Схема воздействия ветров на стенку леса: а – схема определения сечения; б – полнота древостоя; в – рельеф местности; г, д – ветровой удар

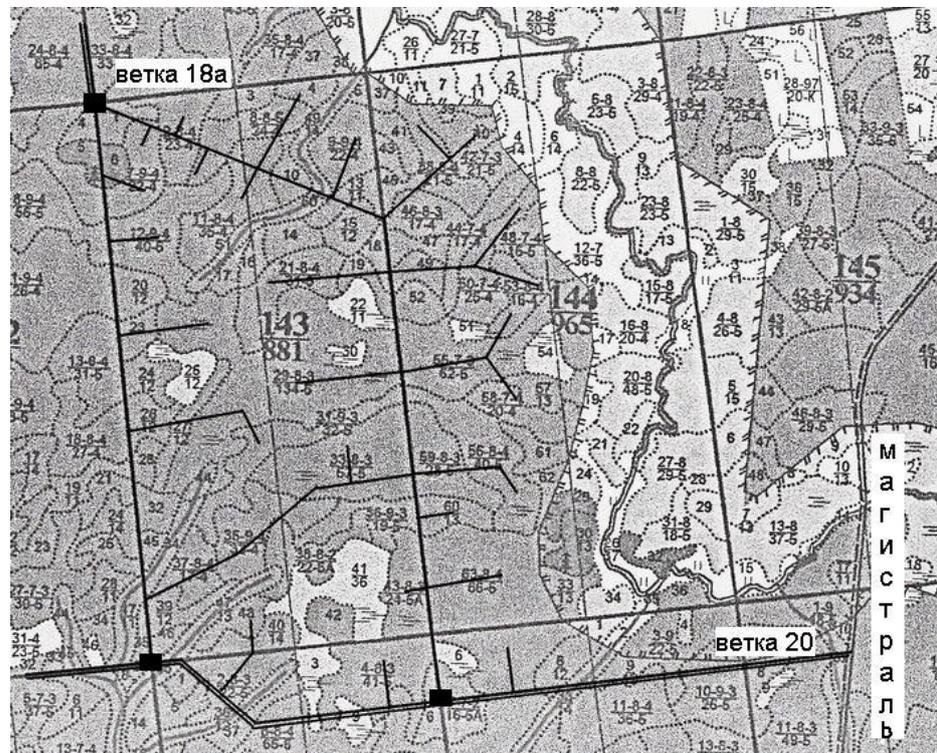


Рис. 2. Запроектированная транспортная сеть для лесного массива с нарезкой делянок по выделам в ОАО «Усть-Покшеньгский ЛПХ»

Можно принять, что запас в пределах выдела (части выдела) концентрируется в центре его тяжести, через который должна проходить сеть лесовозных дорог. Модель сети можно рассматривать в двух вариантах:

- 1 – по определенному объему или массе древесины в центре тяжести;
- 2 – по товарной стоимости всей древесины, которая может быть заготовлена на данном выделе. Чем выше эти показатели, тем ближе подходит сеть дорог.

С использованием компьютеров наши исследования приобретают практическое значение, а количество лесохозяйственных, производственных и экономических факторов возрастает.

В программе размещения сети в качестве целевой функции применяют сумму затрат на строительство путей и вывозку древесины по ним. С помощью этой программы запроектирована сеть веток и усов в ООО «Концевгорский ЛПХ» и ОАО «Усть-Покшеньгский ЛПХ», схема для последнего приведена на рис. 2. За основу проектирования приняты технико-экономические данные с предприятий.

Для нахождения минимальной целевой функции используем прямой способ оптимизации, так называемый метод координатного спуска [1]. Варь-

ируя координатами точек примыкания усов к веткам, находим конфигурацию транспортной сети, соответствующую минимальной целевой функции.

При использовании традиционного способа отвода делянок задачи оптимизации имели компромиссный характер, т. е. стоимость, экологичность и эффективность транспортной системы были разнополюсными. С введением предлагаемого метода эти компромиссы оказываются взаимосвязанными, что определяет цель дальнейших исследований, а именно решение научной проблемы планирования транспортных систем в условиях эксплуатации в разновозрастных древостоях при непрерывном лесопользовании и их развития на основе принципов системного подхода, позволяющих получить максимальный эколого-экономический эффект.

Такое рассмотрение отражает не только потребности производства, но и современный уровень исследования транспортных систем, который последовательно развивается с переходом от изучения отдельных элементов со статистическими характеристиками к пространственным (многомерным), динамическим, адаптивным (органическим) системам.

Развитие транспортной сети на основе предложенных методов оптимального планирования даст прирост использования древесины ориентировочно в 1,5 раза, предотвращение смены пород в хвойных древостоях малоценными лиственными, возможности проведения своевременного лесовосстановления.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буторин, Н.Н. Транспортная сеть для освоения лесного массива [Текст] / Н.Н. Буторин // Лесн. журн. – 2003. – № 6. – С. 40–44. – (Изв. высш. учеб. заведений).

2. Ковалев, Р.Н. Планирование транспортных систем лесных предприятий в условиях многоцелевого лесопользования [Текст] / Р.Н. Ковалев, С.В. Гуров. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. акад., 1996. – 252 с.

3. Павлов, Ф.А. Транспортные системы, пути и перевозки лесопродукции. / В 3 т. Т.3. Перевозки лесопродукции [Текст]: учеб. пособие для вузов / Ф.А. Павлов, Я.Ф. Молнар, М.О. Соколов, Е.Г., Царев; под ред. Ф.А. Павлова. – Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2003. – 496 с.

Архангельский государственный  
технический университет

Поступила 15.06.05

*F.A. Pavlov, K.V. Doronin*

### **Optimal Configuration of Transport Network of Forest Roads Taking into Account Plots Form**

Due to change of forest management structure in the area between the Northern Dvina and Pinega Rivers the necessity of revising the fundamentals of transport systems designing for forest enterprises is shown. Development model for transport network of forest roads is elaborated allowing to maximize the ecological-and-economic effect of forest management.

УДК 630\*377.44

**Н.А.Иванов, Е.А. Мясников**

Иванов Николай Алексеевич родился в 1951 г., окончил в 1973 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования лесопромышленного производства Хабаровского государственного технического университета. Имеет более 30 печатных работ в области транспорта лесных предприятий.



Мясников Евгений Анатольевич родился в 1967 г., окончил в 1989 г. Дальневосточный государственный университет, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Хабаровского государственного технического университета. Имеет около 10 печатных работ в области математического анализа.

**ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ПРЕОДОЛЕНИЯ ВЕЗДЕХОДОМ ЛЕСИСТОЙ МЕСТНОСТИ**

Представлены результаты теоретических исследований вероятности преодоления лесистой местности легким трехколесным вездеходом на пневматиках низкого давления при высокой маневренности.

*Ключевые слова:* вездеход, проходимость, маневренность, вероятность, деревья.

*Проходимость при высокой маневренности*

Движение вездехода по лесистой местности в условиях ограниченной маневренности маловероятно и практически трудно выполнимо. Действительному движению больше соответствует задача о выборе заранее пути в пределах обзора местности водителем. При возникновении на пути непреодолимых препятствий (в виде деревьев) вездеход может найти другой путь, сделав один шаг назад. Возможность такого маневра обеспечивается при наличии заднего хода в силовой передаче вездехода.

Пусть в некоторый момент вездеход находится в точке  $A$  (рис. 1). Считаем, что из этой точки возможно движение влево, вправо и вперед, а вероятность такого движения обозначим  $B_1, B_2, B_3$ .

Перейдя в точки  $A_1, A_2$  или  $A_3$  с вероятностью  $P_1 = 1 - (1 - B_1) \times (1 - B_2)(1 - B_3)$ , вездеход может вновь выбрать одно из трех направлений с вероятностью  $B_1, B_2, B_3$ .

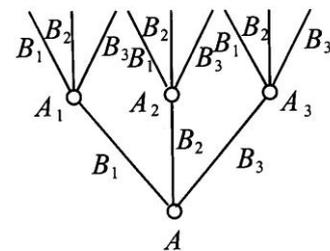


Рис. 1. Схема возможных перемещений вездехода

Если считать, что вероятность  $P_1$  продвижения на один шаг не зависит от номера шага (что соответствует случайному расположению деревьев на участке), то вероятность движения по каждому из трех возникших разветвлений также равна  $P_1$ . Тогда движение из точки  $A$  по левому направлению составит

$$B_1P_1 = B_1[1 - (1 - B_1)(1 - B_2)(1 - B_3)];$$

по среднему

$$B_2P_1 = B_2[1 - (1 - B_1)(1 - B_2)(1 - B_3)];$$

по правому

$$B_3P_1 = B_3[1 - (1 - B_1)(1 - B_2)(1 - B_3)].$$

Вероятность продвижения на два шага хотя бы по одному из 9 направлений

$$P_2 = 1 - (1 - B_1P_1)(1 - B_2P_1)(1 - B_3P_1).$$

Из каждой точки второго уровня снова возможно движение в трех направлениях. Но тогда из точек  $A_1, A_2, A_3$  можно переместиться на два шага с вероятностью  $P_2$ , а из точки  $A$  в точки третьего уровня с вероятностью

$$P_3 = 1 - (1 - B_1P_2)(1 - B_2P_2)(1 - B_3P_2).$$

В общем случае, если  $n$  шагов можно пройти с вероятностью  $P_n$ , то из точек  $A_1, A_2, A_3$  получим вероятность продвижения на  $n + 1$  шагов:

$$P_{n+1} = 1 - (1 - B_1P_n)(1 - B_2P_n)(1 - B_3P_n),$$

где  $P_0 = 1$ , что очевидно.

Особо важно, что при  $B_1, B_2, B_3 < 1$  рекурсивно определенная последовательность  $\{P_n\}$  сходится к числу  $P$ , зависящему только от  $B_1, B_2, B_3$ , но не от  $n$ , причем точность достигается за число шагов, значительно меньшее необходимого.

Сходимость процесса при  $P_0 = 1$  и  $0 \leq B_1, B_2, B_3 \leq 1$  можно доказать графически.

Построим график функции  $y = 1 - (1 - B_1x)(1 - B_2x)(1 - B_3x)$ . Точку перегиба этой функции находим при  $x_0 = \frac{1}{3} \left( \frac{1}{B_1} + \frac{1}{B_2} + \frac{1}{B_3} \right) \geq 1$  при любых  $B_1, B_2, B_3$ .

Значение  $x_0 = 1$  имеет место только при  $B_1 = B_2 = B_3 = 1$ .

Из вероятностного смысла функции  $y$  следует, что в точке  $x = 1$  имеем  $y(1) < 1$ . Проведем прямую  $y = x$  (рис. 2). Известно, что рекурсивная последовательность  $x_{n+1} = f(x_n)$  может быть геометрически представлена цепью уголков. Их вертикальные сто-

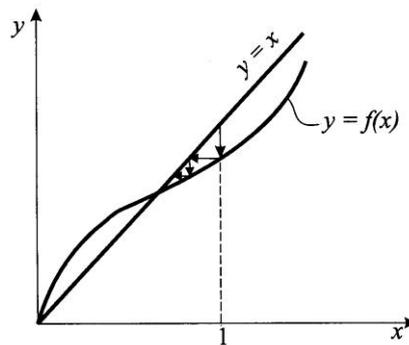


Рис. 2. Графическая интерпретация определения вероятности при рекурсивном вычислении

роны проведены от прямой  $y = x$  до графика функции  $y = f(x)$ , а горизонтальные – из полученных точек на прямую  $y = x$ .

В ситуации, показанной на рис. 2 ( $y(1) < 1, y' > 0, x_0 < 1$ ), такая цепь уголков всегда сходится в точке пересечения графика  $y = f(x)$  и прямой  $y = x$ , т. е. в точке  $x = f(x)$ . Если при этом  $y'(0) > 1$ , то точка пересечения  $x_0 > 0$ . Для нашей функции условие  $y'(0) > 1$  равносильно условию  $B_1 + B_2 + B_3 > 1$ .

Найдем точку пересечения, решив уравнение

$$P = 1 - (1 - B_1P)(1 - B_2P)(1 - B_3P).$$

После преобразований получим

$$B_1B_2B_3P^3 - (B_1B_2 + B_2B_3 + B_1B_3)P^2 + (B_1 + B_2 + B_3 + 1)P = 0,$$

откуда  $P = 0$  (очевидное решение) или

$$P = \frac{(B_1B_2 + B_2B_3 + B_1B_3) - \sqrt{D}}{2B_1B_2B_3},$$

где  $D = (B_1B_2)^2 + (B_1B_3)^2 + (B_2B_3)^2 - 2B_1B_2B_3(B_1 + B_2 + B_3) + 4B_1B_2B_3$ .

Второе решение квадратного уравнения  $P > 1$  и для нас не имеет смысла.

Если  $B_1 = B_2$  (повороты влево и вправо), то

$$P = \frac{1}{B_1} + \frac{1}{2B_3} - \frac{\sqrt{1 - \frac{4B_3}{B_1} + \frac{4B_3}{B_1^2}}}{2B_3} = \frac{1}{B_1} + \frac{1}{2B_3} - \frac{\sqrt{1 + \frac{4B_3}{B_1^2} - B_1}}{2B_3}.$$

Условие  $1 - \frac{4B_3}{B_1} + \frac{4B_3}{B_1^2} \geq 0$  всегда выполнимо, так как

$$1 - \frac{4B_3}{B_1} + \frac{4B_3}{B_1^2} > 1 - \frac{4B_3}{B_1} + \frac{4B_3}{B_1} = 1 > 0.$$

Окончательно имеем

$$P = \frac{1}{B_1} + \frac{1}{2B_3} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{4B_3}{B_1^2} - B_1} \right). \quad (1)$$

Приведем пример расчета\*. Пусть плотность размещения деревьев на единице площади  $\rho = 0,1$ ; ширина колеи вездехода  $b = 2$  м; шаг движения  $0,5 b = 1$  м.

Вероятность поворота вправо или влево

$$B_1 = e^{-0,6142b^2\rho} = e^{-0,6142 \cdot 4 \cdot 0,1} = e^{-0,2457} \approx 0,7821;$$

\* Иванов, Н.А. Оценка проходимости трехколесного вездехода по лесистой местности [Текст] / Н.А. Иванов, Е.А. Мясликов // Лесн. журн. – 2005. – № 5. – С. 45–53. – (Изв. высш. учеб. заведений).

движения вперед

$$B_3 = e^{-0,5b^2\rho} = e^{-0,5 \cdot 4 \cdot 0,1} = e^{-0,2} \approx 0,8187.$$

Тогда по формуле (1)

$$P = \frac{1}{0,7821} + \frac{1}{1,6374} \left( 1 - \sqrt{1 + 4 \frac{0,8187}{(0,7821)^2} \left( -0,7821 \right)} \right) = 0,9904.$$

При рекурсивном вычислении находим (с округлением):

$$P_0 = 1; P_1 = 1 - (1 - 0,7821)^2 (1 - 0,8187) = 0,99199;$$

$$P_2 = 1 - (1 - 0,7821P_1)^2 (1 - 0,8187P_1) = 0,9905;$$

$$P_3 = 1 - (1 - 0,7821P_2)^2 (1 - 0,8187P_2) = 0,9903(9) = 0,9904.$$

Если под шагом считать сдвиг на 0,1 м (поворот на угол  $\alpha = 5,7^\circ$ ), то

$$B_1 = e^{-0,02 \cdot 1,2953} \approx 0,9744;$$

$$B_3 = e^{-0,02} \approx 0,9802;$$

$$P = \frac{1}{0,9744} + \frac{1}{2 \cdot 0,9802} \left( 1 - \sqrt{1 + 4 \frac{0,9802}{(0,9744)^2} \left( -0,9744 \right)} \right) \approx 1.$$

Таким образом, при высокой маневренности вездехода и определенной плотности размещения деревьев движение по лесистой местности теоретически достоверно. Следует учесть, что для осмотра и выбора пути доступен небольшой участок. Если  $R$  – радиус обзора, а возврат назад невозможен, более справедливо считать вероятность  $P(\Delta L = L)$  равной  $(P)^{LR}$ , где  $P = \lim_{n \rightarrow \infty} P_n$  при быстрой сходимости, т. е. при больших  $B_1, B_2, B_3$ , или  $P = P_n$

при  $n = \frac{2R}{l}$  и шаге  $\frac{l}{2}$ ; или  $n = \frac{2R}{l\alpha}$  при шаге  $\frac{l\alpha}{2}$  и малых  $B_1, B_2, B_3$ .

#### Решение обратной задачи

С практической точки зрения представляет интерес решение обратной задачи, когда по известной вероятности преодоления лесистой местности определяют ширину колеи вездехода. Эта задача допускает только приближенное решение.

Если вероятность  $P$  известна, необходимо подобрать максимально возможную ширину колеи  $b$ , чтобы

$$1 - (1 - B_1P)(1 - B_2P)(1 - B_3P) = P,$$

где  $B_i = B_i(b)$ ,  $i = 1, 2, 3$  – вероятности сдвига влево, вправо, вперед для фиксированной плотности  $\rho$ .

Преобразования с учетом  $B_1 = B_2$  и  $B_3 = B_1^\beta$ , где  $\beta = \text{const}$ , приводят к уравнению

$$P^2 B_1^{3+\beta} - PB_1^2 \left( 1 + B_1^\beta \right) + B_1 \left( 1 + B_1^\beta \right) = 1.$$

Решение данного уравнения относительно  $B_1$  достаточно сложно.

Учитывая, что  $\beta \approx 1$  (при шаге  $0,5b$   $\beta = 1,2284$ , при шаге  $0,5ba$

$\beta = \frac{1+3\alpha\sqrt{3}}{1+\alpha\sqrt{3}}$ ), уравнение можно упростить:

$$P^2 B_1^3 - 3PB_1^2 + 3B_1 = 1,$$

тогда решение

$$B_1 = \frac{1 - \sqrt[3]{1-P}}{P}.$$

Параметр  $B_1$  найден ранее как вероятность поворота

$$P(\pi) = P(\text{пр}) = e^{-(1,0472b_0^2 - 0,433b^2)\rho}.$$

Отсюда выразим  $b$  через  $B_1$ ,  $\rho$  и  $R_0$ :

$$1,0472b_0^2 - 0,433b^2 = \frac{1}{\rho} \ln \frac{1}{B_1}$$

и далее приведем к виду

$$1,0472(b^2 + 2 \cdot 2bR_0 + 4R_0^2) - 0,433b^2 + \frac{1}{\rho} \ln B_1 = 0$$

или

$$0,6142b^2 + 2 \cdot 2,0944R_0b + (1,0472 \cdot 4R_0^2 + \frac{1}{\rho} \ln B_1) = 0.$$

Решим квадратное уравнение

$$b = \frac{-2,0944 \cdot 2R_0 \pm \left[ 4 \cdot 2,0944^2 R_0^2 - 4 \cdot 0,6142 \left( 1,0472 \cdot 4R_0^2 + \frac{1}{\rho} \ln B_1 \right) \right]^{1/2}}{2 \cdot 0,6142},$$

$$\text{т. е.} \quad b = (4,808R_0^2 + \frac{1,628}{\rho} \ln \frac{1}{B_1})^{1/2} - 3,408R_0. \quad (2)$$

Решение взято с запасом по сравнению с точным.

При  $R_0 = 0$  результат можно упростить, поскольку среднее расстояние между деревьями  $S_m = \frac{1}{\sqrt{\rho}}$  (для круговых площадей).

Тогда по формуле (2)

$$b \approx 1,276 S_m \sqrt{\ln \frac{1}{B_1}}.$$

Так, для  $\rho = 0,1$  и  $P = 0,999$  получаем  $B_1 = \frac{1-0,1}{0,999} \approx 0,9$ ;

$b = 1,276(10\ln 1,11)^{1/2} \approx 1,3$  м. Для  $\rho = 1$  и  $P = 0,992$  получаем  $B_1 = \frac{1-0,2}{0,999} = 0,80645$ ;  $b = 0,592 \approx 0,6$  м.

Вычисления даны для шага  $\Delta L = 0,5b$ .

Хабаровский государственный  
технический университет

Поступила 26.05.03

*N.A. Ivanov, E.A. Myasnikov*

### **Estimated Probability of Overcoming Woodland by Landrover**

Results of theoretical studies are provided related to probability of overcoming woodland by light three-wheeled landrover on pneumatic low-pressure tires at high maneuverability.



УДК 629.119.2

**С.В. Никитин**

Никитин Сергей Владимирович родился в 1977 г., окончил в 2000 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант кафедры теоретической механики АГТУ. Имеет одну печатную работу в области разработки конструкции опрокидывателя.



### **ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ОПРОКИДЫВАТЕЛЯ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ**

В новой конструкции опрокидывателя рассмотрен механизм компенсации изменения результирующего момента, работающий без применения силовых агрегатов.

*Ключевые слова:* парковка, хранение автомобилей, опрокидыватель.

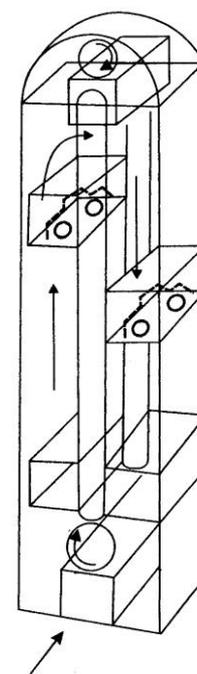
Идеал передвижения «от двери до двери» при распространении индивидуальных автомобилей пока не достигнут. Выявились серьезные проблемы, например нехватка места для хранения стоящих автомобилей.

Трудность строительства гаражей подтверждает и расчет. Так, оборудование гаражей для новых автомобилей в начале 1980-х гг. в Вильнюсе потребовало бы строительных мощностей и материалов в таком количестве, которое затрачивалось бы на жилищное строительство. Естественно, это указывает на то, что настало время искать новые пути решения этой проблемы [3].

Для тех городов, где парковка не представляет особой сложности, чувствуется нехватка охраняемой территории. В центре Архангельска всегда можно припарковаться, исключением могут быть несколько торговых центров в часы пик. Но места на охраняемых автостоянках пользуются постоянно высоким спросом и все время дорожают.

Нехватку места можно увидеть воочию. На любой автостоянке нарушают СНиПы: игнорируют нормы площади, отведенной для хранения одного автомобиля. На один автомобиль с учетом подъездных путей требуется  $25 \text{ м}^2$  [3], реально отводится около  $20 \text{ м}^2$ . Уменьшение площади достигают за счет сокращения расстояния между автомобилями и ширины подъездных путей. В результате парковаться трудно, возрастает пожароопасность стоянки.

Сегодня существует множество конструкций для компактного хранения легковых автомобилей. Самыми дорогими следует признать многоэтажные гаражи с механическим перемещением автомобилей. На рис. 1 представлен гараж-лифт. Автомобили располагают на платформах-люльках, которые перемещают по



замкнутому контуру, указанному стрелками. Прямая стрелка внизу обозначает подъездной путь к гаражу.

Его работа похожа на колесо обозрения. Все автомобили движутся и проходят нижнюю точку захода – выхода, но выходят только те, кому это необходимо. Когда тот автомобиль, которому нужно выехать, оказывается внизу (место заезда – съезда), то лифт останавливается и автомобиль покидает гараж. Остальные продолжают движение по следующему кругу.

Существует другой вид механических парковок: автомобиль крепят на площадке, которую наклоняют и под нее устанавливают другой автомобиль [1, 2]. Применение подобных конструкций позволяет уменьшить площадь, необходимую для парковки. Основной их недостаток – необходимость установки двигателя и передачи для поворота платформы, что удорожает и усложняет эксплуатацию и ремонт оборудования.

Идеальным результатом парковки было бы такое расположение автомобилей, которое представлено на рис. 2. Автомобили, показанные

контуром, закреплены на платформах, обозначенных сплошными линиями. На рисунке указаны две платформы, но их может быть множество.

Нами предпринята попытка сделать парковку с наклонным положением автомобиля доступной за счет оригинальной конструкции опрокидывателя. Планируемый компенсирующий механизм может быть применен на любой наклоняющейся платформе для компактного хранения автомобиля. В данной статье в качестве принципиальной схемы проиллюстрирован основной принцип работы механизма.

Чтобы определить угол наклона, воспользуемся указаниями по технической эксплуатации электромеханического опрокидывателя [3]: при наклоне автомобиля на угол более  $40^\circ$  необходимо снимать с автомобиля аккумуляторную батарею и воздушный фильтр во избежание выливания электролита и масла. Максимальный угол наклона площадки с автомобилем принимаем равным  $40^\circ$ .

Особенность работы опрокидывателя заключается в том, что при наклоне платформ из положения 1 в положение 2 (рис. 3) результирующий положительный момент сил увеличивается. На рисунке позиции элементов платформы, соответствующие исходному ее положению 1, указаны без штриха, соответствующие наклонному положению хранения автомобиля 2 – со штрихом. Результирующий момент  $M_{рез}$  показан у противовеса 3 полукруглой стрелкой.

Для заезда автомобиль 1 крепят на платформе 4, и она поворачивается. Для того чтобы результирующий момент сил был положительным, применяют противовес 3.

Рис. 1. Гараж-лифт

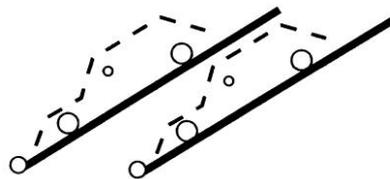


Рис. 2. Схематичное расположение автомобилей на платформах опрокидывателей

Рис. 3. Платформа для наклонного хранения автомобилей: положение 1 – при заезде автомобиля на платформу; положение 2 – хранение автомобиля; 1 – контур установленного автомобиля; 2 – центр тяжести автомобиля; 3 – противовес; 4 – подвижная платформа; 5 – центр поворота платформы

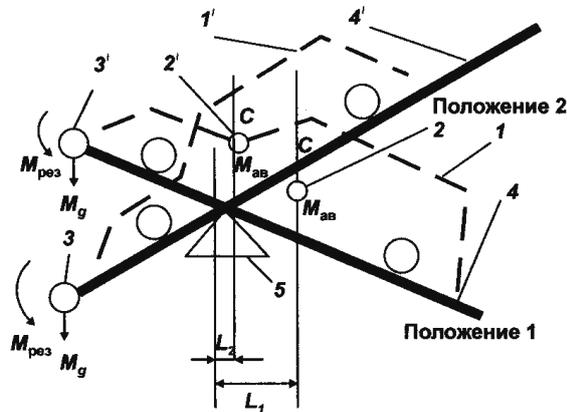
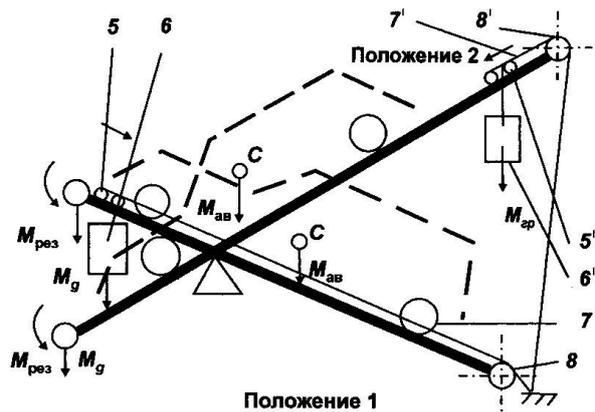


Рис. 4. Схема компенсации изменения момента на платформе: 1 – 4 см. на рис. 3; 5 – подвижная тележка; 6 – груз; 7 – гибкая тяга; 8 – блок



Но центр тяжести автомобиля 2 находится выше центра поворота платформы, и при повороте создаваемый им момент сил уменьшается:

$$M_{\text{авт}} L_2 < M_{\text{авт}} L_1,$$

где  $L_1, L_2$  – расстояния от центра поворота платформы до центра тяжести автомобиля 2 по оси  $x$  в положении 1 и 2 соответственно.

Сказанное приводит к увеличению  $M_{\text{рез}}$ . Чтобы вернуть платформу в первоначальное положение, до сих пор применяли силовые агрегаты: мотор-редукторы, гидравлическое оборудование.

Нами предложена схема компенсирующего механизма (рис. 4). Он установлен на платформе. Подвижный груз 6 находится на тележке 5, которая перемещается по платформе независимо от автомобиля (позиции, соответствующие исходному положению платформы, указаны

без штриха, наклонному положению хранения – со штрихом). Результирующий момент  $M_{рез}$  показан у противовеса 3 полукруглой стрелкой.

На длинном конце платформы 4 устанавливают блок 8 для гибкой тяги 7. Тягу 7 крепят к тележке 5 и другим концом к неподвижной относительно поворачивающейся платформы опоре. При повороте платформы груз перемещается в направлении стрелки: при положительном повороте – к длинному концу платформы, при отрицательном – к короткому. Момент сил, создаваемый грузом, компенсирует изменение момента силы тяжести автомобиля. В результате становится возможным управлять работой опрокидывателя вручную, что снижает его стоимость.

В настоящее время идет работа по созданию механизма, общий принцип которого изложен в нашей статье.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1054520 СССР, МКИ<sup>3</sup> Е 04 Н 6/06. Гараж [Текст] / А.Ф. Лиллесте (СССР). – № 2885298/29–33; заявл. 22.02.80; опубл. 15.11.83, Бюл. № 42.
2. А. с. 1763620 СССР, МКИ<sup>5</sup> Е 04 Н 6/06. Гараж [Текст] / Ленингр. НПО строительного и коммунального машиностроения; Н.С. Сафонов и Т.Б. Шиняева (СССР). – № 4792040/33; заявл. 11.12.89; опубл. 23.09.92, Бюл. № 35.
3. *Березкин, В.И.* Оборудование для гаражей и станций технического обслуживания автомобилей [Текст] / В.И. Березкин, К.А. Краснов. – М.: Транспорт, 1986. – 235 с.

Архангельский государственный  
технический университет

Поступила 03.02.05

*S.V. Nikitin*

#### **Peculiarities of Dump Structure for Storing Cars**

The compensation mechanism for changing the resultant moment working without power-generating set is considered for the new dump structure.





## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.093.6-413

***А.Г. Черных, Л.В. Ильюшенко***

Черных Александр Григорьевич родился в 1954 г., окончил в 1976 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор кафедры технологии деревообрабатывающих производств СПб ГЛТА, академик РАЕН, ген. директор НП «Ассоциация деревянного домостроения». Имеет более 100 научных работ в области технологии и оборудования лесопиления, деревянного домостроения, технологии защитно-декоративных покрытий древесины.



Ильюшенко Леонид Владимирович родился в 1979 г., окончил в 2003 г. С-Петербургскую государственную лесотехническую академию, аспирант по специальности 05.21.05 «Древесиноведение, технология и оборудование деревообработки». Область научных исследований – лесопиление, сушка древесины.



### **ПОЛУЧЕНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ЧЕРНОВЫХ ЗАГОТОВОК**

Освещены основные подходы к раскрою пиловочника на радиальные пиломатериалы и заготовки, а также представлено направление его совершенствования.

*Ключевые слова:* радиальные пиломатериалы, радиальные черновые заготовки.

Радиальные черновые заготовки находят применение во многих отраслях промышленности. Это связано с их уникальными свойствами: изделия, сделанные из них, обладают большей формоустойчивостью. При изменении климата и условий эксплуатации их меньше коробит, так как усушка и разбухание идут преимущественно в радиальной плоскости.

В работах Н.А. Батина и А.А. Янушкевича [2] определены зоны бревна для выпилки радиальных пиломатериалов. Рассмотрим схему на рис. 1, а. Угол наклона годовичных слоев к пласти доски  $\angle \alpha = \angle OKN$  (угол радиальности) определяется углом наклона касательной I – I, проведенной к годовичному слою в точке К (прямая MN – центральная ось доски, параллельная пласти). Исходя из этого определяют допустимые зоны для выпилки

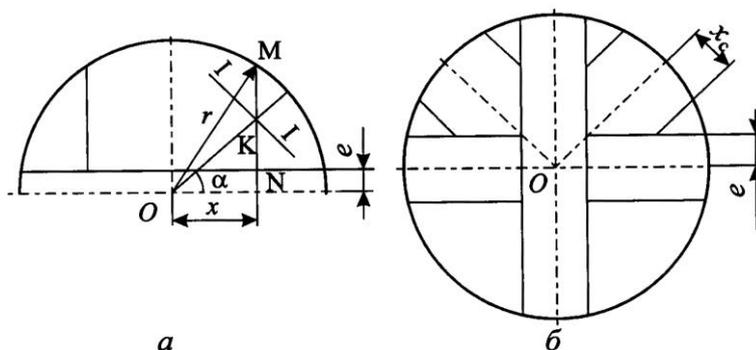


Рис. 1. Допустимые зоны для выпилки радиальных пиломатериалов: *a* – сегмент; *б* – сектор

радиальных пиломатериалов различными способами. Максимально возможную ширину, мм полупостава при распиловке сегмента найдем по следующей формуле:

$$x = \frac{2etg\alpha + \sqrt{r^2(1 + 4tg^2\alpha) - e^2}}{1 + 4tg^2\alpha}, \quad (1)$$

где  $e$  – ширина центральной вырезки, мм.

При  $e = 0$  формула примет вид

$$x = \frac{r}{\sqrt{1 + 4tg^2\alpha}}, \quad (2)$$

где  $r$  – радиус бревна, мм.

Определим ширину участка равностороннего сектора, мм, из которого могут быть выпилены радиальные пиломатериалы (рис. 1, *б*):

$$x_c = \frac{\sqrt{2}(2tg\alpha - 1)e + \sqrt{r^2(4tg^2\alpha - 4tg\alpha + 2) - 2e^2}}{4tg^2\alpha - 4tg\alpha + 2}. \quad (3)$$

В приведенных выше формулах зону, из которой можно получить радиальные пиломатериалы, рассчитывают из допущения, что поперечное сечение бревна и очертание годичного слоя представляют собой окружность. В действительности такие случаи практически не встречаются. Реальная форма бревна и годичного слоя значительно отличается от принятого допущения, что сказывается на точности расчета выхода радиальных пиломатериалов.

В работе Л.К. Осиповой и И.С. Межова [3] проанализированы существующие способы получения радиальных пиломатериалов и заготовок. Наиболее эффективными признаны развально-сегментные и брусосегментные. Они обеспечивают получение радиальных досок и профильных заготовок с сечением в виде треугольника или пятиугольника.

Склеиванием профильные заготовки перерабатывают в радиальные [3]. Выход цельных радиальных заготовок составляет 25 ... 53 %, а с учетом

склеивания профильных заготовок – 58 ... 67 %. С увеличением диаметра пиловочника выход радиальных заготовок возрастает.

В эксперименте нами использованы бревна диаметром 18 ... 30 см [4]. При склеивании профильных заготовок выход радиальных, бесспорно, увеличивается, но требует также дополнительных технологических операций по подготовке поверхности заготовок к склеиванию и по их склеиванию. Следует отметить, что применение треугольных и пятиугольных заготовок ГОСТ 24700–99 «Блоки оконные деревянные со стеклопакетами» не предусматривает.

В работе [1] А.А. Пижурин и С.Н. Мчедлишвили предложили усовершенствованную развально-сегментную схему раскря пиловочника на радиальные пиломатериалы. Размеры участков бревна, в пределах которых могут быть получены радиальные пиломатериалы, определяют в зависимости от диаметра бревна. Увеличение указанной зоны приводит к тому, что крайние доски имеют тангентальное расположение годичных слоев в центральной зоне (рис. 2, зона 2).

Для увеличения выхода радиальных заготовок предложено удалять центральную тангентальную зону. Ее ширину для угла радиальности  $60^\circ$  рассчитывают по формуле

$$Z = \sqrt{3}(0,277d + 2s + t) - \sqrt{d^2 - (0,277d + 2s + t)^2}, \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр бревна, мм;

$s$  – ширина пропила, мм;

$t$  – толщина крайней доски, выходящей за зону радиальности, мм.

Этот способ нельзя применить для досок, поставляемых в пакетах, так как затруднено определение диаметра бревна, из которого они получены. Его можно осуществить только в лесопильном цехе при проведении соответствующих организационных мероприятий, связанных с хранением аргументов, входящих в формулу (1) для каждой доски, расчетом величины  $Z$

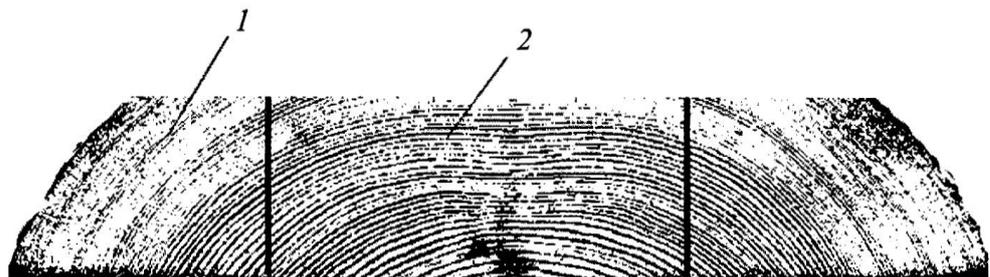


Рис. 2. Схема деления доски на радиальную (1) и центральную тангентальную (2) зоны

и надлежащей настройкой обрезающего станка. К недостатку способа следует отнести то, что центральная тангентальная зона не всегда расположена по центру доски.

В технологии изготовления радиальных черновых заготовок остаются следующие проблемы:

1. Несовершенство математического аппарата для расчета поставок на выпилку радиальных черновых заготовок. Сбор сведений о сырье сводится к определению его диаметра, не учитывается характер расположения годичных колец, эллиптичность бревен, смещение сердцевины.

2. Низкий выход радиальной пилопродукции из тонкомерного сырья.

Перед нами стояла задача – решить эти проблемы при помощи сканирования. Перед формированием сечения радиальных заготовок необходимо провести сбор сведений о характере расположения годичных колец. Места замеров выбирают у пласти, обращенной к периферии бревна, в зоне расположения поздней древесины. В выбранных точках определяют угол наклона годичного кольца с помощью специального алгоритма. После исключения грубых измерений по полученным данным строят кривые с использованием полинома второго порядка (рис. 3). Аппроксимируемая функция в точках, соответствующих углам  $0$  или  $180^\circ$ , имеет разрыв, поэтому для описания наклона годичных слоев по сечению бревна применяют два полинома.

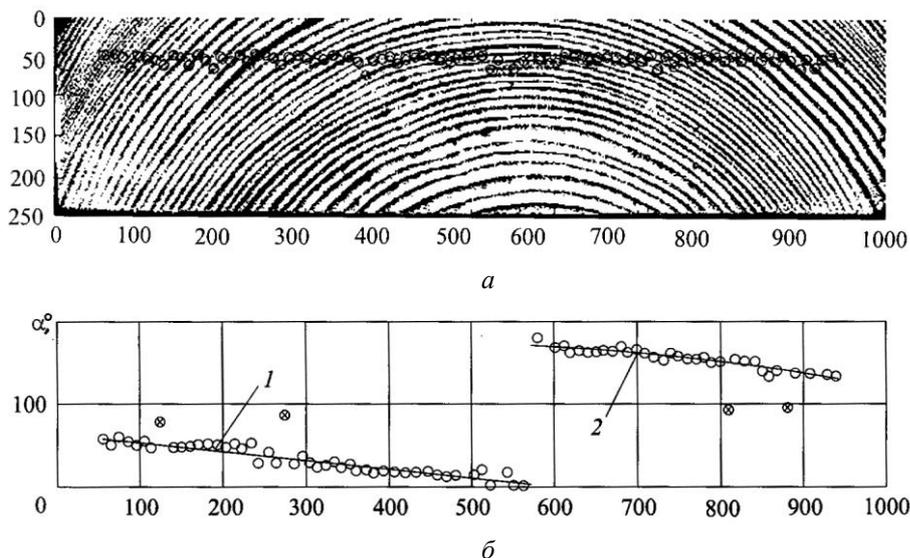


Рис. 3. Схема математического описания расположения годичных колец в торце пиломатериала:  $a$  – места замеров наклона годичных колец ( $o$  – точки замеров),  $b$  – описание наклона годичных колец с помощью полиномов 2-го порядка (оси имеют размерность в пикселях изображения);  $1$  – для угла  $\alpha_1$ ,  $2$  –  $\alpha_2$  ( $o$  – эмпирические данные,  $x$  – промахи, — — теоретическая кривая)

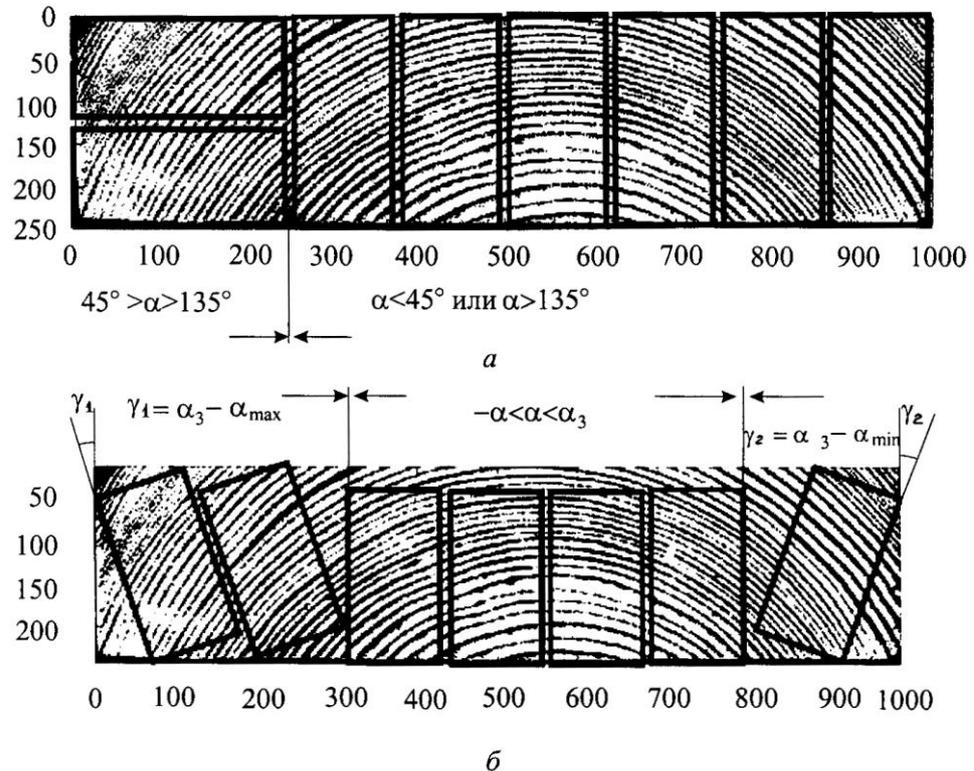


Рис. 4. Схема раскря пиломатериалов на радиальные черновые заготовки: 1 – для заготовок с минимальным углом радиальности  $45^\circ$ ; 2 – более  $45^\circ$

Углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  расположены между касательной к годичному слою и положительным направлением оси  $Ox$ . С помощью полученных данных строится схема раскря (рис. 4).

На схеме *a* площадь торца пиломатериала по характеру наклона волокон разделена на радиальные и тангентальные зоны. В полученных зонах произведена целевая ориентация заготовки относительно годичных колец так, чтобы угол их наклона к пласти заготовки не превышал  $45^\circ$ .

На схеме *b* площадь торца пиломатериала по характеру наклона волокон разделена на тангентальные и радиальную (полурадиальную) зоны. В последних пропилы ориентированы под углами  $\gamma_{1,2}$ , которые определяют по формулам

$$\gamma_1 = \alpha_3 - \alpha_{\max}; \quad (5)$$

$$\gamma_2 = \alpha_3 - \alpha_{\min}, \quad (6)$$

где  $\alpha_3$  – требуемый угол радиальности;

$\alpha_{\max}$  – максимальный угол наклона годичных колец к пласти пиломатериала, который находят с помощью полинома  $\alpha_1$ ;

$\alpha_{\min}$  – минимальный угол наклона годичных колец к пласти пиломатериала, который находят с помощью полинома  $\alpha_2$ .

Полученные по схеме *a* заготовки могут быть использованы в производстве клееных мебельных щитов и клееного оконного бруса, по схеме *б* – музыкальных инструментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. SU 1530443 Способ получения радиальной пилопродукции из бревен [Текст] / А.А. Пижурин, С.Н. Мчедлишвили. – [http://www.fips.ru/cdfi/reestr\\_rupat.htm](http://www.fips.ru/cdfi/reestr_rupat.htm)
2. Батин, Н.А. К составлению поставов на выпилку радиальных пиломатериалов [Текст] / Н.А. Батин, А.А. Янушкевич // Механическая технология древесины. – 1971. – Вып. 1. – С. 9–13.
3. Межов, И.С. Производство радиальных пиломатериалов и заготовок [Текст] / И.С. Межов, Л.К. Осипова // Деревообраб. пром-сть. – 1996. – № 3. – С. 8–10.
4. Осипова, Л.К. Исследование процесса продольной распиловки бревен с целью повышения выхода радиальных пиломатериалов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 / Осипова Людмила Константиновна. – СПб., 1996. – 21 с.

С.-Петербургская государственная  
лесотехническая академия

Поступила 3.03.05

*A.G. Chernykh, L.V. Iljushenkov*

**Producing Radial Rough Workpieces**

The main approaches to cutting sawlogs into radial sawn timber and workpieces are covered; its improvement direction is presented.

---

УДК 630\*812

**Ю.А. Варфоломеев, Л.А. Баданина**

Варфоломеев Юрий Александрович родился в 1953 г., окончил в 1975 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерных конструкций и архитектуры Архангельского государственного технического университета, заслуженный деятель науки РФ. Имеет более 300 научных трудов в области обеспечения долговечности древесины в строительстве экологически безопасными методами.



Баданина Лариса Александровна родилась в 1968 г., окончила в 1991 г. Ленинградский государственный университет, старший преподаватель кафедры высшей математики Архангельского государственного технического университета. Имеет более 10 печатных работ в области математического моделирования процесса консервации древесины.



4\*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГОПРОНИЦАЕМОСТИ ДРЕВЕСИНЫ  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Разработана методика определения коэффициента влагопроницаемости древесины на основе закона Дарси. С надежностью 95% вычислены статистические показатели коэффициента влагопроницаемости основных элементов круглого сечения, пропитанных в автоклавной установке по режиму «вакуум–давление–вакуум».

*Ключевые слова:* фильтрация, нестационарный поток жидкости, коэффициент влагопроницаемости древесины, автоклавная пропитка, технологические режимы, защитная обработка.

Одной из проблем, препятствующих исследованию фильтрации растворов защитных средств в древесине, является установление истинных показателей этого процесса. Точность решения задачи, описывающей процесс пропитки древесины, зависит от степени изученности коэффициента влагопроницаемости (фильтрации). Этот вопрос очень лаконично представлен в учебниках по древесиноведению и в специальной литературе [5–7].

Коэффициент влагопроницаемости, характеризующий способность древесины пропускать жидкость, является основной фильтрационной характеристикой. Он зависит от ряда факторов (породы древесины, ее пористости, коэффициента вязкости пропиточного раствора и т.д.) и играет важную роль в теоретических расчетах технологического процесса автоклавной пропитки изделий защитными препаратами.

Исследователями предложены различные способы его определения. В эксперименте В.А. Баженова, на который ссылается Б.Н. Уголев [6], ис-

питания продолжают до установления стационарного процесса, т. е. пока не станет постоянным расход воды. Опыты проводили в лабораторных условиях на малых образцах с использованием специального прибора, который оснащен насадкой с манометром и градуированной стеклянной трубкой для измерения расхода жидкости. С одной стороны образца под давлением подавали жидкость, с другой – обеспечивали отток воздуха, что способствовало прохождению жидкости в полость нижней части корпуса прибора.

Основной показатель влагопроницаемости – количество воды, прошедшей через малый образец за сутки при установившемся режиме. В стационарном режиме распределение давления жидкости по глубине становится линейным и коэффициент влагопроницаемости можно вычислить с использованием закона Дарси:

$$k_{\phi} = \frac{Q\gamma}{S \frac{\Delta P}{\Delta l}} \quad (1)$$

Коэффициент влагопроницаемости характеризует проницаемость образца единичной длины  $\Delta l$ , в котором перепад давления  $\Delta P = 1$  МПа поддерживает расход жидкости  $Q = 1$  г/с при вязкости  $\gamma = 1$  сП через сечение площадью  $S = 1$  см<sup>2</sup>.

Таким образом, коэффициент  $k_{\phi}$  фактически характеризует проницаемость древесины в установившемся режиме, когда она уже полностью пропитана жидкостью. В процессе сквозной пропитки раствор защитного препарата может вымывать как водорастворимые, так и водонерастворимые компоненты. Интенсивность растворения невымываемых водой компонентов в значительной степени зависит от химического состава средств защиты. Это существенно меняет фильтрационные свойства и вносит большую погрешность в получаемые результаты. В производственных условиях процесс защитной пропитки древесины в автоклавных установках длится в среднем 2–3 ч. За такое сравнительно короткое время древесина не может пропитаться полностью. При проведении защитной обработки древесины имеет место неустановившийся процесс фильтрации. В расчетах более корректно использовать коэффициент влагопроницаемости, который получен экспериментально, именно, при неустановившемся процессе пропитки.

Большую работу по определению значения коэффициента влагопроницаемости в нестационарном режиме провела Е.В. Харук [7]. При лабораторном определении коэффициента критерием проницаемости служила глубина пропитки, измеренная на разрезе образца через определенное время после начала пропитки. Процесс фильтрации в таком эксперименте не становится стационарным.

Теоретические исследования, проведенные нами, показывают, что функцию давления жидкости при неустановившейся фильтрации можно считать линейной лишь очень приблизительно и только при малой толщине пропитываемых образцов, что совершенно не соответствует реальным условиям. Ранее практиковавшиеся методы расчета коэффициента влагопрони-

цаемости, основанные на результатах испытаний малых образцов с пересчетом полученных данных непосредственно по закону Дарси, дают неточные результаты, которые не пригодны для практического применения. Кроме того, Е.Н. Харук утверждает, что в пределах одного и того же образца (на примере заболони сосны) фильтрационные процессы не соответствуют закону Дарси.

В работе П.С. Серговского и А.И. Расева [5] приведена эмпирическая формула для расчета коэффициента проводимости  $k$  (кг/(м·с·Па)) поперек волокон заболонной древесины сосны для водных растворов солей:

$$k = (3,5 + 0,015W + 0,071\omega - 3,360P) \cdot 10^{-9}. \quad (2)$$

Формула приемлема для следующих диапазонов исходных параметров: влажность древесины  $8 \leq W \leq 50$  %, концентрация рабочего раствора защитного препарата  $\omega \leq 15$  %, давление рабочего раствора  $0,1 \leq P \leq 0,5$  МПа при температуре до  $+60$  °С.

В приведенных работах можно встретить противоречивые выводы. Например, Е.В. Харук делает вывод о том, что чем больше давление жидкости, тем выше значение коэффициента влагопроницаемости, а из соотношения (2) следует обратное.

Существующие лабораторные способы основаны на фильтрации жидкости через малый образец древесины, помещенный в специальный прибор. Некоторыми исследователями было замечено, что результаты получаются более корректными при использовании образцов больших размеров [4].

Нами предложена новая методика определения коэффициента влагопроницаемости по данным, полученным на образцах натуральных размеров в производственных или экспериментальных условиях. Это позволяет исключить влияние масштабного фактора, который имеет место при моделировании процесса пропитки на малых образцах в лабораторных условиях. При этом использовали формулы взаимосвязи всех учитываемых параметров пропитки, приведенные в работе [1]. Если исследования фильтрационных свойств древесины проводят в лабораторных условиях, когда с одной стороны подают жидкость под давлением, а с противоположной – выходит беспрепятственно воздух, то для расчета коэффициента влагопроницаемости можно использовать формулу

$$k_{\phi} = \frac{\xi^2 \mu_0 \rho_0}{2(P_{\text{вн}} - P_0) t}. \quad (3)$$

Здесь  $\xi$  – глубина пропитки;  
 $\mu_0$  – коэффициент пористости древесины;  
 $\rho_0$  – плотность пропиточной жидкости;  
 $P_{\text{вн}}$  – давление пропиточной жидкости;  
 $P_0$  – давление воздуха внутри древесины перед пропиткой;  
 $t$  – продолжительность пропитки.

По нашему мнению коэффициент влагопроницаемости характеризует именно фильтрационные свойства древесины и не зависит от того, под каким давлением подается жидкость. С увеличением давления возрастает только скорость пропитки (при условии, что структуру древесины при этом не нарушают физически и химически). Из соотношения (3) следует, что коэффициент влагопроницаемости пропорционален пористости древесины. Из этого соотношения видно, что коэффициент фильтрации древесины, пористость и плотность рабочего раствора могут быть объединены в единый коэффициент  $k = \frac{k_{\phi}}{\mu_0 \rho_0}$ , который более корректно называть обобщенным ко-

эффициентом влагопроницаемости, так как он характеризует свойства проницаемости древесины в целом.

Если в производственных условиях пропитывают тонкомерные изделия круглого сечения, то для определения обобщенного коэффициента следует использовать решение задачи в полярных координатах:

$$k = \frac{1}{t} \int_0^{\xi} \frac{\ln \frac{R-x}{R}}{P_0 \left( \frac{2Ra - a^2}{2Ra - a^2 - 2Rx + x^2} \right) - P_{\text{вн}}} dx, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус изделия;

$a$  – толщина заболони.

На автоклавном заводе в Пинежском районе Архангельской области была проведена серия производственных экспериментов. Для этого были отобраны столбы длиной 4,2 м, полученные из верхней части сосны. Перед началом пропитки влажность изделий составляла 20 ... 25 %. Предварительно образцы, помещенные в автоклавную камеру, в течение 15 мин вакуумировали при давлении 0,080 ... 0,085 МПа. По нашим расчетам среднее давление воздуха внутри древесины  $P_0$ , которое установилось перед началом пропитки, равно 0,09 МПа [1].

Под действием избыточного давления 1 МПа были пропитаны две партии сосновых изделий в течение 120 (выборки 1а и 2а) и 150 мин (выборка 3а). После этого образцы повторно вакуумировали в течение 15 мин при давлении 0,080 ... 0,085 МПа в целях удаления избытка раствора с поверхности деревянных образцов.

Из первой партии было отобрано по 20 образцов диаметром 100 и 120 мм (соответственно 1а и 2а), из второй – 20 образцов диаметром 150 мм (3а). Пропитанные образцы были распилены пополам. Замеры глубины проникновения защитного препарата в радиальном направлении были определены с точностью  $\pm 0,5$  мм.

Результаты производственных испытаний (мм):

выборка 1а: 7,5; 9,0; 10,5; 12,0; 12,0; 12,5; 13,5; 14,5; 15,0; 15,5; 16,0; 16,0; 16,5; 18,0; 19,0; 19,0; 19,5; 20,0; 20,5; 26,0;

*выборка 2а:* 5,5; 6,0; 8,0; 9,5; 10,5; 11,5; 12,5; 13,0; 13,5; 14,5; 15,5; 16,0; 16,0; 17,0; 17,5; 19,0; 19,5; 22,5; 24,0; 25,0;

*выборка 3а:* 11,0; 11,5; 14,5; 15,5; 17,0; 17,5; 17,5; 18,0; 18,5; 19,0; 19,5; 20,5; 21,0; 21,5; 22,0; 22,5; 23,5; 24,0; 25,5; 27,0.

По трем выборкам с помощью формулы (4) вычислено 60 значений обобщенного коэффициента влагопроницаемости, каждое из которых соответствует значению глубины пропитки:

*выборка 1б:* 0,241; 0,366; 0,529; 0,633; 0,678; 0,690; 0,825; 0,911; 1,037; 1,166; 1,183; 1,255; 1,351; 1,715; 1,926; 1,969; 2,358; 2,380; 2,400; 2,420;

*выборка 2б:* 0,137; 0,142; 0,304; 0,390; 0,498; 0,608; 0,730; 0,766; 0,802; 0,957; 1,100; 1,175; 1,206; 1,337; 1,424; 1,671; 1,820; 2,744; 2,830; 2,900;

*выборка 3б:* 0,437; 0,478; 0,760; 0,870; 1,049; 1,101; 1,114; 1,180; 1,249; 1,320; 1,393; 1,564; 1,596; 1,714; 1,802; 1,894; 2,089; 2,193; 2,544; 2,983.

Затем были вычислены точечные оценки параметров распределения (среднее значение обобщенного коэффициента влагопроницаемости  $k_{\text{ср}}$ , дисперсия  $D(X)$ , среднее квадратическое отклонение  $\sigma(X)$ , коэффициент вариации  $\nu$ ) для каждой из трех групп отдельно по следующим формулам:

$$k_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{20} X_i}{20}; \quad (5)$$

$$D(X) = \frac{\sum_{i=1}^{20} (X_i - \xi_{\text{ср}})^2}{19}; \quad \sigma(X) = \sqrt{D(X)}; \quad \nu = \frac{k_{\text{ср}}}{\sigma(X)}$$

Результаты расчетов приведены в таблице.

С помощью критерия Вилкоксона [3] проверена гипотеза об однородности независимых выборок *1б* и *2б*, *2б* и *3б*, *1б* и *3б*. При уровне значимости  $\alpha = 0,05$  получены нижнее и верхнее критические значения:  $W_{\text{н.кр}} = 337$ ;  $W_{\text{в.кр}} = 483$ . По расчетам наблюдаемые значения для соответствующих выборок находятся в пределах  $337 \dots 483$  ( $W_{\text{набл.1,2}} = 434$ ;  $W_{\text{набл.2,3}} = 468$  и  $W_{\text{набл.1,3}} = 432$ ). Это позволило принять гипотезу об однородности выборок и считать, что они получены из одной и той же генеральной совокупности и имеют одинаковые функции распределения.

Используя критерий Стьюдента, проверили гипотезу о равенстве математических ожиданий средних значений выборок *1б* и *2б*, *2б* и *3б*, *1б* и *3б*. При уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и  $r = n_1 + n_2 - 2 = 38$  степеней свободы получили критическое значение  $Z_{\text{кр}} = 2,02$ . Поскольку наблюдаемое значение, вычисленное по выборкам *1б*, *2б*,  $Z_{\text{набл.1,2}} = 0,538$  меньше  $Z_{\text{кр}}$ , то гипотезу  $H_0: M(\xi_1) = M(\xi_2)$  принимаем. Следовательно, выборочные средние  $\bar{k}_1$  и  $\bar{k}_2$  различаются статистически незначимо по величине. Аналогично по вы-

боркам 2б, 3б и 1б, 3б вычислили наблюдаемые значения  $Z_{\text{набл.2,3}} = 1,201$  и  $Z_{\text{набл.1,3}} = 0,841$  и приняли следующие гипотезы:  $H_0 : M(\xi_2) = M(\xi_3)$  и  $H_0 : M(\xi_1) = M(\xi_3)$ .

Таким образом, выборки 1б, 2б и 3б можно объединить и вычислить среднее значение и дисперсию для общей выборки объемом 60 образцов.

#### Точечные оценки для трех групп

Показатель	Значение показателя для группы		
	1	2	3
Среднее значение обобщенного коэффициента влагопроницаемости $\bar{k}_i$ , мм <sup>2</sup> /(МПа·мин)	1,301	1,177	1,466
Дисперсия	0,336	0,725	0,433
Среднее квадратическое отклонение	0,579	0,852	0,658
Коэффициент вариации, %	44,50	72,39	44,88

Исходя из этого, имеем:

среднее значение обобщенного коэффициента

$$k_{\text{общ}} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 k_{\text{ср}}^j = 1,315; \quad (6)$$

внутригрупповая и межгрупповая дисперсии

$$D_{\text{вн.гр}} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 D_{\text{гр}}^j = 0,425; D_{\text{меж.гр}} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 (M_{\text{гр}}^j - M_{\text{общ}})^2 = 0,014; \quad (7)$$

общая дисперсия

$$D_{\text{общ}} = D_{\text{вн.гр}} + D_{\text{меж.гр}} = 0,439; \quad (8)$$

среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_{\text{общ}} = \sqrt{D_{\text{общ}}} = 0,663. \quad (9)$$

Проверка гипотезы о нормальном распределении по критерию Пирсона подтвердилась при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Доверительные интервалы для генерального среднего значения обобщенного коэффициента влагопроницаемости и дисперсии:

$$1,143 < k_{\text{ген}} < 1,486; \quad 0,127 < D_{\text{ген}} < 0,271.$$

Таким образом, в качестве среднего значения обобщенного коэффициента влагопроницаемости заболони сосны с надежностью  $\gamma = 0,95$  можно принять значение  $k_{\text{общ}} = 1,315$  мм<sup>2</sup>/(МПа·мин).

В большинстве научных трудов приведены именно значения коэффициента влагопроницаемости, а не обобщенного. При коэффициенте пористости для заболони сосны 0,64 ... 0,70 и плотности пропиточной жидкости 1,0143 г/см<sup>3</sup> (водный раствор препарата ХМ-11 концентрацией 7 %) имеем следующий доверительный интервал для коэффициента влагопроницаемости:  $7,42 \cdot 10^{-3} \dots 1,055 \cdot 10^{-2}$  г/(см·мин·МПа).

Полученные результаты подтверждены экспериментальными данными других исследователей. Например, в работе Е.В. Харук [7] коэффициент влагопроницаемости для заболони сосны по экспериментальным данным изменяется в пределах  $8,82 \cdot 10^{-4} \dots 1,23 \cdot 10^{-2}$  г/(см·мин·МПа). Из этих данных видно, что верхняя граница практически совпадает, а нижняя – меньше в 10 раз.

Следует отметить, что значения коэффициентов влагопроницаемости получены нами для заболони сосны, подвергшейся предварительному вакуумированию, которое улучшает фильтрационные свойства древесины. Именно этим можно объяснить то, что полученная нами нижняя граница значения коэффициента влагопроницаемости для заболони сосны на порядок больше, чем в работе Е.В. Харук, не использовавшей в своих опытах предварительное вакуумирование.

Предложенная методика может быть использована для быстрого определения режимов пропитки различных изделий, изготавливаемых из сухой ели, пораженной деревоокрашивающими грибами [2], при комплексной переработке заготавливаемого сырья непосредственно в зоне усыхания лесов в междуречье Северной Двины и Пинеги.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баданина, Л.А. Расчет влагопроницаемости древесины, наиболее приемлемый для использования в инженерной практике на производстве [Текст]: тез. докл. IV межрегиональной молодежной науч. конф. «Севергеоэкотех-2003» / Л.А. Баданина. – Ухта: УГТУ, 2003. – С. 272–275.
2. Булатов, А.Ф. Социально-экономические последствия биопоражения и усыхания лесов в междуречье Северной Двины и Пинеги [Текст] / А.Ф. Булатов, Ю.А. Варфоломеев, Ю.Г. Трубин // Наука северному региону: науч. тр. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2005. – Вып. 62. – С. 224–227.
3. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. шк., 1977. – 480 с.
4. Коллинз, Р. Течения жидкостей через пористые материалы [Текст] / Р. Коллинз. – М.: Мир, 1964. – 350 с.
5. Серговский, П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины [Текст] / П.С. Серговский, А.И. Расев. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 360 с.
6. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения [Текст]: учеб. для вузов / Б.Н. Уголев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесн. пром-сть, 1986. – 366 с.
7. Харук, Е.В. Проницаемость древесины некоторых хвойных пород [Текст] / Е.В. Харук. – Красноярск: Краснояр. кн. изд-во, 1969. – 94 с.

Архангельский государственный  
технический университет

Поступила 20.02.06 г.

*Yu.A. Varfolomeev, L.A. Badanina*

---

---

### **Determination of Wood Moisture Resistance Based on Production Test.**

Method of determining moisture resistance factor of wood is developed based on Darcy law. Statistical indices of moisture resistance factor for pine elements of circular section impregnated in autoclave device according to the mode «vacuum-pressure-vacuum» are calculated with reliability of 95 %.

---

---

УДК 674.093

***О.И. Бедердинова, Н.В. Коряковская***

Бедердинова Оксана Ивановна родилась в 1968 г., окончила в 1991 г. Ленинградский технологический институт, доцент кафедры информатики и прикладной математики Севмашвуза. Имеет около 20 печатных работ в области лесопиления.



Коряковская Наталья Владимировна родилась в 1968 г., окончила в 1991 г. Ленинградский технологический институт, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов и производств Архангельского государственного технического университета. Имеет более 20 печатных трудов в области автоматизации лесопромышленного комплекса.



**ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРЕМЕНИ ОБСЛУЖИВАНИЯ  
ПОТОКА НЕОБРЕЗНЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ**

Предложена математическая модель времени обслуживания необрезных пиломатериалов на обрезном станке с учетом их длины и подачи.

*Ключевые слова:* пиломатериалы, время обслуживания, характеристика, анализ.

Непрерывно-поточный метод – основная форма организации лесопильного производства, когда все операции выполняют последовательно в пространстве и во времени.

Особенностью бревнопильных линий является переменный цикл обработки материала. Это не позволяет иметь жесткие транспортные связи и заставляет располагать между станками запасы материала, уменьшающие их возможные цикловые потери как из-за непостоянства, так и из-за различия величины периодов рабочих циклов.

Один из важнейших параметров синхронизации оборудования при расчете его оптимальных параметров, пульсирующих и страховых запасов (механизмы накопителей) – расчетный ритм оборудования [3].

Период рабочего цикла обрезного станка зависит от длины, ширины, и качества пиломатериалов и других факторов. Если ритм работы рамы 1-го ряда меньше ритма обрезного станка, то возникают потери производительности из-за отсутствия пиломатериалов перед обрезным станком. Поэтому необходимо определить величину рабочего цикла обрезного станка, для чего целесообразно оценить статистические параметры распределения: величину рабочего цикла, математическое ожидание, дисперсию и т.д.

Цель статьи – построение формализованного описания времени обслуживания пиломатериалов на участке обрезки.

Анализовали поставки на распиловку бревен хвойных пород в потоках на базе лесопильных рам [1]. Отбирали поставки, предназначенные для распиловки бревен диаметром 16 ... 32 см в вершинном торце. Способ распиловки бревен – брусоразвальный осевой с выпилкой одного бруса. Оценивали поставки, обеспечивающие одновременную выпилку пиломатериалов двух толщин (22 мм – тонкие; 44, 50, 63, 75 мм – толстые). Заданные ограничения параметров пиломатериалов – согласно требованиям нормативных документов [2]. Всего было отобрано 57 поставок. При статистической обработке генеральной совокупности определяли среднюю величину, ее дисперсию, среднее квадратическое отклонение, коэффициенты асимметрии и эксцесса. Для этого использовали программу статистической обработки и выбора закона распределения непрерывной случайной величины Statistika 5.0 [4]. По каждому из вариационных рядов вычисляли параметры гипотетического распределения и эмпирические частоты. Статистическую обработку в виде распределения осуществляли по критерию Пирсона  $\chi^2$  при уровне значимости 0,05.

*Статистические характеристики времени обслуживания  
(рабочий цикл) обрезного станка*

Величина рабочего цикла является случайной величиной и зависит в основном от длины пиломатериалов и скорости подачи станка.

Количественное распределение времени рабочего цикла обрезного станка модели Ц2Д-5А устанавливали для диапазона длин пиломатериалов 4 ... 7 м с шагом 0,1 м. Время цикла обрезного станка определяли для всех скоростей подачи: 80, 100, 120, 150 м/мин. Расстояние от вершинного торца доски до передних подающих вальцов станка – 0,6 м; скорость прохода доски до передних падающих вальцов станка – 50 м/мин, что соответствует показателям работы лучших рабочих-обрезчиков; время, необходимое на укладку очередной доски на впередистаночный стол и установку (ориентацию) ее по коренной пиле, – 1 с; время на перевод подвижной пилы – 1 с.

Так как оценки среднего значения и медианы для всех вариационных рядов равны, а значения асимметрии и эксцесса близки, но не равны нулю, проверке подлежала гипотеза о нормальном распределении вариационных рядов.

В результате исследований установлено, что изменение времени обслуживания для выбранного диапазона длин при скоростях подачи 80, 100, 120, 150 м/мин распределяется по нормальному закону (со средним квадратическим отклонением: 0,011; 0,008; 0,009; 0,006 мин). С увеличением скорости подачи максимальное и минимальное время рабочего цикла обрезного станка для досок длиной 7,0 и 4,0 м уменьшается соответственно на 22,7 и 29,6 %. Среднее значение времени обслуживания при переходе со скорости 150 на 80 м/мин увеличивается на 0,286 мин, что составляет 26,8 %.

*Временные характеристики продолжительности обслуживания  
обрезного станка*

Анализировали количественное распределение времени обслуживания потока необрезных пиломатериалов длиной 4,0; 5,5 и 7,0 м, поступающих за период 3 ... 159 мин с интервалом 6 мин для каждого диаметра и всех поставов при скоростях подачи 80, 100, 120 и 150 м/мин.

Распределение времени обслуживания обрезного станка за период 3 ... 159 мин подчиняется равномерному закону для выбранных характеристик пиломатериалов и всех скоростей подачи.

Анализ показал, что вариационные ряды принадлежат одной генеральной совокупности на основании равенства количественного распределения и числовых характеристик соответственно при всех скоростях подачи обрезного станка для минимальных, средних и максимальных значений длин пиломатериалов: диаметр 16 см – поставы 50×100; 63×100; 75×100; диаметр 18 см – поставы 44×100; 50×100; 63×100; 75×125; диаметр 24 см – поставы 50×150; 75×150; диаметр 24 см – поставы 44×175; 63×125; 63×150; 44×150; для длин досок 4,0 и 7,0 м: диаметр 20 см – поставы 44×125; 63×125; 75×125; 50×100; 50×125; 63×100; 75×100; диаметр 22 см – поставы 63×125; 75×175; 63×150; диаметр 24 см – поставы 50×175; 75×175; 75×125; диаметр 26 см – поставы 50×150; 75×200; диаметр 30 см – поставы 44×200; 50×200; 75×200; для длин досок 4,0 и 5,5 м: диаметр 22 см – поставы 44×125; 50×125; 75×125; 75×150; для минимального и максимального значений длин досок: диаметр 20 см – поставы 44×150; 50×150; 63×150; диаметр 26 см – поставы 44×125; 44×150; диаметр 28 см – поставы 44×175; 63×175.

В результате анализа выявлено, что время рабочего цикла обрезного станка для диаметров бревен 16...32 см (и соответствующих поставов) увеличивается при изменении времени от 3 до 159 мин (3, 81 и 159 мин) для всех выбранных скоростей подачи. Полученные результаты минимального и максимального значений времени обслуживания в зависимости от времени снятия показаний для выбранных характеристик сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Зависимость времени обслуживания обрезного станка  
от времени снятия показаний**

Скорость подачи, м/мин	Длина 4,0 м			Длина 5,5 м			Длина 7,0 м		
	3 мин	81 мин	159 мин	3 мин	81 мин	159 мин	3 мин	81 мин	159 мин
80	<u>1,41</u>	<u>38,16</u>	<u>74,91</u>	<u>1,40</u>	<u>37,85</u>	<u>74,29</u>	<u>1,31</u>	<u>35,20</u>	<u>69,22</u>
	4,44	119,70	235,11	4,75	128,20	251,61	5,08	137,06	269,05
100	<u>1,27</u>	<u>34,26</u>	<u>67,25</u>	<u>1,23</u>	<u>33,25</u>	<u>65,26</u>	<u>1,14</u>	<u>30,75</u>	<u>60,36</u>
	3,998	107,52	211,06	4,17	112,60	221,04	4,43	119,52	234,61
120	<u>1,19</u>	<u>32,09</u>	<u>62,99</u>	<u>1,13</u>	<u>30,42</u>	<u>59,71</u>	<u>1,03</u>	<u>27,93</u>	<u>54,82</u>
	3,73	100,72	197,70	3,82	103,30	202,22	4,02	108,55	213,09
150	<u>1,092</u>	<u>29,49</u>	<u>57,89</u>	<u>1,02</u>	<u>27,59</u>	<u>54,16</u>	<u>0,92</u>	<u>24,82</u>	<u>48,73</u>
	3,43	92,55	181,67	4,17	112,60	221,04	3,57	96,49	189,41

Примечание. В числителе приведены минимальные значения, в знаменателе – максимальные.

Для пиломатериалов длиной 7,0 м (полученных из бревен диаметром 28 см поставом 50×150) максимальное значение времени обслуживания для скоростей подачи 80, 100, 120, 150 м/мин составляет 269,05; 234,61; 213,09; 189,41 мин; для пиломатериалов длиной 5,5 м (от лесопильных рам, после распиловки бревен диаметром 24 см поставом 44×150) соответственно 251,61; 221,04 202,22; 221,04 мин; для пиломатериалов длиной 4,0 м (диаметр 30 см, постав 44×200) – 235,11; 211,06; 197,70; 181,67 мин. Причем минимальное время обслуживания при максимальном времени для исследованного диапазона скоростей подачи 80 ... 150 м/мин с увеличением длины пиломатериалов уменьшается соответственно на 7,6; 10,2; 13,0; 15,8 %. Минимальное время рабочего цикла в интервале времени 3 ... 159 мин соответствует обрезке пиломатериалов минимальной длины, поступающих от лесопильных рам при распиловке бревен диаметром 22 см поставами 63×125; 75×175; для средней и максимальной длины – диаметром 18 см поставами 44×100; 50×100; 63×100; 75×125. При переходе скорости подачи с 80 на 150 м/мин время обслуживания с увеличением времени для всего диапазона выбранных поставов и диаметров при длине пиломатериалов 4,0; 5,5; 7,0 м уменьшается соответственно на 22,7; 27,1 и 29,5 %.

Таким образом, полученные статистические зависимости и установленные закономерности дают возможность оценить вероятные параметры интенсивности обслуживания потока необрезных пиломатериалов на участке распиловки. Полученные результаты могут быть использованы для качественного анализа и количественной оценки параметров времени обслуживания (время рабочего цикла) обрезного станка входного потока пиломатериалов на участке обрезки.

*Количественная характеристика времени обслуживания  
потока необрезных пиломатериалов*

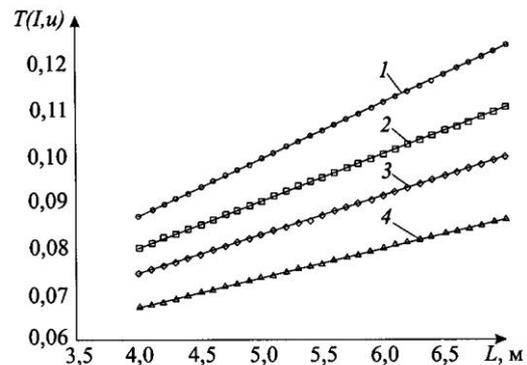
Проанализировано время обслуживания необрезных пиломатериалов  $T$  (мин) в зависимости от двух независимых переменных: длины пиломатериалов  $l$  и скорости подачи  $u$ . Рассмотрено изменение времени рабочего цикла в зависимости от следующих факторов: скорость подачи (80; 100; 120; 150 м/мин) и длина пиломатериалов (в диапазоне 4,0 ... 7,0 м с шагом 0,3 м). В результате исследований определено, что для принятого диапазона характеристик времени обслуживания зависимость от исследуемых факторов определяется уравнением логарифмического типа и имеет следующий вид:

$$T(l, u) = 0,0136 + 0,0529l + (0,0131 - 0,0214l) \log u.$$

Тесноту связи времени обслуживания оценивали коэффициентом корреляционного отношения, который равен 0,986. Значение F-отношения (211, 639) достаточно большое и уровень значимости 0,0047 близок к нулю, соответственно модель адекватна экспериментальным данным. Полученные результаты, характеризующие математическую модель, и фактические значения зависимой переменной приведены в табл. 2.



Зависимость времени рабочего цикла обрезающего станка от длины доски  $l$  и скорости подачи  $u$ : 1 –  $u = 80$  м/мин; 2 – 100; 3 – 120; 4 – 150 м/мин



Расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными данными. Максимальная абсолютная ошибка математической модели равна 0,00167, что соответствует скоростям подачи 80 и 150 м/мин. Таким образом, полученное уравнение описывает исследуемую зависимость достаточно достоверно. Иллюстрация математической модели представлена на рисунке.

Анализируя уравнение, приведенное выше, установили, что найденные коэффициенты корреляции не очень значительны по величине. Наибольшее влияние на время цикла обрезающего станка оказывает длина доски (коэффициент перед  $l$  равен 0,0529), причем это влияние имеет линейный характер. Совместное влияние этого фактора и скорости подачи также значимо (коэффициент перед  $l \log u$  равен 0,0214). Зависимость времени обслуживания от скорости подачи имеет логарифмический вид (коэффициент 0,0131).

В результате исследований нами установлено выявлено, что при переходе скорости подачи с 80 на 150 м/мин время цикла обрезающего станка уменьшается при минимальной длине пиломатериалов на 0,02 мин, при средней и максимальной длине пиломатериалов – соответственно на 0,20 и 0,37 мин. При изменении длины пиломатериалов от 4,0 до 7,0 м, поступающих на участок обрезки, время обслуживания увеличивается для каждой скорости подачи: 80 м/мин – на 29,6 %; 100 м/мин – на 27,5 %; 120 м/мин – на 25,3 %; 150 м/мин – на 22,7 %. Причем при уменьшении скорости подачи возрастает процент отклонения максимального времени цикла от минимального на 6,9 %. Таким образом, при увеличении длины доски время обслуживания потока необрезных пиломатериалов при переходе скорости подачи с 80 на 150 м/мин уменьшается на 8 %.

Полученные результаты могут быть использованы для синхронизации работы бревнопильного оборудования при разработке требований к автоматизированной обрезке потока необрезных пиломатериалов и прогнозирования выхода пилопродукции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбом поставов и выходов продукции при распиловке хвойного и мягколиственного сырья [Текст]. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1992. – 410 с.

2. ГОСТ 26002–83Э. Пиломатериалы хвойных пород северной сортировки, поставляемые для экспорта. Технические условия. – Введ. 01.01.75. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 38 с.

3. *Калитеевский, Р.Е.* Автоматизация производственных процессов в лесопилении [Текст]/ Р.Е. Калитеевский. – М.: Лесн. пром-сть, 1979. – 336 с.

4. *Пижурин, А.А.* Современные методы исследований технологических процессов в деревообработке [Текст]/ А.А. Пижурин. – М.: Лесн. пром-сть, 1972. – 248 с.

Севмашвтуз

Архангельский государственный  
технический университет

Поступила 30.01.04

*O.I. Bederdinova, N.V. Koryakovskaya*

### **Processing Time Characteristics of Unedged Timber Flow**

The mathematical model of processing time for unedged timber on trimming machine is offered taking into account its length and feed speed.

УДК 674.047

*Л.С. Атрощенко*

Атрощенко Леонид Степанович родился в 1937 г., окончил в 1961 г. Днепропетровский государственный университет по специальности физик-теоретик. Область научных интересов – стекольное производство, глубокий и низкий холод, влияние силовых полей на технологические процессы, аэро- и гидромеханика, магнитная гидромеханика, теория и практика тепло- и массообмена, химическая кинетика и технология и др.



### **ЭКСПРЕСС-СУШКА ПИЛОМАТЕРИАЛОВ**

Отмечены различия в технологии конвективной сушки в воздушно-паровых средах и жидкостях; изложены физические основы и особенности процесса экспресс-сушки в жидкостях; дана экономическая и производственно-техническая сравнительная оценка этих процессов.

*Ключевые слова:* экспресс-сушка, пиломатериалы, экономика, сушильная камера.

Основным методом сушки пиломатериалов в настоящее время является конвективная сушка. Однако она имеет следующие недостатки: большая продолжительность, высокая энергоемкость, оснащение камеры вентиляторами, нагревателями, сложными системами контроля и управления и, как следствие, высокие требования к профессионализму обслуживающего персонала. Кроме того, дополнительное оборудование и системы значительно увеличивают амортизационные отчисления на их содержание и себестоимость конечного продукта.

Существующие методы утилизации отходов переработки древесины недостаточно рациональны, как и варварское использование невозполнимых запасов нефти и угля в качестве источника энергии. Так как древесина – это долгосрочно «восполнимый» продукт, то получение химических веществ было бы в несколько раз рациональней, чем сжигание отходов.

Необходимо отметить, что даже передовые фирмы не полностью используют все возможности конвективной сушки пиломатериалов. Ее техническое усовершенствование позволило бы улучшить качество высушиваемого материала и снизило энергозатраты без увеличения интенсивности сушки.

Отдельными технологическими процессами являются антисептирование, консервация и ликвидация возникающей в процессе атмосферной или конвективной сушек пятен синевы, побурения, пожелтения и т.д. До настоящего времени не удавалось получить качественную древесину, за исключением сушки и последующей пропитки в креозоте.

Нам удалось осуществить процесс сушки пиломатериалов в жидкости, в частности в парафине, получив при этом высокое качество конечного продукта. Ни одного из видов деформаций не наблюдалось, не обнаружено

трещинообразование, без дополнительных технологических приемов обеспечены влаго- и биозащита. Длина пиломатериалов не влияла на их качество.

Высокое качество сушки обеспечивалось тем, что разность температур по объему камеры не превышала 1 ... 2 °С, в то время как в конвективных сушильных камерах она может достигать 20...30 °С и вызывать значительные градиенты напряжений как в объеме, так и на поверхности пиломатериала. Первые вызывают деформации формы, а вторые – трещинообразование пиломатериалов.

Сравним показатели разных методов сушки по данным техническим характеристикам конвективных сушильных камер фирмы KATRES (Деревообработчик. – 1998. – № 8) и сушильных камер (нашей разработки) с применением парафина в качестве рабочей жидкости.

Данные технических характеристик камер фирмы KATRES приведены в табл. 1.

Типы камер выбраны по значениям удельной мощности. Отметим, что удельный расход теплоты находится в обратной зависимости от коэффициента заполнения. Вероятно, для оптимизации размеров приведенных типов камер необходимо произвести компьютерную оптимизацию по

Таблица 1

Тип камеры	$V_k$	$V_d$	$W$	$W/V_d$	$W/V_k$	$K_3$	$q$
KSMINI	32,40	6	30	5,00	0,26	0,185	5200
KSR2-6,5N	102,43	18	75	4,17	0,73	0,180	4517
KSR1-12,5N	287,50	60	320	5,33	1,11	0,210	5632

Примечание.  $V_k$  – объем сушильной камеры, м<sup>3</sup>;  $V_d$  – объем сушимой древесины, м<sup>3</sup>;  $W$  – затрачиваемая мощность, кВт;  $W/V$  – удельная мощность, затрачиваемая на сушку 1 м<sup>3</sup> древесины, кВт/м<sup>3</sup>;  $K_3$  – коэффициент заполнения сушильной камеры,  $K_3 = V_d / V_k$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $q$  – теплота, затраченная на сушку 1 м<sup>3</sup> древесины от 60 до 8 % влажности, кДж/м<sup>3</sup>.

затратам теплоты на 1 м<sup>3</sup> высушенной древесины  $q$ , так как отличие между ними составляет 25 % ((5632 – 4517)/5632). Такой резерв позволил бы значительно улучшить энергетические показатели сушильных камер фирмы KATRES.

Выполним расчет по определению необходимого количества теплоты для сушки древесины в камерах KATRES и камерах, предложенных автором.

Чтобы высушить 1 м<sup>3</sup> древесины от влажности 60 до 8 % необходимо нагреть ее до температуры сушки, затем испарить влагу (301 кг – из сосны, 328 кг – из дуба).

Теплоемкость  $C_0$  сухой массы древесины любого типа выражается следующим соотношением:

$$C_0 = 0,25 + 0,0006 \Delta t,$$

где  $\Delta t$  – температура, °С.

При нагреве древесины от 20 до 120 °С ( $\Delta t = 100$  °С) теплоемкость  $C_0 = 2,772$  кДж/(кг·°С).

Мокрая древесина будет иметь более высокую теплоемкость из-за содержащейся в ней влаги. Приняв удельную теплоемкость воды  $C_v = 4,19$  кДж/(кг·°С), рассчитаем теплоемкость сырой древесины по формуле

$$C = (M + C_0)/(1 + M) + A,$$

где  $M$  – относительное влагосодержание древесины;

$A$  – эмпирическая величина, зависящая от влагосодержания и температуры.

Рассчитаем расход теплоты на разогрев и сушку древесины сосны и дуба с начальной влажностью 60 и конечной 8 %. Примем: первоначальная температура загружаемого материала 20 °С, температура процесса сушки 120 °С (прогрев на 100 °С).

Теплоемкость при влажности 8 %: для сосны  $C_1 = 2,72$  кДж/(кг·°С), для дуба  $C_2 = 2,39$  кДж/(кг·°С). Пересчитаем эту теплоемкость на 1 м<sup>3</sup> древесины:  $C_1 = 1365,44$  кДж/(кг·°С),  $C_2 = 1808,7$  кДж/(кг·°С).

Таблица 2

5\*

Тип камеры	Затраты на 1 м <sup>3</sup> древесины при КПД	
	50 %	75 %
KSMINI	0,405	0,250
KSR2-6,5N	0,470	0,290
KSR1-12,5N	0,374	0,340

Воспользуемся для расчета теплоемкости сырой древесины упрощенной формулой:

$$C = C_0(1 - M) + C_v M,$$

где  $C_v$  – теплоемкость влаги.

Для прогрева древесины дуба и влаги, содержащейся в древесине, и испарения ее от 60 до 8 % необходимо затратить 386 кВт·ч электроэнергии, для сосны – 240 кВт·ч.

Используем данные табл. 1 и составим сравнительную таблицу относительных затрат на 1 м<sup>3</sup> древесины при сушке в парафине и в конвективных сушилках. Расчеты ведем при коэффициенте полезного действия (кпд) сушильной камеры 50 и 75 % (табл. 2).

Анализируя данные табл. 2, делаем вывод, что сушка в жидкостях позволит снизить энергоемкость процесса в 2,5–4 раза. При тех же показателях теплового сопротивления стенок сушилок потери теплоты для жидкостных сушилок могут достигать всего 5 ... 10 %.

Практика строительства и эксплуатации жидкостных сушильных камер показала, что за счет слоя асбесто-гипсовой теплоизоляции толщиной

4 мм и слоя фольги на наружной поверхности достигается температура 36 °С. Ее можно снизить, применяя дополнительный слой фольги.

Продолжительность сушки в парафине досок дуба толщиной 55 мм составляет 6 ч, в то время как при конвективной сушке – 40 сут, т.е. скорость сушки увеличивается в 176 раз.

За базовую примем камеру KSR2-6,5N, площадь которой  $6,70 \times 4,47 = 30 \text{ м}^2$  и удельная производительность на единицу площади в единицу времени составляет  $5,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . При сушке в жидкости удельная производительность –  $630,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ . Сравнивая выход высушенной древесины с единицы производственной площади в единицу времени, имеем для жидкостной сушки увеличение в 110 раз по сравнению с конвективной.

Сравним удельную производительность единицы объема сушильной камеры в единицу времени при производстве  $1 \text{ м}^3$  древесины в камере KSR2-6,5N (объем  $102,43 \text{ м}^3$ ) и жидкостной камере соответственно  $1,7 \cdot 10^{-4}$  и  $580,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ .

Таким образом, удельная нагрузка на единицу объема камеры увеличивается более чем в 300 раз. Отметим, что для жидкостной сушки коэффициент заполнения составляет от 0,4 до 0,6, что в 2–3 раза выше, чем для конвективной сушки.

Разработанная нами сушильная камера представляет собой прямоугольный параллелепипед, изготовленный из листовой стали Ст. 3 толщиной 3 мм, снабженный сменным кассетником для укладки древесины, теплоизоляцией, теплообменником, конструкция которого зависит от вида теплоносителя. Контроль процесса во времени ведут в соответствии с заданным температурным режимом в зависимости от породы древесины, толщины пиломатериала с помощью элементов управления автоматики и сигнализации (световая и звуковая, сообщающая об окончании процесса сушки). В настоящее время разрабатываются элементы, которые будут осуществлять также контроль влажности в процессе сушки с пересчетом ее значений при температуре 20 °С.

Реализованы сушильные камеры, в которых для процесса сушки использовали электронагревательные элементы, а также две камеры, работающие на опилках с обогревом уходящими газами. Использовать можно любой вид топлива. Следует отметить, что себестоимость энергоносителей (электроэнергия, жидкое или твердое топливо и газ) находится в соотношениях соответственно 1,0/0,6/0,4.

Поступила 17.06.04  
г. Киев

*L.S. Atroshchenko*  
**Express-drying of Sawn Timber**

Differences in convection drying technology in air-and-vapor media and liquids are marked. Physical bases and peculiarities of express-drying process in liquids are stated. Economic and production-and-technical assessment of these processes is provided.

---



## 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 по 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).  
1. ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ.  
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ 1,10-ФЕНАНТРОЛИНАТА МЕДИ (II)**

Отмечено, что комплексы металлов переменной валентности могут выступать в качестве эффективных катализаторов для многих химических редокс-процессов, в том числе и кислородно-щелочной варки (делигнификации) древесины. Показано, что наиболее активным катализатором делигнификации является 1,10-фенантролинат меди (II), ускоряющий процесс вследствие повышения константы скорости до 15 – 28 раз (в зависимости от условий процесса и вида делигнифицируемого материала) при расходе лиганда и центрального иона соответственно около 0,50 и 0,05 % от массы абс. сухой древесины.

*Ключевые слова:* кислородно-щелочная делигнификация, катализ, комплексы металлов переменной валентности

В химии и химических технологиях катализ комплексами металлов переменной валентности (МПВ) давно считается эффективным и перспективным направлением интенсификации многих промышленных и препаративных редокс-процессов, широко реализуемых как в производственной практике, так и в науке. Как было показано нами [5, 9, 11, 12, 14–16, 18] на примере действия 1,10-фенантролината меди (II) (в ряде наших публикаций, до раскрытия формулы катализатора, имел сокращение КДК – катализатор делигнификации кислородом), этот вид катализа весьма успешно может быть использован при кислородно-щелочной (КЩ) делигнификации древе-

сины и другого высоко лигнифицированного целлюлозного (ЛЦ) сырья. Однако необходимое для практики расширение перечня активных комплексных катализаторов, удовлетворяющих требованиям технологии, экологии и экономики, может быть достигнуто лишь на основе научно-обоснованного подхода к их подбору. Такой подход должен базироваться на изучении общих закономерностей и механизма обсуждаемого катализа, факторов, влияющих на его эффективность, и интервала их значений, в которых реализуется каталитическая активность комплексного соединения и т.п. При этом, безусловно, необходимо учитывать специфику химического строения и состава компонентов древесины, влияние морфологии ЛЦ сырья, а также сложную химию процесса делигнификации.

По нашему мнению, решение этой трудной задачи целесообразно начинать с изучения действия наиболее активного катализатора, являющегося достаточно типичным представителем соединений этого класса. В данном случае на роль такого соединения бесспорно может претендовать 1,10-фенатролинат меди (ФМ), значительно превосходящий по активности любой из известных катализаторов любого способа делигнификации. Такой подход имеет в химии давние традиции. Фактически для всех ее разделов известны характерные реакции, реакционные системы или объекты, подробное изучение которых с последующей интерполяцией полученных результатов на другие, часто много более сложные, но подобные системы (реакции, объекты), способствовало значительному успеху целых направлений химической науки и промышленности.

При этом следует отметить, что ФМ является хотя и самым эффективным, но не единственным комплексным соединением, способным катализировать, в частности, КЩ делигнификацию. Например, известно такое комплексное соединение, как  $N,N'$ -(бис)салицилиденэтилендиамин кобальта (II) (торговое название – салкомин), также катализирующее КЩ делигнификацию, хотя и с гораздо меньшей активностью и селективностью, чем ФМ. Наши исследования в этом направлении позволили выявить еще два катализатора, являющихся комплексными соединениями. Одно из них  $\alpha,\alpha'$ -дипиридил меди (II) имеет тот же центральный ион, но другой лиганд. Активность и селективность его действия подобны ФМ. Другое соединение – 1,10-фенантролинат свинца (II) – имеет тот же лиганд, но иной центральный ион. Этот катализатор показал хорошую (хотя и меньшую, чем ФМ) активность при одновременном значительном повышении селективности делигнификации, выразившемся в необычно высоком выходе целлюлозы при данном числе Каппа (табл. 1).

Селективность – наиболее уязвимый показатель КЩ делигнификации с МПВ и их комплексами. Именно низкая селективность характерна для меди (II) и салкомин при КЩ варке, именно опасность ее снижения не позволяет рекомендовать использование ФМ для КЩ делигнификации ЛЦ сырья с числом Каппа значительно ниже 100. Поэтому как катализатор 1,10-фенантролинат свинца (II), несмотря на экологическую уязвимость,

Таблица 1

**Сравнительная эффективность действия 1,10-фенантролината свинца (II) как катализатора КЩ варки осины [15]**

Показатель	Без добавки	Добавка		
		Pb(II)*	1,10-Phen	[Pb(phen) <sub>m</sub> ] <sup>2+</sup>
Серия 1**				
Число Каппа	60,0	53,1	48,6	38,2
Выход, % от массы абс. сухой древесины	67,5	68,0	65,1	66,1
Серия 2***				
Число Каппа	87,1	84,5	63,2	36,3
Выход, % от массы абс. сухой древесины	76,5	77,9	72,6	68,8

\*Опилки предварительно длительно пропитывали в растворе 1,10-фенантролина с добавкой аликвоты  $Pb(CH_3COO)_2 \cdot Pb(OH)_2 \cdot 2H_2O$  в 0,52 М растворе  $CH_3COOH$ ;  $[phen] = 9,26 \cdot 10^{-4}$  М,  $[Pb(II)] = 5,23 \cdot 10^{-4}$  М.

\*\*Условия варки: 7,5 г/л NaOH, гидромодуль 30,  $P_{O_2} = 2,94$  МПа, температура 130 °С, продолжительность 120 мин.

\*\*\*Условия варки: 10 г/л  $Na_2CO_3$ , температура: 70 ... 100 °С – 30 мин, 100 °С – 50 мин, 100 ... 160 °С – 60 мин, 160 °С – 4 мин, остальное – см.\*\*.

особенно, вследствие наличия в его составе свинца, достаточно интересен для изучения.

Таким образом, исследование каталитического действия ФМ – эффективного и типичного представителя активных комплексов МПВ, вполне может способствовать продуктивному изучению катализа КЩ делигнификации соединениями данного класса.

Весьма высокая активность многих комплексов МПВ при катализе редокс-превращений целого ряда классов органических соединений большинством исследователей связывается с биомиметическим характером их действия. Аналогия между каталитическим действием ферментов и комплексов МПВ базируется на сходстве как основных стадий в механизмах действия ферментов и комплексов, так и строения аддуктов типа «органическое соединение – центральный ион комплекса – лиганд» и ферментов. Подобная аналогия между строением и механизмом действия аддукта типа «макромолекула лигнина – комплекс МПВ» и ферментных систем имеет место и при катализе КЩ делигнификации координационными соединениями МПВ. Причем данная аналогия значительно глубже, чем при катализе комплексами МПВ многих других редокс-процессов органической химии. Это обусловлено химическим строением и пространственным расположением компонентов древесины, которые, являясь объектами живой природы, значительно ближе к ней, чем мономолекулярные или даже многие полимерные объекты органической химии, катализ редокс-превращений которых комплексами МПВ считается модельным действием ферментов. Такую точку зрения подтверждают значительные успехи в практике удаления остаточного лигнина из целлюлозы с помощью ферментов, продуцируемых большим

рядом грибов. Ферменты в природе – это в большинстве случаев исключительно активные катализаторы, формировавшиеся в течение миллионов лет эволюции живой материи. Поэтому модельность действия комплексов МПВ при КЩ делигнификации каталитическому действию ферментов дает все основания полагать, что данный вид катализа делигнификации весьма перспективен. При этом следует учесть, что химические модели ферментов, каковыми в большинстве случаев являются активные комплексы МПВ, имеют перед самими ферментами два существенных преимущества: они способны действовать в условиях (рН, температура), при которых ферменты гибнут; селективность действия комплексов может значительно превосходить селективность действия ферментов, вырабатываемых грибами.

**Кинетика делигнификации при катализе 1,10-фенантролином меди (II) [6, 8, 12,18].** На рис. 1 представлены результаты КЩ варок образцов массы взрывного автогидролиза и древесины, из которой они получены, выполненных при температуре  $t = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (некаталитические варки), и варок тех же образцов с добавкой ФМ, выполненных при  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Из рис. 1, а видно, что, несмотря на снижение температуры на  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , продолжительность каталитической варки остается или такой же, как при  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  без ФМ (образец М-5), или даже снижается в 1,4–1,9 раза (образец М-2, древесина). Элементарные расчеты с учетом температурного коэффициента Вант-Гоффа, равного для КЩ делигнификации 1,6 [2, 11], показали, что ускоре-

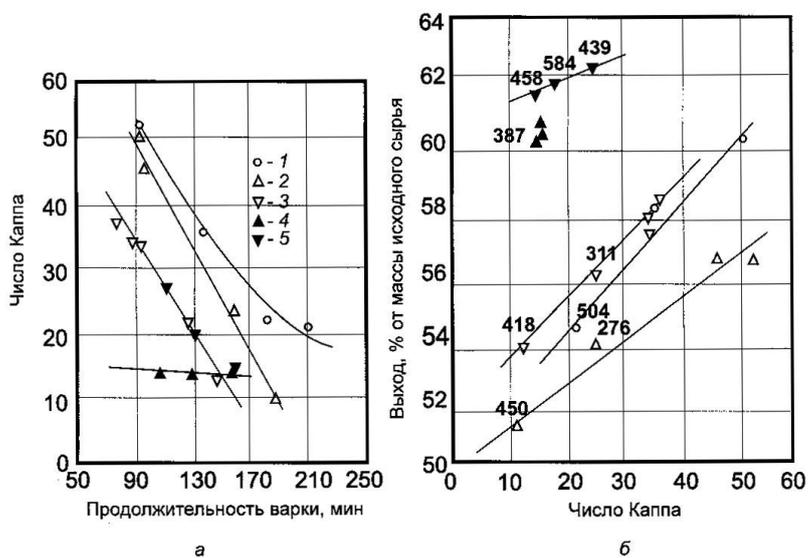


Рис. 1. Кинетика (а) и селективность (б) КЩ варок березовой древесины (1) и образцов массы М-2 (2, 4) и М-5 (3, 5) взрывного автогидролиза с добавкой 1,10-фенантролином меди (II) (4, 5) при  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  и без ФМ (2, 3) при  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (где 2 и 5 продолжительность (мин) автогидролиза щепы при  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$  перед взрывом [18]; цифры над точками (б) – вязкость целлюлозы ( $\text{см}^3/\text{г}$ );  $[\text{phen}] = 9,26 \cdot 10^{-4}\text{ м}$ ;  $[\text{Cu (II)}] = 2,62 \cdot 10^{-4}\text{ м}$  (соответственно 0,50 и 0,05 % от массы абс. сухой древесины))

ние от добавки ФМ составляет в данном случае 10–15 раз. Увеличение скорости делигнификации примерно с 5 раз при сравнении варок при 150 °С с добавкой ФМ и без него до 10–15 раз в данном случае, безусловно, связано с повышением стабильности комплекса при снижении температуры варки.

В серии варок с массой взрывного автогидролиза при 100 °С был также испытан салкомин. Однако даже при этой низкой температуре, соответствующей температуре КЩ делигнификации целлюлозы, для катализа которой он и был предложен, салкомин показал активность и селективность, значительно уступающие ФМ. Например, для образца М-2 при варке с ФМ выход 60,4 % соответствовал целлюлозе с числом Каппа 14,4, полученной за 110 мин варки, тогда как при варке с салкомином почти такой же выход (61,1 %) соответствовал числу Каппа 47,5, полученному за 330 мин варки.

Для достижения максимально возможного ускорения делигнификации при катализе каким-либо активным комплексом МПВ требуется одновременное обеспечение следующих условий:

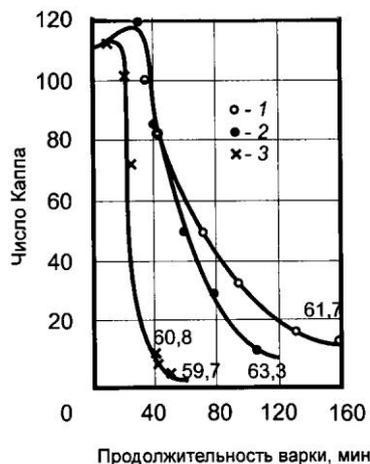
1) Температура 90 ... 110 °С, обеспечивающая повышение стабильности комплекса и растворимости кислорода в щелоче (по сравнению с обычной температурой КЩ варки 150 ... 160 °С) при достаточной скорости растворения продуктов деструкции лигнина.

2) рН варочного раствора при температуре варки 90 ... 110 °С должен быть несколько выше (примерно 8–9, если варка ведется при постоянном рН), чем оптимальное значение рН КЩ варки при 150 ... 160 °С (рН 7,5). Это обусловлено тем, что при КЩ варке, как отмечено в [11], соблюдается принцип суперпозиции между рН и температурой – при низкой температуре варки невысокий рН может не обеспечить степень ионизации  $-\text{ОН}_f$ , достаточную для активной делигнификации, даже с учетом заметной депротонирующей способности обсуждаемого активного комплекса и подобных ему. Тем не менее, следует отметить, что общий расход щелочи при низкотемпературной каталитической варке заметно ниже, так как сопровождается менее глубокой деструкцией лигнина и полисахаридов и, вследствие этого, меньшим образованием кислых продуктов.

3) Обеспечение максимально возможного растворения кислорода в щелоче, чему способствует повышение давления, гидромодуля и другие способы усиления массообмена, а также возможно большая степень проницаемости древесной ткани, поскольку рассматриваемый вид комплексов, в частности ФМ, катализирует именно процессы окисления и оксигенирования субстратов (например, использование 1,10-фенантролина, ускоряющего КЩ делигнификацию древесины в 1,5–3 раза за счет образования комплекса ФМ с медью, входящей в состав лигнина древесины [11], для ускорения обычных щелочных варок дало отрицательные результаты).

Однако в реальной каталитической варке не удастся одновременно обеспечить выполнение всех этих условий и приходится довольствоваться определенным компромиссом при выборе значений параметров процесса – в зависимости от того, снижение каких параметров наиболее желательно дос-

Рис. 2. Кинетические кривые КЩ варок осиновой стружки [8]: 1 – контроль, 2 – 1,10-фенантролин, 3 – 1,10-фенантролилат меди [II];  $[\text{phen}] = 9,26 \cdot 10^{-4} \text{ M}$ ,  $[\text{Cu (II)}] = 2,62 \cdot 10^{-4} \text{ M}$  (соответственно 0,50 и 0,05 % от массы абс. сухой древесины); цифры около точек – выход целлюлозы, % от массы абс. сухой древесины)



тичь за счет использования катализа. Поэтому в разных сериях таких каталитических варок ускорение делигнификации и ее селективность могут существенно колебаться и не достигать максимально возможных значений. Тем не менее, расчеты, сделанные на основе кривых на рис. 2, показывают, что полученное выше ускорение делигнификации в 10–15 раз не является для ФМ максимальным.

Из характера кривых на рис. 2 видно, что делигнификация всех представленных на нем варок подчиняется кинетическим закономерностям реакции первого порядка по субстрату. Для варок с добавкой фенантролина и контрольной (без катализатора) наблюдаются участки интенсивной и замедленной делигнификации. Варка с ФМ заканчивалась получением весьма мягкой целлюлозы с числом Каппа 6 ... 8 уже по достижении конечной температуры 150 °С.

Для участков интенсивной делигнификации рассчитаны константы скорости делигнификации  $k_d$ , которые для контрольной варки, варок с фенантролином и ФМ составили соответственно  $(1,7; 2,9 \text{ и } 48,0) \cdot 10^{-2} \text{ мин}^{-1}$ .

Хотя значение  $k_d$ , полученное для варки с ФМ, является несколько приближенным, поскольку рассчитывалось для неизотермического участка варки путем приведения к 150 °С средней температуры на последних десяти минутах ее подъема на конечную (от 115 до 150 °С), тем не менее, полученное ускорение делигнификации в 28 раз для варок с ФМ по сравнению с некаталитической варкой не является завышенным, поскольку если бы среднюю температуру для расчетов брали в более широком интервале на стадии подъема температуры, то величина  $k_d$  делигнификации для варки с ФМ была бы еще выше.

Такая необычно большая величина ускорения делигнификации рассматриваемого процесса, естественно, требует изучения и объяснения, чему посвящены как это, так и последующие два сообщения. Однако, несколько забегаая вперед, целесообразно отметить, что, хотя *возможность столь вы-*

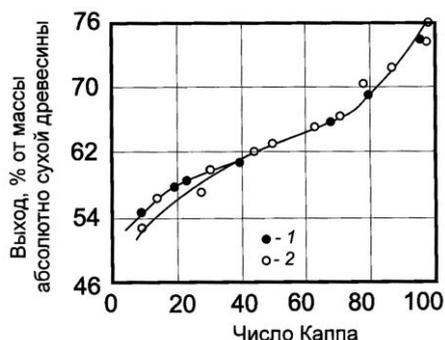
сокой каталитической активности при делигнификации лигноцеллюлозного сырья никем из специалистов в данной области ранее не прогнозировалась, такой результат применительно к окислительной делигнификации и использованию в качестве катализаторов некоторых комплексов МПВ можно допустить даже *a priori*, если учесть, что некоторые из этих комплексов часто рассматриваются и используются как модели металлоферментов, которые способны превосходить активность соответствующих простых ионов металлов в  $10^4$ – $10^7$  раз [13].

Можно ли достичь еще более высокого, чем в 15–28 раз, ускорения делигнификации посредством катализа? Для ответа на этот вопрос следует иметь в виду, что с позиций кинетики КЩ варка реализуется в смешанной области с преобладанием кинетической составляющей [11]. О роли кинетической составляющей свидетельствует, в частности, тот факт, что КЩ делигнификация может быть значительно ускорена посредством катализаторов, не способных непосредственно влиять на диффузионные процессы. Некоторое влияние диффузионной составляющей связано с тем, что технологическая целесообразность всегда заставляет искать некоторый компромисс между значениями отдельных показателей, характеризующих условия проведения варки (давление кислорода, интенсивность массообмена, иногда толщина делигнифицируемого материала, температура и т.п.), не позволяющий полностью нивелировать диффузионные затруднения, связанные с морфологией древесины, низкой растворимостью кислорода и т.д.

По нашему мнению, когда каталитическое ускорение процесса делигнификации достигнет значительной величины, его дальнейший рост может начать контролироваться диффузионными затруднениями. Это существенно повышает их роль в кинетике каталитического процесса, препятствуя дальнейшему ускорению делигнификации и ограничивая, тем самым, активность катализатора. При этом предельная величина ускорения будет зависеть от конкретных условий процесса делигнификации, что и наблюдалось в наших опытах. С учетом всего вышеизложенного, и учитывая, что в наших опытах обеспечен достаточно интенсивный массообмен, можно предположить, что приведенные выше достигнутые нами максимальные значения ускорения КЩ делигнификации под действием катализатора близки к предельно возможным для этого процесса.

**Селективность делигнификации при катализе 1,10-фенантролином меди (II) и некоторыми другими комплексами [1, 4, 5, 9–11, 12, 17, 18].** Отождествлять действие ФМ с действием других комплексов МПВ, способных катализировать КЩ делигнификацию, в данном случае было бы нестрого, поскольку влияние таких комплексов на деструкцию полисахаридов должно существенно зависеть, в первую очередь, от конкретного МПВ (центральный ион), а также от лиганда. Однако, основываясь на том, что Cu(II) из всех МПВ оказывает при КЩ варке наиболее деструктирующее действие на полисахариды [5, 11], логично допустить, что и ФМ относится к комплексам, сильнее других деструктирующим полисахариды. Поэтому изучение влияния этого комплекса приобретает более общий

Рис. 3. Селективность КЩ варки с добавкой 1,10-фенантролина (1) и без нее (2) как функция выхода древесного остатка от его числа Каппа [17]



интерес с точки зрения оценки максимально возможного уровня деструкции полисахаридов при КЩ варке под действием комплексов МПВ. Наряду с влиянием ФМ на селективность КЩ делигнификации древесины, целесообразно кратко рассмотреть и действие добавки 1,10-фенантролина (лиганда в ФМ), реализуемое через образование таких же комплексов, но с медью, содержащейся в ЛЩ сырье.

Из рис. 3 видно, что при получении целлюлозы с числом Каппа выше 20 селективность делигнификации с добавкой 1,10-фенантролина (далее просто фенантролина), характеризуемая величиной выхода целлюлозы при данном числе Каппа, такая же, как и при некаталитической варке. Однако при получении целлюлозы с числом Каппа ниже 15 ... 20 варка с фенантролином дает выход на 1,0 ... 1,5 % от массы абс. сухой древесины выше. Вероятно, это связано со снижением ее продолжительности. Аналогичные результаты были получены и в других сериях варок с добавкой фенантролина.

Из табл. 2 видно, что прочностные показатели целлюлозы, полученной при добавке фенантролина, фактически адекватны показателям целлюлозы от некаталитической КЩ варки: несколько уступая в сопротивлении раздиранию, она превосходит образцы контрольной варки по сопротивлению излому и продавливанию.

Целлюлоза, полученная при добавке салкомина, имеет все показатели значительно ниже. Вероятно, в наибольшей степени это вызвано разрушением салкомина в жестких условиях КЩ варки (160 °С) с выделением Со(II), оказывающего на ее результаты сугубо негативное действие [5, 11].

Рассмотрим влияние непосредственно ФМ на селективность делигнификации при КЩ варке. Из табл. 3 видно, что при варке с ФМ, выполненной при 150 °С, весьма низкому числу Каппа (6,7) соответствует необычно высокий (59,3 %) выход, что свидетельствует о высокой селективности процесса КЩ делигнификации в данном случае. Хотя средняя степень полимеризации (СП) этой целлюлозы меньше, чем у других, представленных в таблице, тем не менее, для столь малого числа Каппа ее нельзя счи-

Таблица 2

**Влияние 1,10-фенантролина и салкоминна на прочностные свойства  
кислородно-щелочной целлюлозы\* [5]**

Катализатор	Продолжи- тельность варки при 160 °С, мин	Число Каппа	Выход, % от массы абс. сухой древесины	Показатели физико-механических свойств целлюлозы***			
				Разрывная длина, м	Сопротивление		
					излому, ч.д.п.	раздира- нию, мН	продавли- ванию, кПа
Контроль	90	16,1	58,4	9000	1263	549	375
Фенантролин**	45	18,2	60,5	8900	1397	451	435
Салкомин**	45	29,2	58,3	6800	74	177	...

\* Варки стружки осины.

\*\* [phen] = [salc] =  $6,5 \cdot 10^{-4}$  М (соответственно 0,23 и 0,42 % от массы абс. сухой древесины).

\*\*\* Масса 1 м<sup>2</sup> отливки 75 г; степень помола массы 60 ° ШР.

Таблица 3

**Сравнительные каталитические кислородно-щелочные варки  
стружки осины [17]**

Катализатор	Температура варки, °С	Продолжи- тельность, мин	Число Каппа	Выход, % от массы абс. сухой древесины	Степень полимери- зации
Контроль	150	110	17,9	58,7	1320
Фенантролин	150	60	19,3	59,2	1310
1,10-Фенан- тролинат меди (II)*	150	20	6,7	59,3	1000
То же	95	130	25,3	67,7	1510

\* [phen] =  $9,26 \cdot 10^{-4}$  М; [Cu(II)] =  $2,62 \cdot 10^{-4}$  М (0,05 % от массы абс. сухой древесины).

тать низкой. Высокая селективность варки в данном случае безусловно объясняется снижением ее продолжительности в 5,5 раз по сравнению с некаталитической.

Еще более высокая селективность достигается при снижении температуры до 95 °С, что невозможно для обычной КЩ варки: при получении целлюлозы средней жесткости с числом Каппа 25,3 достигнут аномально большой выход (67,7 %) при весьма высокой (особенно для КЩ варки) СП (1510). Кроме того, ускорение делигнификации для варки с ФМ при 150 °С здесь составило 7–8 раз, а при 95 °С – около 11–12 раз (по сравнению с некаталитической при 150 °С с использованием при расчете температурного коэффициента Вант-Гоффа, равного 1,6 ... 1,7) [2, 3].

Из рис. 1, б, иллюстрирующего результаты обсуждавшейся выше серии сравнительных варок массы взрывного автогидролиза и исходной древесины, видно, что при снижении температуры варки со 150 до 100 °С выход целлюлозы вырос на 6 ... 8 % от массы исходного полуфабриката, а ее вязкость увеличилась в 1,1–1,9 раза. Причем оба эти показателя селективности выросли даже по сравнению с некаталитической варкой исходной древесины. Последнее особенно важно, поскольку волокна этой массы повреждаются при разволокнении щепы в момент «взрыва», и при последующем окислительном воздействии на них в процессе КЩ варки можно опасаться повышенной деструкции полисахаридов. Столь существенное повышение селективности делигнификации при добавке ФМ в данном случае обусловлено, главным образом, снижением деструкции полисахаридов древесины вследствие значительно более низкой температуры варки, поскольку при типичной для обычной КЩ варки температуре ((150 ± 10) °С) ФМ при равном числе Каппа получаемой целлюлозы показывает лишь незначительно более высокую селективность за счет меньшей продолжительности делигнификации, чем фенантролин (лиганд в ФМ). Стабилизирующее действие собственно ФМ на полисахариды древесного остатка маловероятно, так как отдельные добавки соединения-лиганда (фенантролина) приводят лишь к такой же (или незначительно большей) селективности, чем варка без катализатора, а медь (II), играющая роль центрального иона в ФМ, как известно, очень сильно снижает селективность КЩ делигнификации [5, 11].

Таким образом, на примере катализа 1,10-фенантролином меди (II) КЩ варки видно, что с помощью соответствующих комплексов МПВ можно ускорить КЩ делигнификацию лигноцеллюлозного сырья с высоким содержанием лигнина до 15–28 раз (в зависимости от условий процесса и характеристики лигноцеллюлозного сырья) при существенном повышении ее селективности. Полученный результат достоин изучения и обобщения.

**Методическая часть** (относится и к сообщениям 2, 3).

*Условия варок (делигнификации).* Варки щепы и стружки (соответственно толщина 1,0...2,0 мм и 0,5 мм) выполняли в автоклавах (емкость 860 мл), помещенных в батарейную (3 шт.) качающуюся (60 качаний в мин) с электрообогревом установку. Концентрация  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 10,0 г/л, гидромодуль – 20, продолжительность подъема температуры до конечной (150 или 160 °С) – 40 мин, закачка кислорода – однократная перед варкой до давления 1,47 МПа, степень заполнения автоклава древесиной и щелоком – 60 %.

Варки опилок выполняли в автоклавах (емкость 130 мл), помещаемых попарно в глицериновую баню, совершающую возвратно-поступательное движение в горизонтальной плоскости (74 цикла в мин). Навеска древесины в расчете на абс. сухую – 2,1 г, концентрация  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 10 г/л, температура – 150 °С, гидромодуль – 30, давление кислорода при закачке перед варкой – 2,94 МПа.

КЩ варки по приведенным выше режимам обладают всеми особенностями, характерными для правильно выполненных варок данного типа. Более детальные условия или отклонения от указанных выше отмечены в примечаниях к таблицам и рисункам, в соответствующих местах текста и ссылках, а также в [12].

Выход и степень делигнификации древесных остатков (целлюлозы) определяли по общепринятым для этих показателей методикам.

*Атомно-абсорбционная спектроскопия.* Спектрометр «Perkin-Elmer» модели 5000Z с атомизатором HGA-5. Нижний определяемый предел для Cu и Mn – 0,5 мг/кг образца древесного остатка. Подготовка к определению: 0,25 г образца растворяли при нагревании в 2 мл концентрированной HNO<sub>3</sub> квалификации «осч», разбавляли до 25 мл; 10 мкл раствора переносили в кювету спектрометра.

*Спектры электронно-парамагнитного резонанса* снимали на ЭПР-спектрометре модели ЛТФ-8 с предельной чувствительностью  $5 \cdot 10^{10}$  спин/Гс, разрешением  $2 \cdot 10^{-5}$ , рабочей частотой 9,2 ... 9,5 ГГц при напряженности магнитного поля 3213 Гс и продолжительности развертки 3 мин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гермер, Э.И. Альдегидные и карбоксильные группы кислородно-щелочной целлюлозы и их влияние на прочность бумажного полотна [Текст] / Э.И. Гермер // Химия древесины. – 1988. – № 6. – С. 33–39.
2. Гермер, Э.И. Влияние pH на кинетику делигнификации и растворения полисахаридов при кислородно-щелочной варке древесины [Текст] / Э.И. Гермер // Лесн. журн. – 1991. – № 3. – С. 95–102. – (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Гермер, Э.И. Интенсификация кислородно-щелочной делигнификации лигноцеллюлозных материалов с помощью *o*-фенантролина. 4. Влияние pH варочного процесса на кинетику делигнификации [Текст] / Э.И. Гермер // Химия древесины. – 1992. – № 4–5. – С.46–55.
4. Гермер, Э.И. Катализ кислородной делигнификации при получении целлюлозы из древесины [Текст] / Э.И. Гермер // Междунар. научно-техн. конф. «Paper' 92»: информ. сообщение. – СПб, 1992. – С. 38–40, 75–76.
5. Гермер, Э.И. Катализ кислородно-щелочной делигнификации [Текст] / Э.И. Гермер // Бум. пром-сть. – 1990. – № 11. – С. 6–8.
6. Гермер, Э.И. Катализ кислородно-щелочной делигнификации щепы в пульсационной варочной установке с применением нового эффективного катализатора [Текст] / Э.И. Гермер [и др.] // Лесн. журн., 1997. – № 3. – С. 95–108. – (Изв. высш. учеб. заведений).
7. Гермер, Э.И. Катализ окислительной фрагментации лигнина древесины 1.10-фенантролином при получении целлюлозы кислородно-щелочным способом [Текст] / Э.И. Гермер // Селективное окисление углеводов и ресурсосбережение углеводородного сырья: тез. докл. всесоюз. конф. – Харьков, 1991. – С. 56.

8. *Гермер, Э.И.* Кинетика делигнификации при кислородно-щелочной варке с наиболее эффективными катализаторами [Текст] / Э.И. Гермер, А.А. Сиротенко // 2-я Междунар. научно-техн. конф. «Pар-Fog' 93»: информ. сообщение. – СПб, 1993. – С. 12–13, 69–70.

9. *Гермер, Э.И.* Кислородно-щелочная каталитическая варка с низкими значениями параметров процесса [Текст] / Э.И. Гермер // 5-я Междунар. научно-техн. конф. «Pар-Fog' 98»: информ. сообщение. – СПб, 1998. – С. 15–16, 79–81.

10. *Гермер, Э.И.* Роль гемицеллюлоз в формировании прочностных свойств бумажного полотна при аэродинамическом и традиционном способах его формирования из кислородно-щелочных и щелочных целлюлоз [Текст] / Э.И. Гермер, И.Д. Майорова // Химия древесины. – 1987. – № 4. – С. 45–52.

11. *Гермер, Э.И.* Химизм и катализ кислородно-щелочной делигнификации древесины [Текст]: дис. ... д-ра хим. наук / Э.И. Гермер. – СПб, 1999. – 130 с.

12. *Гермер, Э.И.* Эффективный катализ – путь получения качественной кислородно-щелочной целлюлозы [Текст] / Э.И. Гермер // Целлюлоза, бумага, картон. – 1994. – № 5-6. – С. 20–22.

13. *Яцимирский, К.Б.* Биологические аспекты координационной химии [Текст] / К.Б. Яцимирский [и др.]. – К.: Наук. думка, 1979. – 266 с.

14. *Germer, E.I.* Chemistry and Mechanism of catalysis of Oxygen-Alkaline Delignification by Some Complex Compounds [Text] / E.I. Germer // 5<sup>th</sup> European Workshop on Lignocellulosics and Pulp: poster presentation. – Portugal, Aveiro, 1998. – P. 33–38.

15. *Germer, E.I.* Effective catalysis of oxygen-alkaline wood delignification by the transition metals complexes [Text] / E.I. Germer // Pulp for Papermaking-Fibre and Surface Properties: intern. Conference «Cellucon' 98». – Finland, Turku, 1998. – P. 15.

16. *Germer, E.I.* Oxygen-alkaline delignification catalysis [Text] / E.I. Germer // Ligno-cellulosics – Science, Technology, Development and Use. – Ellis Horwood Ltd., 1992. – P. 227–237.

17. *Germer, E.I.* Oxygen-alkaline delignification catalysis with 1.10-phenanthroline [Text] / E.I. Germer // 6<sup>th</sup> Intern. Symp. on Wood and Pulp Chemistry: Proceedings. – Australia, Melbourne, 1991. – Vol. 2. – P. 143–149.

18. *Germer, E.I.* Production of bleachable pulp through catalytic oxygen-alkaline delignification of high-yield mechanical pulp [Text] / E.I. Germer // Tappi Journal. – 1995. – Vol. 78. – № 11. – P. 121–124.

19. *Germer, E.I.* The catalytic oxygen pulping [Text] / E.I. Germer // Fourth European Workshop on Lignocellulosics and Pulp: proceedings. – Italy, 1996. – Part 2, topic B. – P. 412–416.

20. *Germer, E.I.* The essence of catalysis by transition metal complexes of the oxygen-alkali wood delignification [Text] / E.I. Germer // 9<sup>th</sup> Intern. Symp. on Homogeneous Catalysis: abstracts. – Israel, 1994. – P. 228–229.

СПб ООО «Экология и бизнес»

Поступила 24.01.05

*E.I. Germer*

**Studying Super Active Catalysis of Oxygen-alkaline Wood  
Delignification by Metal Groups of Variable Valency by  
Using 1.10-phenanthroline Copper (II) as Model. 1. Approach to  
Problem Research. 1.10-phenanthroline Copper (II) Performance**

It is noted that metal complexes of variable valency can act as efficient catalysts for many chemical redox-processes, including oxygen-alkaline cooking (delignification) of wood. It is shown that 1.10-phenanthroline copper (II) is the most active catalyst of delignification accelerating the process resulting from rate constant increase up to 15 – 28 times (depending on the process conditions and type of delignification material) at charge of ligand and central ion of 0,50 and 0,05% correspondingly of the dry wood mass.

---

УДК 630\*86

*Э.И. Гермер*

**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**

На примере 1,10-фенантролината меди (II) рассмотрены основные факторы, характеризующие комплексное соединение и его способность катализировать редокс-процессы (состав и стабильность комплекса, его растворимость, редокс-потенциал, способность к связи с лигнином и полисахаридами, строение комплексных аддуктов) для формирования научно-обоснованного подхода при подборе суперактивных катализаторов окислительной делигнификации лигноцеллюлозных материалов.

*Ключевые слова:* 1,10-фенантролинат меди (II), свойства комплекса, катализ, кислородно-щелочная делигнификация.

Важнейшей целью изучения действия 1,10-фенантролината меди (II) (ФМ) в качестве катализатора кислородно-щелочной (КЩ) делигнификации древесины и другого лигносодержащего сырья является получение данных для научно-обоснованного подбора комплексных соединений, которые можно было бы использовать как особо активные катализаторы окислительных процессов делигнификации, обладающие достаточно высокой селективностью действия. Именно потому, что ФМ проявил себя как самый активный из всех известных катализаторов при положительном влиянии его на селективность КЩ делигнификации в границах концентраций, приемлемых при реализации этого процесса, и было решено использовать его в качестве модели для изучения суперактивного катализа окислительных способов делигнификации [1, 3].

Важнейшей составляющей при формировании научно-обоснованного подхода к подбору катализаторов является изучение свойств наиболее эффективных представителей таких катализаторов, а также механизма их действия, причем, именно, в указанном выше порядке.

На примере действия ФМ при КЩ варке рассмотрим основные факторы, от которых зависит эффективность действия катализатора окислительных способов делигнификации с участием в качестве субстрата неупорядоченного полимера, каковым в нашем случае является лигнин в составе древесной матрицы, а в качестве катализатора – ФМ, представляющий собой в общем виде комплекс с металлом переменной валентности (МПВ) как центральным ионом и соединением-лигандом с двумя атомами металлоида,

осуществляющими хелатирующее действие по отношению к центральному иону комплекса.

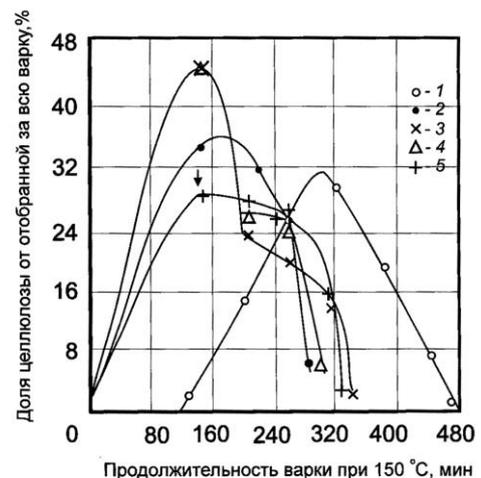
**Состав комплекса.** Медь(II) и 1,10-фенантролин образуют в водной среде одноядерные моно-, бис- и трис-комплексы. Состав ФМ зависит, в основном, от pH среды и молярного отношения  $\beta = [\text{phen}]/[\text{Cu(II)}]$ . В условиях КЩ варки  $\beta$  может находиться в интервале 2,0 ... 14,0 при обычно используемой величине 3,5 ... 6,0 [3]. При таких значениях  $\beta$  добавление ФМ в исходный варочный раствор  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  с pH ~ 10,7 и ниже (в основной период варки древесины pH обычно находится в диапазоне 7,5...8,5) позволяет ожидать присутствие ФМ в наиболее активной форме, соответствующей составу  $[\text{Cu}(\text{phen})_2]^{2+}$  [5]. Расход Cu(II) в составе ФМ обычно колеблется в интервале 0,03 ... 0,07 % от массы взятого на варку лигноцеллюлозного (ЛЦ) сырья.

**Стабильность комплекса.** Общий рК = 20,38, свойственный ФМ, свидетельствует о высокой его стабильности. Наши исследования показали, что она сохраняется в процессе КЩ варки даже при температуре 150 °С. На рис. 1 представлены кинетические кривые КЩ варок нормальной сосновой щепы, выполненных в лабораторной пульсационной варочной установке периодического действия.

Наиболее интенсивной делигнификации в этом аппарате подвергается наружный слой щепы. В результате трения щепок друг о друга сваренные волокна отделяются и выводятся из автоклава, а реакционная поверхность обновляется и т.д. По мере развития варки уменьшается реакционная поверхность щепок и площадь трения между ними. Это снижает количество отделяемых сваренных волокон, что обуславливает необычную для варки параболическую форму кинетической кривой. Как видно из рис. 1, скорость каталитических варок в определенной степени зависит от концентрации ФМ

6\*

Рис. 1. Кинетические кривые КЩ варок сосновой щепы в пульсационном автоклаве [2]: 1 – контрольная (без ФМ); 2 – 0,32 г/л ФМ; 3 – 0,64; 4 – 0,71 г/л ФМ (2 – 4 – при предварительной пропитке щепы); 5 – 50 % общей добавки ФМ введено в автоклав по достижении температуры 150 °С, остальное через 135 мин варки при 150 °С (стрелка над кривой) ([phen] =  $9,26 \cdot 10^{-4}$  М, [Cu(II)] =  $2,62 \cdot 10^{-4}$  М, что соответствует 0,50/0,05 % от массы абс. сухой древесины; pH варки  $7,5 \pm 0,3$ ;  $P = 1,94$  МПа; интенсивность пульсаций 3500; кратность циркуляции 4,3)



при предварительной пропитке щепы. Однако даже в варке 5, где в щелок вводили лишь 50 % общего количества ФМ, причем уже по достижении ко-

нечной температуры 150 °С (в варках 2–4 весь ФМ вводили в щелок перед подъемом температуры), средняя скорость варки за время, предшествующее первой точке на кинетической кривой (через 135 мин варки при 150 °С), была в 9,7 раза выше, чем в контрольной варке. Это однозначно показывает, что основная часть ФМ сохраняет стабильность даже при 150 °С. Если бы ускорение варки 5 было обеспечено преимущественно за счет каталитического действия продуктов распада комплекса, т.е. Cu(II) и 1,10-фенантролина, то оно не могло бы составить столь значительную величину, поскольку катионы Cu<sup>2+</sup> даже при более высокой концентрации ускоряют КЩ варку не более, чем в 1,8–2,5 раза, а фенантролин при данной концентрации его – в 1,6–1,8 раза. Понижение температуры варки еще больше повышает стабильность ФМ и, вследствие этого, активность катализа.

**Растворимость катализатора.** Как показала практика катализа различных способов делигнификации, обычно достаточна относительно небольшая растворимость катализатора в исходном щелоке. При КЩ варках концентрация ФМ обычно не превышает  $2,7 \cdot 10^{-3}$  М. Проведенные нами специальные опыты трудно растворимых неочищенных образцов фенантролина с более низкой растворимостью, чем у выпускаемых реактивных C<sub>12</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub> · H<sub>2</sub>O и C<sub>12</sub>H<sub>8</sub>N<sub>2</sub> · HCL · H<sub>2</sub>O, показали, что при КЩ варке можно получить результаты, соответствующие содержанию в них основного вещества.

**Окислительно-восстановительный (редокс) потенциал (ОВП) катализатора.** Это – один из важнейших параметров активных комплексов МПВ, величина которого, по-видимому, должна быть в довольно узком интервале 0,10 ... 0,20 В. Именно в этом интервале находятся значения нормальных ОВП немногочисленных известных катализаторов КЩ делигнификации: пара Cu<sup>+</sup>/Cu<sup>2+</sup> в солях (0,15 В), в составе ФМ (0,17 В), комплекс с α, α'-дипиридилем (0,12 В), салкомин, точнее Со(II) в составе этого активного комплекса (0,17 В) [1].

Небольшие величины указанных ОВП и узость интервала, в который укладываются их значения, позволяют предположить, что они обусловлены относительно небольшим ОВП лигнина (точнее, определенных его структур), участвующего в каталитическом цикле как в качестве акцептора, так и донора электронов, отдающего их центральному иону комплекса или отбирающего их у него. При этом донором и акцептором, по-видимому, могут быть и разные, и одни и те же структуры лигнина, но в различных формах (например фенолят-анион и фенокси-радикал). Такое предположение согласуется с данными, согласно которым разница в ОВП основных структур лигнина составляет около 0,1 В, что допускает возможность редокс-взаимодействий между ними [6]. Более высокие, чем ~0,2 В, значения ОВП пары M<sup>n+1</sup>/M<sup>n</sup> (где М – металл центрального атома комплекса) скорее способствуют не ускорению фрагментации лигнина, а, наоборот, развитию редокс-превращений, ведущих к увеличению его молекулярной массы, а следовательно, к замедлению делигнификации. Такие реакции известны при КЩ делигнификации. Они идут параллельно окислительной фрагментации

лигнина, имеют свободно-радикальную природу и потому могут катализироваться МПВ, в частности, железом ( $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ,  $\varphi_0 = 0,77$  В), кобальтом ( $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$ ,  $\varphi_0 = 1,95$  В) и т.п. ОВП пары  $\text{M}^{n+1}/\text{M}^n$  может незначительно (а может и существенно) измениться при комплексообразовании в зависимости от лиганда. Например, пара  $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$  в виде соли имеет  $\varphi_0 = 1,84$  В, тормозя КЩ делигнификацию, но та же пара при окислительно-восстановительных превращениях в составе салкомины имеет  $\varphi_0 = 0,17$  В и катализирует тот же процесс.

Как  $\pi$ -акцепторные, так и  $\pi$ -донорные свойства лиганда и центрального иона через величину ОВП комплекса определяют большую или меньшую стабильность центрального иона высшей или низшей степени окисления. Это, в свою очередь, может влиять на механизм, по которому реализуется каталитический цикл. Большое влияние на величину ОВП комплекса и, тем самым, на его каталитическую активность могут оказывать заместители в молекуле лиганда, а также реакционная среда. Необходимо отметить, что роль электронного строения комплекса в его каталитической активности, вероятнее всего, не сводится только к величине его ОВП.

**Способность комплекса к связи с лигнином и полисахаридами.**

Безусловно, наибольший интерес представляет медь, как МПВ, показавший высокую активность при добавке в виде соли, в составе комплекса (ФМ,  $\alpha, \alpha'$ -дипиридил меди(II)), а также в составе протолигнина – при катализе КЩ варки посредством добавки только 1,10-фенантролина [1, 3].

Как показали результаты наших исследований, выполненных с применением атомно-абсорбционной спектроскопии, медь, содержащаяся в древесине, на 65 ... 80 % связана с лигнином и удаляется вместе с ним, например, при получении холоцеллюлозы. Медь, связанная

**Содержание меди в древесном остатке в разные моменты КЩ варки осинового стружки с добавкой 1,10-фенантролината меди (II) [9]**

Момент прерывания варки, мин	Температура, °С	Древесный остаток		
		Число Каппа	Выход, % от массы абс. сухой древесины	Содержание меди, мг/кг
От начала подъема температуры:				
10	50	113,0	98,4	380
20	83	103,0	91,3	430
30	115	72,0	81,0	400
Стоянка при 150 °С				
0	150	8,3	60,3	100
10	150	5,9	58,7	83

Примечание.  $[\text{phen}] / [\text{Cu(II)}] = 9,26 \cdot 10^{-4} \text{ М} / 2,62 \cdot 10^{-4} \text{ М}$ .

с полисахаридами *in situ*, соединена с ними достаточно прочно. Медь (II), сорбированная на эту же целлюлозу из раствора ее соли, наоборот, удаляет-

ся практически полностью, в частности, в процессе обработки образца надуксусной кислотой при получении холоцеллюлозы.

В таблице представлены результаты сорбции меди (II) в составе ФМ из варочного щелока на древесину в начале варки (ср. графы 1 и 2) и последующего ее перехода в щелок из древесного остатка. На начальной стадии варки эти процессы накладываются друг на друга, но на стадии развитой варки (примерно через 20 ... 30 мин) превалирует переход меди в щелок. Расчеты, выполненные с учетом уменьшения массы древесины по мере углубления делигнификации, показывают, что фактически все количество добавленной меди (500 мг/кг, т.е. 0,05 % от массы абс. сухой древесины) сорбируется древесиной на самой ранней стадии варки: свыше 75 % – за первые 10 мин подъема на конечную температуру (150 °С), остальное – еще за 20 мин.

Основное количество ФМ сорбируется на лигнин. На это указывает близость относительных количеств лигнина и меди, растворившихся к моменту завершения варки – соответственно 97 и 90 % (рассчитано с учетом выхода целлюлозы). Полисахаридов при этом растворилось лишь 24 % от их содержания в древесине. С этими результатами согласуются данные практически всех исследователей, изучавших сорбцию меди (II) из растворов солей на древесину и ее компоненты. Количественно показано, что сорбция меди (II) лигнином на порядок выше, чем  $\alpha$ -целлюлозой [8, 12]. Сорбционная способность лигнина и полисахаридов в отношении меди (II) в большинстве случаев связывается с содержанием в них карбоксильных групп: для полисахаридов полностью, для лигнина частично. Наши исследования показали в процессе КЩ варки значительный рост в лигнине (особенно еловом) содержания карбоксильных групп (в 3–3,5 раза) [3]. В целлюлозе, полученной в результате КЩ варки, уровень содержания СООН– групп, по нашим данным, оказался в том же интервале, что и для сульфатной целлюлозы –  $(6 \dots 21) \cdot 10^{-5}$  моль/г абс. сухой целлюлозы. Это объясняется, во-первых, низким содержанием остаточного лигнина в целлюлозе, во-вторых, защитной ролью в процессе варки (по отношению к полисахаридам древесного остатка) гораздо легче окисляющегося лигнина, а также относительно низким рН КЩ варки и дефицитом кислорода в щелоке, препятствующими окислению полисахаридов древесного остатка, и без того, как известно, довольно стойких к окислению, тем более по сравнению с легко окисляющимся лигнином. Изложенное является еще одним доказательством того, что сорбция меди в составе ФМ в процессе КЩ варки обусловлена преимущественно ее связью в составе комплекса именно с лигнином древесного остатка.

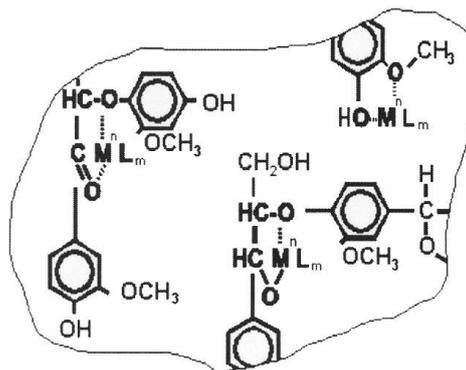
Из таблицы видно, что ФМ не только быстро реагирует с компонентами древесины, но и сохраняет связь с древесным остатком даже при температуре 150 °С. Это согласуется с результатами обсуждавшихся выше опытов по добавке ФМ в варочную систему при 150 °С. Все это позволяет предположить, что основное количество ФМ фиксируется на лигнине посредством хемосорбции, реализуемой через образование координационных

связей, так как именно хемосорбция характеризуется высокой скоростью и необратимостью.

Необходимо также отметить, что медь (II) в составе ФМ при прочих равных условиях значительно меньше способствует деструкции полисахаридов, чем свободные катионы меди (II) (а в отношении лигнина – наоборот). Вероятнее всего, это связано с различием ОВП пары  $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$  в составе ФМ и обычных солей и с повышенной склонностью центрального иона комплекса к взаимодействию с анионами многих функциональных групп лигнина, образующимися при их ионизации в щелочном варочном растворе. Тем не менее, наши исследования показали, что наибольшая селективность варки, не уступающая селективности некаталитического процесса, а чаще превышающая ее, достигается лишь при использовании лигноцеллюлозного сырья с числом Каппа около 100 и при температуре варки 90 ... 100 °С.

**Строение комплексных аддуктов.** Координационное число  $\text{Cu}^{2+}$  в комплексах может достигать 6. Это позволяет находиться во внутренней сфере комплекса, как функциональным группам лигнина, так и молекулам 1,10-фенантролина, связанным с центральным ионом  $\text{Cu}^{2+}$ . Из этого следует, что в случае катализа КЩ делигнификации посредством добавки как собственно 1,10-фенантролина, так и 1,10-фенантролината меди (II) катализ реализуется через образование одинаковых аддуктов известного типа ( $\text{S} \dots \text{Cu}^{2+} \dots \text{phen}_m$ ), где  $\text{S}$  – субстрат, которым в данном случае является лигнин. Таким образом, аддукт, образование которого предшествует каталитической фрагментации лигнина в процессе КЩ варки, принимает общую формулу  $[\text{lign} \dots \text{M}^{n+} \dots \text{L}_m]$  (где  $\text{lign}$  – макромолекула лигнина;  $\text{M}^n$  – центральный ион комплексного соединения, которым в рассматриваемом общем случае является катион МПВ с величиной положительного заряда  $n$ ;  $\text{L}_m$  – лиганд в количестве  $m$  молей ( $m = 1 \dots 3$ ), входящих в состав комплексного соедине-

Рис. 2. Возможные варианты строения комплексных аддуктов типа  $[\text{lign} \dots \text{M}^{n+} \dots \text{L}_m]$  [9]



ния) [10, 11]. Строение рассматриваемого аддукта (рис. 2) можно предложить на основе данных, полученных при изучении катализа с участием комплексов МПВ процессов окисгенирования молекулярным кислородом большого ряда соединений (фенолы, спирты, альдегиды ...), а также с учетом результатов работ по изучению пропитки солями и комплексами МПВ (в том числе и меди (II)) древесины для придания ей различных свойств [12].

Как видно из рис.2, практически во всех представленных структурах центральный ион включен в дополнительный 5-звенный цикл, обладающий, согласно *Schwarzenbach* 'у, наибольшей устойчивостью из всех циклов, которые способен образовывать центральный ион комплекса с молекулой субстрата, способствуя существенному повышению стабильности комплексного соединения. Представленная упрощенная схема по своей структуре напоминает схему биокластера, где центральные ионы комплекса можно рассматривать как ионы МПВ металлофермента, заключенные внутри трехмерной полости биокластера, а акцепторные атомы или функциональные группы макромолекулы (ММ) лигнина, через которые ионы металла соединяются с основной массой ММ лигнина, – как связывающие пункты [7].

Приведенные на рис. 2 модели комплексных аддуктов позволяют предположить, что некоторые участки ММ лигнина после координации с ней ФМ могут рассматриваться как димерные блоки, в которых в состав активного центра входят два близко расположенных, но не связанных между собой прочной химической связью иона  $\text{Cu}^{2+}$ . Такие биядерные участки и вообще участки с близко расположенными катионами меди (II), по-видимому, лучше, чем одноядерные, способны моделировать, например, такие медьсодержащие металлоферменты, как лакказа, тирозиназа, катехолоксидаза и др., содержащие в своем составе по 4 катиона меди. При этом следует отметить, что в зависимости от того, одно- или двухядерным является его активный центр, может зависеть даже механизм действия фермента.

**Стерический фактор.** Именно от этого фактора, главным образом, зависит тип электронного переноса при катализе данного вида. Если специфичность действия центрального иона в составе комплекса определяется только электрохимическими свойствами металла и субстрата, то, следовательно, катализ реализуется по механизму внешнесферного переноса электрона; если же специфичность действия комплекса определяют стерические характеристики лиганда и субстрата, то это свидетельствует о механизме внутрисферного переноса [4]. В нашем случае электрохимические свойства металла центрального иона явно не определяют специфичность действия комплекса. В то же время выше отмечалось, что некоторые комплексные соединения, в частности порфирины и фталоцианины, активные при окислении кислородом модельных соединений лигнина, были инертны в реальном процессе, что, по мнению самих авторов, объяснялось стерическими трудностями. Поэтому у нас появляются основания предположить, что в нашем случае реализуется значительно более эффективный внутрисферный перенос электрона.

В заключение этого следует сделать весьма важный вывод: основная сложность при подборе катализаторов делигнификации (в частности комплексов МПВ), по-видимому, заключается в том, что относительно большое число характеристик соединения, предлагаемого на роль активного катализатора, должно находиться в определенном, причем достаточно узком интервале их значений.

Следует также иметь в виду, что иногда для обеспечения или повышения каталитической активности комплексного соединения, а также увеличения селективности его действия может оказаться рациональней корректировка значений факторов самого катализируемого процесса, по сравнению, например, с попытками модификации состава катализатора.

**Методическая часть.** Изложена в сообщении 1, на с. 70 – 82.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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) [Текст] / Э.И. Гермер // Лесн. журн. – 2006. – № 3. – С. 70 – 82. – (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Гермер, Э.И. Катализ кислородно-щелочной делигнификации щепы в пульсационной варочной установке с применением нового эффективного катализатора [Текст] / Э.И. Гермер [и др.] // Лесн. журн. – 1997. – № 3. – С. 95 – 108. – (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Гермер, Э.И. Химизм и катализ кислородно-щелочной делигнификации древесины: дис. ... д-ра хим. наук / Э.И. Гермер. – СПб, 1999. – 130 с.
4. Пурмаль, А.П. Механизмы окислительно-восстановительного катализа ионами металлов в полярных средах [Текст]: автореф. дис. ... докт. хим. наук / А.П. Пурмаль. – М., 1971. – 47 с.
5. Скибида, И.П. Каталитические системы на основе  $\text{Cu}^{(I)}$  и  $\text{Cu}^{(II)}$  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.
6. 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.
7. Яцимирский, К.Б. Биологические аспекты координационной химии [Текст] / К.Б. Яцимирский [и др.] – К.: Наук. думка, 1979. – 266 с.
8. Bland, D.E. Sorption of Copper by Wood Constituents [Text] / D.E. Bland // Nature. – 1963. – Vol. 200, N 4903. – P. 267.
9. Germer, E.I. Chemistry and Mechanism of catalysis of Oxygen-Alkaline Delignification by Some Complex Compounds [Text] / E.I. Germer // 5<sup>th</sup> European Workshop on Lignocellulosics and Pulp: poster presentation. – Portugal, Aveiro, 1998. – P. 33–38.
10. Germer, E.I. The catalytic oxygen pulping [Text] / E.I. Germer // Fourth European Workshop on Lignocellulosics and Pulp: Proceedings. – Italy, Stresa, 1996. – Part 2, topic B. – P. 412–416.
11. Germer, E.I. The essence of catalysis by transition metal complexes of the oxygen-alkali wood delignification [Text] / E.I. Germer // 9<sup>th</sup> Intern. Symp. on Homogeneous Catalysis: abstracts. – Israel, Jerusalem, 1994. – P. 228–229.
12. Pizzi, A. The Chemistry and Kinetic Behavior of Cu-Cr-As/B Wood Preservatives. II. Fixation of the Cu/Cr System on Wood [Text] / A. Pizzi // Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition. – 1982. – Vol. 20, N 3. – P. 707–724.

СПбОО «Экология и бизнес»

Поступила 24.01.05

*E.I. Germer*

**Studying Super Active Catalysis of Oxygen-alkaline Wood  
Delignification by Metal Groups of Variable Valency by Using  
1.10-phenanthroline Copper (II) as Model. 2. Main Factors  
Characterizing Complex Compound and its Ability to be  
Catalyst of Redox-Processes**

Main factors characterizing complex compound and its ability to catalyze redox-processes (complex composition and stability, its solubility, redox-potential, ability to bond with lignins and polysaccharides, structure of complex additive products) are considered based on example of 1.10-phenanthroline copper (II) for the formation of scientific-sound approach towards selecting of super active catalysts for oxidation delignification of lignocellulose materials.

---

УДК 547.562

*А.М. Айзеништадт, М.В. Богданов, К.Г. Боголицын,  
А.А. Абросимова*

## К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ РОДСТВЕННЫХ ЛИГНИНУ ФЕНОЛОВ

Методом оксредметрии определены кинетические характеристики процесса окисления гидрохинона, которые позволили рассчитать его эффективный потенциал  $E'_0$ . Установлено, что значение  $E'_0$  хорошо согласуется со справочной величиной стандартного окислительного потенциала  $E^0$  оксред-системы хинон–гидрохинон.

*Ключевые слова:* эффективный потенциал, гидрохинон, кинетика.

Наши исследования на протяжении последних десятилетий [1–4, 7, 14, 18] позволили установить основной физико-химический параметр редокс-состояния лигнина – «эффективный потенциал»  $E'_0$ , значения которого являются функцией состояния органического субстрата и критерием его реакционной способности в реакциях окисления-восстановления. Этот вывод сделан на основе изучения реакционной способности модельных соединений структурного звена лигнина. Однако значения  $E'_0$ , определенные для различных препаратов лигнина, показали, что эффективный потенциал – интегральный параметр, который зависит не только от функциональной природы полимера, но и от породы древесины, способа выделения препарата и его макромолекулярных свойств [16, 17].

Вместе с тем, несмотря на отмечаемую высокую корреляцию данного параметра для модельных соединений структурного звена лигнина с величиной их потенциала полуволны [4, 13], до настоящего времени не снят вопрос о возможном термодинамическом соответствии  $E'_0$  величине стандартного окислительно-восстановительного (окс-ред; *ox-red*) потенциала  $E^0$  родственных лигнину фенолов. Поэтому задачами данных исследований являлись:

выбор органического соединения фенольного ряда, значение стандартного окислительно-восстановительного потенциала  $E^0$  которого известно;

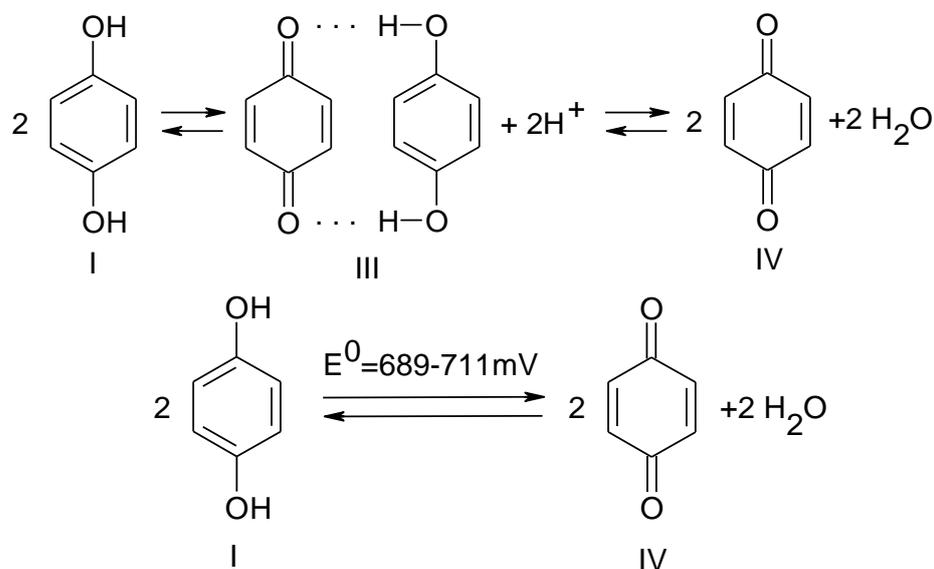
определение эффективного потенциала  $E'_0$  данного органического соединения;

проведение сравнительного анализа полученного значения  $E'_0$  с известной термодинамической величиной.

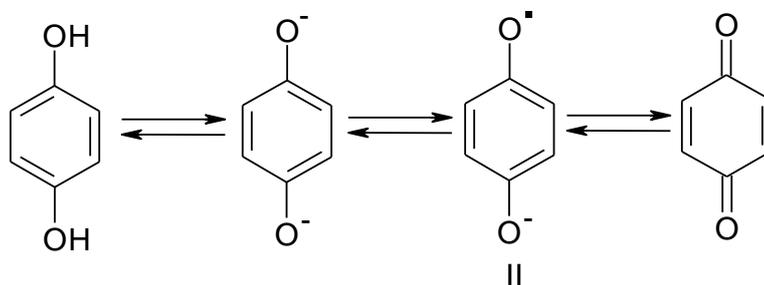
В качестве объекта исследований нами был выбран гидрохинон (1,4-дигидроксибензол), способный образовывать окислительно-восстановительную систему гидрохинон  $\leftrightarrow$  хинон с известным значением стандартного

окред-потенциала  $E^0$ . Необходимо отметить, что встречаемая в литературе величина  $E^0$  изменяется в диапазоне 680 ... 711 мВ ([9] – 699 мВ, [15] – 711 мВ, [5] – 680 мВ, [12] – 700 мВ). По-видимому, это связано с использованием в исследованиях различных электродных шкал.

Известно [10], что процесс окисления гидрохинона (I) проходит через стадию образования соответствующего хингидрона (III), а затем при отщеплении двух атомов водорода образуется *p*-бензохинон (IV):



Вместе с тем, окисление данного многоатомного фенола мягкими окислителями протекает через стадию образования семихинонового анион-радикала (II) [15], что и приводит к созданию термодинамически обратимой окислительно-восстановительной системы:



Данный факт позволяет определять величину эффективного потенциала выбранного органического вещества разработанным нами окредмет-рическим методом.

На первой стадии исследований, на основании полученных экспериментальных данных по окислению выбранного органического вещества медиатором (феррицианид-ферроцианид калия), рассчитывают кинетические параметры реакции.

Кинетические эксперименты проводили следующим образом: в термостатированную при температуре  $(25,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$  стеклянную реакционную ячейку с вмонтированными в нее платиновым и хлорсеребряным электродами (контакт электрода сравнения с реакционной смесью осуществляется через агар-агаровый электролитический ключ, заполненный насыщенным раствором хлорида калия), подключенными к цифровому иономеру И-130, помещали 50 мл свежеприготовленного раствора окислительно-восстановительной системы (ОВС)  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} - [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$  и включали магнитную мешалку; фиксировали начальное значение потенциала ОВС  $E_{\tau=0}$ , после чего в реакционную ячейку добавляли 1 мл предварительно приготовленного раствора органического соединения соответствующей концентрации; далее снимали показания иономера  $E_\tau$  через 0,5; 1; 2; 3; 5; 10; 15 и 20 мин (до достижения практически постоянного значения потенциала электродной пары) и определяли величину  $\Delta E = E_{\tau=0} - E_\tau$  по которой рассчитывали  $[\text{Ox}]_\tau$  медиатора для различных временных интервалов реакции [6, 11].

Для определения порядка реакции по органическому веществу эксперимент проводили при постоянном значении начальной концентрации *ox*-формы ОВС для трех различных концентраций органического вещества:  $C_{ox} = 1 \cdot 10^{-2}$  моль/л,  $C_{red} = 1 \cdot 10^{-3}$  моль/л; концентрация исследуемого вещества  $C_{орг}$  в реакционной ячейке составляла  $3 \cdot 10^{-3}$ ,  $2 \cdot 10^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{-3}$  моль/л; рН 7,0 (растворитель – буферный раствор  $\text{KH}_2\text{PO}_4 + \text{Na}_2\text{HPO}_4$ ).

Для определения порядка реакции по окислителю (*ox*-форма медиатора) закрепляли значения концентраций органического соединения и *red*-формы ОВС. Концентрация *ox*-формы медиатора была переменной величиной:  $C_{ox} = 3 \cdot 10^{-2}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$  и  $3 \cdot 10^{-3}$  моль/л;  $C_{red} = 1 \cdot 10^{-3}$  моль/л; концентрация исследуемого вещества в реакционной ячейке составляла  $2 \cdot 10^{-3}$  моль/л; рН = 7,0.

При определении порядка реакции по *red*-форме ОВС использовали следующие условия:  $C_{ox} = 1 \cdot 10^{-2}$  моль/л; концентрация исследуемого вещества в реакционной ячейке составляла  $2 \cdot 10^{-3}$  моль/л; рН = 7,0;  $C_{red} = 1 \cdot 10^{-4}$ ,  $5 \cdot 10^{-4}$  и  $5 \cdot 10^{-3}$  моль/л.

Для определения порядка реакции по  $[\text{H}^+]$  в эксперименте варьировали значение рН буферного раствора (6,5; 7,0; 7,5 и 8,0);  $C_{ox} = 1 \cdot 10^{-2}$  моль/л,  $C_{red} = 1 \cdot 10^{-3}$  моль/л; концентрация исследуемого вещества в реакционной ячейке составляла  $2 \cdot 10^{-3}$  моль/л.

Порядки реакций по экспериментальным данным рассчитывали с использованием кинетического метода определения начальных скоростей реакции. С этой целью была проведена аппроксимация зависимостей  $\ln \bar{x}_\tau = f(\tau)$  различными полиномами, причем наилучшая корреляция отмечена при использовании следующего уравнения:

Таблица 1

Порядок реакции	$C_{орг} \cdot 10^3$	$C_{ox} \cdot 10^3$	$C_{red} \cdot 10^3$	pH*	$V_0 \cdot 10^4$ , моль/(л · с)
	моль/л				
Гидрохинон	1	10	1,0	7,0(6,92)	5,19
	2	10	1,0	7,0(6,92)	10,40
	3	10	1,0	7,0(6,92)	13,92
Ox-форма медиатора	2	3	1,0	7,0(6,92)	3,46
	2	5	1,0	7,0(6,92)	4,67
	2	30	1,0	7,0(6,92)	41,60
Red-форма медиатора	2	10	0,1	7,0(6,92)	22,39
	2	10	0,5	7,0(6,92)	4,68
	2	10	5,0	7,0(6,92)	1,41
Концентрация OH <sup>-</sup>	2	10	1,0	6,5(6,49)	2,03
	2	10	1,0	7,0(6,92)	10,96
	2	10	1,0	7,5(7,41)	12,56
	2	10	1,0	8,0(7,89)	34,91
	2	10	1,0	8,0(7,89)	34,91

\* Значения pH, представленные в скобках, соответствуют практически достигнутым при приготовлении буферных растворов.

$$\ln x_{\pm} = \frac{a + b\tau}{1 + n\tau + m\tau^2}. \quad (1)$$

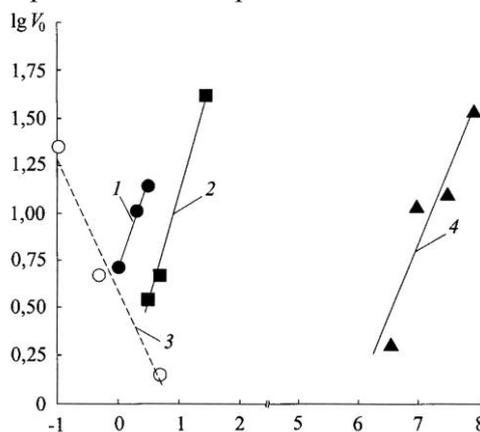
Путем дифференцирования уравнения (1) получено математическое выражение для определения начальной скорости реакции при  $\tau = 0$ :

$$V_0 = \frac{d \ln x_{\pm}}{d\tau}.$$

В табл. 1 представлены значения начальной скорости окисления гидрохинона для различных условий проведения эксперимента.

На рисунке приведены зависимости логарифма начальной скорости реакции от соответствующего переменного параметра ( $C_{орг}$ ,  $C_{ox}$ ,  $C_{red}$  и pH), которые имеют прямолинейный характер с высоким коэффициентом корреляции. Угол наклона данных зависимостей соответствует порядку реакции по соответствующему компоненту. Аппроксимационные кинетические характеристики для гидрохинона представлены в табл. 2.

Таким образом, кинетическое уравнение, характеризующее взаимодействие исследуемого



Функциональные зависимости: 1 –  $\lg V_0 = f(\lg C_{орг})$ ; 2 –  $\lg V_0 = f(\lg C_{ox})$ ; 3 –  $\lg V_0 = f(\lg C_{ред})$ ; 4 –  $\lg V_0 = f(\text{pH})$  (на горизонтальной оси – переменные параметры  $C_{орг}$ ,  $C_{ox}$ ,  $C_{ред}$ , pH)

Таблица 2

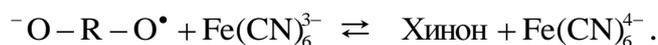
Переменный параметр	Функциональная зависимость $\lg V_0 = f(\lg C)$	Порядок реакции	$R^2$
$C_{ox}$	$y = 1,1 x + 0,05$	1	0,99
$C_{red}$	$y = -0,7 x + 0,72$	-1	0,95
$C_{орг}$	$y = 0,9 x + 0,73$	1	0,90
pH	$y = 0,8 x - 4,69$	1	0,89

двумого органического соединения с медиатором, в общем случае может быть записано в следующем виде:

$$\frac{d[Ox]^-}{dt} = 2k_{obs} \frac{[Ox]^- [RO^{2-}]^- [OH]^-}{[Red]^-},$$

где  $R^- = ^-O-C_6H_4-O^-$ .

Представленное кинетическое уравнение позволяет предположить следующий механизм окислительно-восстановительных превращений гидрохинона при взаимодействии с медиатором:



Полученные экспериментальные данные по кинетике окисления гидрохинона медиатором на основе цианокомплексов железа (III) и (II) позволили рассчитать равновесные концентрации *ox*- и *red*-форм медиатора, а также органического соединения. Эффективный потенциал гидрохинона рассчитывали по следующему уравнению [4]:

$$E'_0 = E^0 + \frac{2,3RT}{2F} (2pH + \lg \frac{[Ox]_p^2 \gamma_{ox}^2 [R(OH)_2]_p}{[Red]_p^2 \gamma_{red}^2 [RO_2]_p}),$$

где  $E^0$  – стандартный окислительно-восстановительный потенциал ОВС феррицианид-ферроцианид калия;  
 $[Ox]_p, [Red]_p$  – равновесные концентрации *ox*- и *red*-форм медиатора;  
 $\gamma_{ox}, \gamma_{red}$  – коэффициенты активности *ox*- и *red*-форм медиатора, соответственно 0,796 и 0,668 [8];  
 $[R(OH)_2]_p, [RO_2]_p$  – равновесные концентрации восстановленной и окисленной форм органического вещества.

Таблица 3

рН	$C_{\text{орг}} \cdot 10^3$ , моль/л	$\Delta E \pm 1$ , мВ	$[Ox]_p \cdot 10^3$ , моль/л	$E'_0$	$E'_0(\text{среднее})$	$E^0$ , [12,16,17]
				мВ		
6,5	4	60	5,38	708 ± 6	710	680...710
	2	45	6,93			
	1	29	8,35			
7,0	4	78	3,59	709 ± 5	710	680...710
	2	53	6,18			
7,5	1	33	8,05	713 ± 4		
	4	90	2,51			
8,0	2	54	6,01	711 ± 5		
	4	93	2,23			
	2	55	5,88			

Равновесные концентрации  $[R(OH)_2]_p$ ,  $[RO_2]_p$  рассчитывали исходя из следующих соотношений:

$$[RO_2]_p = 0,5(C_{ox} - [Ox]_p);$$

$$[R(OH)]_p = C_{\text{орг}} - [RO_2]_p,$$

где  $C_{ox}$  и  $C_{\text{орг}}$  – начальные концентрации феррицианида калия и гидрохинона в реакционной ячейке.

Результаты исследований [13, 14] позволили предложить уравнение для расчета уточненного значения стандартного окислительного потенциала ОВС гексацианоферрат (III) – гексацианоферрат (II), учитывающее влияние процессов ионной ассоциации, по которому определено значение стандартного потенциала системы в водных растворах, равное 313 мВ.

Для расчета  $E'_0$  процесс окисления гидрохинона проводили при следующих условиях:  $C_{ox} = 10^{-2}$  моль/л;  $C_{ox} : C_{red} = 10$ ; рН = 6,5 – 8,0;  $C_{\text{орг}} = (1 \dots 4) \cdot 10^{-3}$  моль/л.

В табл. 3 приведены основные экспериментальные результаты, рассчитанные значения равновесных концентраций  $[Ox]_p$  и эффективного потенциала гидрохинона  $E'_0$ .

Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что величина эффективного потенциала не зависит от свойств медиатора, а определяется только окислительными свойствами фенольных соединений, являясь по физическому смыслу стандартным потенциалом органической окислительно-восстановительной пары.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенштадт, А.М. Кинетическая характеристика процесса окисления ванилинового спирта в кислых средах [Текст]/ А.М. Айзенштадт [и др.] // Лесн./ журн. – 2001. – № 1. – С. 104–108. – (Изв. высш. учеб. заведений).
2. Айзенштадт, А.М. Окисление ванилина [Текст]/ А.М. Айзенштадт [и др.] // Лесн. журн. – 1996. – № 1-2. – С. 153–157. – (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Айзенштадт, А.М. Оценка реакционной способности препаратов лигнина [Текст]/ А.М. Айзенштадт [и др.] // Лесн. журн. – 2000. – № 5-6. – С. 145–151. – (Изв. высш. учеб. заведений).

4. *Айзенштадт, А.М.* Реакционная способность модельных соединений структурного звена лигнина [Текст]/ А.М. Айзенштадт, М.В. Богданов, К.Г. Боголицын // Лесн. журн. – 1998. – № 2. – С. 83–89. – (Изв. высш. учеб. заведений).
5. *Берка, А.* Новые редокс-методы в аналитической химии [Текст]/ А. Берка, Я. Вултерин, Я. Зыка. – М.: Химия, – 1968. – 318 с.
6. *Боголицын, К.Г.* Физико-химические методы анализа Ч. 2. [Текст]: учеб. пособие / К.Г. Боголицын [и др.]. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2003. – 228 с.
7. *Бровко, О.С.* Механизм процесса окисления модельных соединений структурного звена лигнина серноокислым церием [Текст]/ О.С. Бровко [и др.] // Лесн. журн. – 1993. – № 2-3. – С.161–165. – (Изв. высш. учеб. заведений).
8. *Гороновский, И.Т.* Краткий справочник химика [Текст]/ И.Т. Гороновский, Ю.П. Назаренко, Е.Ф. Некряч. – К.: Наук. думка, 1974. – 991 с.
9. *Добощ, Д.* Электрохимические константы [Текст]/ Д. Добощ: пер. с англ.; под ред. Я.М. Колотыркина. – М.: Мир, 1980. – 365 с.
10. *Каррер, П.* Курс органической химии [Текст]/ П. Каррер; пер. с нем.; под ред. М.Н. Колосова. – Л.: Хим. лит-ра, 1960. – 1216 с.
11. *Крунчак, В.Г.* Кинетический метод анализа углеводов [Текст] / В.Г. Крунчак [и др.] // Химия древесины. – 1984. – № 6. – С. 97–103.
12. *Куриц, А.Л.* Фенолы и хиноны [Текст]/ А.Л. Куриц, М.В. Ливанцов, Л.И. Ливанцова. – М.: МГУ, 1996. – 180 с.
13. *Малков, А.В.* Влияние сольватации и ионной ассоциации на реакционную способность фенолов в процессах окисления в водно-этанольной среде [Текст]: автореф дис. ... канд. хим. наук / А.В. Малков. – Архангельск, 2004. – 20 с.
14. *Малков, А.В.* Влияние электролитов на кинетику окисления родственных лигнину фенолов системой  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-} - [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$  [Текст] / А.В. Малков // Лесн. журн. – 2002. – № 6. – С. 114–120. – (Изв. высш. учеб. заведений).
15. *Общая органическая химия* [Текст] Т.2. Кислородсодержащие соединения / Под ред. Д. Бартона; пер. с англ. под ред. Н.К. Кочеткова. – М.: Химия, 1982. – 856 с.
16. *Самылова, О.А.* Кислотно-основные свойства лигнина Бьеркмана [Текст]/ О.А. Самылова [и др.] // Лесн. журн. – 2003. – № 6. – С. 95–103. – (Изв. высш. учеб. заведений).
17. *Самылова, О.А.* Эффективный потенциал хвойных малоизмененных препаратов лигнина [Текст]/ О.А. Самылова [и др.] // Лесн. журн. – 2002. – № 6. – С. 98–107. – (Изв. высш. учеб. заведений).
18. *Gribos, R.* The Reactions of Vanillin with Octacyanotungstate(V) Ions in Alkaline Solution [Text] / R. Gribos [en al.] // J. Inorganic Reaction Mechanisms. – 2000. – Vol. 2. – P. 195–204.

Архангельский государственный  
технический университет  
Поступила 24.02.05

*A.M. Aisenschadt, M.V. Bogdanov, K.G. Bogolitsyn, A.A. Abrosimova*  
**To Question of Effective Potential of Related-to-lignin Phenols**

Kinetic characteristics of hydroquinone oxidation process are determined by the method of oxredmetria. Value of  $E_0$  is well agreed with reference value of standard oxidation potential  $E^0$  of quinone-hydroquinone oxred-system.

УДК 676.163.4:676.019.264

**Ф.Х. Хакимова, Т.Н. Ковтун, С.А. Шистеров**

Хакимова Фирдавес Харисовна родилась в 1938 г., окончила в 1965 г. Уральский лесотехнический институт, кандидат технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии целлюлозно-бумажного производства Пермского государственного технического университета, заслуженный работник высшей школы РФ. Имеет более 150 научных трудов в области теории и технологии целлюлозы.



Ковтун Татьяна Николаевна родилась в 1951 г., окончила в 1975 г., Пермский политехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства Пермского государственного технического университета. Имеет более 60 печатных работ в области теории и технологии целлюлозы.



### **ОБЕССМОЛИВАНИЕ БЕРЕЗОВОЙ БИСУЛЬФИТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА СТАДИЯХ ВАРКИ И ОТБЕЛКИ**

Установлено, что для исключения смоляных затруднений в производстве березовой небеленой целлюлозы эффективно использовать ПАВ Неонол на стадии варки, в производстве беленой березовой целлюлозы – в равной мере добавку ПАВ Неонол как при варке, так и при отбелке целлюлозы пероксидом водорода.

*Ключевые слова:* березовая древесина, бисульфитная целлюлоза, смоляные затруднения, обессмоливание, варка, поверхностно-активное вещество, отбелка, пероксид водорода.

Перед технологами целлюлозно-бумажной промышленности стоят задачи по профилактике и устранению смоляных затруднений в конкретных условиях отдельных предприятий. Проблема эта относится к трудно решаемым, особенно, при переработке лиственной древесины.

Одним из отрицательных свойств лиственной сульфитной и бисульфитной целлюлозы является «вредная» смолистость, вызываемая при отсутствии смоляных кислот, высоким содержанием нейтральных веществ в составе экстрактивных лиственной древесины. В настоящее время проблема смоляных затруднений решается главным образом путем использования большого набора различных химикатов при производстве целлюлозы и бумаги. Однако эти химикаты весьма дороги и не всегда обладают хорошей биоразлагаемостью. Кроме того, на стадиях промывки, сортирования, масосподготовки целлюлозы из-за низкой концентрации массы для достижения необходимого эффекта требуется большой расход химикатов.

В целях снижения расхода химикатов и достижения более высокой эффективности их использования нами предложено применять поверхност-

но-активные вещества (ПАВ) при варке целлюлозы, именно на той стадии, где возникает основной очаг будущих осложнений в виде коллоидно-диспергированной в варочном щелоке смолы, которая в основном извлекается из щепы при ее пропитке и на первой стоянке.

Для получения бисульфитной целлюлозы использовали промышленные варочную кислоту и образцы березовой щепы из свежезаготовленной и выдержанной древесины. Температура варки – 150 ... 152 °С.

В качестве препарата для обессмоливания целлюлозы использовали отечественное ПАВ Неонол марки АФ 9-12, представляющее собой оксиэтилированные моноалкилфенолы на основе тримеров пропилена (технологическая смесь полиэтиленгликолевых эфиров моноалкилфенола). Усредненная степень оксиэтилирования Неонол – 12, массовая доля присоединенного оксиэтилена – 70 %. Это водорастворимое неионогенное ПАВ, обладающее повышенной биоразлагаемостью.

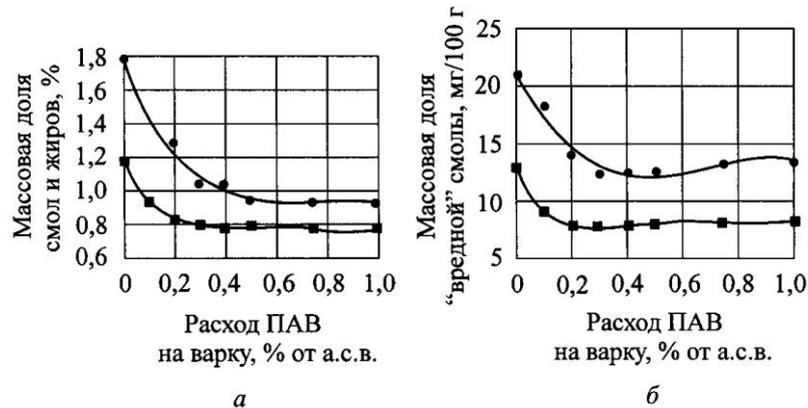
В табл. 1 представлены результаты варок древесины березы с добавками ПАВ Неонол. Выход целлюлозы составил 49,5 ... 51,0 %, образцы имели близкие величины степени провара (87 ... 92 п. ед.). Графики, отражающие степень обессмоливания бисульфитной целлюлозы, приведены на рисунке.

Как следует из данных табл. 1, добавки ПАВ Неонол при варке как свежезаготовленной, так и выдержанной древесины березы заметно снизили

Таблица 1

**Влияние расхода ПАВ Неонол при варке на обессмоливание березовой бисульфитной целлюлозы**

Номер варки	Расход ПАВ, % от абс. сухой древесины	Массовая доля смол и жиров в целлюлозе, %	Обессмоливание целлюлозы, %	Содержание «вредной» смолы в целлюлозе, мг/100 г	Снижение «вредной» смолистости, %
Свежезаготовленная древесина					
1	–	1,78	–	20,9	–
2	0,10	1,40	21,4	18,1	13,4
3	0,20	1,28	28,1	13,8	34,0
4	0,30	1,04	41,6	12,5	40,0
5	0,40	1,02	42,7	12,4	40,7
6	0,50	0,95	46,7	12,7	39,2
7	0,75	0,93	47,8	13,1	37,3
8	1,00	0,93	47,8	13,5	35,4
Выдержанная древесина					
9	–	1,17	–	13,0	–
10	0,10	0,94	19,7	9,3	28,5
11	0,20	0,81	30,8	7,8	40,0
12	0,30	0,79	32,5	7,8	40,0
13	0,40	0,77	34,2	8,0	39,5
14	0,50	0,77	34,2	8,2	37,1



Изменение содержания в березовой бисульфитной целлюлозе смол и жиров (а), «вредной» смолы (б) на стадии варки в зависимости от расхода ПАВ Неонол: 1 – целлюлоза из свежезаготовленной древесины; 2 – из выдержанной древесины

как общую, так и «вредную» смолистость целлюлозы. При варке свежезаготовленной древесины наиболее эффективное снижение смолистости имеет место при расходе ПАВ до 0,3 % от абс. сухой древесины (обессмоливание по общей смоле – 42 %, по «вредной» смоле – 40 %). При увеличении расхода ПАВ более 0,3 % смолистость снижается незначительно. Соответственно, это экономически нецелесообразно.

Массовая доля экстрактивных веществ и «вредной» смолы базового образца из выдержанной березы, сваренного без использования ПАВ (варка 9), значительно меньше, чем для аналогичного образца из свежезаготовленной древесины (варка 1). Наибольший эффект обессмоливания в этом случае достигается при расходе ПАВ Неонол 0,2 % от абс. сухой древесины (обессмоливание по общей смоле – 31 %, по «вредной» смоле – 40 %). При увеличении расхода ПАВ более 0,2 % снижение в целлюлозе общей смолистости продолжается, но не с такой эффективностью, как при расходе до 0,2 %, а обессмоливания целлюлозы по «вредной» смоле вообще не происходит.

Обессмоливающий эффект от использования ПАВ при варке обусловлен следующим:

ПАВ способствует диспергированию смолы (чем более дисперсна смоляная эмульсия, тем она более устойчива, в меньшей степени смола оседает на целлюлозное волокно);

ПАВ, присутствующее в варочном растворе, образует защитные слои, препятствующие сближению и слипанию мелких частиц смолы (перешедших в варочный раствор на начальной стадии варки) в крупные флоккулы, и снижает вероятность оседания этих флоккул на волокне и оборудовании.

Все это способствует меньшему оседанию смолы на волокне и эффективному удалению мелких частиц смолы с волокна при промывке целлюлозы, а в конечном итоге снижает содержание смолы в целлюлозе после варки и устраняет потенциальную возможность смоляных затруднений.

Таким образом, при бисульфитной варке свежезаготовленной древесины березы для снижения смолистости целлюлозы целесообразна добавка ПАВ Неонол в количестве 0,3 %, а при варке выдержанной древесины – 0,2 % от абс. сухой древесины.

В производстве целлюлозу традиционно обессмоливают на стадии отбелки, в частности на ступенях щелочения, отбелки пероксидом водорода и озоном, щелочного облагораживания, кислородно-щелочной отбелки. В связи с этим представляет интерес сравнить степень обессмоливания целлюлозы на стадиях варки и отбелки. С этой целью нами использована схема бесхлорной отбелки целлюлозы только пероксидом водорода: ЩП–П<sub>д</sub>–К–П–К.

Результаты отбелки березовой бисульфитной целлюлозы из свежезаготовленной древесины приведены в табл. 2. Для отбелки использовали образцы целлюлозы различной степени провара. Варки 18 и 19 проведены с добавкой 0,3 % ПАВ Неонол от абс. сухой древесины.

Таблица 2

**Результаты отбелки березовой бисульфитной целлюлозы  
по схеме ЩП–П<sub>д</sub>–К–П–К**

Показатель	Значения показателя для варки				
	15	16	17	18	19
Степень провара целлюлозы, п.е.	105	85	75	110	80
Использование ПАВ при варке	–	–	–	+	+
Общий расход H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> на отбелку, % от абс. сухого волокна	5,5	5,0	4,8	5,0	5,0
Выход беленой целлюлозы, % от небеленой	91,0	93,2	93,3	93,1	94,0
Белизна целлюлозы, %	80,0	85,3	86,1	85,7	85,9
Массовая доля смол и жиров в целлюлозе, %:					
небеленой	2,42	2,22	1,73	1,50	1,29
беленой	0,90	0,60	0,54	0,48	0,38
Обессмоливание целлюлозы, %	62,8	73,0	68,8	68,0	70,6
Массовая доля «вредной» смолы в целлюлозе, мг/100 г:					
небеленой	25,6	23,5	20,7	12,6	12,0
беленой	3,69	3,56	3,75	3,13	3,30
Снижение «вредной» смолистости, %	85,6	84,9	81,9	75,2	72,5
Показатели механической прочности целлюлозы (60 <sup>0</sup> ШР, 75 г/м <sup>2</sup> ):					
разрывная длина, м					
сопротивление:	6780	6730	7650	9010	8700
продавливанию, кПа					
раздиранию, мН	270	260	280	370	360
	640	640	550	480	540

По выходу образцы беленой целлюлозы различаются незначительно (выход жесткой целлюлозы после отбелки на 1 ... 2 % ниже, чем целлюлозы средней жесткости). Белизна целлюлозы варки 15 низкая (80 %), т.е. данная схема отбелки неэффективна при отбелке жесткой целлюлозы. Результаты отбелки образца варки 18 свидетельствуют о том, что целлюлоза, сваренная с добавкой ПАВ Неонол, несмотря на высокую жесткость, отбеливается также успешно, как и целлюлоза невысокой жесткости, сваренная без добавок ПАВ (варка 16). Таким образом, использование ПАВ Неонол при варке березовой целлюлозы положительно сказывается на ее белимости при бесхлорной отбелке пероксидом водорода.

По принятой нами схеме целлюлоза обессмоливается существенно: содержание в целлюлозе общей смолы снижается на 63 ... 73 %, «вредной» смолы – на 70 ... 85 %. Несколько меньший процент снижения «вредной» смолы у образцов целлюлозы (варки 18 и 19), сваренных с добавками ПАВ, объясняется, вероятно, низким содержанием «вредной» смолы в исходной небеленой целлюлозе вследствие обессмоливания ее на стадии варки.

Таким образом, использование при варке березовой целлюлозы добавок ПАВ Неонол способствует снижению смолистости целлюлозы жесткой и средней жесткости как на стадии варки, так и при дальнейшей отбелке, причем, в случае производства небеленой целлюлозы такая операция уже практически исключает проблему смоляных затруднений. Дальнейшая отбелка целлюлозы снижает содержание «вредной» смолы до очень низких величин (в нашем случае до 3,1 ... 3,3 мг/100 г).

Отбелка бисульфитной березовой целлюлозы обычной варки (без добавок ПАВ) по схеме ЩП–П<sub>д</sub>–К–П–К снижает общую и «вредную» смолистость до таких низких величин (3,6 ... 3,8 мг/100 г), что в этом случае варка целлюлозы может быть проведена без добавок ПАВ без опасения создать смоляные затруднения в технологическом потоке.

#### *Выводы*

С целью исключить смоляные затруднения в производстве небеленой бисульфитной березовой целлюлозы эффективна добавка ПАВ Неонол на стадии варки (в количестве 0,3 % от абс. сухой древесины), а в производстве беленой целлюлозы в равной мере эффективна добавка ПАВ Неонол как при варке, так и при отбелке целлюлозы по схеме ЩП–П<sub>д</sub>–К–П–К.

Пермский государственный  
технический университет

Поступила 3.11.04

*F.Kh. Khakimova, T.N. Kovtun, S.A. Shisterov*

#### **Derisination of Birch Bisulfite Pulp at Cooking and Bleaching Stages**

It is established that it is efficient to use surface-active material NEONOL at the cooking stage for excluding resin difficulties in the unbleached pulp production, and it is equally efficient to use additive surface-active material NEONOL both at pulp cooking and bleaching stages by hydrogen peroxide in the production of bleached pulp.

УДК 676.16

**Ю.В. Севастьянова, Л.А. Миловидова, Г.В. Комарова, Т.А. Королева**

Миловидова Любовь Анатольевна родилась в 1946 г., окончила в 1970 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии ЦБП Архангельского государственного технического университета. Имеет более 90 печатных трудов в области производства беленых волокнистых полуфабрикатов.



Комарова Галина Владимировна родилась в 1947 г., окончила в 1970 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат химических наук, доцент кафедры технологии ЦБП Архангельского государственного технического университета. Имеет более 90 научных трудов в области производства белой целлюлозы.



Королева Татьяна Алексеевна родилась в 1974 г., окончила в 1996 г. Архангельский государственный технический университет, старший научный сотрудник НИС АГТУ кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства АГТУ. Имеет более 20 печатных работ в области исследования процессов отбелки целлюлозы.



## **ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ НА СОДЕРЖАНИЕ ОСТАТОЧНОГО ЛИГНИНА И ГРУПП ГЕКСЕНУРОНОВОЙ КИСЛОТЫ В ЛИСТВЕННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЕ**

Изучено влияние основных факторов сульфатной варки на содержание остаточного лигнина в лиственной сульфатной целлюлозе в целях оптимизации условий и получения высококачественного продукта.

*Ключевые слова:* лиственная сульфатная целлюлоза, остаточный лигнин, группы гексенуроновой кислоты, способность к отбелке.

Выполненные нами исследования показали, что такие факторы сульфатной варки, как температура, расход активной щелочи, продолжительность стоянки на конечной температуре, оказывают заметное влияние на способность лиственной целлюлозы к отбелке, или на «белимость».

Причиной снижения белимости лиственной целлюлозы обычно считают образование групп гексенурановой кислоты (Hex-A), особенно, при получении мягких целлюлоз с числом Каппа 10 ... 14 ед.

Для выяснения изменений в составе технической лиственной целлюлозы по ходу варки в лабораторных условиях был проведен эксперимент со смесью березовой и осиновой древесины (1 : 1). Для этого отбирали фракции щепы с сит (20 и 10) фракционатора АЛГМ. Режим варки: подъем температуры от 70 °С до конечной – 2 ч; стоянка на конечной температуре 0,5; 1,0; 1,5; и 2,0 ч; гидромодуль – 1 : 4; температура – 160, 165 и 170 °С; концентрация активной щелочи – 45, 52 и 55 г/л (в ед. Na<sub>2</sub>O); сульфидность белого щелока – 25 %.

В образцах целлюлозы определяли выход, число Каппа, содержание лигнина и групп гексенурановой кислоты (Hex-A). Результаты представлены на рис. 1–3.

Повышение температуры варки от 160 до 170 °С (при одинаковой продолжительности варки) привело к снижению выхода и числа Каппа для всех рассмотренных значений начальной концентрации активной щелочи

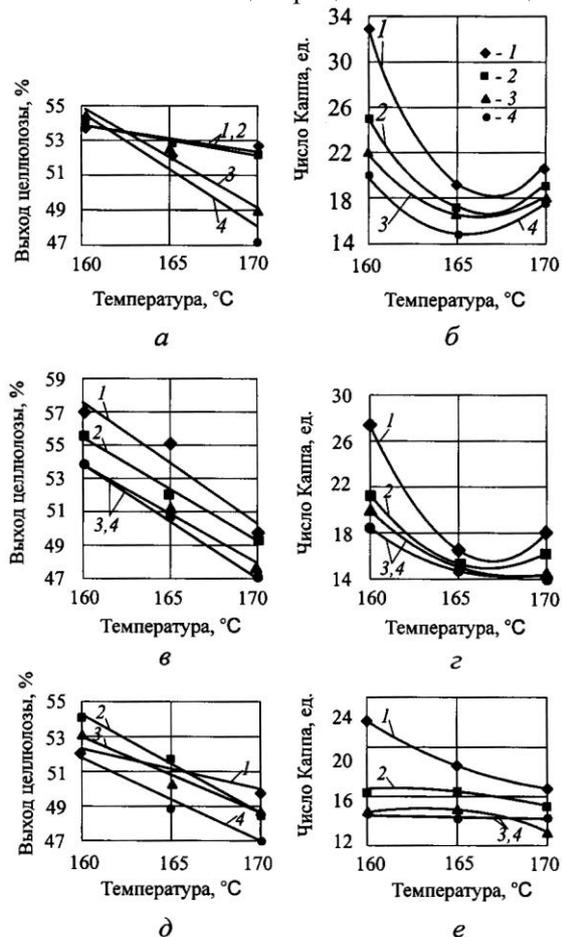


Рис. 1. Влияние температуры и продолжительности варки лиственной древесины на изменение выхода (а, в, д) и числа Каппа (б, з, е) целлюлозы при различной концентрации активной щелочи в варочном щелоке: а, б – 45 г/л; в, з – 52; д, е – 55 г/л; 1 – продолжительность варки 30 мин; 2 – 60; 3 – 90; 4 – 120 мин

(рис. 1). Снижение числа Каппа отмечено при повышении температуры варки от 160 до 165 °С и концентрации активной щелочи 45 и 52 г/л. При дальнейшем повышении температуры варки для этих концентраций активной щелочи имело место повышение числа Каппа во всем интервале продолжительности стоянки.

Повышение начальной концентрации активной щелочи до 55 г/л при увеличении температуры варки снижало число Каппа только при продолжительности варки на конечной температуре в течение 30 мин. При более длительной стоянке температура варки практически не влияет на величину числа Каппа.

Характер изменения содержания лигнина в зависимости от температуры и продолжительности варки представлен на рис. 2, где видно, что ход кривых изменения содержания лигнина существенно отличается от изменения числа Каппа (см. рис. 1). Классический характер изменения содержания лигнина в целлюлозе отмечен только

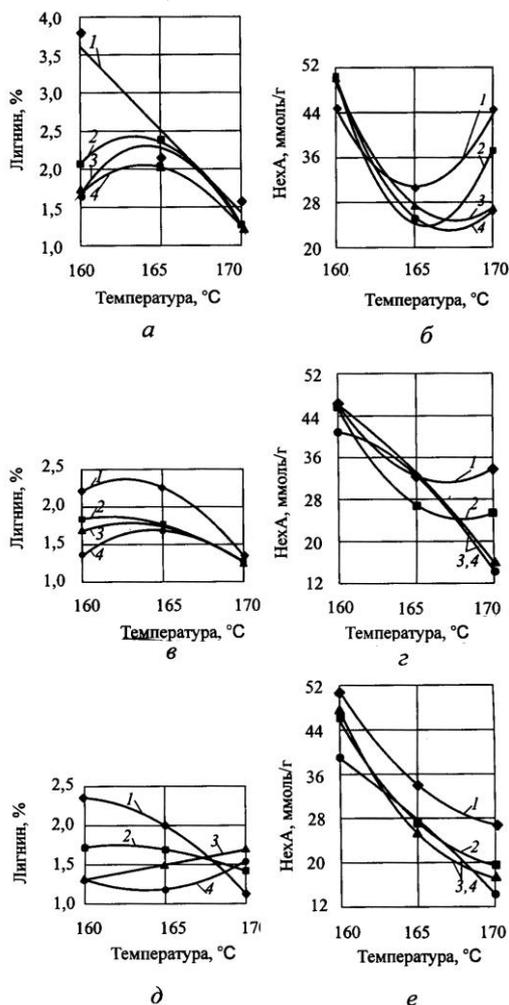


Рис. 2. Влияние температуры и продолжительности варки лиственной древесины на изменение содержания лигнина (а, в, д) и групп Нех-А (б, г, е) (см. обозначения на рис. 1)

для варки при температурах 160 ... 165 °С. При повышении температуры варки до 170 °С растворение лигнина завершается уже в течение 30 мин стоянки на конечной температуре.

Дальнейшее увеличение продолжительности варки не только не приводит к снижению содержания лигнина, но, наоборот, при высокой концентрации щелочи (рис. 2, *в*) сопровождается некоторым увеличением его содержания в целлюлозе.

Как видно из рис. 2, *б*, *з*, *е*, на содержание групп Нех-А в лиственной целлюлозе влияют все рассмотренные факторы варки: продолжительность, температура, расход щелочи. При этом содержание групп Нех-А зависит от сочетания этих факторов. Так, при концентрации активной щелочи в варочном щелоке 55 г/л повышение температуры и продолжительности варки существенно снижает содержание групп Нех-А, причем скорость снижения при повышении температуры практически одинакова во всем временном интервале варки (рис. 2, *е*). Кривые изменения содержания групп Нех-А практически параллельны друг другу, а при продолжительности стоянки 60, 90 и 120 мин почти сливаются.

При концентрации активной щелочи 45 г/л и повышении температуры варки до 165 °С содержание групп Нех-А снижается, но продолжительность варки практически не влияет на этот показатель. Дальнейшее повышение температуры до 170 °С сопровождается увеличением содержания групп Нех-А тем в большей степени, чем меньше продолжительность варки.

Для целлюлозы, полученной при варке с использованием варочного раствора концентрацией активной щелочи 52 г/л, характерны промежуточные результаты. Для стоянки продолжительностью 30 и 60 мин (рис. 2, *з*) при повышении температуры варки до 170 °С содержание групп Нех-А остается постоянным, при дальнейшем увеличении продолжительности варки имеет место снижение содержания групп Нех-А.

Введение поправки в число Каппа (1 ед. Каппа = 10 ммоль/г групп Нех-А) привело к заметному снижению значений этого показателя для варок при температуре 170 °С (рис. 3). Однако тенденция к некоторому росту значений числа Каппа при повышении температуры варки до 170 °С сохранилась и в этом случае.

Таким образом, при варке лиственной сульфатной целлюлозы такие основные факторы, как продолжительность, температура и расход активной щелочи, неоднозначно влияют на содержание остаточного лигнина и групп Нех-А, которые в дальнейшем определяют поведение целлюлозы при отбелке. Наиболее заметное влияние на образование групп Нех-А и содержание остаточного лигнина оказывает совместное действие концентрации активной щелочи и температуры варки. Снижение содержания групп

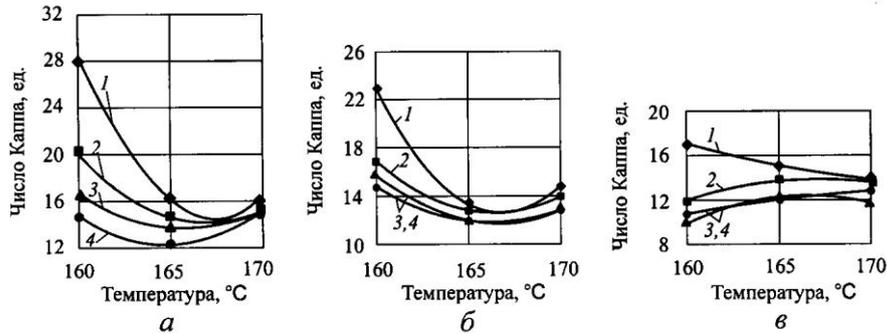


Рис. 3. Влияние температуры варки лиственной древесины на изменение расчетного числа Каппа при различной концентрации активной щелочи: а – 45 г/л; б – 52; в – 55 г/л (обозначения кривых 1 – 4 см. на рис. 1)

Нех-А при одновременном снижении содержания остаточного лигнина достигается при относительно низкой температуре варки (160 °C) и начальной концентрации активной щелочи не ниже 52 г/л.

Архангельский государственный  
лесотехнический университет

Поступила 29.10.04

*Yu.V. Sevastjanova, L.A. Milovidova, G.V. Komarova, T.A. Koroleva*  
**Influence of Sulfate Cooking on Residual Lignin Content  
 and Groups of Hexuronic Acid in Hardwood Pulp**

The influence of the main factors of Sulfate Cooking on the residual lignin content aimed at optimizing conditions and producing high-quality pulp is studied.



## ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 630\*6:630\*3

***А.А. Вертман, Ю.И. Провоторов, В.И. Мелехов, В.Ж. Аренс***

Вертман Александр Абрамович родился в 1926 г., окончил в 1948 г. Московский институт стали, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом ЦНИИ Технологии машиностроения и главный научный сотрудник Института высоких температур РАН, академик РАЕН, член Нью-Йоркской академии наук. Имеет более 150 печатных работ в области микрогетерогенного строения расплавов и вовлечения региональных местных ресурсов твердого топлива, минерального сырья и отходов в переработку на основе новых экологически чистых пиротехнологий.



Провоторов Юрий Иванович родился в 1939 г., окончил в 1964 г. Красноярский технологический институт, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ученый секретарь ОАО ЦНИИМЭ, член-корреспондент РАЕН. Имеет более 120 печатных работ в области создания и испытания машин для первичного транспорта леса, ресурсосберегающих технологий и механизации лесозаготовки.



Мелехов Владимир Иванович родился в 1939 г., окончил в 1961 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой древесиноведения и тепловой обработки древесины Архангельского государственного технического университета, академик РАЕН и АПК. Имеет более 250 работ в области технологии высококачественной сушки, пропитки древесины и использования малоценной древесины и отходов деревообработки на основе новых технологий.



Аренс Виктор Жанович родился в 1933 г., окончил в 1956 г. Московский горный институт, доктор геолого-минералогических наук, профессор Московского горного университета, заслуженный деятель науки и техники РФ, председатель горно-металлургической секции, академик, вице-президент РАЕН. Имеет более 110 печатных работ в области геотехнологии и физико-химических методов добычи полезных ископаемых.



## К ВЫБОРУ СТРАТЕГИИ ОСВОЕНИЯ ОТДАЛЕННЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ

Рассмотрены вопросы освоения ОТР, где сосредоточены основные запасы топливо-минерального сырья. Предложена концепция комплексного использования ресурсов.

*Ключевые слова:* лесные ресурсы, регион, лесозаготовки, биотопливо, освоение территории, мобильность производства, модульное предприятие.

Отдаленные и труднодоступные регионы Севера и Востока России (ОТР), занимающие около 65 % континентальной территории страны, отличаются экстремальным климатом, отсутствием внепогодных транспортных коммуникаций и, как следствие, низкой эффективностью экономики. В то же время именно эти регионы обладают наиболее емким потенциалом невостребованных природных ресурсов.

### *Ресурсы отдаленных регионов*

На территории ОТР сосредоточено более 80 % всех разведанных запасов топливоминерального сырья РФ, стоимость которого оценивается в 25 ... 30 трлн долл. [3], однако в условиях рыночной экономики, исключая регулярные бюджетные дотации, добыча этих ресурсов в большинстве случаев оказывается малорентабельной. Экстремальные расходы на добычу и транспортировку к местам переработки топливоминеральных ресурсов ОТР резко снижают их конкурентоспособность на мировом рынке, конъюнктура которого на рубеже веков также радикально изменилась. Это связано с появлением новых крупных экспортеров (ЮАР, Австралия, Индонезия и др.), располагающих уникальным по запасам и качеству сырьем, которое дислоцировано в комфортных климатических зонах в непосредственной близости к портам [10].

Такие преимущества новых экспортеров в сочетании с удешевлением фрахта судов до 6 ... 10 долл. за 1 т привели к резкому (в 1,5–2,0 раза) снижению цен на уголь, руду и другую продукцию горной промышленности даже при увеличении плеча перевозок до 8...12 тыс. км, причем впервые появилась возможность селективного использования ресурсов всего мирового сообщества [7]. В связи с изложенным можно с большой вероятностью прогнозировать на ближайшую перспективу стагнацию ведущей в ОТР России горной промышленности и, как следствие, необходимость вовлечения иных, еще не востребованных, природных ресурсов.

Анализ показывает, что наиболее перспективным резервом, которым обладают депрессивные регионы Севера и Востока РФ, является древесина, практически единственный восполняемый ресурс:

– при общем потенциале лесных массивов России 80 ... 82 млрд м<sup>3</sup> более 60 ... 70 % запасов древесины сосредоточено на территории ОТР;

– вовлечение возобновляемых ресурсов леса способно (по экспертным оценкам) приносить до 100 млрд долл. в год и оптимизировать структуру экспорта страны в целом [6];

– заготовка и переработка древесины допускают создание системы рассредоточенных по территории региона специализированных высокотехнологичных мини-предприятий, отличающихся рядом преимуществ (сокращение суммы стартовых затрат, длительности ввода в эксплуатацию, экологического ущерба и др.) [8];

– спрос на лесопroduкцию непрерывно возрастает из-за ее дефицита в странах-лидерах мировой экономики, тогда как Россия обладает 25 % мировых ресурсов древесины, большая часть которых не востребована;

– доля России в мировом экспорте древесины (87,2 млн м<sup>3</sup> в год) не превышает 2 % при выручке лишь 4,4 млрд долл., ибо в структуре экспорта преобладают необработанные материалы, реализуемые по цене около 50 долл. за 1 м<sup>3</sup>, тогда как стоимость продукции глубокой переработки древесины на внешнем рынке многократно выше [6]. Расширение экспорта продукции глубокой переработки древесины, с учетом наличия ее ресурсов, при неистощительном и устойчивом лесопользовании способно обеспечить стабильность отечественной экономики в целом и снизить острую зависимость от колебаний мировых цен на нефть.

#### *Постановка задачи*

Характерной особенностью лесного сектора России являются огромные отдаленные, разобщенные лесные площади со слабо развитой сетью лесных дорог круглогодичного действия, специфическими географическими, природными и климатическими условиями, определяющими сезонность лесозаготовок и транспортное освоение лесозаготовительных регионов с малым объемом транспортировки леса водным путем. В отдаленных лесных регионах, имеющих значительный прирост древесины, существенной проблемой является слабое использование лесных ресурсов, направленное в основном на вырубку ресурсов, высокосортного крупного пиловочника, что приводит к истощению хвойных высокобонитетных древостоев. В результате заготовка одинакового объема древесины в России производится на площадях в 5–7 раз больших, чем, например, в Скандинавских странах, а это, в свою очередь, вызывает снижение в 10–15 раз уровня доходов с 1 га эксплуатируемых лесов. Одним из путей повышения эффективности использования лесных ресурсов ОТР является применение новых ресурсосберегающих технологий, учитывающих специфику регионов.

Расширение экспорта продукции глубокой переработки древесины из ОТР требует новых научно обоснованных подходов, отвечающих основным мировым тенденциям в области организации производства, энергообеспечения, экологии и технологии комплексной переработки природных ресурсов.

В ОТР вследствие их малой доступности, слабого развития транспортных путей и других причин образовались значительные запасы спелого

и перестойного леса, которые могут представлять экономическую ценность только при решении ряда технических и технологических мероприятий. Дальнейшее сохранение на корню перестойных древостоев снижает производительность этих лесов, ведет к неполному использованию производительных сил природы и деградации лесных массивов. Лесозаготовки в этих регионах необходимы, поскольку вырубка леса является одновременно и основой лесовосстановления.

Оптимизированный режим лесозаготовок в ОТР позволит вести неистощительное лесопользование длительное время с постепенно возрастающими объемами по мере повышения производительности лесов, при строгом соблюдении правил рубок, с учетом внутренних законодательств, международных договоров и соглашений, а также юридических и традиционных прав коренных народов. Предполагаемая технология лесопользования в ОТР соответствует требованию эффективного многоцелевого использования продуктов и функций леса, позволяя получить широкий спектр экологических и социальных выгод, способствует поддержанию лесов, имеющих высокую природоохранную значимость, сохранению биологического разнообразия, уникальных ландшафтов, лесных и водных ресурсов, обеспечивая целостность лесной экосистемы.

Как показывает анализ, одним из наиболее эффективных решений в базовых отраслях мировой экономики в ОТР (металлургия, химия, энергетика) является концепция автономных, модульных мини-предприятий, применение которой в частном случае безотходного освоения лесных ресурсов обеспечивает дополнительные преимущества.

Идеология системной концепции (на примере освоения лесных ресурсов ОТР) включает следующие положения.

1. Снижение (на 20 ... 30 %) стоимости минимизированного по массе и габаритам оборудования за счет его производства большими сериями по единому проекту и разработки оптимального комплекта оборудования, адаптированного к условиям эксплуатации.

2. Размещение полного комплекта унифицированного энергетического и технологического оборудования (далее энерготехнологический модуль – ЭТМ) на речном судне (барже) в условиях специализированного предприятия с целью обеспечить высокое качество монтажа и надежность агрегатов.

3. Доставка мобильных (плавающих) ЭТМ в состоянии эксплуатационной готовности по водным путям к площадкам дислокации, расположенным в непосредственной близости от ресурсов сырья с целью исключить строительство в необжитых регионах и сократить транспортные расходы.

4. Снижение производственных затрат в результате использования наиболее эффективной энерготехники и применения современных электро-технологий для безотходного передела древесины.

5. Выпуск максимально ценной товарной продукции лесопиления и деревообработки с использованием эффективных технологий и термолиза древесины с последующим транспортированием (в период навигации – вод-

ным путем, зимой – по снежным малозатратным лесовозным и другим дорогам) конечных материалов потребителю, в том числе зарубежному без перевалок и посредников.

6. Замена ископаемых видов топлива энергией биомассы, являющейся продуктом лесопользования в ОТП, что позволяет сократить выбросы CO<sub>2</sub> и др. Кроме того, использование заготавливаемой древесины взамен энергоемких аналогов (сталь, бетон и др.) также способствует уменьшению выбросов CO<sub>2</sub>. Все это хорошо гармонирует с программой Киотского протокола и снижением «парникового эффекта». Следует иметь в виду, что неиспользуемые запасы биотоплива в состоянии решить проблему энергетики в ОТП и других районах.

#### *Комплектация типового мобильного энерготехнологического модуля*

Принципиальная схема предлагаемой технологии передела древесины типовым модулем (50 ... 100 тыс. м<sup>3</sup> в год) представлена на рисунке и включает следующие блоки.

1. Блок поточной первичной обработки древесины и лесопиления сырой качественной древесины (СКД) и фрагментирования ее отходов, размещенный в палубной надстройке судна.

2. Энергоблок мощностью 3000 ... 3500 кВт, имеющий в составе:

– газогенератор, использующий в качестве топлива сырую некондиционную и низкосортную древесину, отходы лесопиления и другие древесные отходы (СНКД);

– газовые двигатели внутреннего сгорания (ГДВС), механически сочлененные с электрогенераторами (два агрегата);

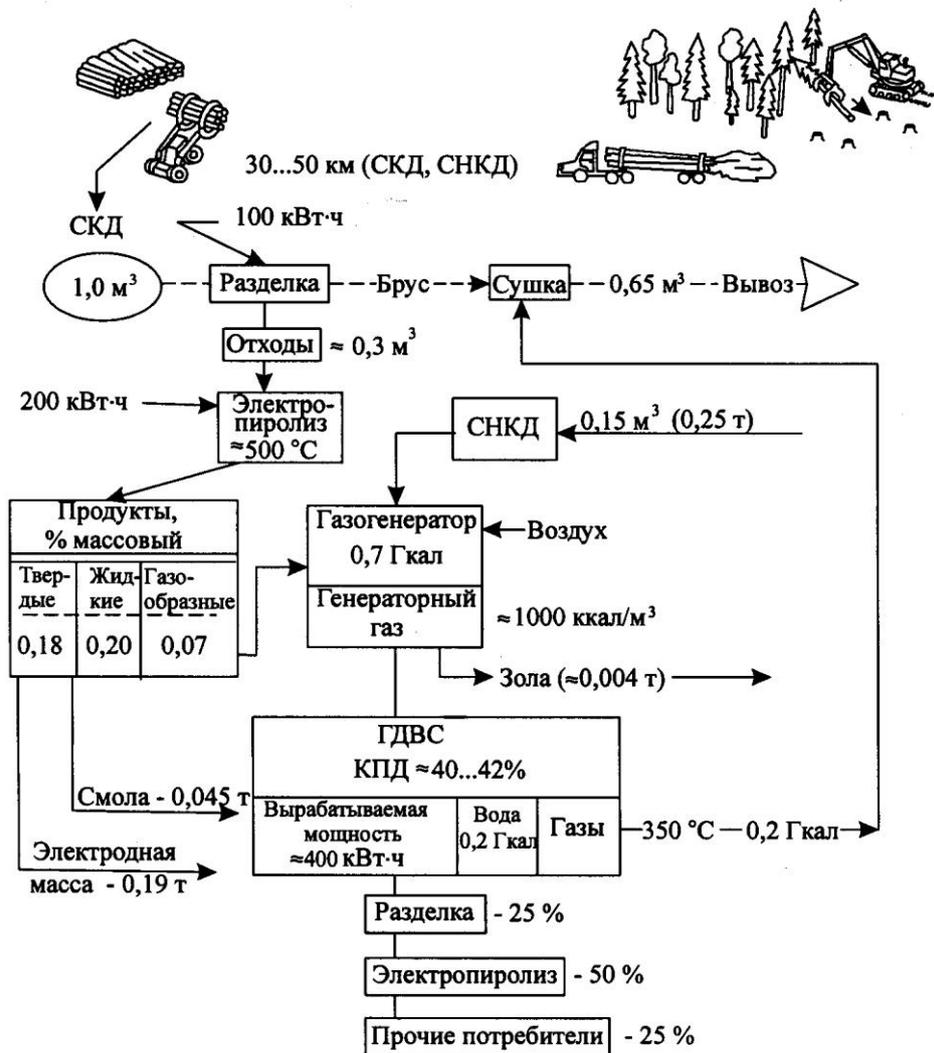
– резервный дизель-генератор мощностью 200 кВт.

3. Блок вакуумного электротермолиза отходов лесопиления (450 ... 550 °С) и конечной обработки продуктов сухой перегонки.

Помимо названных агрегатов в корпусе судна дислоцированы: бункер хранения отходов лесопиления, сушилка (150 °С) наиболее ценной товарной продукции, упаковочное оборудование, танк дизельного топлива, бункер резерва сырья для газогенераторного оборудования, обеспечивающие выполнение технологического процесса. Кормовой трюм судна и часть палубной надстройки используют для размещения жилых помещений и прочих объектов современной инфраструктуры, обеспечивающих комфортный уровень жизни минимального по численности персонала в автономных условиях отдаленных регионов.

#### *Обоснование и преимущества предлагаемого решения*

1. Суммарная площадь бассейнов основных рек Сибири достигает 10 млн км<sup>2</sup> (в 20 раз больше площади Франции), поэтому освоение столь обширной территории практически может быть осуществлено созданием системы рассредоточенных мини-предприятий в виде мобильных автономных модулей, мировой опыт применения которых уже имеется (например в Бразилии) [2].



Технологическая схема заготовки древесины и типового мобильного модуля.

Объем поставок сырья:

СКД – 85 тыс. м<sup>3</sup>/год (240...250 м<sup>3</sup>/сут);

СНКД – 15 тыс. м<sup>3</sup>/год (40...50 м<sup>3</sup>/сут);

Товарная продукция:

сухая продукция лесопереработки – 55 тыс. м<sup>3</sup>/год;

электродная масса – 16 тыс. т/год;

смола – 3,8 тыс. т/год;

прочие продукты – 7 тыс. т/год

2. Помимо исключения необходимости строительства в сложных климатических условиях, повышения надежности эксплуатации и снижения суммарных расходов за счет крупносерийного выпуска плавучих ЭТМ, важным преимуществом такого решения является возможность одновременного использования многочисленных судоремонтных заводов, дислоцированных как в восточных, так и в центральных регионах, что способствует значительному расширению рынка труда.

3. Предлагаемая структура энергоблока (газогенератор – газогенераторный двигатель внутреннего сгорания) отличается наиболее высокой эффективностью, так как:

– КПД газового двигателя достигает 40 ... 42 %, т. е. превышает КПД турбин как паровых, так и газовых (соответственно 38 и 30 %);

– удельные капитальные вложения в энергоисточник на базе ДВС (180 долл./кВт) ниже, чем в комплексе топка – котел – паровая турбина (500 долл./кВт), массогабаритные параметры также намного меньше;

– ДВС позволяют применить вторичные тепловые ресурсы в виде горячей воды (90 ... 110 °С) и отработанных газов (300 ... 360 °С) для сушки древесины, в связи с чем коэффициент полезного использования топлива в таком энергоблоке достигает 65 ... 95 %.

4. Генераторный газ, выработанный на базе фрагментированной некондиционной древесины (СНКД), и выхлоп ДВС содержат наименьшее количество экологически опасных примесей в виде оксидов серы и азота.

5. Особое значение приобретает применение перспективных электротехнологий передела вторичных материалов обработки древесины с помощью оборудования нового поколения.

Например, минимизация объема производства позволяет осуществлять сухую перегонку древесины (пиролиз) в вакуумных электропечах, с внешним обогревом накопительных емкостей до 450 ... 550 °С [4]. Подобные простейшие конструкции оборудования обеспечивают значительное повышение производительности за счет непрерывной эвакуации летучих продуктов пиролиза, минимизацию габаритов и длительный ресурс эксплуатации накопительных емкостей, выполненных из жаростойких, экономно легированных сталей.

Следует указать высокую потребительскую ценность древесного угля, что определяется низким содержанием в нем золы (0,3 ... 0,5 %) и практически полным отсутствием примесей серы, в связи с чем наиболее целесообразно изготавливать на его основе дефицитную ныне анодную массу высшего сорта (АМО) для алюминиевой промышленности [9]. В структуре себестоимости алюминия доля электродных материалов достигает 7 ... 10 % (150 ... 170 долл./т), в связи с чем снижение их цены весьма существенно для повышения конкурентности российского экспорта легких металлов на мировом рынке. Прогнозируется высокий спрос и зарубежных потребителей на чистую (без примесей) электродную массу, так как емкость мирового рынка этого продукта превышает 2,0 ... 2,5 млн т в год.

Ценным экспортным продуктом являются также брикеты экологически чистого бытового твердого топлива (древесный уголь с добавками связующей смолы). В отдаленных регионах, где удельная цена жидкого топлива (с учетом доставки) достигает 250 ... 300 долл. / т у. т, несомненные преимущества имеет и энергетическое использование древесноугольной смолы с удельной теплотой сгорания до 8000 ккал/кг ( $33,52 \cdot 10^6$  Дж/кг или 1,14 т у. т/т).

Еще одним источником дохода от заготавливаемой древесины является древесная зелень, масса которой достигает 15 ... 20 % массы деревьев. Емкая по химическому составу, она содержит большое количество сложных биологически активных и питательных веществ: аминокислот, углеводов, азотных соединений, органических кислот и других элементов. Их промышленное применение основано на отработанных простых и дешевых технологиях с применением специализированного технологического оборудования и аппаратуры с использованием теплоты, получаемой на энерго модуле. Стоимость получаемой продукции при правильной организации производства и хранения существенно перекрывает затраты на заготовку, транспортировку и переработку этого сырья.

#### *Доставка заготавливаемой древесины к модулю и береговому складу*

В настоящее время в освоенных районах древесное сырье заготавливают, как правило, на значительном расстоянии от мест его переработки. Доставка сырья связана с большими транспортными расходами, стоимость железнодорожных перевозок продолжает увеличиваться, поэтому поставки круглых сортиментов по железной дороге становятся убыточными. В рассматриваемом случае при доставке древесины по рекам и их притокам транспортная составляющая себестоимости лесопroduкции уменьшается даже в низкорентабельных производствах.

Размещение и рассредоточение плавучих мини-предприятий по берегам рек, протекающих через лесные массивы ОТР, существенно сокращают транспортные расходы, однако даже в этом случае сложной проблемой остается ритмичная всесезонная доставка древесины из мест лесозаготовки к энерго модулю и береговому складу.

Большинство отдаленных регионов РФ отличаются наличием развитой сети рек (до 800 км на площади 1000 км<sup>2</sup>), в связи с чем максимальная протяженность сухопутного подвоза материалов к водным путям, вероятно, не превысит 20 ... 50 км.

В транспортном освоении разрабатываемого лесного массива главными предпосылками являются природно-производственные условия. В лесных массивах, где рельеф местности и грунты позволяют использовать традиционную лесовозную технику, вывозка древесины к модулю или береговому складу может осуществляться в летнее время по грунтовым, а в зимнее по снежно-ледяным дорогам без больших затрат на дорожное строительство. При разработке горных лесосек, в сложных условиях рельефа, в заболоченных лесных массивах с низкой несущей способностью грунтов

транспортировка древесины может осуществляться с помощью аэростатических летательных аппаратов [5]. Такие аппараты могут использоваться также для штабелевки и погрузки древесины в суда на береговых складах и выполнять другие операции, имея весьма низкие затраты топлива и энергии на перемещение груза.

Технологические схемы заготовки и трелевки древесины также во многом определяются природно-производственными условиями, характеристикой древостоев, применяемой лесозаготовительной техникой, экономической целесообразностью и экологической безопасностью. Одним из вариантов транспортного освоения лесосеки может быть сооружение временных свайных дорог, которые имеют ряд преимуществ, особенно при транспортировке длинномерных стволов древесины. Это малая зависимость от рельефа местности, что сокращает протяженность трассы и не нарушает сложившихся экосистем лесных массивов; низкая стоимость дороги за счет использования местного материала; уменьшение опасности распространения лесных пожаров благодаря расположению свайной дороги по просеке. Деревянные свайные дороги успешно применялись в России еще в XIX в. [2] для перевозки грузов по бездорожью, ныне, при наличии современных средств механизации, длительность и стоимость сооружения таких трасс для всевозможной вывозки леса могут быть существенно снижены.

Очевидно, что созданию мини-предприятий и проведению работ в ОТП должен предшествовать комплекс научно-исследовательских работ по решению ряда проблем: определению запасов, породного состава, возраста древостоев и других характеристик древесного сырья в предполагаемых районах лесозаготовок; разработке технических и технологических решений; обоснованию схем транспортного освоения лесосырьевых баз с учетом конечного пункта доставки продукции; экономическим, экологическим и другим вопросам.

#### *Технико-экономические оценки*

В качестве иллюстративного примера ниже оценены показатели типового, автономного энерготехнологического модуля, оборудование которого размещено на барже с размерами  $50 \times 8 \times 6$  м (табл. 1 и 2). С учетом заработной платы и других производственных затрат (+ 30 %) сумма составит 2,60 млн долл. Амортизация (12 лет) – 0,24 млн долл. (см. ниже). Общие расходы с учетом амортизации – 2,64 млн долл.

Общая сумма составляет 10,3 млн долл. Профицит (доход за вычетом общих расходов) – 7,5 млн долл. в год.

Спецификация основного оборудования типового модуля, лесозаготовительного оборудования и прочего, а также предварительная оценка его суммарной стоимости и амортизационных расходов приведены в табл. 3, из которой следует, что даже при действующей системе налогов создание системы мобильных предприятий безотходной комплексной переработки древесины, включая сооружение временных дорог, окупается в течение 2,0...2,5 лет.

Таблица 1

**Годовой расход материалов и энергоносителей**

Статья расходов	Единица измерения	Расход	Цена за единицу, тыс. долл.	Сумма, млн долл.
СКД	тыс. м <sup>3</sup>	85	20*	1,70
СНКД	«	15	10*	0,15
Дизельное топливо**	т	50	0,4	0,02
Прочие	–	–	–	0,13

\* Включая транспортные и другие расходы.

\*\* Аварийный резерв.

Таблица 2

**Товарная продукция**

Материалы, изделия	Единица измерения	Выход	Цена за единицу, тыс. долл.	Сумма, млн долл.
Продукция деревообработки	тыс. м <sup>3</sup>	60,0	120	7,20
Электродная масса	тыс. т	15,0	120*	1,80
Смола	«	5,5	200	1,10
Прочие органические и химические продукты	«	4,6	90	0,41

\* С учетом транспортных и других расходов.

Таблица 3

**Стоимость оборудования и амортизационные расходы**

Оборудование	Параметр	Сумма, млн долл.
Газовые мотор-генераторы	3500 кВт	0,53
Газогенераторы	2 т/ч	0,25
Пиролизные электрические печи	300 кВт	0,25
Корпус судна	–	1,00
Лесозаготовительное, лесообработывающее оборудование	–	0,30
Вспомогательное оборудование	–	0,21

Итого с учетом расходов на заводской монтаж (+15 %) – 2,92, амортизация (12 лет) – 0,24 млн долл. в год.

В заключение можно отметить, что радикальное повышение доходности освоения лесных ресурсов ОТР России определяется совокупным влиянием ряда известных, опробованных ранее решений.

1. Сокращение на 20 ... 30 % суммарных затрат на изготовление унифицированного комплекта (модуля) оборудования при крупносерийном производстве на специализированных предприятиях, монтаже агрегатов на судне и доставке полностью подготовленного к автономной эксплуатации

модуля водным транспортом в глубинные районы, чтобы исключить капитальное строительство.

2. Снижение (в 8–10 раз) отпускной цены на электроэнергию (по сравнению с фактическим тарифом дизельных энергоисточников ОТР) за счет газификации биотоплива древесных отходов от лесозаготовок и лесопиления и применения генераторного газа в качестве топлива двигателей внутреннего сгорания (ДВС), отличающихся высоким (до 42 %) КПД, компактностью, а также возможностью использования вторичных тепловых ресурсов двигателя для процесса сушки древесины, технологических операций и пр.

3. Улучшение технико-экономических показателей пиролиза отходов лесопиления в герметичных вакуумных электропечах с получением особо ценных материалов в виде электродной массы для алюминиевой промышленности, смолы и другой ценной продукции и квалифицированных изделий, что позволяет увеличить доход от реализации товарной продукции в 2,0–2,5 раза.

Помимо указанных технологических и организационных преимуществ предлагаемая концепция позволяет:

- пресечь незаконную торговлю лесом (ныне до 40 % [6]) путем создания уполномоченных государством крупных фирм, обладающих исключительным правом приема, транспортировки и экспорта продукции преимущественно судами-лесовозами типа река – море (лихтер), без перевалок и посредников;

- сформировать кооперированную систему форпостов, рассредоточенных по обширной территории речных бассейнов ОТР, снабженных, помимо автономного энерготехнологического оборудования, элементами современной инфраструктуры в виде пунктов связи, медобслуживания, охраны правопорядка, пожарной безопасности и пр., что обеспечивает радикальное ускорение темпа освоения труднодоступных регионов;

- существенно увеличить рынок труда в депрессивных регионах путем восстановления производства на многочисленных машиностроительных и судоремонтных заводах [1]. Предприятия отечественного судостроения от реализации концепции получают преимущества от закрепления и увеличения доли присутствия на внутреннем рынке, улучшение финансовых показателей, появление возможностей модернизации производства, улучшение социального положения работников, сохранение рабочих мест;

- привлечь к изготовлению и эксплуатации модулей частный бизнес с ограниченными финансовыми возможностями, имея в виду, что сумма стартовых вложений в единичный модуль составляет около 3 млн долл., или около 50 долл. на 1 м<sup>3</sup> древесины экспортного уровня качества при окупаемости инвестиций менее 2 лет;

- удовлетворить государственные интересы, увеличив налоговые поступления от роста объемов судостроительной продукции и дополнительной активности в сфере освоения и использования лесных ресурсов;

– увеличить экспортный потенциал, создать устойчивый рынок и улучшить внешнеторговый баланс страны за счет роста валютных доходов от экспорта дополнительной лесопродукции.

Предлагаемая концепция мобильных мини-предприятий допускает использование многовариантных решений в части структуры энергоблока. Так, определенные преимущества имеет применение группы компактных пиролизеров внешнего нагрева, позволяющих получать богатый (до 3000 ккал или  $12,57 \cdot 10^3$  кДж на  $1 \text{ м}^3$ ) газ для ДВС и исключить сооружение воздушного газогенератора, хотя при этом уменьшается выход древесного угля и других продуктов сухой перегонки. В зоне акваторий энергоблок может использоваться и для других целей: при прокладке линий электропередач, разрубке трасс дорог, прокладке трубопроводов через лесной массив, расчистке лесных площадей под строительство гидроузлов, как база для проведения геолого-разведочных работ и др.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Величко, В.М.* О стратегии развития энергетического машиностроения до 2010 г. [Текст] / В.М. Величко, Ю.Н. Воронков // Тяжелое машиностроение. – 2001. – № 7. – С. 1–9.
2. *Вертман, А.А.* Стратегия освоения необжитых районов. Экономика и математические методы [Текст] / А.А. Вертман, В.И. Данилов-Данильянц, А.А. Рывкин // МАН СССР. – 1982. – Вып. 21, т. 5. – С. 890–905.
3. *Козловский, Е.А.* Минерально-сырьевые проблемы национальной безопасности [Текст] / Е.А. Козловский, М.И. Шадов. – М.: МГГУ, 1997. – 209 с.
4. *Лейканд, М.С.* Особенности конструкции вакуумных электропечей сопротивления – вакуумная металлургия [Текст] / М.С. Лейканд. – М.: Металлургия, 1962.
5. *Миронов, Б.П.* Аэростатический грузовоз для труднодоступных районов Сибири и Севера [Текст] / Б.П. Миронов, В.А. Грехов. – Новосибирск: СО АН СССР, ИТФ, 1986. – 20 с.
6. Русский курьер, 2004, янв.
7. *Сиваков, Д.* Судьба русской стали [Текст] / Д. Сиваков // Эксперт. – М., 2003. – № 36. – С. 24–30.
8. Сталь на рубеже столетий: сб. статей / под ред. Ю.С. Карабасова. – М.: МИСИС, 2001. – 664 с.
9. *Троицкий, И.А.* Металлургия алюминия [Текст] / И.А. Троицкий, В.А. Железнов. – М.: Металлургия, 1977.
10. *Шадов, М.И.* Природный потенциал ископаемых углей [Текст] / М.И. Шадов [и др.]. – М.: Недра, 2000. Ч. 1 и 2. – 422 с.

Институт высоких температур РАН

ОАО ЦНИИМЭ

Архангельский государственный  
технический университет

Московский государственный  
горный университет

Поступила 17.01.06

---

*A.A. Vertman, Yu.I. Provotorov, V.I. Melekhov, V.Zh. Arens*

**To Choosing Strategy of Remote Regions' Development in Russia**

The questions of developing remote and difficult – of – access regions with concentration of main resources of fuel-and-mineral raw material are considered. The concept of complex use of resources is suggested.

---

УДК 630\*652

***Е.С. Романов, И.В. Лаврова***

Романов Евгений Самуилович родился в 1929 г., окончил в 1952 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор экономических наук, профессор кафедры экономики отраслей Архангельского государственного технического университета, действительный член РАЕН. Имеет более 160 печатных научных работ в области изучения экономической эффективности, инвестиций, производственных мощностей в лесозаготовительной промышленности.



Лаврова Инна Владимировна родилась в 1974 г., окончила в 1996 г. Архангельский государственный технический университет, ассистент кафедры экономики отраслей АГТУ. Имеет 10 научных работ по проблемам экономической эффективности в лесозаготовительной и деревообрабатывающей промышленности.



## **СТРУКТУРИЗАЦИЯ ПОНЯТИЯ ДОСТУПНОСТИ ЛЕСНЫХ РЕСУРСОВ\***

Показано, что понятие доступности шире общетеоретической «ограниченности ресурсов». Выделены семь проявлений доступности.

*Ключевые слова:* лесные ресурсы, экономическая доступность, ограничения, экология, истощенность, лесосплав.

В настоящее время термин «доступность» широко используется в разных сферах деятельности. Говорят, например, о доступности и качестве образования, социальных услуг, коммерческой доступности жилья и т. д., хотя речь часто идет об их недоступности в данный момент и необходимости решения проблем.

Термин «экономически доступные лесные ресурсы» впервые был использован в трудах ученых ЛТА Т. С. Лобовикова, А. П. Петрова и др. в 1963 г. и позднее применительно к ресурсам низкосортной древесины и древесных отходов [5]. В дальнейшем в советской экономике речь пошла в основном о недоступности огромных лесных ресурсов (запасов) Сибири и Европейского Севера из-за неразвитости там транспортной инфраструктуры. Одним из итогов той дискуссии стало решение о строительстве БАМа.

К настоящему времени непосредственно проблеме экономической доступности лесных ресурсов посвящен ряд работ [7, 10, 13, 14], однако при ближайшем ознакомлении с ними выясняется, что многие вопросы не только не решены, но и не поставлены должным образом.

Так, в свое время в работах советских экономистов достаточно серьезно рассматривался вопрос об экологических ограничениях; появился даже

---

\* Работа выполнена по гранту РГНФ № 06-02-48203 а/с.

термин «эколого-экономическая доступность лесных ресурсов» [12, 13], но это направление не получило развития.

Самая главная и острая проблема лесопромышленного комплекса – неразвитая инфраструктура в регионах – заставила выделить отдельный термин «транспортная доступность ресурсов» [11, 13], который сразу приобрел широкую популярность. Вопросу о крайнем дефиците средств на строительство лесовозных (технологических) дорог удалось придать государственное значение: в принципе решено, что государство будет участвовать в этом процессе. Но будет ли объем инвестиций достаточен для широкомасштабного строительства? Придется отбирать наиболее актуальные потребности. При участии государства нельзя ограничиваться одним таким критерием, как просто прибыль от лесозаготовок.

Характерно, что большинство авторов [3–5, 7–9, 11, 13] оперируют категорией «рента», но вкладывают в нее разный смысл, в основном рассматривая дифференциальную ренту по условиям лесозаготовки. Получается, что доступность такого многогранного ресурса, как лес, сводится к маркам трелевочных машин. Есть работы [8], из которых следует, что с использованием бензопилы и чокерного трелевочного трактора ресурс доступен, а с валочно-пакетирующим комплексом недоступен. Очевидное для всех занижение лесных такс в РФ по сравнению с другими странами и огромные потери ренты для бюджета страны все еще остаются без внимания. Пора бы лесозаготовителям основательно разобраться с категорией ренты.

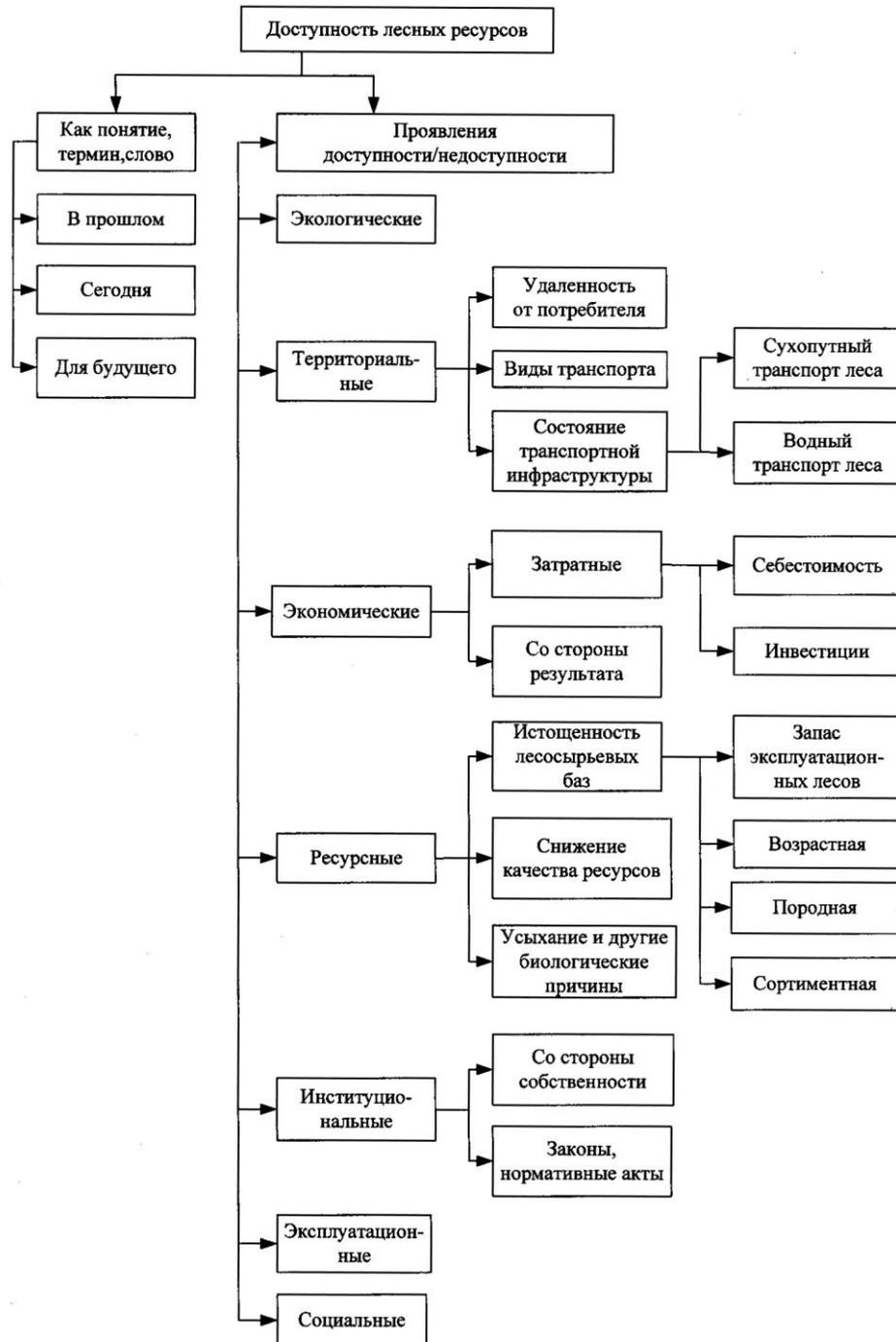
Пока же понятие экономически доступных лесов постепенно приобрело совсем иной смысл. Это уже не леса, освоение которых нецелесообразно по народнохозяйственным соображениям по широкому кругу показателей, а попросту «нерентабельные» участки леса, не приносящие или не сулящие прибыли лесопользователю, участки, не привлекательные для бизнеса [1, 10, 14]. Лес, не задумываясь, именуют недоступным с позиций примитивного барыша частника.

Во всех западных трактовках экономики (Economics и др.), начиная с П. Самуэльсона, подчеркивается ограниченность ресурсов. Так, Ю.А. Львов писал: «Ограниченность ресурсов, следовательно, и производимых для потребления продуктов имеет для экономики фундаментальное значение; это ограниченность экономическая. Физически в окружающем мире – в недрах земли, в мировом океане и, тем более, в космосе – имеется безграничное количество ресурсов. Но уровень наших научных знаний, степень развития техники и технологии, наша производительность таковы, что в каждый отдельный момент мы имеем реальный доступ только к ограниченному количеству ресурсов и вынуждены производить ограниченное количество полезных продуктов, намного меньше, чем это диктовалось бы практически безграничными желаниями людей... В рыночной экономике ограниченность ресурсов проявляется в ограниченности финансовых средств отдельных производителей и потребителей, а согласование возможностей и потребностей осуществляется ценовым механизмом, обеспечивающим равновесие платежеспособного спроса и предложения» [6].

Изучаемая нами доступность сродни ограниченности ресурсов и поэтому не столь нова. Однако видны и различия. Во-первых, очевидно, что доступность лесных ресурсов – категория далеко не только экономическая. Это обусловлено, прежде всего, тем, что лесные ресурсы – природные, связаны с землей и, следовательно, с вопросами собственности, аренды, ренты и т. д., которые являются экономическими по содержанию, но также институциональными, юридическими по форме. Другая сторона – возобновляемость лесных ресурсов; здесь возникают свои ограничения, не просто экономические, денежные, но и биологические. Лесные ресурсы – достояние территории, на которой они растут, и их использование и (или) сохранение имеют большое социальное значение для местного населения. Не углубляясь в другие проявления, можно говорить о разделении факторов доступности (недоступности) на коммерческие и некоммерческие, при этом коммерческие и экономические, конечно, не одно и то же. Те проявления недоступности, о которых в последние два-три года много говорят и пишут, можно без оговорок назвать коммерческими. Экономическая же сторона доступности (недоступности) не раскрыта полностью даже в диссертациях, не говоря о досуговых газетных выступлениях.

Сложность и многогранность понятия «доступность лесных ресурсов» (ДЛР) требуют его структурирования. На рисунке дана наша предварительная структура понятия ДЛР. Оставим пока в стороне соображения о возможности подобрать другое слово вместо «доступности». Пока придется смириться и с оговорками, является ли тот или иной фактор проявлением доступности или недоступности. Отмеченное выше родство понятий доступности и ограниченности отметим как единство противоположностей.

Приведенные на рисунке семь видов проявлений можно считать гипотетическими, требующими всестороннего обсуждения. Не следует придавать значения очередности проявлений на схеме: мы не считаем первые более значимыми, а сам порядок, последовательность – это не убывание значимости. Диалектическую взаимозависимость, взаимопроникновение этих форм проявлений мы считаем само собой разумеющимися как в действительности, так и в ходе исследования. Эксплуатационные и социальные ограничения пока не расшифрованы, поскольку, с одной стороны, они очевидны, а с другой – многочисленны, и степень их конкретного влияния всегда различна.



Структура понятия доступности лесных ресурсов

В конкретных условиях ограниченная доступность и даже полная недоступность лесных ресурсов всегда будут выступать в виде некоторого набора, комбинации разных проявлений. Какие-то из них можно считать доминирующими, другие второстепенными, сопутствующими. Соответственно и решения о том, как преодолевать ограничения, расширять доступность, будут не только разными, но и разномасштабными.

Пока на поверхности видны транспортные, экономические, ресурсные ограничения. В Архангельской области весьма значительные лесные массивы стали недоступными одновременно, субъективно – в связи с постановлением о запрете молевого сплава. Выход здесь зависит от разработки новых технологий лесосплава и их востребованности бизнесом. Слабость регионального бизнеса искусственно делает недоступными многие массивы, которые можно вовлечь в эксплуатацию, развивая плотовой сплав. Появление более состоятельных инвесторов может сразу раздвинуть границы доступности. На схеме это отражено в виде затратного направления экономических проявлений. Сюда примыкает вопрос о частно-государственном строительстве лесовозных дорог, но он относится и к направлению «сухопутный транспорт». Усыхание лесных массивов междуречья р. Сев. Двины и Пинеги – явление сразу ресурсное, территориальное, экологическое и связанное с необходимостью срочно найти инвестиции; тут возникнут и институциональные аспекты (аренда, концессия).

Весьма своеобразен вопрос о доступности ресурсов пиловочного сырья. В лесах Архангельской области их достаточно, но уже явно обозначился дефицит поставок. На рисунке этот фактор спроса подразумевается в позиции «со стороны результата». Под результатом понимается готовая конечная продукция лесопереработки; от ее ассортимента зависит спрос на пиловочник по породам, диаметрам, длинам, отсюда встает вопрос о дифференциации цен на сырье и т. д.

Выше затронута лишь часть вопросов, влияющих на доступность (недоступность) лесных ресурсов. Однако видно много ограничений, они появляются вновь, но могут быть и ослаблены, сняты. Решения, несомненно, должны носить системный характер. Ряд проявлений, отраженных на рисунке, уже изучается нами, но говорить о полной ясности пока рано. Несомненно, что структуризация понятия может и должна предшествовать количественным оценкам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блам, Ю.Ш. Моделирование лесопромышленного производства и методические вопросы экономической оценки лесных ресурсов [Текст]: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Ю.Ш. Блам. – Новосибирск, 1973. – 20 с.
2. Болотов, О.В. Методологический подход к определению экологической доступности лесных ресурсов [Электронный ресурс] / О.В. Болотов, А. П. Мохирев, Е. В. Горяева. – 2004. – <http://science-bsea.narod.ru>.

3. *Гильванов, В.Ш.* Экономическая оценка лесных ресурсов района (на примере Республики Башкортостан) [Текст]: автореф. дис. ... канд. экон. наук: 08.00.04 / В.Ш. Гильванов. – Уфа, 1997. – 21 с.
4. *Каракчиев, А.А.* Экономические основы формирования и реализации лесной политики в Республике Коми [Текст] / А.А. Каракчиев. – Сыктывкар: СЛИ, 2000. – 274 с.
5. *Лобовиков, Т.С.* Определение экономической доступности ресурсов низкосортной древесины и древесных отходов лесозаготовок [Текст] / Т.С. Лобовиков, А.П. Петров, В.Е. Леванов, Е.Д. Жило // Науч. тр. ЛГА. – 1968. – № 116. – 99 с.
6. *Львов, Ю.А.* Основы экономики и организации бизнеса [Текст] / Ю.А. Львов. – СПб.: ГПМ «Формика», 1992. – 383 с.
7. Методика экономической оценки лесных ресурсов и лесных земель, доступности древесных ресурсов и формирование квоты за ресурсы: методич. рекомендации [Текст] / Н.П. Чупров; – М-во природных ресурсов РФ; Сев. науч.-исслед. ин-т лесн. хоз-ва. – Архангельск, 2003. – 45 с.
8. *Моисеева, Е. Е.* Формирование механизма оценки экономической доступности лесных ресурсов при аренде участков лесного фонда: на примере Красноярского края [Текст]: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / Е.Е. Моисеева. – М.: РГБ, 2003. – 159 с.
9. *Мохирев, А.П.* Анализ рентообразующих факторов лесозаготовок [Электронный ресурс] / А.П. Мохирев. – 2005. – <http://science-forum.vis.ru>.
10. *Мохирев, А. П.* Методика определения экономической доступности лесных ресурсов [Электронный ресурс] / А.П. Мохирев. – 2005. – <http://science-forum.vis.ru>.
11. *Петров, А.П.* Экономическая оценка лесных ресурсов в условиях их аренды (лицензирования) [Текст] / А.П. Петров // Лесн. хоз-во. – 1993. – № 4. – С. 12–15.
12. *Петров, А.П.* Экономические аспекты использования лесных ресурсов в системе мероприятий по охране и защите окружающей среды: обзор [Текст] / А.П. Петров, Ю.Ю. Тупыця. – М.: ВНИПИЭИлеспром, 1976. – 50 с.
13. *Пфаненштиль, И.В.* Принципы определения эколого-экономической доступности ресурсов Красноярского края [Текст]: автореф. дис. ... канд. с-х. наук: 06.03.02 / И. В. Пфаненштиль. – Красноярск, 2002. – 22 с.
14. *Соколов, В.А.* Экономическая доступность лесных ресурсов [Текст] / В.А. Соколов, Л.С. Морева, О.А. Шараева // Лесн. журн. – 1994. – № 4. – С. 14. – (Изв. высш. учеб. заведений).

Архангельский государственный  
технический университет

Поступила 13.01.06

*E.S. Romanov, I.V. Lavrova*

### **Structuring of Concept for Accessibility of Forest Resources**

The concept of accessibility is shown to be wider than general theoretic «limitation of resources». Seven manifestations of accessibility are marked out.



## КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ УЧЕБНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 681.31

***В.И. Малыгин, Л.В. Кремлева, К.Л. Шестаков***

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 Севмашвуза – филиала СПбГМТУ. Имеет более 100 научных работ в области математического моделирования физических процессов при резании.



### **ПРОЕКТНЫЕ РЕШЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ДЕРЕВООБРАБОТКИ**

Приведена методика оптимизации параметров технологического процесса деревообработки на стадии его проектирования с помощью использования искусственных нейронных сетей.

*Ключевые слова:* деревообработка, технологическое проектирование, математическая модель, нейронная сеть, оптимизация, анализ и синтез

В связи с возрастающим объемом использования при деревообработке, прежде всего в мебельном производстве, программно-управляемых станков, обладающих широким диапазоном выбора частоты вращения шпинделя (скорость резания) и скорости подачи, актуальным становится вопрос оптимизации параметров механической обработки древесины на стадии проектирования технологического процесса.

Цель статьи – разработать методику оптимизации параметров механической обработки древесины на стадии проектирования технологического процесса путем использования искусственных нейронных сетей.

Сущность проектирования заключается в принятии решений, обеспечивающих выполнение будущим объектом предъявляемых к нему требований. Синтез проектных решений, который строится обычно на анализе создаваемой системы, – основа проектирования. Анализ позволяет получить необходимую информацию для целенаправленного выполнения процедур синтеза в итерационном процессе проектирования. Поэтому синтез и анализ неразрывно связаны. Известно, что существует ряд подходов для обобщенного описания задач принятия решений (ЗПР). Задачу формулируют следующим образом [1]:

$$\text{ЗПР} = \langle A, K, \text{Мод}, P \rangle ,$$

где  $A$  – множество альтернатив проектного решения (входные параметры);  
 $K = (K_1, K_2, K_3, \dots K_n)$  – множество критериев (выходные параметры), по которым оценивают соответствие альтернативы поставленным целям;  
 $\text{Мод} = (A \rightarrow K)$  – модель, позволяющая для каждой альтернативы рассчитать вектор критериев;  
 $\Pi$  – решающее правило для выбора наиболее подходящей альтернативы в многокритериальной ситуации.

Каждой альтернативе можно поставить в соответствие значения упорядоченного множества (набор) атрибутов:  $X = \langle X_1, X_2, \dots X_n \rangle$ . При этом  $X_i$  может иметь нечисловой характер. Присущие проектным задачам неопределенность и нечеткость исходных данных часто приводят к неопределенности математических моделей в силу недостаточной изученности процессов и их взаимосвязей в исследуемой среде. В наибольшей мере это относится к области технологического проектирования.

Обычно для получения параметрических моделей при проектировании операций технологических процессов используют методы идентификации и аппроксимации экспериментальных данных, т. е. феноменологические модели, сформированные методами планирования эксперимента. Для построения математических моделей применяют различные методы. На рис. 1 представлены области эффективного использования современных методов моделирования.

В настоящее время популярным становится подход, основанный на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС), т. е. систем, которые способны сами анализировать имеющуюся и вновь поступающую информацию, находить в ней закономерности, производить прогнозирование и

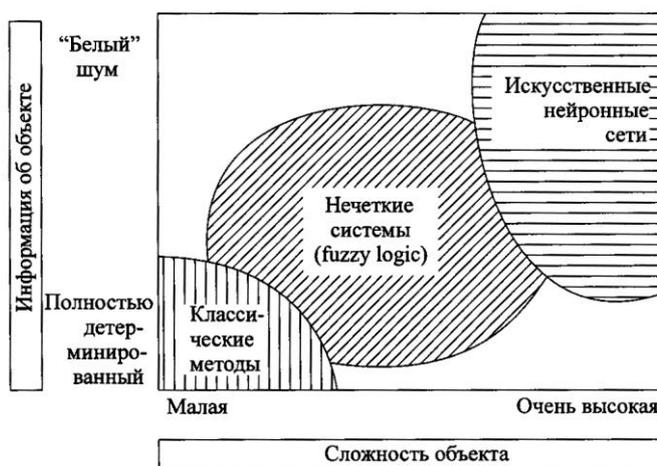
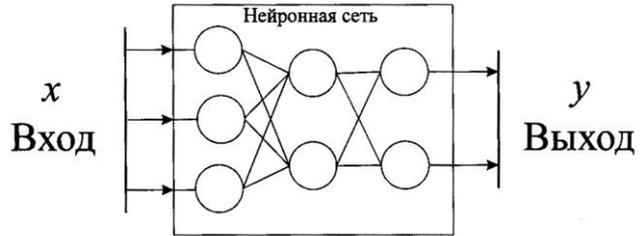


Рис. 1. Области наиболее эффективного применения методов моделирования

Рис. 2. Принцип использования ИНС в качестве модели



выдавать неизвестные параметры, в том числе, и в условиях недостаточности или нечеткости исходных или выходных данных. Нейронные сети – обучаемые системы, имитирующие деятельность человеческого мозга. Фактически нейронная сеть представляет собой «черный ящик» с N входами и M выходами (рис. 2).

Несмотря на большое разнообразие, нейронные сети имеют общие черты. Так, все они состоят из большого числа однотипных элементов – нейронов. Каждый нейрон характеризуется своим текущим состоянием по аналогии с нервными клетками головного мозга, которые могут быть возбуждены или заторможены. Он обладает группой синапсов – однонаправленных входных связей, соединенных с выходами других нейронов, а также имеет аксон – выходную связь данного нейрона, с которой сигнал (возбуждение или торможение) поступает на синапсы следующих нейронов. На рис. 3 показана схема нейрона.

Каждый синапс характеризуется величиной синаптической связи, или ее весом  $W_i$ , который по физическому смыслу эквивалентен электрической проводимости. Текущее состояние нейрона определяют как взвешенную сумму его входов:

$$NET = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i .$$

Выход нейрона есть функция его состояния:

$$OUT = F(NET) .$$

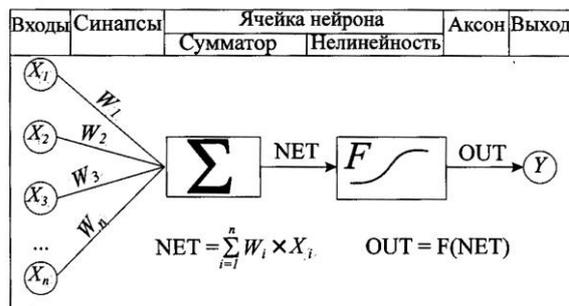


Рис. 3. Схема искусственного нейрона

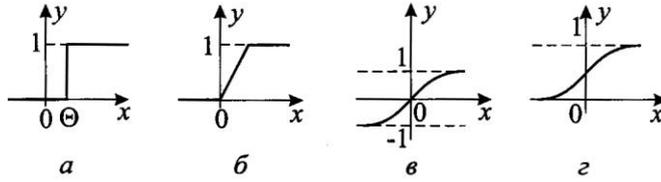


Рис. 4. Типы активационных функций: *a* – единичного скачка; *б* – линейный порог (гистерезис); *в* – гиперболический тангенс; *г* – сигмоид

Нелинейную функцию  $F$  называют активационной, и она может иметь различный вид (рис. 4):

а) единичного скачка 
$$OUT = \begin{cases} 0, NET < \Theta \\ 1, NET \geq \Theta \end{cases};$$

б) линейный порог (гистерезис)

$$OUT = \begin{cases} 0, NET \leq \Theta \\ \frac{NET - \Theta}{\Delta}; & \Theta \leq NET \leq \Theta + \Delta \\ 1, NET \geq \Theta + \Delta \end{cases}$$

в) гиперболический тангенс 
$$OUT = th(NET) = \frac{e^{NET} - e^{-NET}}{e^{NET} + e^{-NET}};$$

г) сигмоид 
$$OUT = \frac{1}{1 + e^{-NET}}.$$

Нейроны в ИНС объединены в слои, которые связаны друг с другом посредством синаптических связей. Если каждый нейрон предыдущего слоя связан со всеми нейронами последующего слоя, то нейронную сеть называют полносвязной (рис. 5).

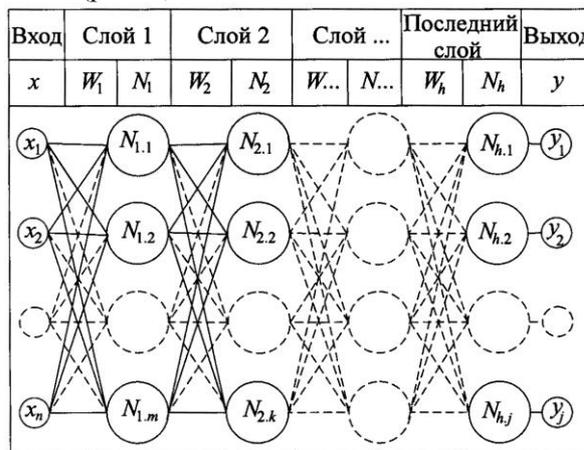


Рис. 5. Схема полносвязной многослойной искусственной нейронной сети (многослойный перцептрон)

В настоящее время существует множество алгоритмов обучения ИНС. В данной работе была реализована схема нейронной сети (НС) обратного распространения, алгоритм обучения которой предполагает распространение ошибки от выходного слоя к входному, т. е. в направлении, противоположном направлению распространения сигнала при нормальном функционировании сети. Нейронная сеть обратного распространения состоит из нескольких слоев нейронов, причем каждый нейрон слоя  $i$  связан с каждым нейроном слоя  $i + 1$ , т. е. речь идет о полносвязной НС.

В общем случае задача обучения НС сводится к нахождению некой функциональной зависимости  $Y = F(X)$  (фактически определению весов), где  $X$  – входной, а  $Y$  – выходной векторы на основе некоторых известных данных экспериментального, расчетного или иного характера. Таким образом в результате обучения система приобретает некоторый «опыт». В общем случае такая задача при ограниченном наборе входных данных имеет бесконечное множество решений. Для ограничения пространства при обучении ставят задачу минимизации целевой функции ошибки НС, которую находят по методу наименьших квадратов:

$$E(W) = \frac{1}{2} \sum_{jp} (OUT_{jp}^{(N)} - D_{jp})^2, \quad (1)$$

где  $OUT_{jp}^{(N)}$  – реальное выходное состояние нейрона  $j$  выходного слоя  $N$  при подаче на входы НС  $p$ -го образа;

$D_{jp}$  – идеальное (желаемое) состояние этого нейрона.

Рассмотрим полный алгоритм обучения нейросети, блок-схема которого представлена на рис. 6.

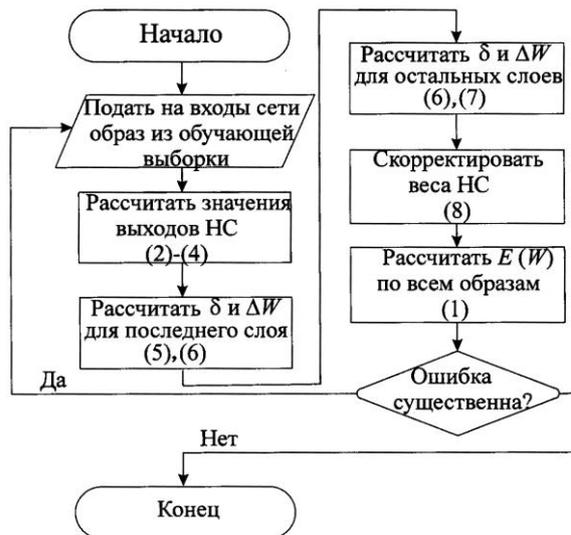


Рис. 6. Блок-схема алгоритма обратного распространения

1. Подать на входы сети один из возможных образов, рассчитать значения выходов согласно (2)–(4):

$$\text{NET}_j^{(n)} = \sum_{i=1}^M W_{ij}^{(n)} \times \text{OUT}_i^{(n-1)}, \quad (2)$$

где  $M$  – число нейронов в слое  $n - 1$ ;

$\text{OUT}_i^{(n-1)} = X_{ij}^{(n)}$  –  $i$ -й вход нейрона  $j$  слоя  $n$ ;

$$\text{OUT}_j^{(n)} = F(\text{NET}_j^{(n)}), \quad (3)$$

где  $F$  – активационная функция;

$$\text{OUT}_q^{(0)} = X_q, \quad (4)$$

где  $X_q$  –  $q$ -ая компонента вектора входного образа.

2. Рассчитать  $\delta^{(N)}$  и  $\Delta W^{(N)}$  для выходного слоя по (5), (6):

$$\delta_l^{(N)} = (\text{OUT}_l^{(N)} - D_l) \frac{d\text{OUT}_l}{d\text{NET}_l}; \quad (5)$$

$$\Delta W_{i,j}^{(n)} = -\eta(\mu \Delta W_{i,j}^{(n)}(t-1) + (1-\mu)\delta_j^{(n)} \text{OUT}_i^{(n-1)}), \quad (6)$$

где  $\eta$  – коэффициент скорости обучения,  $0 < \eta < 1$ ;

$\mu$  – коэффициент инерционности;

$t$  – номер текущей операции.

3. Рассчитать  $\delta^{(n)}$  и  $\Delta W^{(n)}$  для всех остальных слоев:

$$\delta_j^{(n)} = \left[ \sum_k \delta_k^{(n+1)} W_{jk}^{(n+1)} \right] \frac{d\text{OUT}_j}{d\text{NET}_j}. \quad (7)$$

4. Скорректировать веса ИНС:

$$W_{ij}^{(n)}(t) = \Delta W_{ij}^{(n)}(t) + W_{ij}^{(n)}(t-1). \quad (8)$$

5. Если ошибка существенна, то перейти на шаг 1. На этапе 1 сети поочередно, в случайном порядке, предъявляют вектора из обучающей последовательности.

В качестве тестового примера была построена и проанализирована модель износа ножа фрезы при обработке древесины различных пород. Использовались данные, приведенные в работе [3], где для прогнозирования стойкости инструмента применяли методы теории подобия. На основе опытных данных были выведены эмпирические зависимости интенсивности износа лезвия в зависимости от различных параметров обработки. Перечень и размерности параметров прогнозирующей системы, использованной в работе [2], приведены в табл. 1. В результате были получены следующие уравнения:

Таблица 1

## Перечень и размерности параметров прогнозирующей системы

Параметр	Обозначение	Размерность в системе СИ
Прогнозируемые параметры		
Интенсивность изнашивания лезвия:		
по биссектрисе угла заострения	$I_A$	1
по передней поверхности	$I_{II}$	1
по задней поверхности	$I_3$	1
Прогнозирующие параметры, характеризующие лезвие		
Твердость	$HV$	$L^{-1}MT^{-2}$
Теплопроводность	$\lambda$	$LMT^{-3}\theta^{-1}$
Объемная теплоемкость	$c\rho_1$	$L^{-1}MT^{-2}\theta^{-1}$
Прогнозирующие параметры, характеризующие обрабатываемый материал		
Плотность	$\rho_2$	$ML^{-3}$
Кислотное число	pH	1
Прогнозирующие параметры, характеризующие износ лезвия		
Средняя толщина срезаемого слоя	$a_{cp}$	L
Длина срезаемого слоя	$l$	L
Скорость резания	$v_r$	$LT^{-1}$

$$I_A = 5,52 \cdot 10^{-6} \left( \frac{\lambda}{c\rho_1 a_{cp}} \sqrt{\frac{\rho_2}{HV}} \right)^{0,527} \left( \frac{\lambda}{c\rho_1 v_r l pH} \right)^{0,238};$$

$$I_{II} = 5,66 \cdot 10^{-10} \left( \frac{\lambda}{c\rho_1 a_{cp}} \sqrt{\frac{\rho_2}{HV}} \right)^{0,1} \left( \frac{\lambda}{c\rho_1 v_r l pH} \right)^{-0,21};$$

$$I_3 = 8,15 \cdot 10^{-9} \left( \frac{\lambda}{c\rho_1 a_{cp}} \sqrt{\frac{\rho_2}{HV}} \right)^{0,151} \left( \frac{\lambda}{c\rho_1 v_r l pH} \right)^{-0,0072}.$$

На основе опытных данных была построена обучающая выборка и обучена ИНС, топология которой представлена на рис. 7. Обучение проводили в пределах 10 тыс. итераций (шагов алгоритма). После обучения системы на вход подавали различные значения прогнозирующих параметров, а на выходе определяли прогнозируемые.

Экспериментальные данные сопоставляли с рассчитанными по эмпирическим зависимостям и с полученными в результате моделирования при помощи аппарата ИНС. Результаты сопоставления представлены в табл. 2. На основании сравнения результатов можно сделать вывод о достаточной точности прогноза ИНС.

Рис. 7. Топология искусственной нейронной сети, использованной для численного эксперимента ( $a_{kv} = \lambda/c\rho_1$ , остальные обозначения см. в табл. 1)

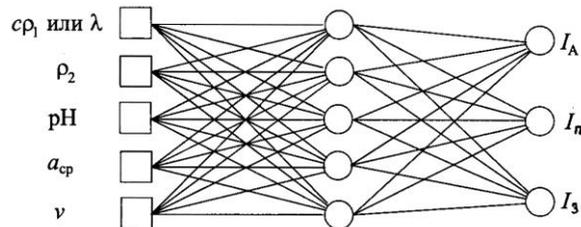


Таблица 2

**Сопоставление экспериментальных данных с данными, полученными по эмпирическим зависимостям (ЭЗ) и рассчитанными с применением ИНС**

Отношение теплопроводности лезвия к его объемной теплоемкости, м <sup>2</sup> /с	Плотность обрабатываемого материала, кг/м <sup>3</sup>	Кислое число	Средняя толщина срезаемого слоя, м	Скорость резания, м/с	Выходные данные (эксперимент, расчет по ЭЗ, расчет по ИНС)		
					$I_A$	$I_{II}$	$I_3$
5,40E-06	400	5,5	8,00E-05	46	6,240E-10	2,98E-09	1,57E-09
					6,50E-10	2,90E-09	3,40E-09
					6,98E-10	2,84E-09	1,70E-09
5,40E-06	400	5,5	1,60E-04	46	4,92E-10	2,58E-09	1,74E-09
					4,50E-10	3,20E-09	3,50E-09
					4,80E-10	2,55E-09	1,66E-09
5,40E-06	400	5,5	8,00E-05	23	8,28E-10	2,71E-09	2,04E-09
					7,60E-10	2,70E-09	3,80E-09
					7,77E-10	2,89E-09	1,79E-09
5,40E-06	400	5,5	1,60E-04	23	5,32E-10	2,62E-09	1,59E-09
					5,30E-10	2,80E-09	3,90E-09
					5,49E-10	2,58E-09	1,73E-09
5,40E-06	700	4	8,00E-05	46	8,40E-10	3,22E-09	1,60E-09
					8,10E-10	2,90E-09	3,80E-09
					8,61E-10	3,06E-09	1,72E-09
5,40E-06	500	7,5	8,00E-05	46	5,08E-10	5,08E-10	5,08E-10
					6,40E-10	2,80E-09	3,40E-09
					4,60E-10	6,28E-10	4,46E-10
7,30E-06	400	5,5	8,00E-05	46	7,44E-10	5,69E-09	2,74E-09
					8,10E-10	3,00E-09	3,40E-09
					1,63E-09	6,70E-09	4,40E-09
7,30E-06	400	5,5	8,00E-05	46	2,53E-09	7,54E-09	6,10E-09
					9,10E-10	3,90E-09	3,40E-09
					1,63E-09	6,70E-09	4,41E-09

В заключении следует отметить, что подход, основанный на использовании нейронных сетей, дает возможность в качестве целевых полей (выходов) определять и входы системы или несколько входов и (или) выходов, что в случае недостаточности информации о входных или выходных данных позволяет количественно прогнозировать неизвестные параметры, поскольку обученная сеть содержит сведения о взаимном влиянии всех входов на все выходы. Немаловажным аспектом также является тот факт, что векторы входных и выходных сигналов могут содержать компоненты, выраженные в виде логических функций или текстовой информации, отражающие, в том числе, и некоторые субъективные оценки объекта исследования проектировщиком.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбань, А.Н. Нейроинформатика [Электронный ресурс] / А.Н. Горбань. – Загл. с экрана.
2. Заенцев, И.В. Нейронные сети: основные модели [Электронный ресурс] / И.В. Заенцев. – Загл. с экрана.
3. Зотов, Г.А. Повышение стойкости дереворежущего инструмента [Текст] / Г.А. Зотов, Е.А.Памфилов. – М.: Экология, 1991. – 304 с.

Севмашвугз

Поступила 15.12.04

*V.I. Malygin, L.V. Kremleva, K.L. Shestakov*

#### **Project Solutions of Woodworking Technology**

Technique for woodworking process optimization at its projecting phase by using artificial neural networks is given.



УДК 518.5

***В.В. Поляков***

Поляков Владимир Витальевич родился в 1951 г., окончил в 1973 году Петрозаводский государственный университет, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и кибернетики ПетрГУ. Имеет более 30 научных работ в области математического моделирования производственных систем и оперативного управления производством.



## **ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ**

Предложен новый подход к построению оптимизационных моделей производственных процессов, связанный с использованием интервальных переменных, что упрощает построение моделей и делает их формулировку доступной для производственного персонала.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, оптимизационные модели и методы, управление производством, балансовые задачи.

Повышения эффективности целлюлозно-бумажного производства (ЦБП) не всегда достигают за счет экстенсивных факторов или модернизации технологических процессов. Не менее важную роль играет принятие оптимальных управленческих решений, что требует использования оптимизационных моделей и методов [2, 4]. Хотя известно большое число моделей, ориентированных на управление ЦБП [1, 4], однако на практике их используют крайне редко.

Использование типовых моделей для решения реальных задач требует их адаптации к условиям применения. Конкретные условия решения многих типичных задач отличаются друг от друга множеством значимых деталей. В каждом случае модели имеют уникальную специфику, без учета которой их решение теряет смысл. При отсутствии достаточного опыта математического моделирования (что характерно для производственного персонала) сложно сформулировать новую или подкорректировать известную модель [6].

Возможный выход из создавшейся ситуации – выбор класса моделей, интуитивно понятных человеку и применению которого нетрудно обучить. Здесь представляется приемлемым использование линейных оптимизационных моделей. Их точность, согласно многим исследованиям [1, 2, 4], достаточна для большинства задач производственного характера. Параметры производственных систем невозможно поддерживать равными оптимальным значениям – они будут флуктуировать из-за влияния не учтенных при моделировании факторов. В задачах выпуклого программирования отклонение любого управляемого параметра от оптимального значения с вероятностью не менее 0,5 приводит к нежелательной ситуации, так как оптимальное решение всегда находится на границе области допустимых значений.

Отмеченную проблему можно решить за счет перехода к моделям, «поглощающим» неточности как моделирования, так и реализации решений. Автором рассмотрены задачи оптимизации с интервальными переменными, предполагающие возможность произвольного колебания значений управляемых параметров в заданных интервалах [6]. Решение такой задачи представляет собой многомерный параллелепипед, полностью «погруженный» в область допустимых значений, любая точка которого является допустимой, а координаты центра определяют значение целевой функции.

Задача оптимизации с интервальными переменными включает два непересекающихся подмножества переменных: подмножество  $N$  обычных (точечных) переменных  $x$  и подмножество  $K$  интервальных переменных  $z$ . Величины  $z'$  являются срединными значениями интервалов. В общем виде модель задачи с интервальными значениями переменных имеет целевую функцию

$$F(x, z') \rightarrow \text{extr} \quad (1)$$

и два множества ( $M$  и  $M'$ ) ограничений:

типа «равенство»

$$g_i(x) = b_i; \quad i \in M, \quad (2)$$

включающее только переменные  $x_j$  для  $j \in N$ ;

типа «неравенство»

$$g_i(x, z) \leq b_i; \quad i \in M', \quad (3)$$

которые должны выполняться для всех значений  $x_j$  ( $j \in N$ ), определяемых ограничениями (2), и любого набора значений переменных  $z_j$  ( $j \in K$ ), если каждое значение  $z_j$  попадает в интервал

$$z_j \in [z'_j(1 - \delta_j); \quad z'_j(1 + \delta_j)]; \quad j \in K,$$

где  $\delta_j$  – ширина интервалов, задаваемая как относительная величина.

Несомненным достоинством предлагаемого подхода является то, что в случае линейности соотношений вида (3) возникающая задача оптимизации не требует специальных методов решения, поскольку путем модификации легко приводится к задаче линейного программирования. Для этого каждое из ограничений (3) преобразуют следующим образом:

$$\sum_{j \in N} \alpha_{ji} x_j + \sum_{j \in K_i'} \alpha_{ji} z_j - \sum_{j \in K_i''} \alpha_{ji} z_j \leq b_i; \quad \forall i \in M'.$$

Здесь в каждом из ограничений подмножество интервальных переменных  $K$  разбивают на два:  $K_i'$  соответствуют неотрицательным коэффициентам  $\alpha_{ji}$ ,  $K_i''$  – отрицательным коэффициентам  $\alpha_{ji}$ . Теперь умножение коэффициентов при интервальных переменных, относящихся к множествам  $K_i'$  и  $K_i''$ , соответственно на величины  $(1 + \delta_j)$  и  $(1 - \delta_j)$ , даст соотношение

$$\sum_{j \in N} \alpha_{ji} x_j + \sum_{j \in K_i'} (1 + \delta_j) \alpha_{ji} z'_j - \sum_{j \in K_i''} (1 - \delta_j) \alpha_{ji} z'_j \leq b_i; \quad \forall i \in M'. \quad (4)$$

позволяющее при точечном характере переменных  $z'_j$  множества  $K$  построить интервальное решение на основе решения задачи линейного программирования.

Под указанный класс задач подпадают многие производственные задачи, прежде всего задачи координации функционирования элементов технологических систем, где первоочередным является выбор сбалансированного плана работы всех элементов системы [2, 5, 6], а критерии оптимальности отступают на второй план. В случае интервального решения, даже при невозможности точного поддержания выбранных значений управляемых параметров, получаем план, «устойчивый» к неизбежным колебаниям этих значений. Помимо обеспечения устойчивости решения, интервальный подход во многих случаях позволяет оставаться в рамках простых задач.

Рассмотрим в качестве примера, где целесообразно использование интервального подхода, задачу поиска сбалансированного плана работы технологической системы, состоящей из множества агрегатов, которые связаны между собой материальными потоками произвольной конфигурации, проходящими через промежуточные хранилища. Целью решения такой задачи является поиск значений производительности каждого из агрегатов, обеспечивающих в течение горизонта планирования сбалансированность всех материальных потоков. Балансовые задачи весьма актуальны для оперативного управления непрерывными производствами ЦБП [1, 2, 4, 5].

Для описания балансовой модели, основанной на линейных соотношениях, введем следующие обозначения:

$M$  – множество видов материальных продуктов, которыми агрегаты обмениваются друг с другом ( $i \in M$ );

$K$  – множество агрегатов ( $j \in K$ );

$T$  – длительность горизонта планирования;

$z_j$  – производительность агрегата  $j$  – неотрицательная переменная величина ( $j \in K$ ) (в дальнейшем это интервальные переменные:

$z_j'$  – срединное значение интервала возможных значений  $z_j$ ,

$\delta_j$  – предельно допустимое относительное отклонение производительности агрегата  $j$  от  $z_j'$ );

$\alpha_{ji}, \beta_{ji}$  – количество продукта  $i$ , вырабатываемого/потребляемого агрегатом  $j$  в расчете на единицу производительности (неотрицательные величины);

$V_i^0$  – запас продукта  $i$  в хранилище в начале горизонта планирования;

$V_i^{\min}, V_i^{\max}$  – минимально и максимально допустимые величины запаса продукта  $i$  в хранилище к концу горизонта планирования.

Простейшая статическая модель включает:

соотношения, связанные с ограничениями на конечный запас продукции в хранилищах:

$$V_i^{\min} \leq V_i^0 - \sum_{j \in K} \alpha_{ji} z_j T + \sum_{j \in K} \beta_{ji} z_j T \leq V_i^{\max}; \quad \forall i \in M; \quad (5)$$

целевую функцию (в общем случае), отображающую некоторый критерий оптимальности:

$$\sum_{j \in K} c_j z_j \rightarrow \max, \quad (6)$$

где  $c_j$  – весовые коэффициенты, определяющие ценность единичной производительности агрегата.

Дополнительно, кроме ограничений (5), могут потребоваться ограничения на величины производительностей агрегатов.

Однако при построении балансовой математической модели технологической системы обычно приходится учитывать ряд дополнительных факторов. Предположение об интервальном характере переменных, соответствующих производительностям агрегатов, позволяет отказаться от учета многих деталей и остаться в рамках статической модели.

Необходимость изменения производительностей агрегатов во времени обычно учитывают путем построения многопериодных моделей, разбивая весь горизонт планирования на отдельные отрезки времени и формируя следующие балансовые соотношения для каждого отрезка:

$$V_i^{\min} \leq V_i^t \leq V_i^{\max}; \quad \forall i \in M, t = 1, 2, \dots, \theta; \quad (7)$$

$$V_i^t = V_i^{t-1} + \sum_{j \in K} \alpha_{ji} z_j^t \tau^t - \sum_{j \in K} \beta_{ji} z_j^t \tau^t; \quad \forall i \in M, t = 1, 2, \dots, \theta. \quad (8)$$

Здесь  $V_i^t$  – запас продукции в  $i$ -м хранилище к концу  $t$ -го отрезка времени;

$\theta$  – количество отрезков, на которые разбивается горизонт планирования;

$\tau^t$  – длительность  $t$ -го отрезка.

Таким образом, в результате перехода к многопериодной модели размерность задачи возрастает по числу как переменных, так и ограничений как минимум в  $\theta$  раз. Соответственно, в случае задачи линейного программирования в  $\theta^3$  раз увеличивается вычислительная трудоемкость решения. Кроме того, что еще более значимо, существенно увеличивается сложность построения математической модели.

Интервальный подход позволяет остаться в рамках статической задачи, если предположить, что экстремальные значения производительности не выходят за границы установленных интервалов значений переменных – во многих случаях этого достаточно. Границы интервалов для производительностей можно задать следующим образом:

$$(1 - \delta_j)^{-1} z_j^0 \leq z_j \leq (1 + \delta_j)^{-1} z_j^t.$$

Здесь  $z_j^0$  – текущее значение производительности  $j$ -го агрегата;

$z_j^t$  – желаемое к концу периода планирования значение производительности (при условии, что  $z_j^0 \leq z_j^t$ , иначе границы  $z_j^0$  и  $z_j^t$  меняются местами).

Заметим, что теперь вид траекторий изменения производительностей агрегатов не имеет значения – в пределах ширины установленного интерва-

ла переменные в течение горизонта планирования могут изменяться произвольным образом, что предоставляет широкие возможности для управления.

Многорежимность работы агрегатов, связанная с различиями в потреблении ресурсов и промежуточных продуктов производства, требует выбора одного или нескольких из множества возможных режимов работы агрегата, что ведет к появлению в моделях логических переменных и новых ограничений: на реализацию режимов работы, на суммарную производительность агрегата в разных режимах, на предельно допустимое количество режимов, реализуемых в течение горизонта планирования. Таким образом, одновременно увеличивается размерность задачи, она усложняется, превращаясь в следующую задачу смешанного целочисленного линейного программирования:

$$V_i^{\min} \leq V_i^0 + \sum_{j \in K} \sum_{r \in R_j} \alpha_{ji}^r z_j^r T - \sum_{j \in K} \sum_{r \in R_j} \beta_{ji}^r z_j^r T \leq V_i^{\max}; \quad \forall i \in M;$$

$$z_j^r \leq D_j y_j^r; \quad \forall j \in K; r \in R_j;$$

$$\sum_{r \in R_j} z_j^r \leq D_j; \quad \forall j \in K; r \in R_j;$$

$$\sum_{r \in R_j} y_j^r \leq q_j; \quad \forall j \in K.$$

Здесь  $D_j$  – предельно допустимое значение производительности  $j$ -го агрегата;

$y_j^r$  – логические переменные, принимающие значение 1, если реализуется  $r$ -й режим  $j$ -го агрегата, и 0 – в противном случае;

$R_j$  – множество режимов работы  $j$ -го агрегата;

$z_j^r$  – производительность  $j$ -го агрегата в  $r$ -м режиме;

$q_j$  – предельно допустимое количество режимов работы  $j$ -го агрегата.

Учтем, что различие в режимах работы связано с различной выработкой и потреблением ресурсов. Выработка  $i$ -го продукта  $j$ -м агрегатом зависит от выбранного режима работы  $r$  и значения производительности  $z_j^r$ : она не может быть менее  $\min_{r \in R_j} (\alpha_{ji}^r) z_j^r T$  и более  $\max_{r \in R_j} (\alpha_{ji}^r) z_j^r T$ .

Но это условие адекватно предположению о том, что значение параметра  $\alpha_{ji}^r$  фиксировано, а варьирует значение  $z_j^r$ , т. е. значение переменной  $z_j^r$  имеет интервальный характер. Аналогичные рассуждения справедливы и для случая потребления продуктов. Поэтому различия между режимами можно трактовать как следствие изменений производительности агрегата и, в случае интервальности переменных, оставаться в рамках модели (5)–(6) с той лишь разницей, что точечные переменные  $z_j$  в соотношении (5) становятся интервальными, а в целевой функции (6) они заменяются на срединные значения  $z_j^!$ .

Таким образом, многообразие ситуаций можно учесть в рамках статической модели, причем использование интервального подхода позволяет найти решение, обеспечивающее сбалансированность технологической системы как при непланируемых отклонениях производительностей агрегатов

от расчетных величин, так и при произвольном изменении режимов работы агрегатов. Следовательно, интервальность решения дает возможность отказаться от более точных, но, одновременно, и более громоздких моделей.

Программный комплекс, реализующий описанный подход к решению задач координации работы технологического оборудования, в течение нескольких лет эксплуатировался на Архангельском ЦБК и продемонстрировал свою жизнеспособность. Как показал опыт, обучить производственный персонал, имеющий техническое образование, формулированию математических моделей технологических систем вида (5)–(6) – посильная задача.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированные системы оперативно-диспетчерского управления предприятиями целлюлозно-бумажной промышленности [Текст] / Под ред. И.Е. Вьюкова. – М.: Лесн. пром-сть, 1978. – 248 с.
2. Воронин, А.В. Математические модели и методы в планировании и управлении предприятием ЦБП [Текст] / А.В. Воронин, В.А. Кузнецов. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2000. – 256 с.
3. Духовин, Ю.И. Оптимальное планирование в лесной, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности [Текст] / Ю.И. Духовин, Ю.Г. Павлов, В.А. Марков. – М.: Лесн. пром-сть, 1984. – 295 с.
4. Ицкович, Э.Л. Оперативное управление непрерывным производством: задачи, модели, методы [Текст] / Э.Л. Ицкович, Л.Р. Соркин. – М.: Наука, 1988. – 160 с.
5. Питухин, Е.А. Исследование математической модели верхнего уровня при производстве целлюлозы [Текст] / Е.А. Питухин // Лесн. журн. – 2003. – № 5. – С. 129–137. – (Изв. высш. учеб. заведений).
6. Поляков, В.В. О возможности использования задач оптимизации с интервальными решениями в оперативно-диспетчерском управлении [Текст] / В.В. Поляков, Е.А. Корольков, Р.В. Воронов // Новые информационные технологии в ЦБП и энергетике: материалы VI Междунар. научно-технич. конф., г. Петрозаводск, 20–24 сент. 2004 г. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2004. – С. 81–84.

Петрозаводский государственный  
университет

Поступила 4.11.04

*V.V. Polyakov*

#### **Optimization of Pulp-and-paper Production Management**

New approach to building up the optimization models of manufacturing processes related to use of interval variables is offered; it eases the process of models construction and makes their formulation accessible for operational personnel.



УДК 624.011.1.072.32

**А.Я. Найчук**

Найчук Анатолий Яковлевич родился в 1953 г., окончил в 1979 г. Брестский инженерно-строительный институт, кандидат технических наук, директор филиала УП «Институт БелНИИС»–«Научно-технический центр», докторант ЦНИИпромзданий. Имеет более 40 печатных работ в области исследования деревянных конструкций.



### **О НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УЗЛОВ ДЕРЕВЯНЫХ КЛЕЕННЫХ ТРЕХШАРНИРНЫХ АРОК**

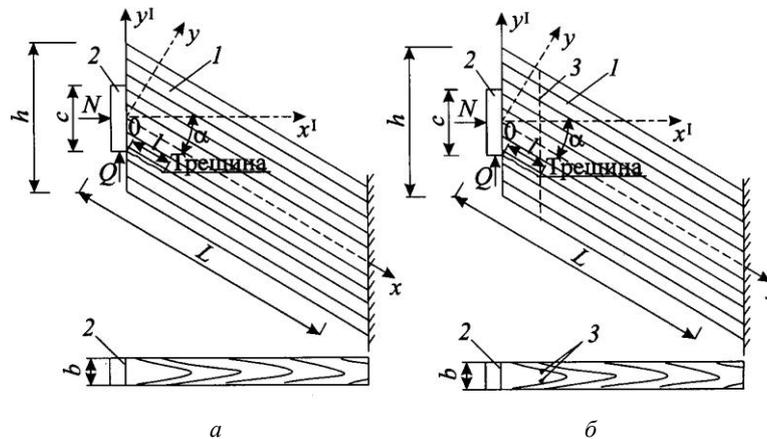
Разработана методика оценки прочности опорных и коньковых узлов деревянных трехшарнирных арок со сквозными трещинами и узлов, усиленных наклонно вклеенными стержнями.

Ключевые слова: стержень, вязкость разрушения, деревянная трехшарнирная арка, коэффициент интенсивности напряжений, прочность, трещина, разрушающая нагрузка.

Ранее [4, 6] было показано, что несущая способность узлов арок лимитируется не смятием древесины под плитой башмака, а уровнем концентрации напряжений в древесине, расположенной у его кромок. Конструктивными факторами, направленными на снижение концентрации напряжений и повышение несущей способности узлов арок, является устройство скосов ненагруженных торцовых участков и применение башмаков переменной изгибной жесткости [4–6]. Это не всегда возможно выполнить в эксплуатируемых конструкциях зданий и сооружений и, тем более, в узловых зонах с повреждениями в виде трещин. Наиболее перспективна, как при новом проектировании, так и при усилении опорных участков арок, установка вклеенных под углом к волокнам древесины металлических стержней периодического профиля. Вклеенные стержни должны препятствовать распространению трещин, т.е. несущая способность узлов должна определяться прочностью не только соединения на вклеенных стержнях, но и древесины на поперечный сдвиг и нормальный отрыв в вершине трещины. Таким образом, задача о несущей способности узлов арок с вклеенными стержнями должна решаться комплексно, исходя из прочности самого стержня, прочности соединения его с древесиной и прочности древесины в вершине трещины.

Для решения данной задачи нами проведены экспериментально-теоретические исследования узлов арок. Рассмотрено два варианта узлов: первый – для арок со сквозной трещиной длиной  $l$ , второй – для арок со сквозной трещиной, усиленных наклонно вклеенными металлическими стержнями. Целью данных исследований являлась оценка эффективности вклеенных стержней.

Теоретические исследования выполняли численным методом с использованием вычислительного программного комплекса STIZAR [3], позволяющего опре-



Общий вид расчетных схем узлов арок со сквозной трещиной (а) и со сквозной трещиной и арматурными стержнями (б): 1 – анизотропная полоса; 2 – штамп; 3 – арматурные стержни

делять напряженно-деформированное состояние и значения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН):  $K_I$  и  $K_{II}$  – в вершине трещины, а также экспериментальные (испытанием фрагментов узлов арок).

Расчетная схема узлов арок приведена на рисунке, где древесину моделировали анизотропной полосой 1, трещину – разрезом длиной  $l$ , вклеенные параллельно торцу полуарки металлические стержни – линейными конечными элементами, которые работают на растяжение-сжатие и изгиб, башмак – стальным штампом 2.

Во всех расчетных случаях при  $\alpha > 0^\circ$  трещину располагали у нижней кромки штампа и по направлению волокон древесины, а при  $\alpha = 0^\circ$  – у его кромок. Длину трещины  $l$  принимали равной 45 и 145 мм. Арматурные стержни располагали в одном поперечном сечении (по два стержня диаметром 16 мм), отстоящем от вершины трещины (по направлению ее развития) на 5 мм. Поперечное сечение фрагментов узлов  $b \times h = 140 \times 200$  мм; угол  $\alpha = 0; 15; 30$  и  $45^\circ$ , а соотношение  $c/h = 0,25; 0,50$  и  $0,75$ .

Все расчеты выполняли как на действие усилия  $N$ , так и на совместное действие усилий  $N$  и  $Q$ , при  $Q/N = 0,2$ . Величину сжимающего усилия  $N$  принимали из предположения, что значение средних сминающих напряжений  $\sigma_{см}$  под штампом равно 10 МПа. Расчеты узлов арок сводили к решению плоской задачи теории упругости. Упругие характеристики материала штампа и древесины арки задавали в направлении осей  $Ox$  и  $Oy$  (см. рисунок). Для стального штампа 2 имеем  $E_x = E_y = 210\,000$  МПа;  $\mu_{xy} = \mu_{yx} = 0,3$ ;  $G_{xy} = 81\,000$  МПа, а для древесины –  $E_x = 10\,000$  МПа;  $E_y = 400$  МПа;  $\mu_{xy} = 0,5$ ;  $\mu_{yx} = 0,02$ ;  $G_{xy} = 500$  МПа. В результате расчетов определены  $K_I$  и  $K_{II}$  в вершине трещины и максимальные значения напряжений  $\sigma_{max}$  в арматурных стержнях.

По результатам расчетов установили, что в узлах без арматурных стержней при  $\alpha = 0^\circ$  с увеличением длины трещины  $l$  при действии сжимающего  $N$  усилия  $K_I = 0$ , а  $K_{II}$  уменьшается. При одновременном действии в узле усилий  $N$  и  $Q$  в вершине трещины имеет место совместное действие нормального отрыва (растяжение поперек волокон древесины) и поперечного сдвига (скалывание вдоль волокон), т.е.  $K_I > 0$  и  $K_{II} > 0$ . Следует отметить, что с увеличением длины трещины значения  $K_I$

возрастают, а  $K_{II}$  уменьшаются. Наличие арматурных стержней при  $\alpha = 0^\circ$  способствует снижению КИН. Так, для узлов без арматурных стержней с соотношением  $c/h = 0,5$  при  $l = 145$  мм и совместном действии усилий  $N$  и  $Q$   $K_I = 0,315$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup> и  $K_{II} = 0,15$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>; в узлах с арматурными стержнями –  $K_I = 0,065$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup> и  $K_{II} = 0,106$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>, что соответственно в 4,8 и 1,4 раза меньше.

В узлах без арматурных стержней при  $\alpha > 0^\circ$  значения КИН возрастают. В случае действия в узле только сжимающего усилия  $N$  максимальные значения  $K_I = 1,7$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup> и  $K_{II} = 3,28$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup> достигаются при  $l = 145$  мм,  $\alpha = 45^\circ$  и  $c/h = 0,75$ . Это характерно и для узлов с арматурными стержнями, где  $K_I = 0,053$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup> и  $K_{II} = 0,639$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>.

Наибольший эффект от армирования наблюдали с увеличением длины трещины  $l$ , а также в случаях совместного действия усилий  $N$  и  $Q$ . Так, в узлах без арматурных стержней при  $l = 45$  мм,  $\alpha = 15^\circ$ ,  $c/h = 0,25$  и действии сжимающего  $N$  усилия  $K_I = 0,164$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>,  $K_{II} = 0,147$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>; а для узлов с арматурными стержнями –  $K_I = 0,02$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>,  $K_{II} = 0,067$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>, что соответственно в 8,2 и 2,2 раза меньше. Для тех же узлов, но без арматурных стержней, при  $l = 145$  мм и действии сжимающего усилия  $N$ , значения  $K_I = 0,245$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>,  $K_{II} = 0,064$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>, а с арматурными стержнями –  $K_I = 0,0213$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>,  $K_{II} = 0,011$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>, что соответственно в 11,5 и 5,8 раза меньше. В случае совместного действия усилий  $N$  и  $Q$  при  $\alpha = 30^\circ$  и  $c/h = 0,5$  для узла без арматурных стержней с трещиной  $l = 145$  мм имеем  $K_I = 1,428$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>,  $K_{II} = 1,626$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>; с арматурными стержнями –  $K_I = 0,031$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>,  $K_{II} = 0,562$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>, что соответственно в 46,1 и 2,9 раза меньше. Аналогичная картина снижения КИН наблюдается и для других значений  $\alpha$  и  $c/h$ .

Таким образом, установка вклеенных арматурных стержней существенно сказывается на величине КИН. Следует отметить, что наибольшее снижение КИН от армирования характерно для  $K_I$ .

На основании результатов теоретических исследований и выполненной автором работы [1] была разработана методика по оценке прочности узлов арок. Сущность ее состоит в том, что величину разрушающей нагрузки  $N_r$  определяют из двух условий:

а) условие прочности древесины от смятия под углом  $\alpha$  к направлению волокон под плитой башмака:

$$N_{исм} = cbR_{см\alpha}^{вр}; \quad (1)$$

б) условие прочности древесины в вершине трещины по значениям  $K_I$  и  $K_{II}$ :

$$N_{ip} = \frac{N}{K_I / K_{IC} + (K_{II} / K_{IIC})^2}, \quad (2)$$

где  $c$  – длина опорной площадки (штампа);

$b$  – толщина, равная 140 мм;

$R_{см\alpha}^{вр}$  – предел прочности древесины смятию под углом  $\alpha$  к направлению волокон [7];

$N$  – усилие, действующее в узле.

Вязкость разрушения древесины в вершине трещины при нормальном отрыве и поперечном сдвиге определены в соответствии с данными работ [1–3] для плотности древесины  $\rho = 500$  кг/м<sup>3</sup> и  $K_{IC} = 0,392$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup> и  $K_{IIC} = 1,075$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>.

За величину разрушающей нагрузки  $N_t$  для узла арки принимали минимальное значение, полученное из (1) и (2). В ходе анализа значений  $N_{тсм}$  и  $N_{тп}$  было установлено, что они существенно отличаются. Для узлов арок с трещиной без арматурных стержней величина  $N_{тсм}$  значительно больше  $N_{тп}$ , т.е. исчерпание прочности узлов будет происходить из-за разрушения древесины в вершине трещины. В узлах арок с арматурными стержнями (в рассмотренном диапазоне длин трещин и принятом армировании)  $N_{тп}$  всегда больше  $N_{тсм}$ , т.е. разрушение таких узлов будет происходить от смятия древесины под штампом.

В целях экспериментальной проверки полученных результатов были проведены испытания фрагментов натуральных коньковых узлов деревянных клееных трехшарнирных арок со сквозными трещинами длиной  $l = 145$  мм без арматурных стержней, а также усиленных двумя вертикальными арматурными стержнями диаметром 16 мм и установленных на расстоянии 150 мм от торца.

Эксперименты включали в себя испытания фрагментов узлов арок со сквозной трещиной для  $\alpha = 15, 30$  и  $45^\circ$  при соотношениях  $c/h = 0,25$  и  $0,50$  на действие сжимающего усилия  $N$  (см. рисунок). Был испытан 21 образец: по 3 образца (с арматурными стержнями и без них) для  $\alpha = 45^\circ$  при  $c/h = 0,25$  и  $0,50$ ; для  $\alpha = 30^\circ$  при  $c/h = 0,50$ ; 3 образца без арматурных стержней при  $\alpha = 15^\circ$  и  $c/h = 0,50$ . Образцы имели сечение  $b \times h = 135 \times 200$  мм и длину 1800 мм.

В ходе экспериментов было установлено, что в узлах с трещиной без арматурных стержней разрушение имело хрупкий характер и происходило в результате роста трещины по направлению волокон древесины, а величины разрушающей нагрузки  $N_t$ , соответствующие старту трещины, были на 4 ... 7 % выше значений  $N_{тп}$ , вычисленных по формуле (2). В узлах с арматурными стержнями разрушение носило пластический характер и происходило от смятия древесины под штампом, а разрушающие нагрузки  $N_t$  были близки к значениям  $N_{тсм}$  (1).

На основании выполненных экспериментально-теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

в опорных и коньковых узлах арок со сквозными трещинами несущая способность узла определяется прочностью древесины в вершине трещины;

в опорных и коньковых узлах арок с металлическими башмаками, усиленных наклонно клееными стержнями, несущая способность определяется прочностью смятия древесины под башмаком;

расчет и расстановку клеенных стержней необходимо выполнять в соответствии с [7].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Найчук, А.Я. Вязкость разрушения древесины сосны  $K_{IC}$  и  $K_{IIc}$  при совместном действии нормального отрыва и поперечного сдвига [Текст] / А.Я. Найчук // Строительная механика и расчет сооружений. – 2006. – № 1. – С. 7–14.

2. Найчук, А.Я. О вязкости разрушения древесины сосны  $K_{IC}$  при кратковременном действии статической нагрузки [Текст] / А.Я. Найчук, А.Н. Петрукович // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2005. – №2(32). – С. 60–63.

3. Найчук, А.Я. О вязкости разрушения древесины сосны  $K_{ДС}$  при кратковременном действии статической нагрузки [Текст] / А.Я. Найчук // Промышленное и гражданское стр-во. – 2006. – № 1. – С. 42–43.

4. Найчук, А.Я. Опорные и коньковые узлы деревянных клееных трехшарнирных арок [Текст]: автореф. дис. ... канд. тех. наук / А.Я. Найчук. – К., 1985. – 22 с.

5. Орлович, Р.Б. О напряженном состоянии опорных участков клееных деревянных арок [Текст] / Р.Б. Орлович, Г.И. Кореньков, А.Я. Найчук // Конструкции из дерева и пласт-масс. – Л., 1980. – С. 15–19. – (Межвуз. темат. сб. тр. /ЛИСИ).

6. Орлович Р.Б., Найчук А.Я., Никитин В.И. Экспериментальное исследование несущей способности клееных деревянных арок в зоне коньковых узлов [Текст] / Р.Б. Орлович, А.Я. Найчук, В.И. Никитин // Строительство и архитектура. – 1983. – № 4. – С. 19–22. – (Изв. высш. учеб. заведений).

7. СНиП II-25–80. Деревянные конструкции. Нормы проектирования [Текст]. – М.: Стройиздат, 1982. – 31 с.

Научно-технический центр (г. Брест)

Поступила 26.05.06

*A. Ya. Naychuk*

### **On Bearing Capacity of Units for Wooden Glued Laminated Three-hinged Arches**

Technique has been developed for strength evaluation of bearing and ridged units of wooden three-hinged arches with through-wall cracks and units reinforced by oblique glued-in rods.



УДК 624.011.1:620.17

*Б.В. Лабудин, Р.П. Матвеев, Р.С. Санжаровский***УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТО-ИЗОГНУТЫХ СТЕРЖНЕЙ,  
УСИЛЕННЫХ ТИТАНОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Рассмотрена проблема повышения прочности и устойчивости сжато-изогнутых стержней, усиленных титановыми элементами.

*Ключевые слова:* прочность и устойчивость стержней, титановые элементы, деревянные конструкции.

Методы расчета узлов и соединений деревянных конструкций, применяемых в строительстве, с использованием строительной механики стержневых систем могут быть применены при их усилении. С целью повышения прочности, жесткости и устойчивости этих конструкций, работающих на сжатие с изгибом, нами были проведены экспериментально-теоретические исследования. Их выполняли на трубчатых образцах и фрагментах из древесины.

В ряде работ, посвященных анизотропным свойствам конструкционных материалов, костный материал как природный композит рассматривается с учетом анизотропии прочностных и упругих свойств [1].

В построение методики расчета составных элементов положены основные гипотезы механики твердых деформируемых тел, гипотезы плоских сечений и линеаризации между соответствующими перемещениями и деформациями элементов биомеханической системы [2, 4].

Применение этих гипотез позволяет построить простую и физически ясную математическую модель для расчета устойчивости элементов как при кратковременных, так и при длительных статических или динамических нагрузках с учетом их упругодеформируемого соединения [3, 5].

Примем, что элемент имеет трубчатое или сплошное строение с неизменным по длине сечением, искривлен и внецентренно закреплен. Тогда эти параметры учтем усреднением поперечного сечения, а искривление – введением эксцентриситетов.

Общую длину стержня делим на  $(m + 1)$  равных частей длиной  $s$  (рис. 1). Уравнение изогнутой оси стержня заменим интерполирующей функцией, которую используем для вычисления кривизны в точках деления. Значения функции в точках деления совпадают с ординатами действительной кривой  $y_0, y_1, \dots, y_j, y_m, y_{m+1}$ . Так, с помощью интерполяционной формулы Лагранжа запишем вторые производные по пяти точкам. Они дают приближенные выражения кривизны [5]:

$$\left. \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right|_j = \frac{l}{24s^2} \left( C_{j-2} y_{j-2} + C_{j-1} y_{j-1} + C_j y_j + C_{j+1} y_{j+1} + C_{j+2} y_{j+2} \right); j = 0, \dots, m + 1. \quad (1)$$

Кривизну  $\kappa$  выразим также через краевые деформации сечения:

$$\kappa = (\varepsilon_{1i} + \varepsilon_{2i}) / h, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{1i}$  и  $\varepsilon_{2i}$  – краевые деформации;

$h$  – наибольший размер поперечного сечения в плоскости изгиба.

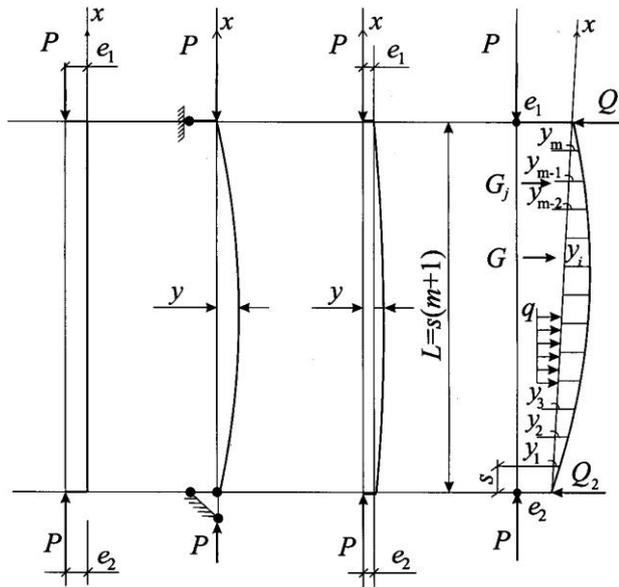


Рис. 1. Выбор расчетной схемы сжато-изогнутого стержня с шарнирным закреплением концов

Подставив правые части (1) и (2), получим:

$$\frac{(\varepsilon_{1i} + \varepsilon_{2i})}{h} = \frac{l}{24s^2} (C_{j-2}y_{j-2} + C_{j-1}y_{j-1} + C_j y_j + C_{j+1}y_{j+1} + C_{j+2}y_{j+2}) \quad (3)$$

Примем, что распределение напряжений в поперечных сечениях сжато-изогнутого стержня определяется зависимостью  $\sigma$ – $\varepsilon$ , соответствующей диаграмме сжатия короткого стержня (образца), а также, что ось нулевых деформаций совмещается с осью нулевых напряжений.

Опытные диаграммы осевого сжатия  $\sigma$ – $\varepsilon$  композитного (костного) элемента и титанового аппарата (далее Ti) в общем случае аппроксимируются полиномами вида

$$\sigma(\varepsilon) = \sum a_m \varepsilon^{n-m} \quad (4)$$

Соответствие выражения (4) эксперименту приводят через метод наименьших квадратов, апробированный в решении многих задач.

Если титан и костный материал имеют явно выраженные площадки текучести, то полином (4) представляется диаграммой  $\sigma$ – $\varepsilon$  до начала площадки текучести. Отсюда следуют и другие частные зависимости, например уравнение, приведенное в [2]:

$$\sigma = C\varepsilon^m (1 \pm a\varepsilon) \quad (5)$$

Главный вектор и главный момент эпюры нормальных напряжений наиболее нагруженного (среднего) сечения определим из известного соотношения внутренних усилий:

$$P_{вн} = \int_F \sigma dF; \quad M_{вн} = \int_F \sigma z dF, \quad (6)$$

где  $z$  – расстояние от рассматриваемого волокна до центра тяжести сечения (рис. 2).

Выделим разрушенный (сломанный) костный элемент, который усилен специальным элементом из титана, установленным с наружной стороны. Трубчатый элемент кости условно заменим эквивалентным сплошным, а титановый элемент – эквивалентной тонкой оболочкой.

В качестве текущей координаты примем центральный угол  $\alpha$ , элементарные площади выразим через текущую координату: для композита

$$dF_k = 2R^2 \sin^2 \alpha \cdot d\alpha ;$$

для титана

$$dF_{Ti} = 2Rt \cdot d\alpha , \tag{7}$$

где  $R$  – радиус наружной поверхности;  
 $t$  – толщина оболочки.

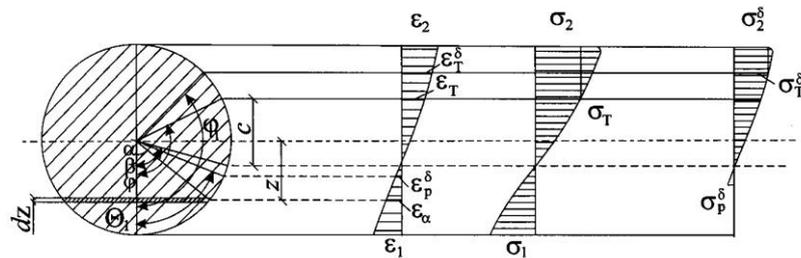


Рис. 2. Эпюры распределения напряжений и деформаций по поперечному сечению комплексного элемента

Рассмотрим оболочку, толщина которой является достаточно малой в сравнении с ее диаметром. По эпюрам, приведенным на рис. 2, запишем выражение для деформации произвольно волокна оболочки из Ti:

$$\epsilon_\alpha = \epsilon_{Ti} \frac{\cos\beta - \cos\alpha}{\cos\beta - \cos\varphi} , \tag{8}$$

где  $\epsilon_{Ti}$  – деформация текучести титана;  
 $\beta$  – центральный угол, характеризующий положение нейтральной оси;  
 $\varphi$  – центральный угол, характеризующий положение волокна, имеющего деформацию  $\epsilon_{Ti}$  в сжатой зоне.

Для случая двусторонней текучести имеем [4]:  
 главный вектор

$$\begin{aligned} P_{вн} = & 2Rt \sum_{m=0}^n a_m \frac{\epsilon_{Ti}^{n-m}}{(\cos\beta - \cos\varphi)^{n-m}} \int_0^\varphi (\cos\beta - \cos\alpha)^{n-m} d\alpha + 2Rt\sigma_{Ti}(\pi - \varphi) + \\ & + 2R \sum_{m=0}^{m=i} a_{1m} \frac{\epsilon_{тк}^{i-m}}{(\cos\beta - \cos\varphi_1)^{i-m}} \int_\beta^{\varphi_1} (\cos\beta - \cos\alpha)^{i-m} \sin\alpha \cdot d\alpha + \\ & + 2R^2 \sum_{m=0}^k a_{2m} \frac{\epsilon_{тк}^{k-m}}{(\cos\beta - \cos\varphi_1)^{k-m}} \int_\theta^\beta (\cos\beta - \cos\alpha)^{k-m} \sin^2 \alpha \cdot d\alpha + \\ & + \sigma_{тк} R^2 (\pi - \varphi_1 + \sin\varphi_1 \cos\varphi_1) \cdot 2Rt\sigma_{Ti}\theta; \end{aligned} \tag{9}$$

момент поперечной нагрузки

10\*

$$\begin{aligned}
M_{\text{вн}} = & 2R^2 t \sum_{m=0}^n a_m \frac{\varepsilon_{\text{Тi}}^{n-m}}{\cos \beta - \cos \varphi} \int_{\theta}^{\varphi} (\cos \beta - \cos \alpha)^{n-m} \cos \alpha \, d\alpha + \\
& + 2R^2 t \sigma_{\text{Тi}} \sin \varphi + 2R^2 \sigma_{\text{Тi}} \sin \theta + 2R^3 \sum_{m=0}^i a_{1m} \frac{\varepsilon_{\text{ТК}}^{i-m}}{\cos \beta - \cos \varphi_1} \times \int_{\beta}^{\varphi_1} (\cos \beta - \cos \alpha)^{i-m} \times \\
& \times \cos \alpha \sin^2 \alpha \cdot d\alpha + 2R^3 \sum_{m=0}^k a_{2m} \frac{\varepsilon_{\text{ТК}}^{k-m}}{\cos \beta - \cos \varphi_1} \int_{\theta}^{\beta} (\cos \beta - \cos \alpha)^{k-m} \times \\
& \times \cos \alpha \sin^2 \alpha \cdot d\alpha + \frac{2}{3} \sigma_{\text{ТК}} R^3 \sin^3 \varphi_1,
\end{aligned} \quad (10)$$

где  $\varepsilon_{\text{ТК}}$  – деформация текучести композитного материала сжатой зоны;

$\varepsilon_{\text{рК}}$  – деформация предельного растяжения композитного материала;

$\varphi_1$  – центральный угол, соответствующий положению волокон с деформацией  $\varepsilon_{\text{ТК}}$ ;

$\theta_1$  – центральный угол, соответствующий положению волокон с деформацией  $\varepsilon_{\text{рК}}$ .

Далее составим уравнения равновесия деформированного состояния части стержня, отделенной любым сечением:

$$P - P_{\text{вн}}^j \left( \beta_j, \varphi_j, \varphi_{1j}, \theta_j, \theta_{1j} \right) \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \beta_j' \right)^2 \right] + G_j - Q_{\text{оп}} y_j' = 0; \quad (11)$$

$$P(e - y_i) + M_G^j - M_{\text{вн}}^j \left( \beta_j, \varphi_j, \varphi_{1j}, \theta_j, \theta_{1j} \right) = 0, \quad (12)$$

где  $G_j$  и  $M_G^j$  – главные вектор и момент поперечной нагрузки;

$e$  – эксцентриситет приложения силы  $P$ ,  $e = \frac{e_1 + e_2}{2}$ ;

$Q_{\text{оп}}$  – опорная реакция  $Q_1$  или  $Q_2$ .

Главный вектор  $P_{\text{вн}}^j \left( \beta_j, \varphi_j, \varphi_{1j}, \theta_j, \theta_{1j} \right)$  и момент

$M_{\text{вн}}^j \left( \beta_j, \varphi_j, \varphi_{1j}, \theta_j, \theta_{1j} \right)$  найдем из выражений (9), (10).

Центральные углы  $\beta_j, \dots, \theta_{1j}$  с помощью гипотезы плоских сечений выразим через краевые деформации сечений  $\varepsilon_{1j}$  и  $\varepsilon_{2j}$ . Производную от прогиба  $y$  по координате  $x$  запишем с помощью интерполяционного многочлена по пяти точкам:

$$y' = a(s) [a_{j-2} y_{j-2} + a_{j-1} y_{j-1} + a_j y_j + a_{j+1} y_{j+1} + a_{j+2} y_{j+2}]. \quad (13)$$

Полагаем, что внешняя нагрузка возрастает во времени по известным законам  $P(t)$  и  $G(t)$ , причем, если  $t = 0$ , то стержень работает упруго. Тогда можно проследить процесс изменения напряженно-деформированного состояния элемента. Дифференцируя его по времени, получаем:

$$\frac{(\dot{\varepsilon}_{1j} + \dot{\varepsilon}_{2j})}{h} = \frac{l}{24s^2} \left( C_{j-2} \dot{y}_{j-2} + C_{j-1} \dot{y}_{j-1} + C_j \dot{y}_j + C_{j+1} \dot{y}_{j+1} + C_{j+2} \dot{y}_{j+2} \right);$$

$$\dot{P} - \left( \frac{\partial P_{\text{вн}}^j}{\partial \varepsilon_{1j}} \dot{\varepsilon}_{1j} + \frac{\partial P_{\text{вн}}^j}{\partial \varepsilon_{2j}} \dot{\varepsilon}_{2j} \right) \left[ 1 + \frac{1}{2} \mathcal{C}'_j \right] - P_{\text{вн}}^j \dot{y}_j y_j + (\dot{G}_j - Q_{\text{оп}}) \dot{y}_j = 0; \quad (14)$$

$$\dot{y}'_j = a(s) [a_{j-2} \dot{y}_{j-2} + a_{j-1} \dot{y}_{j-1} + a_j \dot{y}_j + a_{j+1} \dot{y}_{j+1} + a_{j+2} \dot{y}_{j+2}],$$

$$\text{где } \frac{\partial P_{\text{вн}}^j}{\partial \varepsilon_{1j}} = \frac{\partial P_{\text{вн}}^j \cdot \partial \beta_j}{\partial \beta_j \cdot \partial \varepsilon_{1j}} + \dots + \frac{\partial P_{\text{вн}}^j \cdot \partial \theta_{1j}}{\partial \theta_{1j} \cdot \partial \varepsilon_{1j}}.$$

Эта система дифференцируемых уравнений легко сводится к нормальной форме Коши:

$$\dot{y}_j = \frac{\Delta y_j}{\Delta}; \quad \dot{\varepsilon}_{1j} = \frac{\Delta \varepsilon_{1j}}{\Delta}; \quad \dot{\varepsilon}_{2j} = \frac{\Delta \varepsilon_{2j}}{\Delta}, \quad (15)$$

где  $\Delta$ ,  $\Delta y_j$ ,  $\Delta \varepsilon_{1j}$ ,  $\Delta \varepsilon_{2j}$  – определители системы.

Для нахождения условия, в котором система приходит в критическое состояние, рассмотрим отклонение стержня от состояния равновесия. Для чего системе уравнений запишем в следующем виде:

$$\frac{(\delta \varepsilon_{1j} + \delta \varepsilon_{2j})}{h} = \frac{l}{24s^2} \mathcal{C}_{j-2} \delta y_{j-2} + C_{j-1} \delta y_{j-1} + C_j \delta y_j + C_{j+1} \delta y_{j+1} + C_{j+2} \delta y_{j+2} - \delta P_{\text{вн}}^j \left[ 1 + \frac{1}{2} \mathcal{C}'_j \right] - P_{\text{вн}}^j y'_j + (G_j - Q_{\text{оп}}) \delta y'_j = 0;$$

$$P \delta y_j - \delta M_{\text{вн}}^j = 0 \quad (16)$$

$$\delta y'_j = a(s) [a_{j-2} \delta y_{j-2} + a_{j-1} \delta y_{j-1} + a_j \delta y_j + a_{j+1} \delta y_{j+1} + a_{j+2} \delta y_{j+2}],$$

$$\text{где } \frac{\partial P_{\text{вн}}^j}{\partial \varepsilon_{1j}} \delta \varepsilon_{1j} + \frac{\partial P_{\text{вн}}^j}{\partial \varepsilon_{2j}} \delta \varepsilon_{2j} = \delta P_{\text{вн}}^j;$$

$$\frac{\partial P_{\text{вн}}^j}{\partial \varepsilon_{1j}} = \frac{\partial P_{\text{вн}}^j \cdot \partial \beta_j}{\partial \beta_j \cdot \partial \varepsilon_{1j}} + \dots + \frac{\partial P_{\text{вн}}^j \cdot \partial \theta_{1j}}{\partial \theta_{1j} \cdot \partial \varepsilon_{1j}}.$$

Далее определитель системы уравнений (16) необходимо приравнять к 0, чтобы получить критическое состояние конструкции. Рассмотренный метод решения задачи упругопластической устойчивости и запись (15) в форме Коши удобна для численной реализации с использованием стандартных программ ЭВМ.

Численные эксперименты показали, что решение задачи Коши для системы (15) с одновременным вычислением определителя системы (16) намного эффективнее задачи с вычислением системы нелинейных алгебраических уравнений так как итерационный процесс расходится вблизи критического состояния.

Предложенный метод удобен для исследования закритического поведения сжатых стержней в упругопластической стадии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашкенази, Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов [Текст] / Е.К. Ашкенази. – М.: Лесн. пром-сть, 1978. – 224 с.
2. Лукаш, П.А. Основы нелинейной строительной механики [Текст] / П.А. Лукаш. – М., 1978. – 208 с.

3. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности [Текст] / Л.М. Качанов. – М., 1956. – 324 с.

4. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела [Текст] / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 712 с.

5. Санжаровский, Р.С. Устойчивость элементов строительных конструкций при ползучести [Текст] / Р.С. Санжаровский. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. – 280 с.

Архангельский государственный  
технический университет

Северный государственный  
медицинский университет

С.-Петербургской государственный  
архитектурно-строительный университет

Поступила 12.05.06

*B.V. Labudin, R.P. Matveev, R.S. Sanzharovsky*

### **Stability of Close-bent Rods Reinforced by Titanic Elements**

The problem of enhancing strength and stability of close-bent rods reinforced by titanic elements is considered.

---

УДК 6.048:668.473

**Т.М. Владимирова, О.М. Соколов, С.И. Третьяков**

Владимирова Татьяна Михайловна родилась в 1981 г., окончила в 2003 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант кафедры биотехнологии АГТУ. Имеет 9 печатных работ в области получения и переработки талловых продуктов.



Соколов Олег Михайлович родился в 1936 г., окончил в 1960 г. Ленинградский технологический институт ЦБП, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой биотехнологии Архангельского государственного технического университета, академик Международной академии наук, РИА, РАЕН, Академии проблем качества РФ, чл.-кор. МИА, заслуженный деятель науки РФ. Имеет около 200 научных трудов в области исследования процессов сульфатной варки, изучения свойств и применения технических лигнинов.



Третьяков Сергей Иванович родился в 1946 г., окончил в 1971 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, профессор кафедры лесохимических производств Архангельского государственного технического университета. Имеет около 90 печатных трудов в области химической переработки древесины.



## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ И ПАРЦИАЛЬНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ТАЛЛОВОГО МАСЛА**

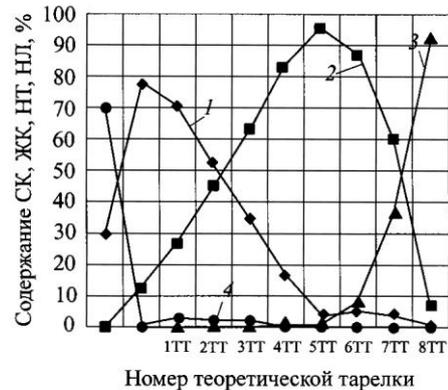
Установлено, что применение совмещенного процесса ректификации и парциальной конденсации позволяет увеличить степень разделения и улучшить качество талловых продуктов.

*Ключевые слова:* парциальная конденсация, талловое масло, ректификация, степень разделения, многокомпонентная смесь.

Для моделирования процесса ректификации таллового масла как многокомпонентной системы выбран метод Льюиса и Мачесона, при котором уравнения материальных балансов и уравнения рабочих линий, выведенные для бинарных систем, справедливы для каждого из компонентов смеси. Смесь принимают идеальной и считают, что она подчиняется закону Рауля [3].

При расчете процесса ректификации принимали талловое масло ТМ как смесь, состоящую из нейтральных легколетучих веществ, жирных кислот, смоляных кислот и нейтральных тяжелолетучих веществ [1, 2, 4]. Результаты расчета содержания компонентов на каждой ступени разделения (теоретической тарелке) ректификационной колонны представлены на рис. 1.

Рис. 1. Зависимость концентрации смоляных кислот, жирных кислот, нейтральных веществ в жидкой фазе от числа теоретических тарелок (ТТ): 1 – смоляные кислоты (СК); 2 – жирные кислоты (ЖК); 3 – нейтральные легколетучие (НЛ); 4 – нейтральные тяжелолетучие (НТ)

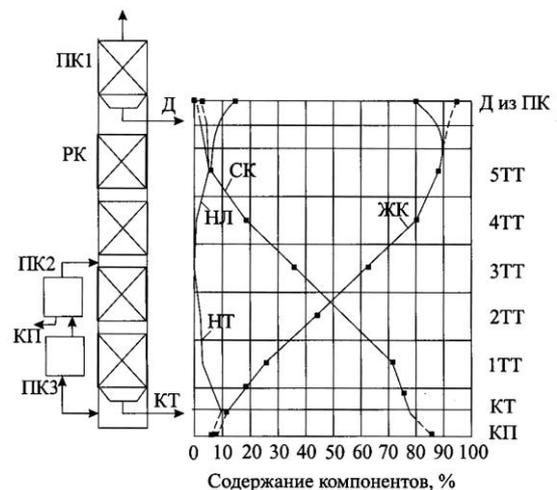


Из графиков, приведенных на рис. 1, следует, что максимальное число ТТ = 5. Дальнейшее увеличение числа тарелок приводит к уменьшению степени разделения компонентов таллового масла и ухудшению качества как дистиллята (верхний продукт), так и канифоли с тарелки отбора (нижний продукт).

На рис. 2 приведена схема процесса ректификации и парциальной конденсации, а также кривые, характеризующие изменение содержания компонентов таллового масла по высоте ректификационной колонны. Парциальный конденсатор 1 предназначен для конденсации пара и отбора дистиллята, парциальные конденсаторы 2 и 3 – для конденсации паров, выводимых из кубовой части ректификационной колонны. Продукт, получаемый в конденсаторе 2, является высококачественной талловой канифолью.

Кривые содержания компонентов таллового масла при парциальной конденсации имеют больший угол наклона, чем аналогичные зависимости при ректификации. Приведенные данные показывают, что парциальная конденсация позволяет существенно улучшить качество продуктов. Содержание жирных кислот в дистилляте возрастает до 95 %, а смоляных кислот в канифоли – до 85 ... 90 %. При этом уменьшается содержание нейтральных веществ в обоих продуктах.

Рис. 2. Изменение содержания компонентов таллового масла при ректификации (прямая линия) и парциальной конденсации (пунктирная) (РК – ректификационная колонна; Д – дистиллят; КТ – канифоль с тарелки отбора; ПК – парциальный конденсатор; КП – талловая канифоль – продукт)



Сравнительный анализ распределения содержания компонентов таллового масла показал, что разделение таллового масла методом ректификации с применением парциальной конденсации происходит полнее, чем при использовании только ректификации. Преимуществом предложенной схемы является также то, что гидравлическое сопротивление ректификационной колонны не изменяется и, следовательно, уменьшается термическая деструкция талловых продуктов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Владимирова, Т.М.* Алгоритм расчета системы парциальной конденсации при получении таловой канифоли [Текст] / Т.М. Владимирова, С.И. Третьяков // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр., вып. 9. – Архангельск, 2004. – С. 31–33.
2. *Владимирова, Т.М.* Расчет парциальной конденсации многокомпонентных смесей [Текст] / Т.М. Владимирова, О.М. Соколов, С.И. Третьяков // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: матер. II Всерос. конф. – Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2005. – Кн. 2. – С. 549–552.
3. *Стабников, В.Н.* Ректификационные аппараты. Расчет и конструирование [Текст] / В.Н. Стабников. – М.: Машиностроение, 1965. – 356 с.
4. *Третьяков, С.И.* Применение парциальной конденсации при ректификации таллового масла для улучшения качества продуктов [Текст] / С.И. Третьяков // Лесн. журн. – 2002. – № 3. – С. 92–97. – (Изв. высш. учеб. заведений).

Архангельский государственный  
технический университет

Поступила 25.02.05

*T.M. Vladimirova, O.M. Sokolov, S.I. Tretyakov*

#### **Simulation of Rectification Process and Partial Condensation in Tall Oil Separation**

It is established that the use of combined rectification process and partial condensation allows increasing the separation degree and improving the tall products quality.

