

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ ПО ВЫСШЕМУ ОБРАЗОВАНИЮ

АРХАНГЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ  
ЗАВЕДЕНИЙ

*Лесной журнал*

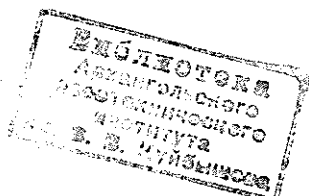
Материалы исследований по государственной научно-технической  
программе «Комплексное использование  
и воспроизводство древесного сырья»

Издается с февраля 1958 г.

Выходит 6 раз в год

3

1994



ИЗДАТЕЛЬ — АРХАНГЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор — акад. **О. М. Соколов**.  
Заместители главного редактора:  
акад. **И. С. Мелехов**, чл.-кор. **Е. С. Романов**,  
проф. **С. И. Морозов**.

## ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Проф. **Ю. Г. Бутко**, проф. **А. В. Веретенников**, проф. **Е. Д. Гельфанд**,  
чл.-кор. **И. И. Гусев**, чл.-кор. **Р. Е. Калитеевский**, проф. **А. Н. Кириллов**,  
проф. **Н. П. Коваленко**, акад. **В. А. Кучерявый**, проф. **Н. В. Лившиц**,  
акад. **Е. Г. Мозолевская**, доц. **О. А. Неволин**, акад. **А. Н. Обливин**,  
акад. **В. И. Онегин**, акад. **А. Р. Родин**, д-р биол. наук **Л. П. Рысин**,  
проф. **В. П. Рябчук**, проф. **Е. Д. Сабо**, акад. **В. И. Санев**, проф. **О. А. Терентьев**,  
проф. **Н. И. Федоров**, чл.-кор. **В. Я. Харитонов**, д-р с.-х. наук  
**Г. А. Чибисов**, акад. **Г. М. Шутов**, проф. **В. В. Щелкунов**, проф.  
**А. А. Эльберт**.

Ответственный секретарь **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 вузов и техникумов, студентов старших курсов лесотехнических институтов.

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
«ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ» № 3

Редакторы **Н. П. Бойкова**, **Л. С. Окулова**. Корректор **Л. Л. Аксенова**.

Сдан в набор 02.08.94. Подписан в печать 28.11.94.  
Форм. бум. 70 × 108<sup>1/16</sup>. Бумага мелованная. Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Усл. печ. л. 12,775. Усл. кр.-отт. 12,775. Уч.-изд. л. 15,51. Тираж 1 000 экз. Заказ 1728.  
Архангельский государственный технический университет

Адрес редакции: 163007, Архангельск, 7, наб. Сев. Двины, 17, тел. 44-13-37.

Типография издательства «Правда Севера», 163002, г. Архангельск, пр. Новгородский, 32

## СОДЕРЖАНИЕ

- О. А. Терентьев. Комплексное использование и воспроизводство древесного сырья: достижения и проблемы . . . . . 7

### ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

- И. И. Гусев, О. А. Неволин, С. В. Третьяков. Леса и лесистость Архангельской области . . . . . 10

### ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

- В. Я. Харитонов, П. Н. Гагарин, И. И. Долгова. Лесотранспортная единица для первоначального лесосплава . . . . . 18  
В. Я. Харитонов, И. И. Долгова. Внутренний искусственный подплав для пучков недостаточной плавучести . . . . . 23  
А. Н. Вихарев. Выбор оптимальных параметров анкерных береговых опор . . . . . 27

### МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- В. И. Онегин, В. М. Палянский-Гвоздев, Л. М. Сосна. Экспертные задачи принятия решений в технологии деревообработки . . . . . 33  
Л. С. Суровцева, Э. А. Волкова. Использование низкокачественных пиломатериалов на заготовки для поддонов . . . . . 40  
О. И. Полубояринов, А. М. Сорокин. Физические свойства еловой коры и ее компонентов . . . . . 43  
А. Е. Алексеев. Ограничение способности пилопродукции к деформированию . . . . . 47  
А. Е. Алексеев. Улучшение показателей распиловки бревен по образующей . . . . . 51  
А. Е. Алексеев. О выборе положения бруса перед раскромом . . . . . 58

### ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- Д. В. Евтюгин, А. А. Шаталов, М. Я. Зарубин. Деструкция полисахаридов в присутствии кислорода в водно-органических средах различной природы. 1. Изменение химического состава полисахаридного комплекса в ходе кислородно-органо-сольвентной делигнификации . . . . . 64  
Д. В. Евтюгин, Н. Г. Костюкевич, М. Я. Зарубин. Деструкция полисахаридов в присутствии кислорода в водно-органических средах различной природы. 2. Деполимеризация макромолекул полисахаридного комплекса в условиях кислородно-органо-сольвентной делигнификации . . . . . 70  
М. О. Леонова, Л. Ф. Левина, С. И. Суворова, И. Л. Шапиро, Р. З. Пен. Низкотемпературная окислительная делигнификация древесины. 2. Варка осинового щепы с принудительной пропиткой и низким жидкостным модулем . . . . . 76  
А. Ю. Поварова, Э. И. Чупка. Эффективность кислотно-основного и окислительно-восстановительного катализа при окислении древесины в водно-органических средах. 3. Влияние давления кислорода и температуры на скорость окисления древесины и лигнина в щелочных средах . . . . . 81  
Э. И. Чупка, Л. П. Анисимова, Б. А. Моисеев, Н. Е. Рихтер. Ингибированное окисление в условиях сульфатной варки с предобработкой древесины . . . . . 85  
Э. И. Гермер, Р. А. Горенков. Интенсификация кислородно-щелочной делигнификации лигноцеллюлозных материалов с помощью 1, 10-фенантролина. 5. Роль металлов, содержащихся в древесине, в реализации каталитического действия 1, 10-фенантролина . . . . . 90  
А. В. Вураско, С. Ю. Меньшиков, А. Я. Агеев, Л. А. Петров, В. Д. Скобелева, Г. Ф. Беляева, В. Г. Шошаров, Е. И. Андрейков. Каталитическая делигнификация древесины . . . . . 94  
Д. А. Сухов, О. Ю. Деркачева, В. И. Комаров, Я. В. Казаков. Изменения состава и структуры основных компонентов стенки волокна хвойной древесины в процессе сульфатной варки . . . . . 100

---

<i>В. И. Комаров, Я. В. Казаков, Д. А. Сухов, О. Ю. Деркачева.</i> Влияние структуры стенки волокна на фундаментальные, деформационные и прочностные характеристики сульфатной небеленой целлюлозы . . . . .	105
<i>В. И. Комаров.</i> Жесткость при изгибе целлюлозно-бумажных материалов. Анализ методов измерения и влияния технологических факторов . . . . .	112
<i>О. А. Терентьев, В. С. Куров, Э. И. Давыденко.</i> Теоретический анализ пульсационного движения флокул в потоке волокнистой суспензии . . . . .	142

---

## CONTENTS

<i>O. A. Terentyev</i> . Complex Utilization and Reproduction of Timber Raw Material: Achievements and Problems . . . . .	7
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

### FORESTRY

<i>I. I. Gusev, O. A. Nevolin, S. V. Tretyakov</i> . Forests and Forestation of Arkhangelsk Region . . . . .	10
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

### WOODEXPLOITATION

<i>V. Ya. Kharitonov, P. N. Gagarin, I. I. Dolgova</i> . Forest Transport Unit for Spring Timber Floating . . . . .	18
<i>V. Ya. Kharitonov, I. I. Dolgova</i> . Internal Artificial Arrangement for Bundles of Insufficient Floatability . . . . .	23
<i>A. N. Vikharev</i> . Selection of Optimal Parameters of Shore Anchors . . . . .	27

### MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

<i>V. I. Onegin, V. M. Payansky-Gvozdev, L. M. Cosna</i> . Expert Tasks of Making Decisions in Woodworking Technology . . . . .	33
<i>L. S. Surovtseva, Z. A. Volkova</i> . Utilization of Low Grade Sawn Wood for Intermediate Products for Trays . . . . .	40
<i>O. I. Poluboyarinov, A. M. Sorokin</i> . Physical Properties of Spruce Bark and its Components . . . . .	43
<i>A. E. Alexeev</i> . Limiting Sawn Products Deforming Ability . . . . .	47
<i>A. E. Alexeev</i> . Improving Log Cutting Line Indicators . . . . .	51
<i>A. E. Alexeev</i> . Positioning of Cants Before Cutting . . . . .	58

### CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

<i>D. V. Evtugin, A. A. Shatalov, M. Ya. Zarubin</i> . Destruction of Polysaccharides in the Presence of Oxygen in Liquid-Organic Mediums of Different Nature. 1. Change in the chemical Composition of Polysaccharide Complex in the Process of Oxygen-Organosolvent Delignification . . . . .	62
<i>D. V. Evtugin, N. G. Kostyukovich, M. Ya. Zarubin</i> . Destruction of Polysaccharides in the Presence of Oxygen in Liquid-Organic Mediums of Different Nature. 2. Depolymerization of Polysaccharide Complex under Conditions of Oxygen-Organosolvent Delignification . . . . .	70
<i>M. O. Leonova, L. F. Levina, S. I. Suvorova, I. L. Shapiro, R. Z. Pen</i> . Low-Temperature Oxidative Delignification of Wood. 2. Aspen Wood Chips Pressure Impregnation Low Modulus Pulping . . . . .	76

<i>A. Yu. Povarova, E. I. Chupka</i> . Efficiency of Acid-Base and Oxidation-Reduction Catalyst at Oxidizing Wood in Aqueous-Organic Mediums. 3. Influence of Oxygen Pressure and Temperature on Oxidization Rate of Wood and Lignin in Alkali Mediums . . . . .	81
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>E. I. Chupka, L. P. Anisimova, B. A. Moiseev, N. E. Rikhter</i> . Inhibited Oxidation in the Conditions of Sulphate Pulping with Pretreatment of Wood . . . . .	85
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>E. I. Germer, R. A. Gorenkov</i> . Intensification of Oxygen-Alkali Delignification of Lignocellulose Materials by 1,10-Phenanthroline. 5. Role of Metals in Wood in Putting 1,10-Phenanthroline Catalyst Action into Effect . . . . .	90
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>A. V. Vurasko, S. Yu. Men'shikov, A. Ya. Ageev, L. A. Petrov, V. D. Skobeleva, G. F. Belyaeva, V. G. Koksharov, E. I. Andreikov</i> . Catalytic Delignification of Wood . . . . .	94
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

<i>D. A. Sukhov, O. Yu. Derkacheva, V. I. Komarov, Ya. V. Kazakov.</i> Variation in Composition and Structure of the Main Components of Softwood Fibre Wall in the Process of Sulphate Pulping . . . . .	100
<i>V. I. Komarov, Ya. V. Kazakov, D. A. Sukhov, O. Yu. Derkacheva.</i> Influence of Fibre Wall Structure on Fundamental, Deformation and Strength Characteristics of Unbleached Pulp . . . . .	105
<i>V. I. Komarov.</i> Elaxural Rigidity of Pulps Paper Materials Analysis of Measuring Methods and Influence of Technological Factors . . . . .	112
<i>O. A. Terentyev, V. S. Kurov, E. I. Davydenko.</i> Theoretical Analysis of Floccules Pulsating Motion in the Flow of Fibre Suspension . . . . .	147

---

О. А. ТЕРЕНТЬЕВ

С.-Петербургский государственный технологический университет  
растительных полимеров

## КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ВОСПРОИЗВОДСТВО ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ

Проблемы комплексной переработки и воспроизводства древесного сырья особенно актуальны в России, которая, оставаясь самой великой лесной державой, использует заготавливаемую древесину не более чем на 55 %.

Для эффективной координации действий сформировавшегося в течение многих лет научно-технического и производственного потенциала в целях поддержания и развития отраслей лесохимического комплекса в 1992 г. создана и успешно реализуется Государственная научно-техническая программа (ГНТП) России «Комплексное использование и воспроизводство древесного сырья», научным руководителем которой является ректор С.-Петербургского технологического университета растительных полимеров, академик Инженерной академии, доктор технических наук, профессор О. А. Терентьев.



В 1993 г. в выполнении ГНТП принимали участие более 200 организаций и предприятий России, в том числе 25 институтов Российской академии наук, 75 отраслевых НИИ и проектно-конструкторских организаций, 36 высших учебных заведений, 66 производственных объединений и предприятий.

В настоящий период стратегия Программы направлена на сохранение лесопромышленного комплекса, разработку мер, обеспечивающих выход отрасли из кризиса и стабилизацию производства всех видов продукции, производимой из древесины, в соответствии с чем были определены следующие направления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

1. Проблемы лесозэксплуатации (43 проекта): головная организация — «Центральный научно-исследовательский институт механизации и электрификации лесоразработок»; научный руководитель — зам. директора института по научной работе, доктор технических наук, профессор В. В. Коробов.

2. Технология механической переработки древесины (54 проекта): головная организация — С.-Петербургская лесотехническая академия; научный руководитель — ректор академии, академик Инженерной академии, доктор технических наук, профессор В. И. Онегин.

3. Химическая технология целлюлозы и полуфабрикатов высокого выхода (53 проекта): головная организация — Архангельский государ-

ственный технический университет; научный руководитель — ректор университета, академик Инженерной академии, доктор химических наук, профессор О. М. Соколов.

4. Разработка новых технологических процессов производства бумаги и целлюлозных композиционных материалов (69 проектов): головная организация — С.-Петербургский технологический университет растительных полимеров; научный руководитель — ректор университета, академик Инженерной академии, доктор технических наук, профессор О. А. Терентьев.

5. Новые технологии лесохимических продуктов биологически активных веществ растительного сырья (45 проектов): головная организация — С.-Петербургская лесотехническая академия; научный руководитель — проректор академии по научной работе, доктор технических наук, профессор В. И. Ягодин.

6. Технологии очистки сточных вод и газовых выбросов лесопромышленных предприятий (20 проектов): головная организация — С.-Петербургский технологический университет растительных полимеров; научный руководитель — зав. кафедрой технологии рекуперации промышленных выбросов, доктор химических наук, профессор Ю. М. Чернобережский.

7. Химия и экологически безопасная технология переработки возобновляемого растительного сырья (26 проектов): головная организация — С.-Петербургская лесотехническая академия; научный руководитель — проректор академии по учебной работе, доктор химических наук, профессор М. Я. Зарубин.

В целом объем финансирования Программы в 1993 г. составил около 400 млн руб. По сравнению с 1992 г. увеличение объема финансирования составило всего 2,6 раза, что при высоких темпах инфляции в 1993 г. замедлило выполнение научных проектов и сделало невозможным их завершение, особенно в части проведения производственных испытаний, изготовления пилотных установок, головных образцов машин и оборудования.

В 1993 г. во 2—3 выпуске «Лесного журнала» опубликованы первые материалы исследований, проводимых в 1992 г. в соответствии с Программой.

В очередные тематические выпуски «Лесного журнала» (№ 3, 5—6) будут включены статьи, подготовленные по результатам научных исследований 1993 г.

Созданию экологически безопасной технологии лесосплава посвящены статьи В. Я. Харитоновой, написанные на основании исследований, выполняемых в рамках первого направления.

Второе направление представлено статьями В. И. Онегина о разработке научных основ создания новой информационной технологии экспертных знаний технологического назначения и А. Е. Алексеева о создании автоматизированной технологии производства пиломатериалов.

Создание экологически безопасного производства целлюлозы органическими способами отражено в статьях Э. И. Чупки, Д. В. Евтюгина, Р. З. Пена, К. Г. Боголицына по третьему направлению. В работах Э. И. Гермера и А. В. Вураско установлено, что катализ процесса делигнификации при кислородно-щелочной варке 1, 10-фенантролином и при сульфатной варке антрахинонсодержащими продуктами приводит не только к увеличению выхода полуфабриката из древесины, ускорению процесса варки, но и позволяет повысить экологическую безопасность производства целлюлозы. Решению этой же задачи посвящена статья Л. А. Миловидовой. Результаты исследования структуры целлюлозы ранней и поздней древесины ели методом рентгеновской дифракции представлены в статье В. В. Петровой, а строения во-



локнистой структуры целлюлозных суспензий и основных компонентов стенки волокна — А. В. Бывшева и Д. А. Сухова. Влияние структуры стенки волокна на фундаментальные, деформационные и прочностные характеристики установлено В. И. Комаровым.

В целях создания новой технологии производства бумаги и бумагоподобных материалов (четвертое направление) О. А. Терентьевым произведен теоретический анализ пульсационного движения флокул в потоке волокнистой суспензии и расчет оптимальных параметров работы отсасывающей части бумагоделательной машины.

Проекты, выполненные по пятому направлению, представлены статьями П. П. Тиранова (об улучшении реологических свойств пасты сульфатного лигнина), Е. В. Новожилова (о локальной очистке сточных вод сульфит-целлюлозного производства с одновременным производством кормовых дрожжей), А. И. Киприанова и А. Г. Апушкинского (об использовании жидких продуктов пиролиза древесины).

Решению проблемы оценки качества очистки выбросов в атмосферу посвящена статья Л. Н. Григорьева, подготовленная в ходе работ по шестому направлению.

В предлагаемый Вашему вниманию выпуск «Лесного журнала» включены далеко не все статьи, поступившие в редакцию. В 5—6 номере журнала будет продолжена публикация работ, выполненных в рамках ГНТП России «Комплексное использование и воспроизводство древесного сырья».

УДК 630\*905.2

*И. И. ГУСЕВ, О. А. НЕВОЛИН, С. В. ТРЕТЬЯКОВ*



Гусев Иван Иванович родился в 1930 г., окончил Архангельский лесотехнический институт, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой лесной таксации и лесоустройства Архангельского государственного технического университета, чл.-кор. РАЕН. Имеет 140 печатных трудов в области исследования закономерностей формирования, роста, продуктивности и рационального использования таежных лесов.



Неволин Олег Алексеевич родился в 1929 г., окончил в 1952 г. Архангельский лесотехнический институт, заслуженный лесовод России, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесной таксации и лесоустройства Архангельского государственного технического университета. Имеет 98 печатных трудов в области изучения высокопродуктивных лесов Севера и организации хозяйства в них, истории лесного хозяйства и лесоустройства.



Третьяков Сергей Васильевич родился в 1956 г., окончил в 1978 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесной таксации и лесоустройства Архангельского государственного технического университета. Имеет 16 печатных трудов в области изучения закономерностей роста и продуктивности среднетаежных сосново-еловых лесов.

## ЛЕСА И ЛЕСИСТОСТЬ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Дана оценка современного состояния лесных ресурсов и их размещения на территории Архангельской области в результате многолетней хозяйственной деятельности лесопромышленного комплекса. Рассмотрена динамика лесистости области в течение длительного периода и ее современное состояние.

Estimation of the present condition of forest resources on the territory of the Arkhangelsk Region and their location as a result of long economic activities of forest industrial complex has been given. Dynamics of forestation degree of the Region during a long period and its present state is considered.

Архангельская область является крупным поставщиком высококачественной древесины на внутренний рынок и на экспорт. На лесной

комплекс приходится около половины экономического потенциала области. Лесопильная и целлюлозно-бумажная промышленность с дорогостоящим импортным оборудованием рассчитана на огромное количество древесного сырья, однако потребности в древесине удовлетворяются лишь на 65...70 %. Между тем наблюдаются большие потери древесины при заготовке и транспортировке, нерациональное ее использование [10]. К дефициту древесного сырья привело и нарушение в течение многих лет основ лесопользования, переруб расчетной лесосеки, неравномерное использование лесов по отдельным административным районам области. Восполнение дефицита за счет традиционно освоенных лесов привело к изменению структуры лесов, сокращению спелых древостоев на большой территории, что приносит большой экономический и экологический ущерб. Введение в действие Основ лесного законодательства Российской Федерации позволит контролирующим органам сдерживать перерубы, так как в них записано, что «заготовка древесины в размерах, превышающих расчетную лесосеку, запрещается» [11, ст. 44].

Общая площадь лесов государственного значения, находящаяся в ведении Архангельского управления лесами, составляет 25,6 млн га с запасом древесины 2,0 млрд м<sup>3</sup>, в том числе спелых и перестойных 1,6 млрд м<sup>3</sup>. К лесным ресурсам, являющимся основой хозяйственной деятельности лесопромышленного комплекса, следует относить запасы древесины только в спелых и перестойных насаждениях III группы, составляющие 1,25 млрд м<sup>3</sup>.

По преобладанию пород покрытая лесом площадь распределяется следующим образом: сосняки — 27,2, ельники — 58,3, лиственничники — 0,3, березняки — 13,0 и осинники — 1,2 %. Лиственница, как правило, не образует чистых насаждений и растет в смеси с другими породами. Береза и осина активно заселяют места сплошных рубок и в основном как примесь к хвойным. Преимущественное распространение имеют хвойно-лиственные насаждения (около 80 %).

Продуктивность лесов низкая. Средний класс бонитета с преобладанием сосны — IV,8, ели — IV,7, лиственницы — IV,3, березы — IV,3 и осины — III,4. Средние запасы древесины на 1 га спелых и перестойных сосняков — 116, ельников — 146, лиственничников — 150, березняков — 104 и осинников — 181 м<sup>3</sup>. Средний годичный прирост древесины в хвойных лесах составляет 1,0, в лиственных — 1,6 м<sup>3</sup> на 1 га. На его размер оказывает влияние довольно высокий возраст хвойных лесов и заболоченность. Кроме того, лучшие хвойные леса, в первую очередь сосняки, издавна привлекавшие внимание отечественных и иностранных лесопромышленников, интенсивно вырубались и продолжают вырубаться. А ведь запасы отдельных насаждений сосны, ели и лиственницы достигали 300...500 и нередко 700 м<sup>3</sup> на 1 га [1, 4, 5, 8, 9, 13].

Лимитирующим фактором роста таежных лесов является температура воздуха и почвы. Однако сами леса, особенно темнохвойные, трансформируют климатические условия в сторону, благоприятную для своего произрастания [6, 15]. Под пологом лесов наблюдаются постоянная высокая влажность воздуха и верхних горизонтов почвы, умеренные экстремальные температуры воздуха.

Низкая продуктивность современных лесов Архангельской области обусловлена не только вырубкой высокопродуктивных насаждений за последние 60 лет и особенностями климата. В прошлом почти все спелые древостои были пройдены бессистемными, нередко интенсивными рубками на прииск в целях добычи крупномерных пиловочных бревен. Такие рубки порою приводили к расстройству древостоев, снижению их продуктивности. За многие годы эти леса так и не восстановились. Низкое качество лесных культур и уходов за молодняками, массовая долговременная смена пород существенно снижают продуктив-

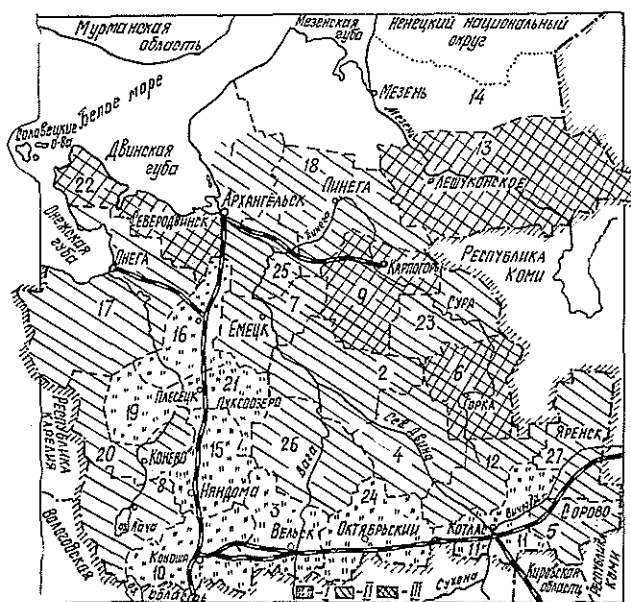
Таблица 1

Лесхоз	Среднегодовое накопление запаса древесины, м <sup>3</sup> на 1 га, в насаждениях					
	хвойных			лиственных		
	Воз- мож- ное	Дей- стви- тель- ное	% от воз- мож- ного	Воз- мож- ное	Дей- стви- тель- ное	% от воз- мож- ного
Архангельский	1,8	0,9	50	1,7	0,9	53
Березниковский	2,0	1,0	50	2,4	1,1	46
Вельский	2,9	1,2	41	3,3	1,9	58
Верхнетоемский	2,4	1,2	50	2,9	2,0	69
Вилегодский	2,9	1,5	52	3,6	2,2	61
Выйский	1,7	0,9	53	2,9	1,8	62
Емецкий	1,8	0,8	44	2,4	1,1	46
Каргопольский	2,4	1,0	43	2,8	2,8	100
Каргогорский	1,7	0,9	53	2,2	1,4	64
Коношский	2,9	1,2	41	3,3	2,4	73
Котласский	2,5	1,5	60	2,7	2,1	78
Красноборский	2,2	1,1	50	2,5	1,5	60
Лешуконский	1,8	0,9	50	1,8	0,9	50
Няндомский	2,5	1,1	44	2,4	1,7	71
Обозерский	2,5	1,0	40	2,2	1,7	77
Онежский	1,8	0,9	50	2,2	0,9	41
Пинежский	1,7	0,7	41	2,2	0,9	41
Плесецкий	2,8	1,1	39	3,1	2,0	64
Приозерный	2,6	1,2	53	2,5	1,9	76
Пуксоозерский	2,9	1,2	41	2,4	1,9	79
Северодвинский	1,8	0,9	50	2,0	1,1	55
Сурский	1,9	0,9	47	2,2	1,0	45
Устьянский	2,9	1,4	48	2,3	2,1	91
Холмогорский	1,8	0,8	44	1,4	1,2	86
Шенкурский	2,5	1,2	48	2,1	2,1	100
Яренский	2,4	0,9	38	2,3	1,5	66
Итого	2,0	1,0	50	2,5	1,6	64

ность архангельских лесов. Для большинства современных лесов она значительно ниже возможной, обусловленной климатом и потенциальной производительностью лесных почв. Нами выполнено сопоставление действительного и возможного среднегодового накопления запаса древесины на 1 га в лесах III группы по отдельным лесхозам Архангельской области (табл. 1). Продуктивность хвойных насаждений в целом по области едва достигает половины от возможной. Действительный среднегодовой прирост древесины от возможного в хвойных лесах колеблется от 38 до 60 %, в насаждениях с преобладанием лиственных пород от 41 до 100 % (в среднем 64 %), т. е. несколько больше, чем для хвойных лесов.

Эксплуатационные лесные ресурсы по территории области размещены неравномерно. Чтобы представить характер размещения и концентрации лесных ресурсов, мы вычисляли по лесхозам эксплуатационный запас, приходящийся на 1 га лесной площади. Этот показатель использовали для оценки концентрации эксплуатационных запасов. Выделены три группы запасов, м<sup>3</sup> на 1 га: до 40 — крайне низкий; 50... 100 — низкий уровень концентрации; свыше 100 — эксплуатационные запасы не истощены, уровень концентрации приближается к естественному. Исследования показали, что на 23,3 % лесной площади III группы лесов ресурсы практически исчерпаны. Сюда относятся лесхозы, примыкающие к железной дороге Архангельск — Коноша — Котлас: Обозерский, Плесецкий, Пуксоозерский, Няндомский, Коношский, Вельский, Устьянский, Котласский. На 54,2 % лесной площади уровень

концентрации эксплуатационных запасов низкий (Архангельский, Березниковский, Верхнетоемский, Вилегодский, Емецкий, Каргопольский, Красноборский, Онежский, Пинежский, Приозерный, Сурский, Холмогорский, Шенкурский, Яренский лесхозы). И лишь в четырех лесхозах (Лешуконский, Карпогорский, Сурский, Северодвинский) с лесной площадью, занимающей 22,5 % от лесных земель III группы лесов, уровень концентрации приближается к естественному (см. рисунок). Оценивая лесные ресурсы Архангельской области, необходимо подчеркнуть недопустимость включения лесов I группы в категорию «возможные к эксплуатации». Это можно сделать только за счет биологически перестойных, высоковозрастных древостоев, утративших специальные защитные и санитарно-гигиенические функции. Таких насаждений немного, и их необходимо учесть особо. Основной вклад в это важное дело должно внести лесоустройство.



Состояние лесных ресурсов Архангельской области: I — крайне низкий уровень концентрации эксплуатационных запасов, лесные ресурсы практически исчерпаны; II — низкий уровень концентрации, ресурсы истощены; III — уровень концентрации приближается к естественному, ресурсы еще не истощены; 1 — Архангельский; 2 — Березниковский; 3 — Вельский; 4 — Верхнетоемский; 5 — Вилегодский; 6 — Выйский; 7 — Емецкий; 8 — Каргопольский; 9 — Карпогорский; 10 — Коношский; 11 — Котласский; 12 — Красноборский; 13 — Лешуконский; 14 — Мезенский; 15 — Няндомский; 16 — Обозерский; 17 — Онежский; 18 — Пинежский; 19 — Плесецкий; 20 — Приозерный; 21 — Пуксоозерский; 22 — Северодвинский; 23 — Сурский; 24 — Устьянский; 25 — Холмогорский; 26 — Шенкурский; 27 — Яренский лесхозы

В связи с истощением эксплуатационных лесных ресурсов рассмотрим лесистость Архангельской области. Различают два ее вида: географическую и хозяйственную. Под географической лесистостью понимается процент лесной площади (лесных земель) от общей территории, под хозяйственной — процент покрытой лесом площади от общей территории. Показатель хозяйственной лесистости зависит от ре-

зультатов деятельности лесоводов. При правильном ведении лесного хозяйства, когда лесовозобновление на вырубках, редианах, прогалинах, горях осуществляется своевременно, хозяйственная лесистость практически одинакова с географической и отличается лишь относительной площадью расчетной лесосеки при ведении сплошнолесосечного хозяйства. Большой разрыв между значениями географической и хозяйственной лесистости свидетельствует о неблагополучии в лесных делах и должен служить сигналом бедствия для экологической службы данного района. Поэтому не случайно проблема лесистости всегда волновала общественных деятелей и ученых России. Д. И. Менделеев [7] указывал на особую государственную важность мер по охране лесов и необходимость усиленного лесоразведения в безлесных районах России, полагая работу в этом направлении «однозначной с защитой государства». Это беспокойство ученого, далекого от лесных дел, было связано с катастрофическим истреблением лесов России. По данным М. А. Цветкова [14], с 1700 г. по 1914 г. в результате рубок только в европейской части России исчезло 56 млн га лесов. Это на 5,3 млн га больше лесной площади Финляндии, Швеции и Норвегии, вместе взятых. Лесистость за 214 лет уменьшилась в 1,5 раза.

В то время как на юге и в центральной части России исчезали огромные площади лесов, в северных губерниях все шире разворачивались промышленные рубки лучшей части сосновых и лиственничных лесов. В Архангельской губернии эти леса эксплуатировались вблизи рек Онеги, Северной Двины и ее притоков — Мезени и др. С постройкой в 1898 г. железной дороги Вологда — Архангельск лесозаготовки начались и в прижелезнодорожных лесных массивах.

Отрицательно отражаясь на качестве древостоев, генофонде сосны и лиственницы и резко снижая их продуктивность, экстенсивно-выборочная форма хозяйства, преобладающая во всех лесничествах до 20-х гг. текущего столетия, практически не отразилась на лесистости. По данным М. А. Цветкова [14], в Архангельской губернии за 218-летний период (1696—1914 гг.) географическая лесистость оставалась практически неизменной (61,2...62,6 %), а хозяйственная деятельность не влияла на нее.

Большой интерес представляет изменение лесистости континентальной территории Архангельской области во второй половине текущего столетия (табл. 2).

Из таблицы видно, что за последнее 40-летие географическая лесистость увеличилась на 3,4, хозяйственная — на 8,8 %. Наибольший процент лесистости приходится на 1988 г. В целом лесистость континентальной части области высокая, при этом географическая всегда несколько выше хозяйственной за счет имеющихся не покрытых лесом площадей, в основном вырубок.

По отдельным административным районам области лесистость существенно колеблется: географическая от 41,2 до 90,1 %, хозяйственная от 40,8 до 88,0 % (табл. 3, данные на 01.01.93 г.).

Таблица 2

Год учета	Процент лесистости	
	географической	хозяйственной
1956	—	62,1
1961	70,2	63,8
1966	74,5	67,0
1988	77,5	73,9
1993	73,6	70,9

Таблица 3

Административный район	Общая площадь, тыс. га	Лесистость, %	
		географическая	хозяйственная
Вельский	1006,0	85,8	77,4
Верхнетоемский	2011,9	87,9	85,1
Вилегодский	470,0	84,0	84,0
Виноградовский	1256,1	78,8	76,2
Каргопольский	1013,8	71,7	70,6
Коношский	846,0	87,3	83,8
Котласский	628,2	79,6	79,5
Красноборский	947,2	80,7	79,1
Ленский	1066,5	90,1	87,9
Лешуконский	2778,4	76,1	74,6
Мезенский	2715,8	41,2	40,8
Няндомский	809,3	83,4	72,4
Онежский	2372,9	62,3	53,8
Пинежский	3060,9	80,8	78,0
Плесецкий	2750,3	76,0	72,0
Приморский	2155,8	62,1	61,5
Соловецкий	28,8	65,1	65,1
Устьянский	1072,4	88,0	88,0
Холмогорский	1681,3	71,4	65,8
Шенкурский	1129,8	75,7	72,3
Итого	29 801,4	73,9	71,2

Как видим, самая низкая лесистость в Мезенском, самая высокая — в Устьянском районе.

На территории 13 административных районов, занимающих 65 % (19 245,9 тыс. га) континентальной части Архангельской области, хозяйственная лесистость нормальная (60,1... 80,0 %), причем в десяти из них (15 380,0 тыс. га или 52 %) выше 70 %; низкая — в крупных Мезенском и Онежском районах общей площадью 5088,7 тыс. га или 17 %.

Определение лесистости по административным районам и тем более по области в целом заметно сглаживает результат и в какой-то мере искажает действительность. Например, в Плесецком районе хозяйственная лесистость в Плесецком лесхозе составляет 35,6, Обозерском 70,4, Приозерном 72,8 и Пуксоозерском 80,0 %. Аналогичная картина наблюдается в Приморском районе, где два лесхоза имеют хозяйственную лесистость 46,2 (Северодвинский) и 63,9 % (Архангельский). Исторически низкая хозяйственная лесистость имеет место в Мезенском районе. В Онежском районе она также низкая в результате хозяйственной деятельности. Географическая лесистость по административным районам на 38 % территории высокая ( $\geq 80,1$  %) на 53 % — нормальная (60,1... 80,0 %), на 9 % — низкая (40,1... 60,0 %). Хозяйственная лесистость области по этим же грациям составляет соответственно 18, 65 и 17 %.

Цифры лесистости Архангельской области не могут успокаивать хозяйственников и экологов. Огромное значение для экономики области и сохранения нормальной экологической обстановки имеют состав и возрастная структура лесов. Породный состав, возраст, продуктивность и другие показатели лесов, равномерность их размещения по территории существенно влияют на интенсивность трансформации лесом экологических факторов существования биогеоценозов. Заметим, что лесистость области сохраняется на относительно стабильном уровне за счет смены хвойных пород лиственными, которые имеют существенную особенность трансформации экологических факторов существования лесных биогеоценозов, что необходимо учитывать при оценке экологической

Таблица 4

Преобладающая порода	Доля насаждений, %	
	всего	спелых и перестойных
Сосна	27,2	21,8
Ель	58,3	74,1
Лиственница	0,3	0,4
Береза	13,0	2,9
Осина	1,2	0,8
Итого	100	100

роли современных лесов. Состав лесов Архангельской области по породам показан в табл. 4.

Как видим, лиственные насаждения в гослесфонде составляют 14,2 %. Однако реальная их площадь значительно больше, особенно молодых и средневозрастных. Дело в том, что лесоустроители, работая по инструкциям 1964 и 1986 гг. [2, 3], хвойно-лиственные молодняки и средневозрастные насаждения при участии хвойных 0,3 и лиственных 0,7 от общего запаса относят к насаждениям с преобладанием сосны или ели. Мероприятия по уходу за ними не дали желаемых результатов, и фактически значительные площади лиственных молодняков числятся по сосновой и еловой хозсекциям. Этим объясняется значительное завышение наличия сосновых и еловых молодняков и средневозрастных насаждений (табл. 5).

Из таблицы видно преобладание спелых и перестойных лесов и небольшая доля приспевающих. Такое соотношение возрастных групп дает повод для составления программ по «омоложению» тайги и значительному увеличению размера пользования [12]. Однако такие программы могут иметь негативные экономические и экологические последствия. Тайга не стареет. В ней идут непрерывные процессы обновления леса на корню, особенно в разновозрастном насаждении, доля

Таблица 5

Преобладающие породы	Молодняки	Насаждения			Итого
		средне-возрастные	приспевающие	спелые и перестойные	
Покрытая лесом площадь					
Хвойные	2992,5	1742,2	539,8	10 712,8	15 987,3
	18,7	10,9	3,4	67,0	100
Лиственные	1309,9	828,0	139,5	383,5	2660,9
	49,3	31,1	5,2	14,4	100
Хвойные и лиственные	4302,4	2570,2	679,3	11 096,3	18 648,2
	23,1	13,8	3,6	59,6	100
Запас					
Хвойные	60,35	217,40	78,11	1 514,48	1 870,34
	3,2	11,6	4,2	81,0	100
Лиственные	13,20	54,38	17,36	48,98	133,92
	10,0	40,8	13,2	36,0	100
Хвойные и лиственные	73,55	271,78	95,47	1 563,46	2 004,26
	3,6	13,6	4,8	78,0	100

Примечание. В числителе — абсолютные показатели (площадь — тыс. га, запас — млн м<sup>3</sup>), в знаменателе — %.



которых значительна [1]. Как справедливо отмечали Н. А. Моисеев и С. К. Лебедев [8], тайга является «той кладовой, запасы которой в девственной обстановке с течением времени не убывают». Поэтому нет опасения потери накопленных в природной обстановке запасов спелой древесины.

Таким образом, многолетняя хозяйственная деятельность лесопромышленного комплекса Архангельской области существенно повлияла на структуру и состояние лесов и экосистему в целом. Наибольшие изменения произошли в распределении лесов по возрастным группам, особенно около железной дороги Архангельск — Коноша — Котлас. Здесь площади спелых лесов сократились вдвое, а доля молодняков и средневозрастных насаждений значительно увеличилась. Происходит интенсивная смена хвойных лесов на лиственные, особенно на юге и юго-востоке области. В перспективе следует ожидать уменьшения запасов хвойных лесов, особенно сосновых. Однако лесистость области остается практически без изменения в течение длительного периода, но доля лиственных пород возрастает. Необходимость сохранения и приумножения северных лесов, улучшение их породного состава и повышение продуктивности — важные задачи лесного комплекса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Гусев И. И. Продуктивность ельников Севера.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1978.— 232 с. [2]. Инструкция по устройству государственного лесного фонда СССР. Ч. 1. Полевые работы.— М., 1964 г.— 128 с. [3]. Инструкция по проведению лесоустройства в едином государственном лесном фонде СССР / Гос. ком. лесн. хозяйства СССР.— М., 1986.— 135 с. [4]. Калинин В. И. Лиственница Европейского Севера.— М.: Лесн. пром-сть, 1965.— 92 с. [5]. Левин В. И. Сосняки Европейского Севера.— М.: Лесн. пром-сть, 1966.— 152 с. [6]. Мелехов И. С. Лесоведение: Учеб. для вузов.— М.: Лесн. пром-сть, 1980.— 408 с. [7]. Менделеев Д. И. Работы по сельскому хозяйству и лесоводству.— М.: АН СССР, 1954.— 620 с. [8]. Моисеев Н. А., Лебедев С. К. Очередные вопросы лесопользования.— Архангельск, 1960.— 77 с. [9]. Неволин О. А. Основы хозяйства в высокопродуктивных сосняках Севера.— Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1969.— 103 с. [10]. Неиспользуемые ресурсы древесины на лесосеках Европейского Севера / И. И. Гусев, А. А. Бахтин, Л. Ф. Ипатов и др. // Актуальные проблемы рационального использования природных и энергетических ресурсов Европейского Севера: Сб. тр. АЛТИ.— Архангельск: АЛТИ, 1994.— С. 22—28. [11]. Основы лесного законодательства Российской Федерации.— М.: Экоинформ, 1993.— 64 с. [12]. Сяницын С. Г. Эффективнее использовать леса России при решении экологических проблем мирового сообщества // Лесн. хоз-во, 1993.— № 5.— С. 2—7. [13]. Тюрин А. В. Еловые насаждения в Северной и Северо-Восточной России // Тр. по лесн. опытному делу в России.— 1916.— Вып. 58.— 79 с. [14]. Цветков М. А. Изменение лесистости Европейской России с конца XVII столетия в 1914 году.— М.: Изд-во АН СССР, 1957.— 214 с. [15]. Чертовской В. Г. Некоторые вопросы экологии таежных лесов // Экология таежных лесов: Сб. тр. АИЛНЛХ.— Архангельск, 1978.— С. 5—10.

Поступила 1 июня 1994 г.

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

630\*378.2

*В. Я. ХАРИТОНОВ, П. Н. ГАГАРИН, И. И. ДОЛГОВА*



Харитонов Виктор Яковлевич родился в 1929 г., окончил в 1952 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водного транспорта леса и гидравлики Архангельского государственного технического университета, чл.-кор РАЕН. Имеет 135 печатных трудов в области водного транспорта леса, экологии водных объектов, гидродинамики.



Гагарин Павел Николаевич родился в 1959 г., окончил в 1983 г. Архангельский лесотехнический институт, ассистент кафедры теоретической механики Архангельского государственного технического университета. Имеет 13 печатных трудов в области водного транспорта леса, гидромеханики и намораживания ледяных переправ.



Долгова Ирина Ивановна родилась в 1958 г., окончила в 1980 г. Архангельский лесотехнический институт, ассистент кафедры водного транспорта леса и гидравлики Архангельского государственного технического университета. Имеет 5 печатных работ в области водного транспорта леса, экологии водных объектов.

**ЛЕСОТРАНСПОРТНАЯ ЕДИНИЦА  
ДЛЯ ПЕРВОНАЧАЛЬНОГО ЛЕСОСПЛАВА**

Рассмотрена конструкция лесотранспортной единицы, пригодной для трансформирования из плоской в цилиндрическую путем сворачивания в рулон-пучок с помощью обвязки из синтетического талка. Получены аналитические зависимости для расчета усилий в обвязках и мощности, затрачиваемой в процессе скручивания.

The construction of forest transport unit suitable for transforming from flat to cylinder by rolling it up as a bundle-roll by means of synthetic rigging has been considered. Analytical functions for calculation of tying twisting strength and spent capacity are derived.

В последние годы существенно меняется структура водного транспорта леса, уменьшается доля молевого лесосплава. Возникает необходимость поиска таких конструкций лесотранспортных единиц, которые удовлетворяли бы сложным гидрологическим условиям на малых и средних реках при экологически безопасном лесосплаве.

На кафедре водного транспорта леса и гидравлики Архангельского государственного технического университета разработана лесотранспортная единица, которая может быть переформирована из плоской в цилиндрическую и обратно. На верхнем участке реки, где глубины лесосплавного хода небольшие, плоские единицы формируют в секции для буксировки их катером до пункта переформировки с большими глубинами. Здесь плоские единицы преобразуют в пучки, из которых формируют секции и плоты для дальнейшей буксировки.

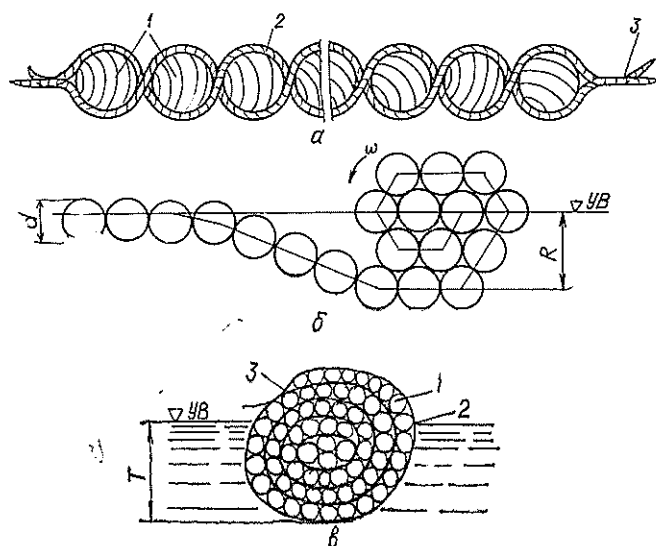


Рис. 1. Лесотранспортная единица: а — плоская единица; б — расчетная схема; в — пучок из плоской единицы; 1 — бревна; 2 — синтетический канат-обвязка; 3 — узел

Плоскую транспортную единицу (рис. 1, а) формируют на берегу или на воде из бревен или хлыстов вразнокомелицу. Их обвязывают по типу «восьмерка» в двух местах по длине плетеными полыми полипропиленовыми канатами. Использование таких канатов позволяет сплачивать без подплава лиственные и тонкомерные хвойные лесоматериалы, так как роль подплава выполняет канат относительной плотностью 0,9. Канаты легко соединяются без дополнительных такелажных элементов путем введения конца одного каната внутрь другого на любом участке его длины (узел 3). Между собой единицы соединяют свободными концами таким же способом.

При преобразовании в пучок плоскую единицу сворачивают на воде в рулон (рис. 1, б, в), используя те же обвязочные канаты. На рис. 2 показан пучок заданной осадки  $T$ , плавающий на воде.

Параметры устройства для скручивания плоской ленты бревен определяются, главным образом, возникающими усилиями и затрачиваемой мощностью. Ниже рассматриваются эти характеристики в предположении, что лента сворачивается вокруг крайнего бревна при отсутствии течения, без учета архимедовых сил. При наличии течения практически целесообразно сворачивание начинать с нижнего (по течению)

конца единицы. Энергетические затраты и усилия в этом случае меньше, чем при отсутствии течения.

Из расчетной схемы (рис. 1, б) следует, что радиус намотанной ленты  $R$  — расстояние между центрами первого и нижнего бревен — определяется по формуле

$$R = \frac{ad}{2\pi} + \frac{d}{2}, \quad (1)$$

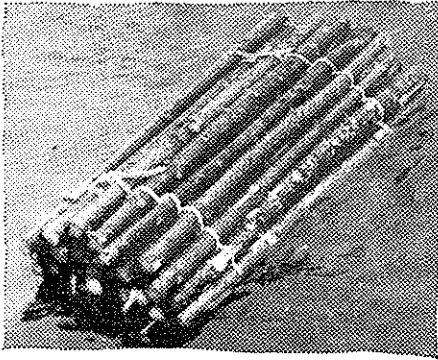


Рис. 2. Модель пучка, сформированного из плоской единицы

где  $d$  — средний диаметр бревен;  
 $\alpha$  — текущий угол поворота захватного устройства после начала сворачивания, рад.

Отсюда находим

$$\alpha = \pi \left( \frac{2R}{d} - 1 \right). \quad (2)$$

Элементарная длина сворачиваемой ленты бревен

$$dL = R d\alpha$$

или, с учетом (2),

$$dL = \frac{2\pi}{d} R dR.$$

Полная текущая длина ленты в пучке

$$L = \frac{2\pi}{d} \int_0^{\pi} R dR = \frac{\pi R_n^2}{d}, \quad (3)$$

отсюда

$$R_n = \sqrt{\frac{Ld}{\pi}}. \quad (4)$$

Здесь  $R_n$  — радиус цилиндрического пучка, в который свернута лента бревен длиной  $L$ .

Движение ленты по воде в процессе ее сворачивания в рулон, даже при постоянной угловой скорости вращения, ускоренное, так как радиус рулона увеличивается. Поэтому взаимодействие поперечной щети бревен с водой носит нестационарный характер, и дифференциальное уравнение движения ленты в воде имеет вид

$$(L_0 - L) m (1 + n) \frac{dv}{dt} = F - R_x, \quad (5)$$

где  $L_0$  — полная длина ленты, сворачиваемой в пучок;  
 $m$  — масса бревен в 1 м длины ленты;  
 $n$  — коэффициент нестационарности;

- $v$  — скорость движения ленты относительно воды;  
 $F$  — мгновенная суммарная сила натяжения в обвязочных канатах ленты в точках их набегания на пучок;  
 $R_x$  — сила сопротивления оставшейся несвернутой поперечной щети движению в воде при мгновенной скорости  $v$ ,

$$R_x = C_x \rho b (L_0 - L) \frac{v^2}{2}; \quad (6)$$

- $C_x$  — коэффициент гидродинамического сопротивления поперечной щети в условиях равномерного движения;  
 $\rho$  — плотность воды;  
 $b$  — ширина щети (длина бревен).

По исследованиям Б. Я. Корехова [1], без больших погрешностей можно принимать для поперечной щети из бревен и хлыстов  $n = 1,0$ , а  $C_x = 2,0$ .

Скорость движения ленты

$$v = \omega R_n,$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения рулона из бревен.  
 Используя (4), находим

$$\dot{v} = \omega L^{0,5} \left( \frac{d}{\pi} \right)^{0,5}, \quad (7)$$

тогда

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dL} v = \frac{d}{2\pi} \omega^2. \quad (8)$$

Подставляя в уравнение (5) выражения (6) — (8), получаем формулу для расчета силы натяжения в канатах ленты:

$$F = \frac{\omega^2 d}{2\pi} (L_0 - L) m (1 + n) + (L_0 L + L^2) C_x \rho b. \quad (9)$$

Мощность, затрачиваемая на сворачивание ленты в рулон, определяется преимущественно этой силой и описывается формулой

$$N = F \omega R_n,$$

или

$$N = F \omega \sqrt{\frac{Ld}{\pi}},$$

или

$$N = L^{0,5} \frac{\omega^3}{2} \left( \frac{d}{\pi} \right)^{1,5} [(L_0 - L) m (1 + n) + (L_0 L + L^2) C_x \rho b]. \quad (10)$$

Для проверки запаса прочности канатов и выбора расчетной скорости сворачивания ленты важно знать условие возникновения экстремальных усилий в канатах. Найдем это условие согласно  $\partial F / \partial L = 0$ .

Преобразуя формулу (9), получаем

$$L_0 - 2L = \frac{m(1+n)}{C_x \rho b}$$

или

$$L = L_0 \left( 0,5 - \frac{m(1+n)}{2L_0 C_x \rho b} \right). \quad (11)$$

Величина

$$\frac{m(1+n)}{2L_0 C_x \rho b} \ll 0,5,$$

поэтому можно принять условие наибольшей силы натяжения канатов

$$L = 0,5L_0.$$

Тогда расчетная формула примет вид

$$F_{\max} = \frac{L_0 d \omega^2}{4\pi} [m(1+n) - 0,5L_0 C_x \rho b] \quad (12)$$

или с учетом рекомендаций [1]

$$F_{\max} = \frac{L_0 d \omega^2}{4\pi} (2m - L_0 \rho b). \quad (13)$$

Для подбора привода сворачивающего устройства необходимо знать экстремальное значение затрачиваемой мощности.

Преобразуя выражение (10), согласно  $\frac{\partial N}{\partial L} = 0$  находим

$$\frac{3L_0 L - 5L^2}{3L - L_0} = \frac{m(1+n)}{L_0^2 C_x \rho b}. \quad (14)$$

Без большой погрешности правую часть соотношения (14) можно приравнять нулю, тогда условие  $N_{\max}$  будет соблюдаться при  $L = 3/5 L_0$ .

Расчетная формула для определения мощности привода имеет вид

$$N_{\max} = 0,2L_0 \omega^3 \sqrt{\frac{0,6L_0 d^3}{\pi^3}} [m(1+n) + 0,6C_x \rho b L_0] \quad (15)$$

или с учетом рекомендаций [1]

$$N_{\max} = 0,2L_0 \omega^3 \sqrt{\frac{0,6L_0 d^3}{\pi^3}} (2m + 1,2L_0 \rho b). \quad (16)$$

Полученные зависимости (9) и (10) позволяют проанализировать с помощью ЭВМ изменение усилий в канатах-обвязках лесосплавной транспортной единицы и потребляемой мощности в процессе преобразования ее формы из плоской в цилиндрическую, а (13) и (16) — рассчитать соответственно максимальные усилия в обвязках и мощность привода.

Применение рассмотренной здесь лесосплавной единицы может служить, на наш взгляд, одним из вариантов решения проблемы лесотранспорта по малым и средним рекам по экологически безвредной технологии, исключаяющей потери лесоматериалов. На кафедре разработаны конструкции плотов из таких плоских единиц и из рулонов-пучков с использованием синтетического такелажа. Прорабатываются варианты устройств для механизированной сплотки плоских единиц, сворачивания их в пучок и освобождения от канатов-обвязок в пунктах приплава.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Корехов Б. Я. Исследование некоторых вопросов сортировки леса на воде: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Л.; 1972.— 17 с.

Поступила 11 мая 1994 г.

УДК 630\*378.2

В. Я. ХАРИТОНОВ, И. И. ДОЛГОВА

Архангельский государственный технический университет

**ВНУТРЕННИЙ ИСКУССТВЕННЫЙ ПОДПЛАВ  
ДЛЯ ПУЧКОВ НЕДОСТАТОЧНОЙ ПЛАВУЧЕСТИ**

Рассмотрена конструкция лесосплавного пучка с искусственным подплавом в виде многооборотных модулей. Определены параметры внутреннего подплава для обеспечения плавучести пучков из лиственных сортиментов.

The construction of floatage bundle with artificial arrangement in a form of multiple modules has been considered. Parameters of the internal arrangement to ensure hardwood bundles floatability are determined.

Прекращение молевого лесосплава на большинстве рек России обострило проблему доставки леса потребителю, особенно в лесоизбыточных регионах со слабо развитой сетью путей сухопутного транспорта. В то же время плотовой лесосплав с береговой сплоткой по многим рекам в весенний период позволяет вовлечь в эксплуатацию лесные массивы с лиственницей, лиственными и другими породами, при молевом сплаве которых наблюдались большие потери от утопа.

Наиболее технологичной транспортной единицей, являющейся неделимой частью плота, признан пучок в форме эллиптического цилиндра. Его формирование (сплотка) легко поддается механизации, объем, а следовательно, и осадку просто варьировать, прочность удовлетворительная при соблюдении технических требований. Пучок удобен и в качестве так называемого единого транспортного пакета, в котором группа круглых лесоматериалов доставляется потребителю при возможных перегрузках в пути на всех видах лесотранспорта. Одним из положительных качеств пучка является возможность сплотки бревен с разным запасом плавучести, что обеспечивает в целом его достаточную плавучесть.

В тех случаях, когда нельзя применить естественный подплав (нет бревен нужных пород, или они не нужны потребителю), используют искусственный, чаще многооборотный.

Предложено много конструкций искусственных подплавов. В нашей работе [4] обоснованы параметры подплава из полимерных материалов, расположенного по периметру пучка. Чаще подплав размещают внутри пучка. Наибольшее распространение получил пневмоподплав ЦЛС-135 [3] в виде надувной емкости из прорезиненного капрона, внутри которой размещена резиновая камера. Недостаток всех надувных подплавов — потеря герметичности, в том числе от проколов.

В Архангельском государственном техническом университете разработана конструкция лесосплавного пучка с искусственным подплавом в виде многооборотных модулей, изготовленных из полистиролового пенопласта (рис. 1). По центру вдоль оси модуль армирован капроновым канатом. Свободные концы каната используют для соединения модулей между собой и крепления их к бревнам в пучке (рис. 2).

Подплавы в пучок укладывают в процессе формирования его в сплотноном устройстве (лесонакопителе). Соединительные канаты

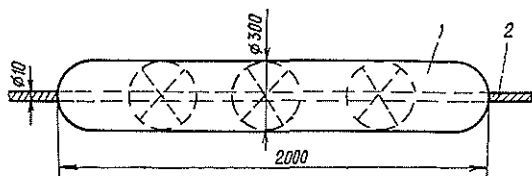


Рис. 1. Модульный подплав из армированного пенополистирола: 1 — модуль подплава; 2 — капроновый канат армирующий

должны быть «засорены» среди бревен, чтобы предотвратить всплытие подплавов в случае ослабления обвязок пучка при буксировке и отстое плотов. Число подплавов в пучке зависит от его объема и веса бревен.

Для всех типов модулей внутреннего подплава важно установить место их расположения в поперечном сечении пучка из условия, что внешнее давление на них будет наименьшим. Это необходимо для увеличения сроков службы и сохранности модулей.

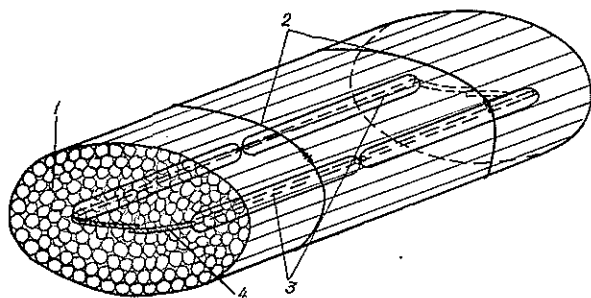


Рис. 2. Лесосплавной пучок с внутренним подплавом: 1 — бревна; 2 — пучковые обвязки; 3 — модуль внутреннего подплава; 4 — капроновый канат

На подплав внутри пучка действуют сила тяжести расположенных выше него бревен и сила распора, возникающая в пучке от усилий в обвязке (рис. 3). С достаточной для практики точностью считаем, что давление от бревен подчиняется гидростатическому закону при отсутствии трения. В вертикальном диаметральной сечении пучка это давление распределяется по закону

$$p = \rho_6 g (H/2 - y), \quad (1)$$

где  $p$  — давление бревен;

$\rho_6$  — плотность бревен;

$H$  — высота пучка;

$y$  — координата произвольного сечения пучка.

Для определения давления на подплав от усилий в обвязке рассмотрим ее как параболическую гибкую нить, на которую действует равномерно распределенная нагрузка  $q$  (рис. 3). Выделим элементарный участок длины нити  $dS$  с центральным углом  $d\varphi$  и радиусом  $r$ .

Спроектируем на ось  $x$  все силы, действующие на выделенный элементарный участок:

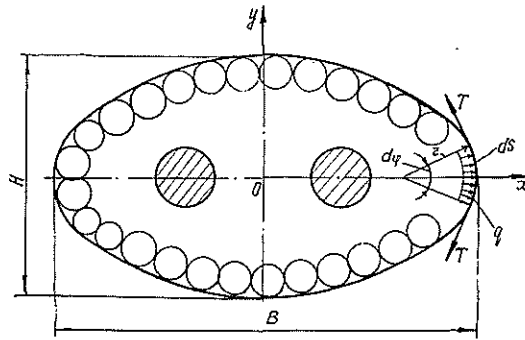
$$- 2T \sin \frac{d\varphi}{2} + qdS = 0, \quad (2)$$

где  $T$  — усилие в обвязках, приходящееся на единицу длины пучка.

Так как  $dS = rd\varphi$  и при малых углах  $\sin \frac{d\varphi}{2} = \frac{d\varphi}{2}$ , то из (2) можно выразить  $T$ , если известна  $q$ :



Рис. 3. Расчетная схема



$$T = qr, \tag{3}$$

или выразить  $q$ , если известно  $T$ :

$$q = T/r. \tag{4}$$

Величину  $T$  по рекомендации [2] можно определить по формуле

$$T = \frac{0.15}{a/b - 0.83} \rho_6 g \pi a b k, \tag{5}$$

где  $k$  — коэффициент полнодревесности пучка [3].

Очевидно, что в целях предохранения подплавов от разрушения целесообразно их располагать в таких точках поперечного сечения пучка, где суммарное давление

$$p_{\text{сум}} = p + q = f(x) \tag{6}$$

минимально.

Полагая, что подплавы обычно помещают в средней части пучка по его высоте ( $y = 0$ ), находим координату  $x$  по условию

$$f'(x) = 0. \tag{7}$$

С учетом (1) и (4) имеем

$$f(x) = 1/2 \rho_6 g H - \rho_6 g y + T/r. \tag{8}$$

Форма периметра поперечного сечения пучка близка к эллипсу, с полуосями  $a = B/2$ ,  $b = H/2$  (рис. 3). Следовательно,

$$y = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2}$$

и

$$1/r = \frac{d^2 y}{dx^2}.$$

Для конкретного пучка значения  $\rho_6$ ,  $g$ ,  $T$ ,  $a$ ,  $b$  в формуле (8) постоянны. Поэтому после двойного дифференцирования и преобразований получаем

$$|r| \approx \frac{(a^2 - x^2) \sqrt{a^2 - x^2}}{ab}. \tag{9}$$

Таким образом, имеем

$$f(x) = 1/2 \rho_6 g H - \rho_6 g \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} + \frac{abT}{(a^2 - x^2) \sqrt{a^2 - x^2}}, \tag{10}$$

следовательно,

$$f'(x) = \frac{3aT}{(a^2 - x^2)^2} - \frac{\rho_6 g}{a} = 0,$$

отсюда

$$x_{1,2} = \pm a \sqrt{1 - \sqrt{\frac{3T}{\rho_6 g a^2}}}. \quad (11)$$

Анализ формул (1), (4) и (11) показывает, что подплав следует располагать попарно, симметрично вертикальной диаметральной плоскости пучка, в точках с координатами  $y = 0$  и  $x$  по формуле (11), где модули будут воспринимать наименьшее давление.

Например, при  $a = 1,50$  м,  $b = 0,75$  м (коэффициент формы пучка  $a/b = 2$ )  $\rho_6 = 900$  кг/м<sup>3</sup>,  $k = 0,65$  расчетом получим  $T = 2600$  Н/м,  $x_{1/2} \pm 0,92$  м,  $r = 1,47$  м,  $y = 0,59$  м.

Давление от силы тяжести бревен

$$p = 900 \cdot 9,81 \cdot 0,59 = 5209 \text{ Па};$$

от усилия в обвязках

$$q = 2600/1,47 = 1769 \text{ Па};$$

суммарное

$$p_{\text{сум}} = 6978 \text{ Па}.$$

Предел прочности на сжатие пенополистирола плотностью  $\rho_n = 60$  кг/м<sup>3</sup> [1] [ $\sigma_{\text{сж}}$ ] = 300 кПа, что существенно больше расчетного. В центре пучка ( $y = b = 0,75$  м;  $x = 0$ ;  $r = a/b = 3$  м)  $p = 6622$  Па,  $q = 867$  Па,  $p_{\text{сум}} = 7489$  Па, что больше оптимального, но меньше допустимого.

Таким образом, по условиям прочности пенополистироловый подплав, армированный капроновым канатом, вполне удовлетворяет требованиям прочности.

В целях улучшения технологичности при закладке подплавов-модулей в пучок и их возврате можно принять длину  $l_m = 2$  м, диаметр  $d_m = 0,3$  м. Тогда объем одного модуля

$$V_m = 0,785 \cdot 0,3^2 \cdot 2 = 0,141 \text{ м}^3;$$

вес

$$G_m = 9,81 \cdot 60 \cdot 0,141 = 83 \text{ Н};$$

а сила запаса плавучести

$$P_m = 9,81 (1000 - 60) \cdot 0,141 = 1300 \text{ Н}.$$

Для обеспечения плавучести пучков из лиственных сортиментов достаточно в центральную часть пучка уложить два-четыре модуля в зависимости от объема лесоматериалов, плотности древесины и продолжительности пребывания ее в воде. Для пучков небольших объемов достаточно укладывать один модуль.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Пенопласты // БСЭ.— М.: Сов. энциклопедия, 1975.— Т. 19.— С. 332. [2]. Реутов Ю. М. Расчеты пучков (пакетов круглых лесоматериалов).— М.: Лесн. пром-сть, 1975.— 152 с. [3]. Справочник по водному транспорту леса / В. А. Шербаков и др.— М.: Лесн. пром-сть, 1986.— 384 с. [4]. Харитонов В. Я., Долгова И. И. Искусственный подплав для рек северозападного региона // Лесн. журн.— 1992.— № 4.— С. 79—82.— (Изв. высш. учеб. заведений).

УДК 630\*378.7

А. Н. ВИХАРЕВ

Вихарев Александр Николаевич родился в 1961 г., окончил в 1987 г. Архангельский лесотехнический институт, ассистент кафедры водного транспорта леса и гидравлики Архангельского государственного технического университета. Имеет 12 печатных трудов в области экологии водного транспорта леса и оптимизации берегового анкерного крепления.



### ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АНКЕРНЫХ БЕРЕГОВЫХ ОПОР

Разработана математическая модель для определения максимальных параметров береговых анкерных опор из сборного железобетона. Выполнен расчет для песчаных грунтов.

A mathematical model for determining the optimal parameters of precast reinforced concrete shore anchors has been developed. A calculation for sand ground is carried out.

В связи с уменьшением объемов молевого лесосплава возрастает роль транспортировки леса в плотах, судах, а по малым рекам — нетрадиционными средствами. Это требует строительства новых и реконструкции имеющихся стоянок плотов, причалов, других гидротехнических сооружений лесных рейдов [5], а также строительства надежных береговых опор с держащей силой до 400 кН.

В настоящее время на лесосплаве широко распространены деревянные анкерные опоры. Их недостатками являются: уменьшение держащей силы по мере эксплуатации, а следовательно, и короткий срок службы; большой расход высококачественной древесины; для анкерно-стенчатых опор — отчуждение береговой полосы из-за устройства открытых траншей.

В связи с этим необходимо разработать новые конструкции береговых опор, которые должны быть надежны и удобны при эксплуатации, перевозке и монтаже, иметь длительный срок службы и не нарушать природную среду. Анализ [8] показывает, что самыми экономичными являются анкерные железобетонные береговые опоры. Они имеют наибольшую держащую силу, отнесенную к объему опоры. В эксплуатации, перевозке и монтаже удобны опоры из сборного железобетона [7].

На кафедре водного транспорта леса и гидравлики АГТУ разработана конструкция анкерной береговой опоры из сборного железобетона БОС-7. Она состоит из двух железобетонных балок прямоугольного сечения с бандажом посередине. Канат обносится вокруг балок, пропускается между ними и выводится на поверхность грунта [8].

Балки опоры можно серийно изготавливать на заводе железобетонных изделий, а монтаж на месте применения — осуществлять с помощью трелевочного трактора. Опора полностью заглубляется в грунт, а на поверхность выводится только петля, за которую крепится канат от сооружения. Это не нарушает естественного ландшафта, исключает эрозию берегов и отчуждение береговой полосы из естественного землепользования.

Для повышения эффективности опор типа БОС-7 и расширения географии их применения необходимо разработать конструкции, рассчитанные на держащую силу 100, 200, 300, 400 кН, и определить их оптимальные параметры для каждой группы нагрузок при минимальных затратах на изготовление и монтаж. За критерий оптимальности  $W$  принят минимизируемый обобщенный критерий в виде взвешенной суммы двух частных: минимизации массы опоры и объема земляных работ при ее монтаже. Из условия, что опора выдерживает расчетную нагрузку,

$$W = c_1 W_1 + c_2 W_2. \quad (1)$$

где  $W_1, W_2$  — критерий минимизации соответственно массы опоры и объема земляных работ;

$c_1, c_2$  — вес критериев.

Абсолютные значения коэффициентов  $c_1$  и  $c_2$  пропорциональны важности соответствующего частного критерия с учетом требования их нормативности, т. е.  $|c_1| + |c_2| = 1$ . Значение соответствующего критерия определяют через стоимость производства 1 м<sup>3</sup> железобетона и земляных работ.

Если плотность железобетона рассматривать как постоянную величину, то значение  $W_1$  определяется только габаритами опоры (см. рисунок):

$$W_1 = lbh_i \rightarrow \min, \quad (2)$$

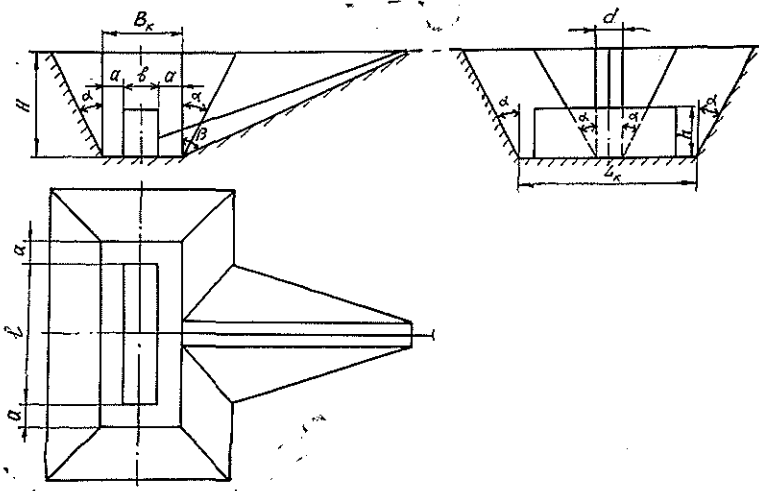
где  $l, b, h$  — длина, ширина и высота балки.

Значение  $W_2$  зависит от объема котлована  $V_k$  и траншеи  $V_{тр}$ :

$$W_2 = V_k + V_{тр} \rightarrow \min. \quad (3)$$

Здесь

$$V_k = B_k L_k H + H^3 \operatorname{tg}^2 \alpha + H^2 \operatorname{tg} \alpha (L_k + B_k), \quad (4)$$



где  $B_k$  — ширина котлована по дну,  $B_k = b + 2a$ ;  
 $L_k$  — длина котлована по дну,  $L_k = l + 2a$ ;  
 $a$  — запас на длину и ширину котлована для обеспечения его за-  
 чистки и безопасности работ;  
 $H$  — глубина заложения опоры;  
 $\alpha$  — угол наклона откосов котлована;

$$V_{\text{тр}} = \frac{H^3}{3} \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha + \frac{\alpha H^2 \operatorname{tg} \beta}{2}, \quad (5)$$

где  $d$  — ширина траншеи;  
 $\beta$  — угол наклона траншеи.

Целевая функция при углах  $\alpha = 45 - \varphi/2$ ,  $\beta = 45 + \varphi/2$  при-  
 мет вид

$$W = c_1 l b h + c_2 \left[ H^3 \left( \operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{1}{3} \right) + H^2 \operatorname{tg} \alpha \left( L_k B_k + \frac{d \operatorname{tg} \beta}{2 \operatorname{tg} \alpha} \right) + B_k L_k H \right], \quad (6)$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения грунта.

Она имеет переменные  $l$ ,  $b$ ,  $h$ ,  $H$  и стремится к нулю при уменьше-  
 нии габаритов как опоры, так и котлована. Оптимальные параметры  
 опоры необходимо определять при наложении на целевую функцию ряда  
 ограничений.

Первую группу составляют ограничения, вызванные требованиями  
 к надежности опоры. Максимальный прогиб анкера  $Y_{\text{max}}$  должен пре-  
 вышать предельно допустимого  $Y_{\text{п.д}}$ . Для конструкций из железобетон-  
 ных элементов, находящихся под воздействием многократно повторяю-  
 щихся нагрузок,  $Y_{\text{п.д}}$  принимается равным  $l/600$  [4]. Максимальный про-  
 гиб анкера как балки, лежащей на упругом основании, определяется по  
 формуле [3]

$$Y_{\text{max}} = \frac{1,09P \left( \frac{kh}{4EI} \right)^{0,25}}{2kh}, \quad (7)$$

где  $P$  — нагрузка, действующая на опору;

$k$  — коэффициент постели;

$E$  — модуль упругости бетона;

$I$  — момент инерции приведенного сечения железобетонного  
 анкера.

При расчете железобетонных конструкций момент инерции приве-  
 денного сечения допускается определять относительно центра тяжести  
 бетонного сечения [4], если общая площадь арматуры не превышает 2 %  
 от площади сечения бетона. В этом случае

$$I = \frac{h(0,5b)^3}{3} + nF_a(0,5b)^2, \quad (8)$$

где  $n$  — отношение модуля упругости арматуры  $E_a$  к модулю упру-  
 гости бетона  $E$ ;

$F_a$  — площадь арматуры.

При равномерном расположении арматуры в растянутой и сжатой  
 зонах для железобетонных опор средний процент армирования равен  
 двум [7]. С учетом формулы (8) получим максимальный прогиб анкера

$$Y_{\text{max}} = \frac{1,09P \left( \frac{6k}{(1 + 0,12n) E b^3} \right)^{0,25}}{2kh}. \quad (9)$$

Действующая нагрузка на опору  $P$  должна быть равна расчетной  
 силе  $P_n$ , определяемой для несвязных грунтов по формуле [6]:

$$P_n = f \gamma g h [h + 2(H - h)] (\lambda_n - \lambda_a) l + \frac{1}{3} \gamma g H^3 \lambda_a \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \varphi, \quad (10)$$

где  $f$  — коэффициент, учитывающий распределение реактивного давления грунта;  
 $\gamma$  — плотность грунта;  
 $g$  — ускорение свободного падения;  
 $\lambda_n, \lambda_a$  — коэффициенты пассивного и активного давления грунта.

Ограничения второй группы вызваны требованиями к удобству в эксплуатации и монтаже опоры.

Глубина заложения опоры  $H$  не должна быть больше предельной глубины заложения  $H_{np} = 2,5$  м. В противном случае резко увеличиваются расходы, связанные с арендой предприятием специальной техники. Возможно также подтопление котлована грунтовыми водами.

Для удобства транспортировки к месту монтажа длина опоры  $l$  не должна превышать предельную  $l_{np} \leq 7$  м.

В целях сохранения естественного состояния грунта на поверхности и предотвращения выворачивания опоры расстояние от верхней ее кромки до дневной поверхности грунта должно составлять  $H - h \geq 1$  м.

Ограничения третьей группы связаны с конечным диапазоном варьирования параметров опоры и дискретностью их задания. В целях типизации элементов их габариты назначают в соответствии с [4]. Высота анкера должна составлять 100, 120, 150, 180, 200, 220, 250 мм (и далее через 50 мм), ширину сечения принимают кратной 50 мм при  $b \leq 600$  мм и кратной 100 мм при  $b > 600$  мм. Длина анкера равна 2000, 2200, 2500 мм и далее через 500 мм.

Таким образом, задача оптимизации параметров опоры описывается следующей математической моделью:

$$\left. \begin{aligned} W &= c_1 l b h + c_2 \left[ H^3 \left( \operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{1}{3} \right) + H^2 \operatorname{tg} \alpha (L_k + B_k + \right. \\ &\quad \left. + \frac{dH^2 \operatorname{tg} \beta}{2 \operatorname{tg} \alpha} \right) + L_k B_k H \Big]; \\ Y_{\max} &\leq Y_{n.д}; \quad P_n = P; \\ H &\leq H_{np}; \quad l \leq l_{np}; \quad H - h \geq 1; \\ H &\geq 0; \quad l \geq 0; \quad b \geq 0; \quad h \geq 0; \\ l &= l_1, l_2, l_3, \dots, l_k; \quad h = h_1, h_2, h_3, \dots, h_n; \\ b &= b_1, b_2, b_3, \dots, b_m. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Поскольку мы имеем задачу нелинейного программирования при наличии нелинейных ограничений в виде неравенств, то для нахождения минимума используем метод множителей Лагранжа [2].

Решим сначала задачу при условии, что  $l, b, h, H$  непрерывны, а ограничения  $l \geq 0, b \geq 0, h \geq 0, H \geq 0, l \leq l_{np}$  не активны, и на первом этапе их не учитываем. Ограничения в виде неравенств можно преобразовать в равенства добавлением к каждому из них неотрицательной ослабляющей переменной  $u_i^2$ , всегда положительной [1]. Задача сводится к минимизации функции при наличии этих ограничений, которые имеют вид:

по прогибу балки

$$u_1^2 + \frac{327 \left( \frac{6k}{(1 + 0.12n) E b^3} \right)^{0.25}}{k h} - l = 0, \quad (12)$$

остальные ограничения

$$u_2^2 - H + h + 1 = 0; \quad (13)$$

$$u_3^2 + H - 2,5 = 0. \quad (14)$$

Для упрощения в формуле (10) обозначим  $k_1 = \frac{1}{3} \gamma g (\lambda_n - \lambda_a)$ ,  $k_2 = \frac{1}{3} \gamma g \lambda_a \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \varphi$ . Тогда

$$k_1 h l (2H - h) + k_2 H^3 - P = 0. \quad (15)$$

Составим функцию Лагранжа:

$$F = c_1 l b h + c_2 \left[ H^3 \left( \operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{1}{3} \right) + H^2 \operatorname{tg} \alpha \left( L_K + B_K + \frac{d \operatorname{tg} \beta}{2 \operatorname{tg} \alpha} \right) + L_K B_K H \right] + \\ + \lambda_1 \left( u_1^2 + \frac{327P \left( \frac{6k}{(1 + 0,12n) E b^3} \right)^{0,25}}{kh} - l \right) + \lambda_2 (u_2^2 - H + h + 1) + \\ + \lambda_3 (u_3^2 + H - 2,5) + \lambda_4 [k_1 h l (2H - h) + k_2 H^3 - P], \quad (16)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$  — множители Лагранжа.

Необходимым условием экстремума этой функции является равенство нулю частных производных по переменным и множителям Лагранжа (последние должны быть положительны):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial l} &= c_1 b h + c_2 (H^2 \operatorname{tg} \alpha b + B_K H) - \lambda_1 + \lambda_4 [k_1 h (2H - h)] = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial b} &= c_1 l h + c_2 (H^2 \operatorname{tg} \alpha l + L_K H) - \lambda_1 \frac{245P \left( \frac{6k}{(1 + 0,12n) E} \right)^{0,25}}{k h b^{1,75}} = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial h} &= c_1 l b - \lambda_1 \frac{327P \left( \frac{6k}{(1 + 0,12n) E b^3} \right)^{0,25}}{k h^2} + \\ &+ \lambda_2 + \lambda_4 [2k_1 l (H - h)] = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial H} &= c_2 \left[ 3H^2 \left( \operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{1}{3} \right) + 2H \operatorname{tg} \alpha \left( L_K + B_K + \frac{d \operatorname{tg} \beta}{2 \operatorname{tg} \alpha} \right) + L_K B_K \right] - \\ &- \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 (2k_1 h l + 3k_2 H^2) = 0; \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \lambda_1} &= u_1^2 + \frac{327P \left( \frac{6k}{(1 + 0,12n) E b^3} \right)^{0,25}}{kh} - l = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda_2} &= u_2^2 - H + h + 1 = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial \lambda_3} = u_3^2 + H - 2,5 = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda_4} &= k_1 h l (2H - h) + k_2 H^3 - P = 0; \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\frac{\partial F}{\partial u_1} = 2\lambda_1 u_1 = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial u_2} = 2\lambda_2 u_2 = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial u_3} = 2\lambda_3 u_3 = 0. \quad (19)$$

Умножим уравнения (19) на  $u_i/2$ , выразим  $u_i^2$  из (18) и подставим в (19):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial u_1} &= \lambda_1 \left( l - \frac{327P \left( \frac{6k}{(1 + 0,12n) E b^3} \right)^{0,25}}{kh} \right) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial u_2} &= \lambda_2 (H - h - 1) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial u_3} &= \lambda_3 (2,5 - H) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Для совместного решения системы уравнений (17), (18), (20) используется ЭВМ и математический пакет «Эврика».

Ниже приведены результаты расчетов при нагрузках 100, 200, 300, 400 кН для песчаных грунтов и следующих исходных данных:  $c_1 = 0,96$ ;  $c_2 = 0,04$ ;  $\gamma = 1700$  кг/м<sup>3</sup>;  $\varphi = 30^\circ$ ;  $k = 3 \cdot 10^7$  Н/м<sup>3</sup>;  $E_a = 2,1 \cdot 10^{11}$  Па;  $E = 2,1 \cdot 10^{10}$  Па;  $a = 0,25$ ;  $d = 0,7$ .

Так, для опоры на нагрузку 300 кН с коэффициентом запаса 1,75 получено  $l = 5,17$  м;  $b = 0,11$  м;  $h = 1,50$  м;  $H = 2,50$  м;  $\lambda_1 = 0,22$ ;  $\lambda_2 = 0,88$ ;  $\lambda_3 = 0$ ;  $x_4 = 3,21 \cdot 10^{-6}$ ;  $u_1 = 0$ ;  $u_2 = 0$ ;  $u_3 = 0,002$ .

Анализ решения показывает, что все ограничения математической модели выполняются, следовательно, принятые нами допущения правомерны.

Для определения стандартных габаритов опоры применяем комбинаторный подход. Он состоит в том, чтобы для каждой приемлемой комбинации значений габаритов опоры в окрестностях полученных значений найти минимум целевой функции (6) по остальным переменным и из полученных величин выбрать наименьшую. В этом случае задача существенно сужается. Например, для опоры на нагрузку 300 кН можно принять длину опоры 5,5 м, так как при этом соблюдаются все ограничения. Затем находят стандартную высоту опоры, толщину и глубину заложения. Полученные результаты оптимальных параметров опоры для песчаных грунтов приведены в таблице.

Показатели	Оптимальные параметры опор при расчетной нагрузке, кН			
	100	200	300	400
Глубина заложения опоры, м	2,32	2,49	2,49	2,50
Габариты опоры, м:				
длина	2,00	3,50	5,50	7,00
высота	1,20	1,20	1,30	1,50
толщина	0,20	0,25	0,30	0,30

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс / Пер. с англ.—М.: Радио и связь, 1966.—128 с. [2]. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация / Пер. с англ.—М.: Мир, 1965.—509 с. [3]. Митинский А. Н. Балки постоянного сечения на упругом основании.—Л.: Типо-литогр. ЛТА, 1940.—88 с. [4]. СНиП 2.03.01—84. Бетонные и железобетонные конструкции: Утв. Гос. ком. СССР по делам стр-ва 20.08.84.—М.: Стройиздат, 1985.—79 с. [5]. Соколов К. В. Водный транспорт леса в новых экономических условиях // Лесн. пром-сть.—1994.—№ 2.—С. 6—7. [6]. Справочник по водному транспорту леса / В. А. Щербаков, Ю. П. Борисовец, В. Д. Александров и др.—М.: Лесн. пром-сть, 1986.—384 с. [7]. Таскаев В. Г. Береговые опоры лесосплава: Учеб. пособие.—Архангельск: РИО АЛТИ, 1991.—65 с. [8]. Таскаев В. Г., Вихарев А. Н. Анкерная опора из сборного железобетона // Лесн. пром-сть.—1992.—№ 6.—С. 16. [9]. ТП 411—01—110.83. Типовые проектные решения наплавных сооружений и опор для сплавных рек и лесных рейдов / Гипролестранс.—Л., 1983.—215 с.

Поступила 8 июня 1994 г.



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 684 : 658.512

В. И. ОНЕГИН, В. М. ПАЯНСКИЙ-ГВОЗДЕВ, Л. М. СОСНА  
С.-Петербургская лесотехническая академия

Онегин Владимир Иванович родился в 1935 г., окончил в 1960 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор, академик Инженерной академии, ректор С.-Петербургской лесотехнической академии. Имеет более 100 научных трудов в области лесоведения.

ЭКСПЕРТНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
В ТЕХНОЛОГИИ ДЕРЕВООБРАБОТКИ

Рассмотрены базовые задачи экспертных систем в технологии деревообработки, идентификации, диагностики, прогнозирования, проектирования, планирования и управления, а также технологического мониторинга. Показана возможность их декомпозиции, предложены программные средства для принятия решений в экспертных задачах.

**Basic problems of expert systems in the technology of woodworking identification, diagnosing, forecasting, designing, planning and management as well as technological monitoring have been considered. A possibility of their decomposing is revealed. Software for decisionmaking in expert problems is offered.**

Динамические условия усложняющихся технологий деревообработки, интеграция информационных, материальных и энергетических потоков в производстве продукции предприятий лесного комплекса существенно повышают значимость решений, принимаемых в сквозном цикле разработки, выпуска, сбыта и снятия промышленного изделия с производства. Трудности принятия управленческих, проектных и технологических решений усиливаются наличием в обрабатываемой информации факторов неопределенности, нечеткости и риска.

Один из подходов, позволяющий ослабить влияние противоречий, возникающих в процессе поиска и принятия решения, базируется на использовании интеллектуальных автоматизированных систем (АС), предназначенных для выполнения на ЭВМ таких практических задач, которые решаются экспертами с учетом накопленного опыта, знаний и интуиции. Совокупность частей АС, придающая им черты интеллектуальных систем, назовем экспертной компонентой. Меняя свою внутреннюю структуру и внешние спецификации в процессе принятия решения, экспертная компонента создает предпосылки интеллектуализации среды АС либо за счет взаимодействия пользователей, либо за счет «обучения» специалистами высшей квалификации.

В интеллектуальных системах экспертные компоненты оперируют с живым знанием эксперта, что придает им способность имитации лич-

ностного знания. Потребность в неканонизированных знаниях становится очевидной при принятии проектно-технологических решений в плохо структурированных предметных областях и задачах, характерных для технологии деревообработки, где порой приходится оперировать неформальными и интуитивными соображениями, вербализуя скрытое знание технолога.

Концентрация экспертных знаний технолога в интегрированной оболочке инструментальных средств способствует повышению эффективности принимаемых решений, закладывает основу ресурсосбережения и экологической устойчивости на всех стадиях создания и эксплуатации объектов технологических систем. Поэтому в течение последних лет в Лесотехнической академии под руководством авторов этой статьи осуществляется ряд исследовательских проектов по разработке и созданию компонент АС.

Предпроектные исследования предметной области технологии деревообработки позволили установить наиболее приоритетные направления приложения инженерии знаний, среди которых можно выделить основные: интеллектуальная поддержка принятия управленческих и проектно-технологических решений; проектирование высокоэффективных технологических и производственных систем; решение слабоформализуемых инженерно-технологических задач; информационно-экспертный поиск сведений об объектах технологии деревообработки в интеллектуальных базах данных и знаний.

Эффективность использования системы обработки экспертной информации во многом определяется формой представления решаемых задач. Исходя из принятой в [1] типизации задач экспертных систем (ЭС) в качестве базовых предложены следующие задачи: идентификация; диагностика; прогнозирование; проектирование; планирование и управление; технологический мониторинг. Анализ характеристик перечисленных задач показал, что объединяющей их чертой является наличие этапа принятия решений. Вместе с тем, каждой из задач присущи свои индивидуальные особенности, а в рамках одной задачи проявляются нюансы и специфика объектов технологии. Поэтому в процессе обследования предметной области признано нецелесообразным создавать универсальные средства получения решений для всех задач, поскольку это повлечет неоправданные затраты на разработку унифицированной и громоздкой системы.

Типовые задачи обработки экспертных знаний, как правило, не встречаются обособленно, а сочетаются в различных вариантах. Так, задачи технологического мониторинга объединяют совокупность подзадач наблюдения, слежения, интерпретации, идентификации, диагностики и прогнозирования, каждая из которых на этапе ее выполнения выступает как самостоятельная задача. При этом необходимо учитывать, что технологический мониторинг выполняется в реальном времени и осуществляет интерпретацию поведения наблюдаемого объекта в зависимости как от времени, так и от контекста.

Экспертные задачи в технологии деревообработки имеют явно выраженную иерархическую структуру. В этой связи возникает необходимость декомпозиции глобальной задачи мониторинга на ряд подзадач, каждая из которых детально анализируется и прорабатывается. В качестве задач-представителей на первых этапах декомпозиции выбраны следующие подзадачи: диагностика брака выпускаемой продукции и идентификация породы древесины.

#### Задача диагностики

Необходимость интеллектуализации автоматизированных средств диагностирования обусловлена особенностями процесса диагностики сложных технологических систем в деревообработке, среди которых к

основным можно отнести: наличие множества альтернатив интерпретации событий; формирование алгоритмов в виде набора правил определения причин выявленных нарушений; необходимость одновременного учета множества факторов для установления диагноза; отсутствие достаточного объема статистических данных для выявления объективных зависимостей между диагнозами и формами воздействия на систему.

Диагностика состояния (или ситуации) в технологической системе по набору наблюдаемых данных об объекте обеспечивает обнаружение причин, вызывающих исследуемое состояние. В частности, задачей экспертизы является диагностирование причин появления дефектов и брака в технологии деревообработки. Специфика диагностирования здесь связана в первую очередь с тем, что одни и те же причины возникновения брака могут приводить к разным последствиям. С другой стороны, дефектное состояние готового продукта может быть вызвано различными причинами. Сложность принятия решений в задачах диагностирования в основном определяется отсутствием полных и точных знаний о способах анализа состояний даже у лучших экспертов.

Выявленная структура задачи диагностики позволяет выделить три аспекта ее решения [3]:

- прогнозирование состояния технологического комплекса (ТК);
- диагностика причин возникновения дефектов;
- идентификация непосредственно дефекта.

Последующая декомпозиция задачи в целом дает возможность установить уникальные подзадачи в рамках предложенных аспектов рассмотрения. Перечислим базовые подзадачи каждого из аспектов.

**Прогнозирование состояния:**

наблюдение за состоянием ТК и анализ контролируемых параметров;

прогнозирование вероятности отклонения качественных и количественных показателей технологии от заданных регламентами;

определение наиболее вероятных причин возникновения отклонений от нормального функционирования ТК;

выдача приоритетных рекомендаций по корректировке контролируемых параметров и предотвращению дефектов.

**Диагностика причин:**

определение наиболее вероятных причин, для которых источниками возникновения дефектов являются параметры, контролируемые непосредственно в ходе технологического процесса;

определение наиболее вероятных причин, для которых источниками возникновения дефектов являются параметры, контролируемые в лабораторных условиях;

формирование рекомендаций по устранению дефектов.

**Идентификация дефекта:**

выявление необходимого и достаточного количества признаков для определения дефекта;

установление тождественности дефекта выявленным признакам.

В задаче прогнозирования состояния ТК проявляется разнообразие возможных вариантов и путей предотвращения дефектов с множеством побочных эффектов. При этом возникает потребность в использовании компьютера для имитации последствий применения того или иного набора средств, допустимого (лучшего) по множеству показателей состояния технологического процесса. Это дает возможность подобрать стратегию коррекции процесса, что особенно важно в случае сочетания причин, приводящих к браку.

Характерно, что в этом случае в модель принятия решения, кроме правил логического вывода, необходимо включать результаты числен-

ного эксперимента с функциональными зависимостями. Эти зависимости образуют решающие правила для выбора компромиссных наборов корректирующих воздействий, составляя количественную базу знаний (КБЗ). Применение КБЗ дает возможность объединить правила с оптимизационным многокритериальным экспериментом.

Наряду с количественной информацией для принятия решения в перечисленных задачах широко используются качественные показатели, характеризующие как саму технологию деревообработки, так и объект технологии — производственную продукцию. Очевидно, что для этого класса характеристик достоверность информации существенно зависит от воздействия среды на человека. Вместе с тем, разработанные математические методы формализации качественной информации [2] дают возможность снизить влияние субъективности оценок на принимаемые решения, что позволяет обрабатывать информацию на ЭВМ.

Для эффективного функционирования системы автоматизированного диагностирования необходима разработка стратегии поиска диагноза на множестве возможных причин. Поскольку имеется возможность глубокой структуризации предметной области деревообработки для рационального выбора последовательности проверок целесообразно использовать классический метод представления задач — разбиение на подзадачи. Условием разбиения начального множества причин является возможность на каждом этапе проверки однозначно решить вопрос о принадлежности диагноза подмножеству. В этом случае для формализации взаимосвязей признаков и дефектов применима производственная модель.

Манипулирование знаниями в решении задач диагностирования обеспечивается наличием у системы способности представлять (хранить, отображать и управлять) основные взаимосвязи между информационными объектами (причины/дефекты) предметной области. Основу причинного моделирования составляет статистический подход, особенно привлекательный как помощь принятия решений в контексте технологических проблем. Одна из форм причинного моделирования состоит в анализе путей, позволяющих исследовать отношения среди информационных объектов. Целью анализа является получение правдоподобных объяснений, наблюдаемых взаимосвязей путем проектирования причинно-следственных моделей для отношений между информационными объектами. Использование причинного моделирования позволяет установить систему глубинных понятий на основе комбинированных правил взаимодействия информационных объектов и связей глобальных модулей системы.

#### Задача идентификации

В технологическом проектировании при принятии решений часто возникает необходимость идентификации объекта технологии в процессе поиска среди некоторого однородного множества объектов. Здесь под идентификацией понимается определение характеристик объекта с целью установить его тождественность некоторой модели как оригиналу и принадлежность определенному классу по кодовому обозначению. Объектами идентификации при этом выступают различные элементы производственно-технологических систем (сырье, материалы и др.).

Существенная особенность задач идентификации объектов — наличие совокупности признаков, зная которые объект может быть отнесен с некоторой долей уверенности к той или иной группе. Главной проблемой создания и последующего успешного функционирования системы автоматизированной идентификации является разработка структуры классифицирующих признаков, позволяющих решать основную задачу идентификации. В процессе структуризации данных и знаний

конкретной предметной области (в рассматриваемом случае — анатомии древесины и технологии ее переработки) чрезвычайно важно установить характер отношений между объектами и признаками идентификации.

Область идентификации объектов технологии ограничена множеством пород деловой древесины, в частности древесины тропических пород, поскольку в Россию она ежегодно импортируется в виде строганого шпона, кряжей, паркетных и мебельных заготовок. Регламентирующими документами предусматриваются к поставке определенные породы древесины. Вместе с тем, в получаемых партиях встречаются породы, которые из-за отсутствия специфических включений не пригодны к отделке лаками по существующей технологии; механическая обработка некоторых пород на имеющемся оборудовании затруднена. В указанных условиях повышение эффективности использования древесины за счет принятия решений по оперативному выбору требуемого технологического процесса переработки древесины, лакокрасочных материалов, расширению ассортимента поставляемых пород служит глобальной целью разработки и создания системы автоматизированной идентификации древесины (САИД).

Функциональные возможности САИД влияют на эффективность решения задач идентификации и находятся в прямой зависимости от структурной организации знаний и данных в рассматриваемой предметной области. В целях адаптации системы к меняющимся структуре и содержанию информационного фонда при разработке САИД множества видов отношений между объектами объединены в группы (классификации, признаковые, порядковые и др.).

Отношения классификации позволяют информационные элементы предметной области (породы древесины, признаки, свойства) отнести к выделенному классу (группе). Среди наиболее важных в этой группе отношений являются: *иметь имя; элемент — класс; род — вид; быть эталоном; часть — целое* и др. Признаковые отношения представлены последовательной композицией отношений и приписывают различные признаки понятиям: *иметь признак; иметь значение признака*. Порядковые отношения описывают соотношенность элементов предметной области между собой: *быть следующим; быть ближайшим* и др. Выделенные группы отношений служат организационной основой построения структуры предметной области.

Изложенный подход обеспечивает разработку информационного фонда для идентификации свойств древесины со следующей блочно-модульной структурой экспертных знаний: признаки анатомического строения; физико-механические свойства; технологические и эксплуатационные свойства; режимы механической обработки; режимы облицовывания строганым шпоном; режимы отделки лакокрасочными материалами; режимы изготовления строганого шпона.

Существенное отличие использованной модели предметной области от программной реализации [4] состоит в выявленной взаимосвязи между анатомическими признаками древесины тропических пород и ее физико-механическими и технологическими свойствами. Интегрированная направленность предлагаемого подхода состоит в комплексном сочетании и учете анатомии и технологии древесины, что позволяет оперативно предъявлять обобщенную информацию пользователю-технологу.

Эффективное решение задач идентификации в системе обеспечивается тем, что каждая порода древесины характеризуется интегрированным комплексом признаков и свойств, режимами механической обработки, экспертной информацией об областях рационального использования и требованиях, предъявляемых к поставляемому материалу, что в итоге безусловно влияет на оперативное принятие решений техноло-

гом-экспертом. Привлечение аппарата теории множеств и инженерии знаний позволяет рационально и адекватно идентифицировать породу древесины по обобщенному набору анатомических признаков и комплексу физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств.

В целом знания о каждой породе древесины объединены в две глобальные группы параметров: анатомические признаки и характеристики строения древесины (группа А — анатомия); параметры, характеризующие эксплуатационные, физико-механические и технологические свойства породы (группа Т — технология). Обе группы параметров по отдельности и в совокупности могут служить идентификаторами для автоматического распознавания породы древесины в некотором множестве описаний (прямая задача идентификации). В свою очередь, некоторая совокупность заданных анатомических признаков может однозначно идентифицировать породу (или группу пород) древесины с фиксированными технологическими свойствами.

Параметры группы А (наименование и значение анатомического признака) и часть параметров группы Т (наименования физико-механических свойств и их значения) составляют фактографическую основу базы данных (БД) системы идентификации. Каждая порода древесины представляет собой отдельную запись в реляционной БД, структура которой повторяет принятую в системе блочно-модульную архитектуру знаний эксперта об объекте идентификации. Правила группирования признаков, соотнесение совокупности анатомических признаков технологическому или физико-механическому свойству, правила установления отношений между группами признаков однородных пород послужили основой формирования базы знаний системы.

Функциональные возможности систем, среди которых необходимо отметить базовые: *информационно-поисковые; консультационно-справочные; интерфейсно-сервисные и интеллектуально-экспертные* — поддерживаются выбранной архитектурой системы.

Высший (внешний) слой архитектуры системы предназначен для организации пользовательского интерфейса, внутренний — определяет физическую организацию знаний и данных на носителях информации и доступ к информации. Глобальный концептуальный уровень архитектуры позволяет установить интеграционные взаимосвязи внешнего и внутреннего уровней.

В архитектуре системы использован ряд классических компонент: база знаний (БЗ); база данных (БД); механизм вывода (МВ), основанный на сопоставлении с образцом или поисковом подходе с целью сужения области поиска и исключения полного перебора или комбинаторного взрыва; подсистема сбора знаний (ПСЗ) — предоставляет средства манипулирования знаниями, наполнения и модификации БЗ; объясняющая и консультирующая подсистемы (ОКП), обеспечивающие пользователя дополнительной информацией о ходе получения решения системой и отвечающие на вопросы «Почему?» и «Как получено решение?».

Учет особенностей предметной области деревообработки позволил дополнительно к основным функциям системы классической архитектуры добавить ряд специфических, обусловленных особенностями рассмотренных задач-представителей, в частности задач проектирования. К ним следует отнести графическое отображение структуры технологического процесса, технологических планировок оборудования, структуры системы производственного оборудования и ряд других графических задач. Интерактивные средства графического взаимодействия должны обеспечивать широкий спектр сервисных возможностей, позволяющих пользователю-технологу получать компактные и эффективные решения.

Результаты анализа взаимодействия пользователя и демонстрационного прототипа системы позволили сделать вывод о целесообразности разработки средств управления ведением консультаций. Общая методология подобного подхода состоит в разработке сценариев ведения консультаций, глобальная структура которых базируется на сетевом представлении. Управление консультационным режимом должно осуществляться с помощью интерпретатора сценариев, основные функции которого определяются в процессе анализа и структуризации предметной области.

Другой отличительной чертой является введение количественной базы знаний, расширяющей арсенал средств технолога, принимающего решения. В этом случае каждый модуль знаний может быть представлен в своей форме. Доступ к ним осуществляется путем навигации в базе знаний. Поиск информации путем перемещения от одних элементов к другим по критериям их семантической близости позволяет просматривать и осмысливать предлагаемые варианты решений в любом порядке и с разной целевой установкой. КБЗ не имеет априорно предписанной структуры, что позволяет свободно наращивать знания. Взаимосвязь между элементами знаний становится видимой и доступной для пользователя, который может настраивать информационную среду на свою предметную область. В таких условиях пользователь в интерактивном режиме может исследовать знания нелинейным способом (в нелинейной манере).

Важным фактором, обеспечивающим тиражирование и успешное освоение экспертных средств поддержки решений, является удобство работы с ними пользователей-непрограммистов. Пользовательский интерфейс, представляющий собой комплекс программных средств и обеспечивающий взаимодействие пользователя и системы, должен иметь высокий показатель «дружественности» по отношению к технологу-эксперту. Сервис пользовательского обслуживания достигается за счет применения при создании средств общения передовых технологий программирования типа WYSIWYG (What You See Is What You Get — что видите, то и получаете) и WIMP (Windows, Icons, Menus, Pointers — окна, пиктограммы, меню, указатели), а также интегрированной информации (тексты, рисунки, звуковое сопровождение, мультимедиа, видеоизображение) в многосредних системах (мультимедиа). Благодаря современной технологии создания программных продуктов (многооконный интерфейс, аккордная клавиатура, редакторы, контекстно-чувствительная поддержка), удается не только повысить производительность разработчиков системы, но и обеспечить комфортные условия деятельности специалиста, принимающего решения.

Несомненные достоинства рассмотренного подхода использования новой информационной технологии обработки экспертных знаний проявляются в ускорении оперативности принимаемых решений, что весьма существенно в рыночной экономической ситуации для сохранения или повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции. Характерно, что долговременные прогнозы указывают на повышенный интерес зарубежных исследовательских центров к вопросам создания систем, базирующихся на знаниях.

Проектируемые системы должны стать доступным и мощным инструментальным средством принятия решений в профессиональной деятельности различных специалистов: конструкторов при разработке изделий мебели, технологов предприятий при сопровождении или проектировании технологических процессов деревообработки, экспертов по закупке древесины, экспертов торгово-промышленных палат, брокеров бирж.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Искусственный интеллект: В 3 кн.—М.: Радио и связь—Книга 1. Справочник / Под ред. Э. В. Попова.—1990.—464 с. [2]. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации.—М.: Наука, 1982.—256 с. [3]. Палянский-Гвоздев В. М. и др. Повышение эффективности производственных систем в деревообработке на основе использования экспертных систем.—СПб.: ЛТА, 1992.—8 с.—Деп. в ВНИПИЭИлеспром. № 2873-л692. [4]. Computer-Aided Wood Identification. Reference Manual.—North Carolina State University.—Bulletin 474, Sept. 1986.

Поступила 30 июня 1994 г.

УДК 674.093.6

Л. С. СУРОВЦЕВА, З. А. ВОЛКОВА



Суровцева Любовь Савватьевна родилась в 1944 г., окончила в 1966 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры лесопильно-строгальных производств Архангельского государственного технического университета. Имеет более 60 научных трудов в области комплексного, рационального использования древесины, совершенствования технологического процесса лесопильно-деревообрабатывающих производств.



Волкова Зинаида Александровна родилась в 1946 г., окончила в 1970 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики и сопротивления материалов Архангельского государственного технического университета. Имеет 15 научных работ в области лесопиления, деревообработки, строительной механики и сопротивления материалов.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НИЗКОКАЧЕСТВЕННЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ НА ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПОДДОНОВ

Показано, что, несмотря на низкий объемный выход заготовок для поддонов (около 36 %), предприятиям выгодно выпускать их из низкосортных пиломатериалов длиной 1,00...1,75 м.

It has been shown that in spite of low volume yield of low grade lumber of 1,00...1,75 m long for trays it is profitable for 36% of enterprises to manufacture them.

При производстве экспортных пиломатериалов на лесопильно-деревообрабатывающих предприятиях г. Архангельска попутно вырабатываются низкокачественные доски IV сорта (ГОСТ 8486—86), которые сортируются по толщине и группам длин: длинные (2,0...6,5 м), средние (1,00...1,75 м), короткие (0,5...0,9 м), все ширины вместе. Использование такого сырья для изготовления качественной продукции всегда интересовало как производителя, так и покупателя пиломатериалов.



В целях выяснения возможности получения заготовок для поддонов из низкокачественных пиломатериалов нами исследована партия досок длиной 1,00... 1,75 м, толщиной 22 и 25 мм, разных ширин. Порода — сосна и ель; влажность — 60... 80 %. Распределение досок по сечениям приведено в табл. 1.

Таблица 1

Размеры сечения, мм	Доля досок, %
25 × 150	16,4
22 × 150	4,3
25 × 125	7,8
22 × 125	22,9
25 × 100	30,0
22 × 100	18,6

Таблица 2

Обзол	Доля обзола, % от общего числа досок
Занимающий частично:	
одну кромку	28,0
обе кромки	40,6
Занимающий полностью:	
одну кромку	6,8
обе кромки	6,8
Занимающий частично одну и полностью другую кромки	16,1
Сплошной (горбыль)	1,7

Пиломатериалы толщиной 22 мм составляли 45,8 %, толщиной 25 мм — 54,2 %. При исследовании измеряли толщину каждой доски с обоих торцов. Толщина досок с правого и левого торцов оказалась одинаковой лишь у 42,6 % досок. Остальные доски имели разнотолщинность, которая колебалась от 0,3 до 1,8 мм. В основном колебание толщины доски по длине составило 0,3... 0,5 мм.

Качество досок в основном характеризовалось дефектами обработки. В партии содержалось 84,3 % досок с обзолом, частично или полностью занимающим одну или обе кромки доски. Распределение обзола по видам приведено в табл. 2.

Кроме того, качество досок определялось наличием таких пороков древесины, как синева, гниль, червоточина, сучки.

Доски предполагалось использовать в производстве заготовок для поддонов по спецификации покупателя. Требуемые заготовки при толщине 22 мм должны иметь ширину 145 или 100 мм, при толщине 14... 19 мм — ширину 75 мм. Длина заготовок 800... 1200 мм. Заготовки поставляются пилеными, но строго выдержанными по толщине. Они не должны содержать обзол, синеву, гниль, червоточину, а также сучки размером более 30 мм.

При раскросе досок за показатель рациональности использования низкокачественных досок был выбран наибольший объемный выход спецификационных заготовок.

У досок шириной 100, 125 и 150 мм из-за обзола ширину заготовок уменьшали до 75 мм, толщину — до 14... 19 мм, (с учетом припуска на усушку), что приводило к значительному снижению объемного выхода, который составлял от 24 до 40 %. В случае, когда можно было получить заготовки шириной 145 или 100 мм и толщина заготовки соответствовала толщине доски, объемный выход составлял 50... 65 %.

Выход спецификационных заготовок для поддонов из раскраиваемой партии сырых досок длиной 1,00... 1,75 м колебался от 0 до 92, %. Лишь у 24,8 % раскраиваемых досок выход заготовок был более 50 %. Из-за недопустимых пороков древесины и дефектов обработки, которые занимают большую площадь доски, невозможно было выкроить ни одной заготовки из 21,4 % досок, в том числе: из-за сплошной синевы — 16,4 %, сучков размером более 30 мм — 1,4 %, обзола — 3,6 %. У остальных пиломатериалов выход колебался от 15 до 50 %.

Наличие разнотолщинности, а также досок толщиной 25 мм, при максимальной толщине заготовок 22 мм потребовало для получения стандартной толщины заготовок фрезеровать дважды 70 % досок. Это увеличило расход древесины, трудо- и энергозатраты.

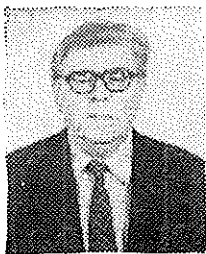
Средний объемный выход для исследованной партии составил 35,8 %, норма расхода пиломатериалов на 1 м<sup>3</sup> заготовок для поддонов — 2,8 м<sup>3</sup>. Однако и при низком объемном выходе предприятие может иметь прибыль от производства заготовок, так как цена 1 м<sup>3</sup> заготовок для поддонов в 5 раз выше цены 1 м<sup>3</sup> пиломатериалов IV сорта длиной 1,00... 1,75 м. В результате этого предприятие может получить доход от реализации заготовок для поддонов (при незначительных затратах на их производство) в два раза больше, чем от реализации низкокачественных пиломатериалов. Анализ раскроя досок исследуемой партии показал, что объемный выход можно увеличить с помощью корректировки спецификации на заготовки для поддонов. Введение в спецификацию двух толщин (22 и 25 мм), только двух ширин (75 и 100 мм) и двух длин (800 и 1000 мм) даст возможность увеличить объемный выход заготовок на 9,8 % по сравнению с выходом заготовок по спецификации потребителя. Кроме того, при введении толщины заготовок, равной 25 мм, 30 % досок не потребуют повторного фрезерования.

По предлагаемой спецификации в целом средний объемный выход составит 45,6 %, норма расхода пиломатериалов на 1 м<sup>3</sup> заготовок для поддонов — 2,19 м<sup>3</sup>. Предприятие может получить доход от реализации заготовок для поддонов в 2,5 раза больше, чем от реализации низкокачественных пиломатериалов длиной 1,00... 1,75 м.

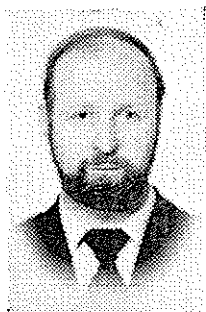
Поступила 2 июня 1994 г.

УДК 630\*812

*О. И. ПОЛУБОЯРИНОВ, А. М. СОРОКИН*



Полубояринов Олег Иванович родился в 1931 г., окончил в 1956 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор, профессор кафедры защиты леса и древесиноведения С.-Петербургской лесотехнической академии. Имеет более 120 научных трудов в области научного обоснования весового учета древесного сырья, исследования технических свойств древесины и коры, основатель нового научного направления — биологического древесиноведения.



Сорокин Александр Михайлович родился в 1943 г., окончил в 1965 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры защиты леса и древесиноведения С.-Петербургской лесотехнической академии. Имеет 23 научных труда в области древесиноведения и лесного товароведения, фитопатологии, защиты и консервирования древесины.

## ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЕЛОВОЙ КОРЫ И ЕЕ КОМПОНЕНТОВ

Приведены данные о массовом (весовом) и объемном соотношениях луба и корки в еловой коре, а также показатели плотности (базисной и в абсолютно сухом состоянии) и усушки коры и ее компонентов по трем возрастным группам древостоев; установлена связь между плотностью коры и древесины; исследовано изменение коры в продольном направлении ствола.

The data on weight and volume ratio of bast wood and cortex in spruce bark are presented as well as indicators of density (basis and absolute dry) and shrinkage of bark and its components according to three age groups of stands; a relationship between density of bark and wood is stated; a change in bark density in the grain direction of stem is investigated.

Кора ели относительно тоньше в сравнении с корой других хвойных пород. Доля ее составляет от 6 до 20 % объема ствола [21] и в среднем может быть принята равной 10...12 % [3, 6—8, 21]. Массовая доля несколько ниже: в среднем 8...10 % [15]. Из физических свойств еловой коры в наибольшей степени исследована ее влажность [5, 19, 20], плотность (табл. 1) и усушка [5, 19]. Все авторы указывают на большую изменчивость показателей свойств еловой коры при определении их на образцах, взятых как на складе, так, и особенно, в древостоях.

Таблица 1

Базисная плотность коры ели по данным разных авторов

Район исследования	Вид коры и место взятия образца	Базисная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Источник
Иркутская область	Не указано	351	[4]
Краснодарский край	»	440	[4]
Якутия	»	360	[4]
ФРГ	Середина хлыстов	351	[14]
Швейцария	»	333	[14]
ФРГ	Не указано	351	[15]
Финляндия	Грубая («комлевая»)	409	[18]
»	Тонкая («вершинная»)	365	[18]
»	Ветви	348	[17]
ФРГ	Молодняки, высота груди	301	[19]
»	Средневозрастные насаждения, высота груди	410	[19]
Норвегия	Комель	450	[22]
»	Вершина	300	[22]

Имеющиеся в литературе данные о содержании и физических свойствах основных компонентов еловой коры (луб и корка) отрывочны и очень противоречивы [1, 2, 19]. Между тем такие данные необходимы для более квалифицированного учета коры и разработки технологии переработки ее в полезные продукты.

Нами определены следующие физические свойства еловой коры: полная объемная усушка  $\beta_v$ , плотность в абсолютно сухом состоянии  $\rho_0$  и базисная  $\rho_6$ . Кроме того, были получены данные о весовом (массовом) соотношении луба и корки.

Исследования проведены на образцах коры размером 5 × 5 см, взятых с деревьев в разновозрастных насаждениях Лисинского учебно-опытного лесхоза (Ленинградская область): молодняки (средний воз-

раст 25—35 лет), средневозрастные (60—70 лет), спелые (100—120 лет) древостой.

Основное количество образцов было отобрано со стоящих деревьев на высоте 1,3 м. Для изучения изменения плотности коры по высоте ствола были взяты образцы из шести срубленных деревьев на различных высотах. Всего исследовано более 400 образцов. Для установления связи между плотностью коры и древесиной у двадцати деревьев взяты керны, проходящие через сердцевину ствола. В лабораторных условиях часть образцов разделили на лубяную и корковую составляющие, что позволило изучить физические свойства как коры в целом, так и ее компонентов.

Для определения объема свежезаготовленные образцы коры вымачивали в течение 3 ч в воде. После определения объема их высушивали до абс. сухого состояния и находили их массу и объем. Все операции осуществляли в соответствии с методическими положениями, изложенными в работах [9, 10]. Определение объема высушенных образцов производили в горячем состоянии, что, как показано в работе [9], дает минимальную погрешность. Все использованные методические приемы полностью соответствовали тем, которые нами применялись ранее при изучении коры осины и березы [11, 12]. Расчет показателей физических свойств производили по известным формулам [13].

Объемное содержание луба в свежезаготовленных образцах определяли из соотношения «объем луба/(объем луба + объем корки)», а

Таблица 2  
Объемная (числитель) и  
массовая (знаменатель) доля луба  
в коре ели (на высоте 1,3 м)

Насаждения	Доля луба, %
Молодняки	85,6/55,6
Средневозрастные	70,3/43,3
Спелые	65,0/29,0

Таблица 3

Физические свойства коры ели (на высоте 1,3 м)

Насаждения	Число образцов для определения каждого показателя	Показатели		
		$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_6$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{\text{л}}$ , %
Молодняки:				
луб + корка	20	571/527 ... 631	289/231 ... 331	43,4/39,2 ... 54,0
луб	20	788/718 ... 824	257/243 ... 277	67,1/62,0 ... 69,7
Средневозрастные:				
луб + корка	25	564/515 ... 600	346/307 ... 377	38,7/33,8 ... 43,6
луб	20	764/740 ... 800	263/250 ... 327	64,7/60,8 ... 67,4
корка	20	553/524 ... 575	385/351 ... 433	30,5/22,9 ... 37,0
Спелые:				
луб + корка	25	564/536 ... 586	392/370 ... 406	30,4/26,1 ... 34,5
луб	20	669/606 ... 776	281/266 ... 296	57,6/51,8 ... 65,5
корка	20	543/519 ... 560	434/415 ... 451	19,9/15,3 ... 24,9

Примечание. В числителе приведены средние значения показателей; в знаменателе — их диапазон.

Рис. 1. Изменение толщины  $l$  (1) и базисной плотности  $\rho_b$  (2) коры ели в продольном направлении ствола. (Средние данные по 6 модельным деревьям)

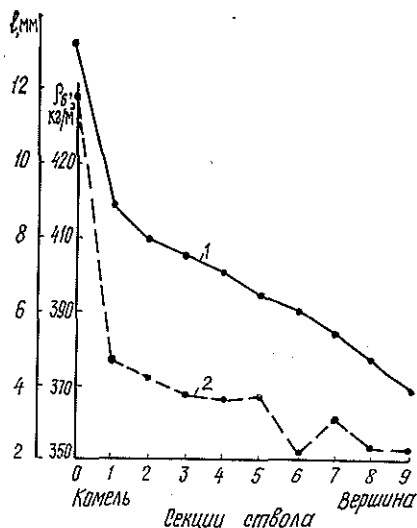
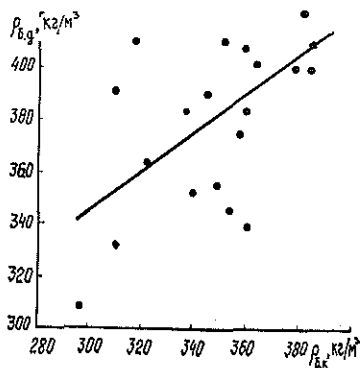


Рис. 2. Связь между базисной плотностью коры  $\rho_{б.к}$  и древесины  $\rho_{б.д}$  ели



массовое в абс. сухом состоянии — «масса луба/(масса луба + масса корки)».

Результаты исследования представлены в табл. 2, 3 и на рис. 1, 2. Из данных табл. 2 следует, что как объемная, так и массовая доля луба в еловой коре сильно зависит от возраста деревьев. По этому показателю кора ели значительно отличается от сосновой. Так, массовая доля луба в коре сосны, снятой с нижней части стволов в спелом древостое, составила, по нашим данным, всего 8,7 %, т. е. в 3 раза меньше, чем у ели. В средневозрастных насаждениях эти различия значительно сокращаются и почти исчезают в молодняках.

Проведенные исследования позволили получить более дифференцированные, по сравнению с ранее опубликованными данными, значения плотности еловой коры и ее компонентов. Подтвердилась зависимость плотности от возраста деревьев и места взятия образцов по высоте ствола. С изменением возраста древостоев изменяется плотность не только коры в целом, но и ее компонентов. По высоте дерева плотность коры наиболее резко снижается в комлевой части; в дальнейшем наблюдается более плавное ее падение. Аналогичный вид имеет график изменения толщины коры (рис. 1).

При изучении связи между базисной плотностью коры и древесины ели в возрасте 80 лет (отбор образцов на высоте 1,3 м) обнаруже-

на умеренная степень корреляции ( $r = 0,55$ ) между этими показателями и получено уравнение прямой  $\rho_{б.д} = 0,65\rho_{б.к} + 152$  (рис. 2). При этом установлено, что плотность коры несколько выше, чем плотность древесины. В молодняках наблюдается обратное соотношение (табл. 3). Для средневозрастных насаждений можно согласиться с мнением финского исследователя П. Хаккила [16], который считает, что у ели базисная плотность коры приблизительно равна базисной плотности древесины.

Полученные нами данные о базисной плотности коры ели в целом согласуются с результатами исследований, выполненных другими авторами. Плотность коры ели в абс. сухом состоянии, по нашим данным, оказалась несколько ниже той, которая определена Н. Л. Леонтьевым [5]. Одна из возможных причин этого различия — использование разных методов определения.

Важнейшая характеристика древесных материалов — полная объемная усушка  $\beta_v$ . Для древесины ели (литературные данные) и еловой коры, луба и корки (усредненные данные настоящих исследований) получены соответственно следующие значения  $\beta_v$ : 12,9; 37,5; 63,1 и 25,2 %.

Как видно из приведенных данных, по показателю полной объемной усушки как кора в целом, так и ее компоненты (особенно луб) значительно превосходят древесину.

Другое отличие коры ели от древесины заключается в том, что после высушивания до абс. сухого состояния и повторного намачивания кора не восстанавливает своих первоначальных размеров, как обычно это происходит с древесиной. Подобная особенность была отмечена нами и при исследовании коры осины и березы [11, 12]. Это явление можно объяснить происходящими в процессе высушивания необратимыми изменениями структуры луба, богатого живыми паренхимными элементами. По-видимому, при температуре 100 °С происходит не усушка образцов луба (и коры в целом) в общепринятом понимании этого термина, а скорее сморщивание, или коллапс, тканей. Подобное явление описано и применительно к «живой» древесине [13].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Большаков А. В. Физико-механические свойства основных анатомических компонентов еловой, сосновой и березовой коры // Сб. тр. Свердловского ЦНИИПДрев.— 1970.— № 5.— С. 41—51. [2]. Гелес И. С., Коржицкая З. А. Биомасса дерева и ее использование.— Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1992.— 230 с. [3]. Гусев И. И. Толщина и объем коры древесных стволов ели // Лесная таксация и лесостроительство: Межвуз. сб. науч. тр.— Красноярск: РИО СибТИ, 1981.— С. 24—30. [4]. Изменчивость базисной плотности и процентного содержания коры и отходов окорки древесного сырья целлюлозно-бумажной промышленности / Т. М. Мадеева, И. А. Нахабцев, А. Х. Ошкаев, В. Н. Крылов // Химия и технология производства целлюлозы: Межвуз. сб. науч. тр.— Л.: ЛТА, 1987.— С. 105—114. [5]. Леонтьев Н. Л. О влажности и объемном весе древесной коры // Тр. ЦНИИМЭ.— 1967.— № 84.— С. 118—124. [6]. Леонтьев Н. Л., Енговатова В. К. Об объеме коры в хлыстах основных древесных пород // Тр. ЦНИИМЭ.— 1974.— № 135.— С. 84—88. [7]. Мошкалев А. Г. Лесотаксационный справочник по северо-западу СССР.— Л.: ЛТА, 1984.— 320 с. [8]. Нахабцев И. А. Таксация древесной коры.— Л.: ЛТА, 1990.— 34 с. [9]. Полубояринов О. И. Определение объемного веса древесины методом погружения в воду // Лесн. журн.— 1967.— № 3.— С. 123—124.— (Изв. высш. учеб. заведений). [10]. Полубояринов О. И. Плотность древесины.— М.: Лесн. пром-сть, 1976.— 160 с. [11]. Полубояринов О. И., Сорокин А. М. Содержание и физические свойства основных компонентов березовой коры // Лесоводство, лесные культуры и почвоведение: Межвуз. сб. науч. тр.— Л.: ЛТА, 1993.— С. 27—31. [12]. Полубояринов О. И., Сорокин А. М. Физические свойства осинной коры и ее компонентов // Лесн. журн.— 1992.— № 3.— С. 67—69.— (Изв. высш. учеб. заведений). [13]. Уголев Б. Н. Древесное сырье с основами лесного товароведения.— М.: Лесн. пром-сть, 1986.— 368 с. [14]. Dietz P. Dichte und Rindegehalt von Industrieholz // Holz als Roh- und Werkstoff.— 1975.— N 4.— S. 135—141. [15]. Grammel R. Forstbenutzung.— Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey, 1989.— 193 s. [16]. Hakkiila P. Wood density

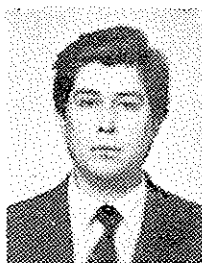
survey and dry weight tables for pine, spruce and birch stems in Finland.—Helsinki: 1979.—60 p. [17]. Kärkkäinen M. Density and moisture content of wood and bark and bark percentage in the branches of birch, Norway spruce and Scots pine // *Silva Fenn.*—1976.—N 3.—P. 212—236. [18]. Kärkkäinen M. Havutukkien knoren tiheys ja kosteus // *Commun. Inst. For. Fenn.*—1976.—N 87.—24 p. [19]. Koltzenburg Ch. Untersuchungen über die physikalischen Eigenschaften der Fichtenrinde // *Holz als Roh- und Werkstoff.*—1985.—N 2.—S. 47—52. [20]. Prasetya B., Roffael E. Zur Acidität der Rinde einiger Nadelbaumarten // *Holz als Roh- und Werkstoff.*—1990.—N 11.—S. 429—435. [21]. Schmidt-Vogt H., Ziese W. Die Fichte. Band II/1.—Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey, 1986.—444 s. [22]. Tamminen Z. Fuktighet, volymvikt m.m. hos ved och bark. II Gran // *Skoghögsk Inst. Virkeslära Rapp Upps.*—1964.—47—p. 56.

Поступила 16 мая 1994 г.

УДК 674.093

А. Е. АЛЕКСЕЕВ

Алексеев Александр Евгеньевич родился в 1958 г., окончил в 1980 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры лесопильно-строгальных производств Архангельского государственного технического университета. Имеет 65 научных трудов в области базирования при производстве пиломатериалов.



## ОГРАНИЧЕНИЕ СПОСОБНОСТИ ПИЛОПРОДУКЦИИ К ДЕФОРМИРОВАНИЮ

Приведены результаты разработки процессов производства пиломатериалов по деформационному признаку и сформулированы задачи разработки технологии производства пиломатериалов с учетом способности их к деформированию.

**The results of lumber manufacture processes development according to deformation condition are given, and the problems of production technology development of lumber with reference to their deforming ability are specified.**

За последние годы в технологии лесопиления на стадии получения пиломатериалов значительно возросла доля процессов формообразования. Это связано с достижением высокого качества, существенным снижением расхода древесины, а также с повышением производительности труда. Придание древесине необходимой формы, отвечающей конфигурации предмета труда и получаемой с наименьшими трудовыми затратами, повышение качества материала путем агрегатного формообразования—основные аргументы применения этих процессов.

Новый этап совершенствования технологии лесопиления связан с возрастающим использованием оборудования различных видов, отличающихся как способом ориентации и раскроя предметов обработки, так и методами формообразования пиломатериалов (поточные и агрегатные линии, гибкие процессы, условия и режимы обработки и др.).

Даже при строгом соблюдении технологических параметров процесса производства пиломатериалы оказываются свободными, в лучшем случае, лишь от поверхностных дефектов. Глубокое вакуумирование при сушке не способно преобразовать или сгладить внутренние напряжения, которые неизбежно присутствуют в древесине и переходят в деформированную заготовку или изделие.

Проблема осложняется тем, что для изделий с разными параметрами существенно изменяются не только распределение деформаций, но и построение технологического режима обработки. В этой связи особое значение приобретает получение качественных пиломатериалов. Структура древесины неоднородна и итоговое распределение внутренних напряжений (и механических свойств) неравномерно. Однако для получения ряда категорий пиломатериалов высокие прочностные свойства требуются лишь в отдельных участках объема исходного предмета обработки. Технологические требования иногда предусматривают неравномерное распределение механических свойств древесины в объеме изделия.

Распределение напряжений по трем координатным осям пространства в общем случае зависит от положения относительно наименьшего сопротивления деформированию. Ограничение этих условий определенными рамками позволяет не только значительно экономить древесину, но также дает возможность повышать ресурс эксплуатационных характеристик широкого ассортимента изделий из древесины.

Для получения продукции лесопиления с заданными характеристиками необходимо аналитически и экспериментально исследовать напряженно-деформированное состояние древесины в зависимости от силовых, контактных, скоростных, деформационных и др. условий. Изучение деформационной способности, разработка методов оценки предельных деформаций и способов повышения сопротивления к деформированию — задачи, требующие первоочередного решения. Это позволит представить характер деформирования изделий из древесины при различных операциях и установить наиболее благоприятные условия процесса, соотношения между размерами исходных полуфабрикатов и конечного продукта. Влияние обработки на перераспределение механических и физических свойств древесины в основе должно быть связано со свойствами готовых изделий как функцией технологических режимов.

Изучение строения древесины с известными механическими свойствами ведется методами, позволяющими рассчитывать параметры процессов деформирования. Однако с их помощью невозможно разрабатывать новые технологические процессы, обеспечивающие заданные свойства продукции. Известные теории дают возможность анализировать распределение напряжений и деформаций в сечениях образца. Дальнейшее интегрированное изучение этих явлений не выполнено и обратная задача перехода к технологическим усредненным параметрам не решена.

При неизвестных форме очага деформирования и граничных условиях напряжений наиболее приемлемым является графоаналитический метод исследования.

Из совокупности возможных кинематически допустимых перемещений выделенных зон исследуемых изделий в процессе эксперимента нельзя определить действительное поле рассеяния, используя лишь положения теории твердого тела. Поэтому целесообразно с физической точки зрения рассмотреть характер деформирования на примере конкретного продукта из древесины в условиях эксперимента. Это позволит определить граничные условия формообразования предметов труда (ПТ) с известными способностями к деформированию.

Для сокращения цикла обработки необходимо приблизить форму поперечного сечения предмета обработки (ПО) к форме ПТ. Это свойственно операциям по формированию сечений пиломатериалов и заготовок, окантовке, базоформированию. (ПТ, сечение которого приближается к кругу, получают оцилиндровкой.)

Анизотропия свойств древесины в разных направлениях дает основание полагать, что конфигурация ПО играет роль геометрического па-



раметра в обеспечении заданной равномерности деформации ПТ. Это обстоятельство не учитывается как на этапе разработки технологии производства пиломатериалов (заготовок) и планирования раскроя, так и на этапе оценки результатов распиловки. Сложность макрогеометрии пиловочника относительно требуемых ПТ (брусья, доски, заготовки) вынуждает применять операции механической обработки, что и определяет возникновение эффекта перераспределения напряжений.

Поперечное сечение бревна после распиловки сохраняет первоначальную структуру древесины — чередующиеся участки сосредоточения и понижения сопротивления к деформации. Общее нарушение структуры при известных длинах бревна практически не вызывает его коробления. Следует, однако, обратить внимание на тот факт, что высушенные бревна, в большинстве своем отдавшие влагу через открытые торцы, искривлены. Это же наблюдается и при достаточно малых длинах формируемых обрезков.

По мере углубления процесса формообразования пиломатериалов из бревна или бруса вследствие механической обработки создаются условия, способствующие сначала наибольшему короблению предмета труда, затем — ослаблению внутренних напряжений. Первое вызывается нарушением спокойного состояния системы в результате обработки, второе — многократным изменением формы ПТ в процессе их формообразования. В первом случае сечение ПТ немного отличается от ПО (толщина бруса составляет 0,8 от диаметра бревна), в то время как во втором случае они различаются на порядок.

Анализ состояния вопроса дает основание полагать, что в результате формообразования пиломатериалов напряжения в древесине сохраняются. При оценке качества продукции возможные отклонения формы, а также кривизна пиломатериалов, не связываются с внутренней природой напряженного состояния древесины.

Вышесказанное, с учетом условий формирования годичных слоев, характеризует рабочую гипотезу, что уравнивание и сосредоточение внутренних напряжений концентрируются относительно оси бревна. Удаление части древесины параболической зоны бревна с одной из сторон ослабляет участки древесины с этой стороны, а вызванные изгибающие моменты стремятся искривить осевую зону. Однако это не отмечается визуально ввиду небольшой толщины удаленной части по отношению к сечению бревна и стабильности условий. Последнее определяется малым течением временного цикла обработки при постоянных влажности, температуре и других показателях, изменение которых влияло бы на перераспределение напряжений.

Перераспределение внутренних напряжений, вызывающее коробление ПТ после механической обработки ПО характеризуется следующими параметрами; отношением поперечного сечения к длине ПО; сбежистостью; формой поперечного и продольного сечения; наличием дефектов (сердцевинной гнили, механических повреждений необработанных поверхностей, наростов).

Изучение механики деформирования пиломатериалов под воздействием технологических факторов позволит разработать требования к ее производству на основе деформационных признаков. Ранее нами изучены основные принципы построения технологического процесса формообразования пиломатериалов с учетом способности древесины к деформированию\*. Ограничение этой способности средствами технологии позволит повысить качество продукции. Известные пределы относитель-

Алексеев А. Г. О построении процесса производства пиломатериалов с учетом способности древесины к деформированию // Лесн. журн.— 1994.— № 2.— С. 74—78.— (Изв. высш. учеб. заведений).

ного искривления продольной оси ПТ дают возможность перейти к определению вектора деформирования в заданной системе координат. Далее использованы обозначения, приведенные в упомянутой работе.

Вертикальное перемещение координатной ячейки

$$u_{y_1} = \omega_1 y_1. \quad (1)$$

Равномерность перемещения по оси  $Y$  допустима при условии, что отношение

$$(R - r)/a_1 \quad (2)$$

велико. Тогда компонента деформации по оси  $Y$  при малых значениях

$$\omega_{y_1} = du_{y_1}/dy = -\omega_1. \quad (3)$$

Поскольку при механической обработке возникающие внутренние напряжения в объеме заготовки способствуют скручиванию продольной оси, компонента деформации по оси  $x$  не будет отражать происходящие изменения в положении координатной ячейки. В этом случае удобнее оперировать углом наклона координатной ячейки к осевой плоскости исходной заготовки. Тогда траектории перемещений можно принять линейными и выразить с учетом угла наклона как

$$u_{n_1} = u_{y_1} \cos \varphi \omega_1 a_1 / H_1. \quad (4)$$

Горизонтальное перемещение координатной ячейки

$$u_{x_1} = \omega_1 x_1 (a_1 / H_1) \cos \gamma. \quad (5)$$

Компонента деформации по оси  $x$

$$\omega_{x_1} = \omega_1 (a_1 / H_1) \cos \gamma. \quad (6)$$

Учитывая перманентность явления по всему продольному сечению изделия (при принятых условиях — с затуханием) третью составляющую  $\omega$  по оси  $z$  находим из условия несжимаемости, полагая деформации малыми:

$$\omega_{z_1} = \omega_1 [1 - (a_1 / H_1) \cos \gamma]. \quad (7)$$

Продольное перемещение

$$u_{z_1} = \int \omega_{z_1} dz + C_1. \quad (8)$$

Значение  $C_1$  определяем из граничного условия

$$u_{z_1} |_{z=0} = 0. \quad (9)$$

Откуда  $C_1 = 0$ . Таким образом, продольное перемещение

$$u_{z_1} = \omega_1 [1 - (a_1 / H_1) \cos \gamma] z. \quad (10)$$

Для оценки изменений параметров деформирования по всей длине изделия, т. е. для наглядности изменения взаимного положения торцов изделия, удобно пользоваться выражением, полученным при повороте координатных осей на угол  $\gamma$  до совмещения их с осью  $xO$ :

$$u_{x_2} = \omega_2 (a_2 / H_2) (\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma) (x - B) \quad (11)$$

при условии

$$u_{x_2} |_{x=B} = 0. \quad (12)$$

Соответствующие перемещения компоненты деформаций в поперечном направлении

$$w_{y_2} = -w_2; \quad (13)$$

$$w_{x_2} = w_2 (a_2/H_2)(\sin \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \cos \gamma). \quad (14)$$

Третью компоненту находим из условия несжимаемости, полагая деформации малыми:

$$w_{z_2} = w_2 [1 - (a_2/H_2)(\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma)]. \quad (15)$$

После интегрирования уравнения (15) с учетом постоянства  $C_2 = 0$  получаем

$$u_{z_2} = w_2 z [1 - (a_2/H_2)(\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma)]. \quad (16)$$

Из условия сплошного твердого тела принимаем перемещения по линии  $Ox_1$  при повороте осей координат равными. Тогда имеем

$$\frac{w_1}{1-w_1} (\sqrt{2w_1-w_1^2}) \cos \gamma = \frac{w_2}{1-w_2} (\sqrt{2w_2-w_2^2}) \times \\ \times (\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma). \quad (17)$$

Пренебрегая величинами деформаций высших порядков вследствие их малости, окончательно получаем

$$w_1/w_2 = \sqrt{(\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma)^2 / \cos^2 \gamma}. \quad (18)$$

Апробирование метода в рамках договорной тематики с АО «Северолесэкспорт» осуществляется в ходе решения задач по выявлению влияния на характер деформированного состояния бруса (пиломатериалов) следующих факторов: стадийности обработки; технологии производства пиломатериалов; ориентации; глубины (и ширины) обработки (технологических баз); формы ПТ. Это позволит уточнить степень зависимости качества пилопродукции от вышеперечисленных факторов; определить граничные условия их взаимодействия, т. е. подойти к разработке технологии, поставок, способов ориентации и распиловки по деформационному принципу; рекомендовать к эксплуатации новое оборудование.

Поступила 30 марта 1994 г.

УДК 674.093.

*А. Е. АЛЕКСЕЕВ*

Архангельский государственный технический университет

### УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАСПИЛОВКИ БРЕВЕН ПО ОБРАЗУЮЩЕЙ

Приведен алгоритм продольного раскроя бревен по образующей на пиломатериалы стандартных размеров и дана оценка результатам распиловки при использовании ряда критериев выполнения распиловочных планов.

An algorithm of longitudinal log cutting line for lumber of standard dimensions is presented and an assessment of log sawing results using a number of criteria for carrying out sawing plans is given.

При ориентировании и последующей распиловке бревен параллельно образующей достигается более рациональное, по сравнению с осевым, использование древесины параболической зоны бревна для выра-

ботки пиломатериалов за счет увеличения эффективной ширины постава [2—4].

При ориентировании бревна по «сбегу», с одной стороны, увеличивается пифагорическая зона, расходуемая на выработку пиломатериалов, поскольку одна крайняя доска выпиливается параллельно образующей и ее положение определяется только минимальной допустимой шириной, с другой — эта зона имеет тенденцию к сокращению, вызванному выводом сбega в одну сторону. Суммарный эффект выражается в некотором увеличении «зоны неукорачиваемых» досок. В целом при ориентировании бревен по образующей ожидается улучшение показателей раскроя обусловлено увеличением доли «длинномерных» досок и возможностью выпилки досок минимальной допустимой длины и наименьшей ширины со стороны, противоположной установочной базе, за счет увеличения эффективной ширины постава.

При планировании результатов хозяйственной деятельности лесопильного производства применимы, как правило, комплексные критерии их оценки. Это обобщенные показатели пооперационного получения продукции. Решение задач повышения эффективного использования пиловочника для производства основного компонента баланса сырья (пиломатериалов) предусматривает оценку условий рационального использования древесины для выработки пиломатериалов и других высококвалифицированных видов пилопродукции. Ориентация на рациональное использование предполагает применение рангов критериев, при совместном рассмотрении которых и производится определение условий эффективного расходования древесины.

С учетом расчетной схемы (рис. 1) при распиловке бруса на доски двух толщин (одной для толстых и одной для тонких) число толстых чистообрезных досок в пропиленной части бруса

$$K_1 = \text{int} [(G + E(2))/t_2], \quad (1)$$

где

$$t_2 = h_2 + z_2 + E(2). \quad (2)$$

Оператор  $\text{int}$  означает выделение целой части числа, получающегося в результате выполнения действий в квадратных скобках.

Число тонких чистообрезных досок полной длины из недоиспользованной при выработке толстых досок пласти бруса

$$K_2 = \text{int} [(G - t_2 K_1 + E(2))/t_1], \quad (3)$$

где

$$t_1 = h_1 + z_1 + E(2). \quad (4)$$

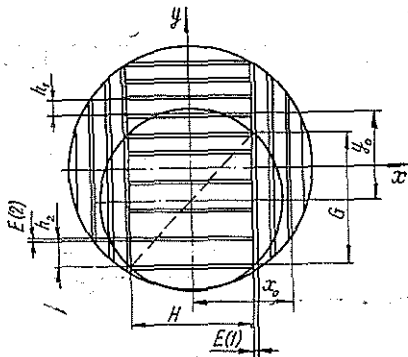


Рис. 1. Расчетная схема при базировании бревна по образующей

Координаты укорачиваемых досок, выпиленных из древесины параболической зоны бревна, рассчитывают по следующим формулам: для первой «верхней» доски, требующей обрезки, ( $y_0 > 0$ ),

$$y_0 = K_1 t_2 + K_2 t_1 + z_1 - G/2; \quad (5)$$

для первой «нижней» доски, требующей обрезки, ( $y_0 < 0$ ),

$$y_0 = -G/2 - t_1; \quad (6)$$

для первой боковой доски, выпиленной за брусом и требующей обрезки,

правой ( $x_0 > 0$ )

$$x_0 = H_0/2 + t_1; \quad (7)$$

левой ( $x_0 < 0$ )

$$x_0 = -H_0/2 - t_1. \quad (8)$$

В выбранной системе координат  $XOY$  относительное смещение центров торцов бревна  $\Delta$  в долях разности их диаметров составляет по осям  $x$  и  $y$  соответственно 0 и 0,5. Плоскости, ограничивающие брус, равноудалены от оси бревна.

Ширина доски в параболической зоне бревна: при первом проходе

$$b_0 = \sqrt{D^2 - 4(x_0 + \Delta)^2}; \quad (9)$$

при втором проходе

$$b_0 = \min \{ \sqrt{D^2 - 4(y_0 + \Delta)^2}, H_0 \}. \quad (10)$$

Формула для вычисления длины доски находится методом координат при решении системы, состоящей из уравнений параболоида, плоскости сечения и плоскости, перпендикулярной сечению и находящейся на расстоянии  $b'/2$  от оси параболоида. В общем случае длины укорачиваемых досок:

при  $\Delta \neq 0$

$$\tilde{l} = a_1 [a_4 + \text{sign}(\Delta) \sqrt{a_5 - (b')^2/4}]; \quad (11)$$

при  $\Delta = 0$

$$\tilde{l} = [d^2 - (b')^2]/d_1, \quad (12)$$

где  $\tilde{l}$  — длина прямоугольника шириной  $b'$ , вписывающегося в сечение параболоида плоскостью верхней пласти тонкой доски;

$$a_1 = \text{sign}(\Delta) \sqrt{1 + (L/\Delta)^2}; \quad (13)$$

$$a_2 = (D^2 - d^2)/4\Delta; \quad (14)$$

$$a_3 = a_2^2/4 + d^2/4; \quad (15)$$

$$a_4 = y_0 + \Delta - a_2/2; \quad (16)$$

$$a_5 = a_3 - a_2 y_0; \quad (17)$$

$$d_1 = (D^2 - d^2)/L; \quad (18)$$

$$d_2 = D^2 - 4x_0^2. \quad (19)$$

Оператор  $\text{sign}$  означает выделение дробной части числа, получающегося в результате выполнения математических действий.

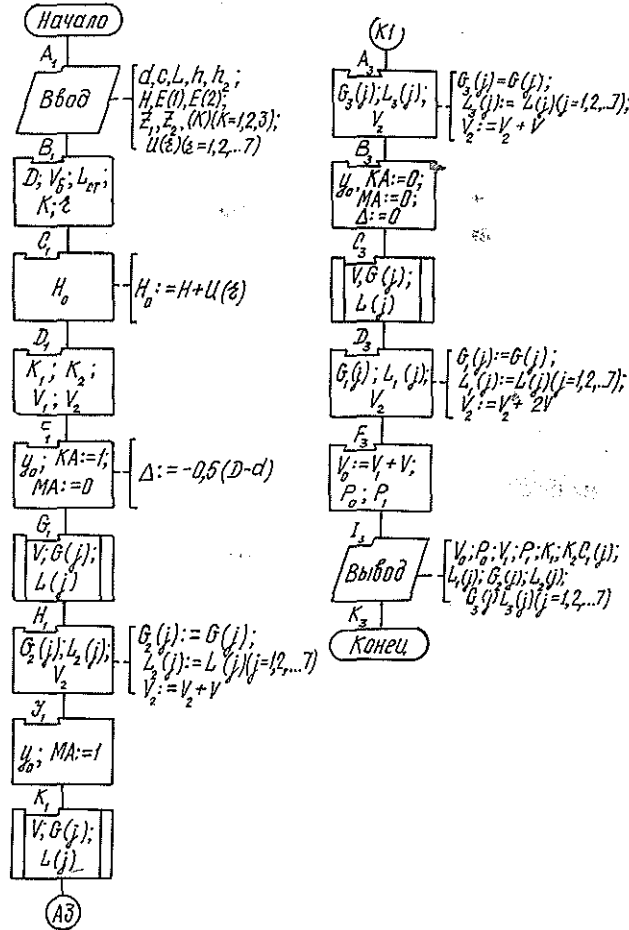


Рис. 2. Блок-схема алгоритма программы распиловки бревен

Блок-схема алгоритма продольного раскроя бревен по образующей на экспортные пиломатериалы стандартных размеров приведена на рис. 2, а на рис. 3 — блок-схема подпрограммы, предназначенной для определения размеров и объемов досок. Подпрограмма « $n/n, V, G(j)$ » позволяет вычислить объем тонких досок  $V$ , требующих обрезки (или «верхних», или «нижних», или половины боковых), а также порядковый номер  $G(j)$  стандартной ширины для обрезки  $j$ -й доски в порядке отсчета от оси бревна.

Основные обозначения, принятые при написании блок-схем.

#### Алгоритм программы

- $H$  — номинальная толщина бруса (без припуска на усушку), мм;
- $h_1, h_2$  — номинальная толщина тонкой и толстой досок (без припуска на усушку), мм;
- $E(1), E(2)$  — ширина пропила при 1-м и 2-м проходах, мм;
- $Z_1(K)$  — припуск на усушку в зависимости от толщины тонкой доски  $h_1$   $K$ -го стандарта, мм;
- $Z_2(K)$  — припуск на усушку в зависимости от толщины толстой доски  $h_2$   $K$ -го стандарта, мм;

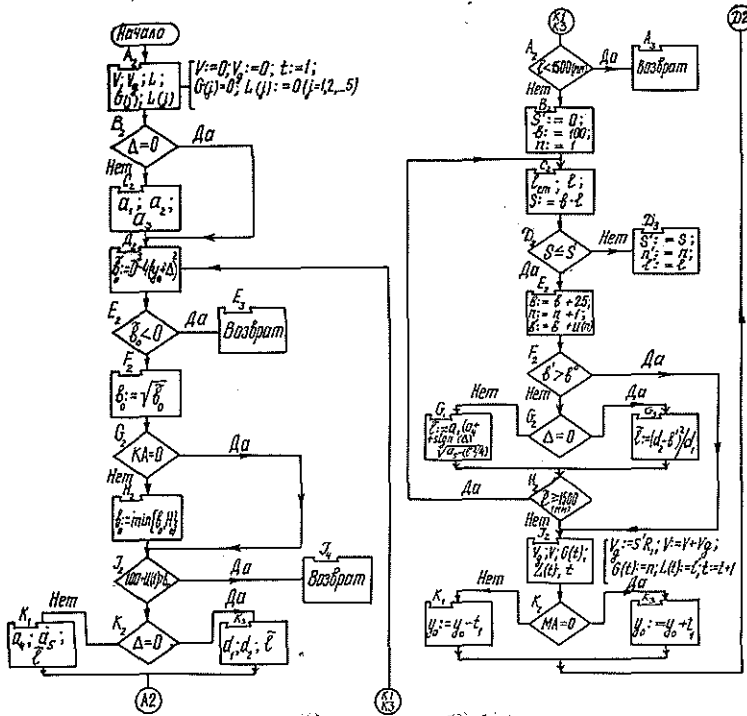


Рис. 3. Блок-схема подпрограммы

$U(r)$  — припуск на усушку  $r$ -го стандарта ширины доски (нумерация начинается со 100 мм в порядке возрастания с шагом 25 мм), мм;

$V_0$  — объем бревна,  $m^3$ ;

$L_{ст}$  — наибольшая стандартная длина, уместяющаяся в длине бревна  $L$ , м;

$H_0$  — толщина бруса с припуском на усушку, мм;

$K_1$  — число толстых досок, шт.;

$V_1$  — объем толстых досок,  $m^3$ ;

$K_2$  — число тонких досок, не требующих обрезки (выпиленных из пласти бруса), шт.;

$V_2$  — объем тонких досок,  $m^3$ ;

$y_0$  — координата наружной пласти первой боковой (верхней или нижней) тонкой доски, требующей обрезки, мм;

$G_1(j), G_2(j), G_3(j)$  — номер стандартной ширины для обрезки  $j$ -й боковой (верхней, нижней) тонкой доски, требующей обрезки, соответственно (нумерация начинается от центра торца);

$L_1(j), L_2(j), L_3(j)$  — стандартная длина  $j$ -й боковой (верхней, нижней) тонкой доски, м;

$V_0$  — общий объем пиломатериалов,  $m^3$ ;

$P_0$  — процент выхода пиломатериалов;

$P_1$  — процент выхода толстых досок.

Алгоритм подпрограммы

$V$  — объем боковых (верхних, нижних) тонких досок,  $m^3$ ;

$V_g$  — объем тонкой доски, м<sup>3</sup>;

$b_0$  — верхняя граница для стандарта ширины выпиленной тонкой доски;

$l$  — длина тонкой выпиленной доски, м.

Сырье — лесоматериалы круглые хвойных пород (ГОСТ 9463). Породы — ель. Диапазон диаметров бревен в вершинном торце — 16...40 см. Сбег — нормальный, дифференцированный по диаметрам. Средняя длина бревен для условий «Северолесэкспорт» — 5,2 м. Продукция — пиломатериалы транспортной влажности (20...22 %) двух толщин и шести ширин по ГОСТ 26002—Э с учетом укорочения до стандартной длины. Толщина толстых досок в поставе характеризуется рядом 32, 36, 38, 44, 50, 63, 75 мм; тонких — 16, 19, 22, 25 мм. Ширина пиломатериалов, начиная со 100 мм, изменяется через 25 мм. Диапазон толщин бруса — 100...275 мм. Наименьшая длина доски — 1,5 (изменяется через 0,3 м). Усушка выбирается в соответствии с ГОСТ 6782.1. Ширина пропила при первом и втором проходах выбирается исходя из условий рамной распиловки бревен средних диаметров на экспортные пиломатериалы в унифицированной размерной сетке для условий Архангельского промышленного узла.

Предпочтительные параметры поставов, характеризующие условия рационального использования древесины бревна при распиловке его по образующей, приведены в [4]. К ним относятся толщины толстых досок и брусьев при необходимом количестве их сечений. Они определены на основании параметрической оценки формоизменяемости размеров пиломатериалов по программе, описание алгоритма которой дано в работе [1].

Рекомендуемые параметры поставов при получении наибольшего выхода толстых досок приведены в табл. 1. Рекомендуемые показатели раскроя, обеспечивающие получение наибольшего объемного выхода пиломатериалов из бревна, приведены в табл. 2.

Принимая за критерий оценки назначаемых поставов получение наибольшего числа толстых досок, следует предусматривать в них наименьшие допустимые толщины. Рекомендуемые параметры раскроя с учетом назначения наименьших допустимых толщин досок, назначаемых в зависимости от диаметра перерабатываемых бревен и толщин брусьев, приведены в табл. 3.

Таблица 1

Рекомендуемые параметры поставов для распиловки бревен на пиломатериалы при получении наибольшего выхода толстых досок

Диаметр бревна, см	Толщина бруса, мм	Толщина толстой доски, мм	Выход, %	Диаметр бревна, см	Толщина бруса, мм	Толщина толстой доски, мм	Выход, %
16	100	32	36,19	30	175	75	45,19
18	100	44	40,44	30	200	50	45,91
18	125	38	43,66	30	225	50; 75	38,73
20	100	38	37,66	32	175	75	39,87
20	125	44	40,83	32	200; 225	75; 50	45,56
22	125	38	39,68	34	200	75	40,80
22	150	44	41,35	34	225	75	45,90
24	125	44	38,45	36	200	50	40,25
24	150	50	39,33	36	225	50	45,28
26	150	44	39,97	38	200	50	36,46
26	175	50; 75	39,74	38	225	50	41,02
28	150	50	39,00	40	200	50; 75	39,83
28	175	50; 75	34,12	40	225	75	44,80
28	200	50; 75	39,00				



Таблица 2

Рекомендуемые параметры поставов для распиловки бревен при получении наибольшего объемного выхода пиломатериалов

Диаметр бревна, см	Толщина бруса, мм	Толщина толстой доски, мм	Выход, %	Диаметр бревна, см	Толщина бруса, мм	Толщина толстой доски, мм	Выход, %
16	100	44	50,74	30	175	75*	62,72
18	100	44*	54,32	30	200	50*	64,36
18	125	50	53,37	30	225	75*	63,46
20	100	44	56,69	32	175	75*	63,68
20	125	50	55,67	32	200	75*	64,53
22	125	50	55,10	32	225	50*	64,27
22	150	44*	58,38	34	200	75*	65,65
24	125	44*	57,97	34	225	75*	65,03
24	150	44	57,80	36	200	75	65,32
26	150	44*	60,89	36	225	50*	65,31
26	175	75*	61,49	38	200	50*	62,87
28	150	50*	61,12	38	225	75	65,19
28	175	75*	63,27	40	200	75*	64,29
28	200	75*	61,04	40	225	75*	65,79

\* Толщины, при назначении которых варианты раскроя бревен при этой целевой установке дают наибольший выход толстых досок (см. табл. 1).

Таблица 3

Рекомендуемые параметры поставов для распиловки бревен при получении наибольшего числа толстых досок

Диаметр бревна, см	Толщина бруса, мм	Толщина толстой доски, мм	Число толстых досок, шт.	Диаметр бревна, см	Толщина бруса, мм	Толщина толстой доски, мм	Число толстых досок, шт.
16	100	32	3	30	175	50	4
18	100	32	4	30	200	50	4
18	125	32(38)	3(3)	30	225	50	3
20	100	38	4	32	175	50	4
20	125	38(44)	3(3)	32	200	50	4
22	125	38	4	32	225	50	4
22	150	38(44)	3(3)	34	200	50	4
24	125	44	4	34	225	50	4
24	150	44(50)	3(3)	36	200	50	5
26	150	44	4	36	225	50	5
26	175	44(50)	3(3)	38	200	50	5
28	150	50	4	38	225	50	5
28	175	50	3	40	200	50	6
28	200	50	3	40	225	50	5

Как следует из анализа табл. 1—3, принятие за критерий оценки поставов комплекса показателей раскроя неадекватно влияет на конечный результат реализации распиловочных планов. Получение максимального конечного результата может быть достигнуто при условии подчинения плана выполнению одного из заданных показателей.

Результаты работы позволяют разработать научно-обоснованный подход к планированию основных показателей раскроя бревен на экспортные пиломатериалы, не абстрагируясь от поставов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Алексеев А. Е., Рогатых А. Л., Царев Е. Г. Расчет рациональных поставов на распиловку бревен при их ориентации по образующей // Лесн. и дере-

вообраб. пром-сть: Инф. сб. / ВНИПИЭИлеспром.—1990.—№ 10.—С. 14—15. [2]. Лахтанов А. Г., Батина Н. Н. Влияние способа базирования бревен на объемный выход обрезных досок // Механ. технология древесины.—Вып. № 8.—Минск: Высш. шк.—С. 9—14. [3]. Сидоров И. И. Распиловка двухкантных брусев параллельно образующей // Лесн. журн.—1975.—№ 3.—С. 76—81.—(Изв. высш. учеб. заведений). [4]. Турушев В. Г., Алексеев А. Е., Царев Е. Г. Совершенствование параметров поставок для распиловки бревен параллельно образующей // Технология и оборудование деревообраб. производств: Межвуз. сб. науч. тр. / ЛТА.—Л., 1992.—С. 38—44.

Поступила 7 апреля 1994 г.

УДК 674.093

А. Е. АЛЕКСЕЕВ

Архангельский государственный технический университет

## О ВЫБОРЕ ПОЛОЖЕНИЯ БРУСА ПЕРЕД РАСКРОЕМ

Дана характеристика изменения параметров потока пиломатериалов при изменении основных технологических факторов распиловки; приведена таблица выбора рациональных смещений пакета толстых досок в пределах пропиленной пласти бруса; сформулированы основные требования к ограничению многомерности потока пиломатериалов.

A characteristic of Cumber flow parameters variation when changing the main technological factors of cutting has been given; a selection chart of rational shifts of thick boards bundle within a sawn cant layer is presented; the main requirements for limiting multi-dimensionness of lumber flow are specified.

При разработке технологических требований к базированию брусев перед раскромом целесообразно ориентироваться на получение заданного количества пиломатериалов спецификационных размеров. При назначении наиболее рационального плана раскромья брусев следует придерживаться условий их выпилки.

Цель данного исследования — разработать требования к базированию брусев перед раскромом.

Исходя из основных положений теории максимальных поставок достижение наибольшего объема толстых досок возможно в результате распиловки бруса максимального объема. Определение бруса наибольшего объема внесено в теорию раскромья Х. Л. Фельдманом [14]. При этом назначают толщину бруса, которая равна ширине его пласти по вершинному торцу бревна размером  $d/\sqrt{2}$  (где  $d$  — диаметр бревна в вершинном торце). Приведенные в работе П. П. Аксенова [2] выводы показывают, что брус указанных размеров обеспечит наибольший выход длинномерных досок из брусевой зоны. Однако под воздействием ряда факторов случайного характера это условие не выполнимо.

Повышению гибкости технологии способствует расширение диапазона толщин бруса в меньшую и большую стороны относительно рекомендованных теорией максимальных поставок. Площадь поперечного сечения брусев толщиной 0,6...0,8 диаметра вершинного торца бревна от площади брусев наибольшего объема (т. е. квадратного сечения) отличается на 4 % [1, 2]. Это значительно расширяет возможности эффективной переработки бревен и брусев на пиломатериалы широкого ряда спецификационных размеров.

Наибольший объем толстых досок может быть получен при наборе их толщин (с учетом усушки каждой доски по толщине) и шириин пропилов между ними, когда суммарная ширина будет равняться ширине пласти бруса по вершинному торцу:

$$B_{бр} = \sqrt{d^2 - H^2}, \quad (1)$$

где  $B_{бр}$  — ширина пласти бруса по вершинному торцу;

$H$  — номинальная толщина бруса.

Ширина пласти бруса, расходуемая на выпилку одной толстой доски, характеризуется величиной

$$t_2 = h_2 + z_2 + e_2, \quad (2)$$

где  $h_2$  — номинальная толщина толстой доски;

$z_2$  — величина припуска на усушку толстой доски по толщине;

$e_2$  — ширина пропила.

При назначении в поставках стандартных размеров пиломатериалов ввиду некратности величины, расходуемой на выпилку толстых досок, ширине пласти бруса образуется недоиспользуемый запас пласти  $\delta$ . Эта величина обусловлена диаметром бревна, толщиной бруса и толстой доски, а также назначаемыми в зависимости от этого усушкой бруса и вырабатываемых толстых досок, шириной пропила.

Теоретически получение наибольшего объема толстых досок возможно в случае, когда

$$B_{бр} = K_1 h_2 + K_1 z_2 + (K_1 - 1) e_2, \quad (3)$$

где  $K_1$  — число толстых досок.

Отсюда следует, что получению наибольшего числа толстых досок заданной толщины  $K_1$  способствует назначение толщины бруса с припуском на усушку  $H_0$  (см):

$$H_0 = \sqrt{d^2 - [K_1 h_2 + K_1 z_2 + (K_1 - 1) e_2]^2}. \quad (4)$$

Расчеты по формуле (4) показывают, что при переработке бревен заданных диаметров каждой назначаемой из ряда стандартных размеров толщине толстой доски соответствует определенная толщина бруса, без выделения дробной части, близкая к стандартной. В целом ориентация на получение наибольшего объема только толстых досок приводит к индивидуальному раскрою брусьев.

Величина запаса пласти бруса, недоиспользуемого на выпилку толстых досок стандартных толщин,  $\delta < t_2$ .

При переработке брусьев регламентированной нормативными документами толщины (100, 125, ... 275 мм и т. д.) запас пласти бруса  $\delta$  составляет  $2/3 t_2$ , что вызвано разбросом толщин перерабатываемых брусьев вследствие расширения диапазона выбора их размеров в долях вершинного диаметра бревен.

Анализ поставок, назначаемых для распиловки бревен на предприятиях, показывает значительные отклонения средней толщины брусьев  $H_{ср}$  от рекомендуемой  $H = 0,707 d$ . В долях вершинного диаметра бревна средняя толщина брусьев в поставках для выработки экспортных пиломатериалов составляет  $0,64 d$  [9] и  $0,683 d$  [4], для пиломатериалов внутреннего потребления —  $0,664 d$  [3] и  $0,67 d$  [12]. На предприятиях «Северолесозэкспорт» используют поставки, которыми предусматривается выработка брусьев средней толщины  $H_{ср} = 0,639 d$ . Причем, большая часть поставок предполагает выпиливание брусьев тоньше  $0,6 d$ . Эта вынужденная мера обуславливается многообразием форм бревен, и, как следствие, трудностями точной их подборки по диаметрам и установки по поставу инструмента лесопильного станка. Практически, недоиспользование пласти бруса на выработку толстых досок составляет до 50 мм [12]. При идеализации условий раскрою для исключения получения толстых досок с обзолом эта величина предусматривается в диапазоне 10 ... 20 мм [9].

В целом, учитывая специфику поступающего на переработку древесного сырья и условия производства пилопродукции, можно констатировать, что кардинально снизить многомерность потока пиломатериалов проблематично. Однако удержание параметров потока в определенных, приемлемых для технологических решений рамках, возможно. Это достигается реализацией ряда организационно-технических мероприятий. С учетом условий раскряя получение сбалансированного потока пиломатериалов может быть достигнуто за счет снижения верхнего предела диапазона размеров назначаемых толщин брусков до  $0,75d$  [13]. Формирование параметра определяется влиянием трех доминирующих факторов: точностью сортирования бревен по диаметрам, точностью базирования бревен и брусков по поставу инструмента лесопильного станка.

При направлении бревна по оси поставы пил, в случае получения бруса с равновеликими пластинами и его симметричной распиловки ширина пласти бруса уменьшается в среднем на 14 мм. Согласно исследованиям Г. Г. Титкова [10], это соответствует условиям сортирования бревен по диаметрам с точностью до 1 см и назначению толщины бруса  $H = 0,7d$ . Реализация плана распиловки дает увеличение выхода

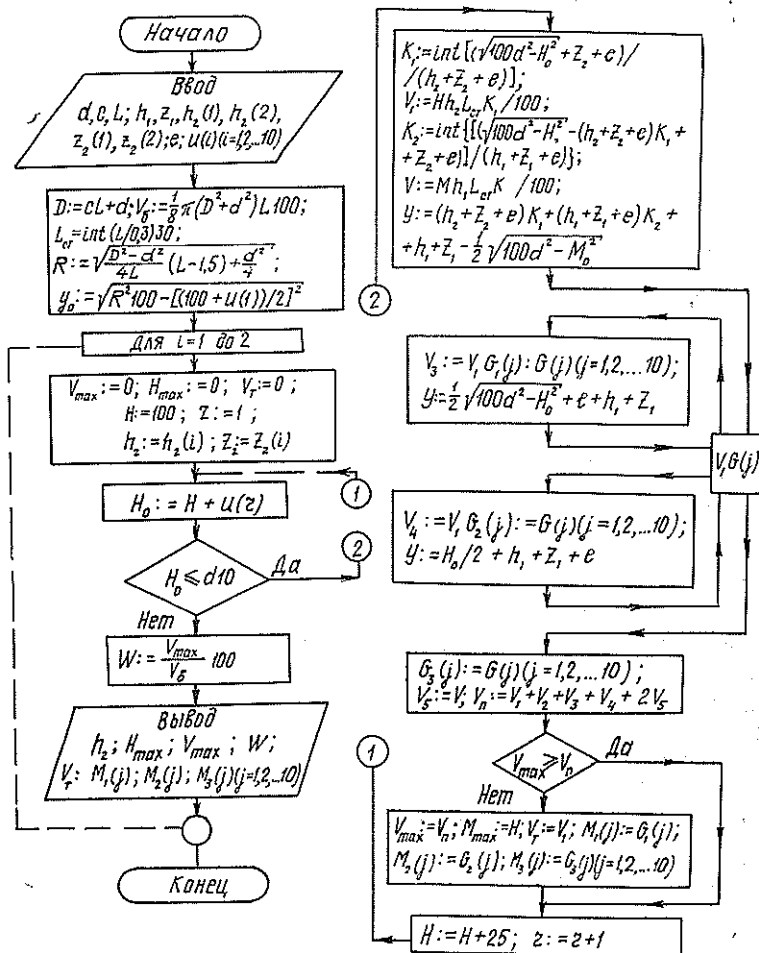


Рис. 1. Блок-схема алгоритма программы распиловки бревна

тонких досок до 12 % по сравнению с вариантом, предусматривающим соблюдение условий максимальных поставов. При выпиливании четырехкантного бруса наибольшего объема общий выход тонких досок не превышает 10 %. Доля тонких досок в рассматриваемых случаях может достигать 16 и 20 % соответственно. При запасе пласти бруса 50 мм выход тонких досок увеличивается до 24 %, а их доля составляет 49 %.

Изменение интенсивности потока в указанных диапазонах имеет определяющее значение при решении проблем автоматизации производства пиломатериалов. Однако неизбежное и плохо прогнозируемое изменение параметров потока обуславливает невозможность автоматизации всего производственного цикла. Указанное дает основание полагать, что решение этих вопросов может быть обеспечено контролем за соблюдением технологических требований на всех операциях производства пиломатериалов.

При изучении механики процесса изменения параметров потока пиломатериалов использовали программу, блок-схема алгоритма которой представлена на рис. 1. Комментарии к ней приведены в нашей работе [11]. Расчет поставов для каждой пары толщины толстой и тонкой досок и формируемой толщины бруса осуществляли последовательно при смещении пакета толстых досок в пределах недоиспользуемой для выпилки толстых досок пропиленной пласти бруса с шагом 1 мм. Граничные условия, предусматривающие получение чистообрезных толстых досок в пределах пропиленной пласти бруса, показаны на рис. 2. Как следует из рисунка, возможные положения пакета толстых досок в пределах пропиленной пласти бруса определяют равные поставы. Изменение линейных параметров поставов, обуславливающее вариации размеров тонких досок, наблюдается при смещении в пределах  $\delta$ .

При симметричной распиловке брусьев недоиспользование пласти бруса на толстые доски по обе стороны пакета распределяется поровну, т. е.  $\delta/2$ . При наборе толстых досок от начального положения (рис. 2, а) запас пласти, не израсходованный на выпилку этих досок, располагается по одну сторону пакета. В первом случае не имеется возможности выпилить чистообрезные тонкие доски полной длины. Плоскости пропилов, формирующие внешние пласти этих досок, захватывая параболическую зону бревна, определяют необходимость их укорочения. Во втором случае чистообрезная доска шириной, равной толщине бруса, выпиливается практически во всех случаях на длину бревна. Это дает основание засвидетельствовать улучшение условий стабилизации размеров получаемых пиломатериалов.

Другим отправным моментом оценки влияния положения пакета толстых досок на изменение потока тонких досок, является недоиспользуемый запас. Очевидно, что во втором случае, при большей величине  $\delta$ , шире возможности изменения параметров потока тонких досок. Учитывая эти обстоятельства, не противоречащие условиям производства

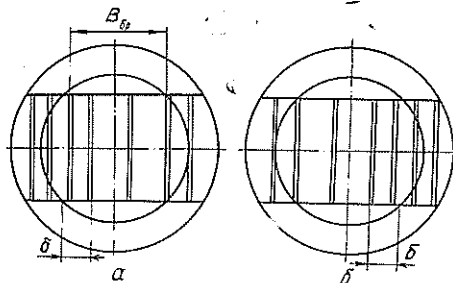


Рис. 2. Схема раскром для начального (а) и конечного (б) положения пакета толстых досок

пиломатериалов на практике, проводили оценку результатов раскроя, которые приведены в таблице.

При идеализации условий раскроя и формы бревна правильным геометрическим телом в подавляющем большинстве случаев ориентацию бруса целесообразно производить по поставу центральных пил и устанавливать продольную ось бруса параллельно направлению подачи. При этом вершинный торец бруса следует ориентировать таким образом, чтобы начало пропиленной его пласти располагалось в плоскости пропила крайней из центральных пил. Обеспечение точности визуальной оценки обеспечивается направлением лазерного луча. Как следует из таблицы, сформулированные технологические требования могут быть применены для переработки бревен всего диапазона диаметров (отмечены звездочкой в таблице).

Как предписывает теория раскроя, во избежание получения обзола на толстых досках следует предусматривать некоторый запас пласти для снижения влияния на результаты распиловки факторов случайного характера. В реальных условиях, с учетом многообразия формы образующей поверхности бревна, а также ряда технологических факторов,

$d$ , см	$H$ , мм	$h_2$ , мм	$h_s$ , мм	$v$ , %
16*	100	32	0...2; 8...9; 14...16	46,9
16	100	38	14...28; 40...41	47,1
16	100	44	8...21	47,8
18*	100	32	0...4	50,3
18*	100	38	0...3; 22...23	51,5
18*	100	44	0...3	51,5
18	100	50	14...27	52,0
18	125	32	9...13	51,4
18*	125	44	0...6; 26...32	52,4
18	125	50	4...17	52,5
20*	100	38	0...3	53,6
20	100	44	10...14	54,7
20*	100	50	0...1; 9...10	55,0
20*	125	38	0...3	55,0
20*	125	44	0...8	55,8
22*	100	38	0...1; 8...19; 26...27	56,6
22*	100	44	0...2	56,9
22	100	50	8...24	57,2
22*	125	38	0...11	55,0
22	125	44	4...5; 29...33	55,3
22*	125	50	0...13	55,6
22	150	38	3...5; 26...32	57,2
22	150	44	6...7	57,1
22*	150	50	0...1; 24...25	57,6
24*	125	38	1...8	58,6
24*	125	44	1...10	59,2
24*	125	50	2...13	59,0
24*	150	38	0...1	57,0
24	150	44	16...17; 24...25	57,0
24	150	50	20...22	57,7
24	175	38	4...5	58,2
24	175	44	10...13	59,1
24	175	50	12...15; 38...41	58,7
26*	150	50	1...2; 18...30	60,8
26*	150	75	0...1; 25...27; 50...52	61,7
26	175	75	14...17	60,4
28*	150	38	0...1	59,7
28	150	44	19...22	59,6
28*	150	50	0...3; 14...15	59,9
28	150	75	60...61	60,5
28*	175	38	0...4	60,6
28	175	44	7...13	61,3
28	175	50	17...18; 36...37; 44...45	61,4

выбор требований к базированию брусьев перед раскромом может быть произведен на основании данных таблицы, где представлены диапазоны  $h_s$ , обеспечивающие наибольшие выходы. Получение равных выходов  $v$  имеет место при нескольких положениях пакета толстых досок в пределах пропиленной пласти бруса. На каждом шаге смещения толстых досок  $h_s$  в пределах  $\delta$  формируются различные размеры тонких досок. Число вариантов, с учетом указанного влияния технологических факторов, относящихся к поставам, зависит от шага сдвига пакета толстых досок и запаса пласти. Часть вариантов, как указывалось при рассмотрении граничных условий, могут иметь равные параметры. Возможность получения равных объемов пиломатериалов при нескольких вариантах смещений позволяет облегчить решение технологических задач.

Разработанные технологические требования апробированы в опытно-промышленных условиях автоматизированного производства пиломатериалов на базе созданных базирующих устройств (в рамках внедрения малооперационной технологии производства пиломатериалов по тематике ГКНТ), описание работы которых приведены в [5—8].

Полученные результаты могут быть использованы для разработки технологических требований к базированию брусьев перед раскромом в зависимости от требуемого конечного результата.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Аксенов П. П. Раскрой бревен на пиломатериалы.— М.; Л.: Гослесбумиздат, 1951.— 175 с. [2]. Аксенов П. П. Теоретические основы раскроя пиловочного сырья.— М.; Л.: Гослесбумиздат, 1960.— 216 с. [3]. Альбом поставов для распиловки бревен на пиломатериалы внутрисоюзного потребления.— Архангельск: ЦНИИМОД, 1971.— 126 с. [4]. Альбом поставов для распиловки хвойных пиловочных бревен на экспортные пиломатериалы.— Архангельск: ЦНИИМОД, 1971.— 337 с. [5]. Воронцов Ю. С., Алексеев А. Е. Конвейер подачи бревен // Науч.-техн. реф. сб. / ВНИПИЭИлеспром.— 1989.— № 1.— С. 6—7. [6]. Воронцов Ю. С., Алексеев А. Е. Конвейер подачи брусьев в лесопильную раму // Деревообработка: Инф. сб. / ВНИПИЭИлеспром.— 1991.— № 3.— С. 14—15. [7]. Воронцов Ю. С., Алексеев А. Е. Конвейер подачи брусьев в распиловку // Лесн. и деревообраб. пром-сть: Инф. сб. / ВНИПИЭИлеспром.— 1990.— № 6.— С. 31—32. [8]. Воронцов Ю. С., Алексеев А. Е. Конвейер подачи брусьев фрезернопильной линии // Деревообработка: Инф. сб. / ВНИПИЭИлеспром.— 1991.— № 1.— С. 3—4. [9]. Елькин Г. А. Схемы раскроя хвойных пиловочных бревен на экспортные пиломатериалы.— Архангельск: ЦБТИ, 1961.— 293 с. [10]. Титков Г. Г. Краткое руководство по составлению и расчету поставов.— М.; Л.: Гослесбумиздат, 1955.— 50 с. [11]. Турушев В. Г., Алексеев А. Е., Царев Е. Г. Совершенствование технологии получения пиломатериалов // Лесн. журн.— 1992.— № 4.— С. 96—104.— (Изв. высш. учеб. заведений). [12]. Турушев В. Г., Ключев В. А. Сборник поставов для распиловки хвойных пиловочных бревен на пиломатериалы по ГОСТ 8486—66.— Архангельск: ЦНИИМОД, 1975.— 171 с. [13]. Турушев В. Г. Технологические основы комплексной механизации и автоматизации процессов производства пиломатериалов: Автореф. Дис. ... докт. техн. наук.— М., 1984.— 37 с. [14]. Фельдман Х. Л. Система максимальных поставов на распиловку.— М.: Гослестехиздат, 1932.— 230 с.

Поступила 13 мая 1994 г.

## ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 630\*863

*Д. В. ЕВТЮГИН, А. А. ШАТАЛОВ, М. Я. ЗАРУБИН*

Евтюгин Дмитрий Викторович родился в 1963 г., окончил в 1985 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат химических наук, докторант кафедры химии древесины ЛТА. Имеет 38 печатных трудов в области химии новых окислительных методов делигнификации в водно-органических средах, реакционной способности лигнинов в процессах модификации и сингеза на их основе, ЯМР-спектроскопии лигнинов, общих вопросов химии древесины и целлюлозы.



Шаталов Анатолий Анатольевич родился в 1965 г., окончил в 1987 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат химических наук, ассистент кафедры химии древесины С.-Петербургской ЛТА. Имеет 5 печатных трудов в области реакционной способности и кинетики гидролиза полисахаридов, общих вопросов химии древесины и целлюлозы.



Зарубин Михаил Яковлевич родился в 1931 г., окончил в 1954 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой органической химии, проректор по учебной работе. Имеет свыше 210 печатных трудов в области реакционной способности компонентов древесного комплекса и их модельных соединений в процессах химической переработки древесины.

**ДЕСТРУКЦИЯ ПОЛИСАХАРИДОВ  
В ПРИСУТСТВИИ КИСЛОРОДА  
В ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ СРЕДАХ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ.  
1. ИЗМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА  
ПОЛИСАХАРИДНОГО КОМПЛЕКСА В ХОДЕ  
КИСЛОРОДНО-ОРГАНОСОЛЬВЕНТНОЙ ДЕЛИГНИФИКАЦИИ**

Установлена взаимосвязь между топохимическими особенностями и закономерностями удаления гемицеллюлоз в процессе кислородной делигнификации в водно-органических средах. Показано, что высокие выходы кислородно-органо-сольвентных волокнистых полуфабрикатов по сравнению с сульфатными обусловлены не столько лучшей сохранностью гемицеллюлоз, сколько различным характером деструкции целлюлозы в водно-органических и щелочной средах.



In the process of oxygen delignification in aqueous-organic mediums interrelation between topochemical features and regularities of hemicellulose separation has been established. It has been shown that oxygen-organosolvent fibre unfinished products yields compared with sulphate ones are due not so much to the best preservation of hemicelluloses as to the different destruction character cellulose in aqueous-organic and alkali mediums.

Несмотря на большое число исследований в области кислородной варки и отбелки в водно-органических средах, все они посвящены в основном закономерностям делигнификации лигноцеллюлозных материалов. До сих пор всесторонне не изучено поведение полисахаридного комплекса в вышеупомянутых условиях. Между тем, отсутствие такой информации затрудняет понимание получаемых результатов анализа различных свойств волокнистых полуфабрикатов и не позволяет целенаправленно наметить пути повышения их качественных характеристик.

Задача проведенного исследования — изучить особенности химического состава и строения кислородно-органосольвентной технической целлюлозы с целью оценки окислительно-гидролитической деструкции основных её компонентов в процессе делигнификации.

Эксперимент проводили с использованием осиновой щепы, в качестве сред делигнификации брали наиболее хорошо зарекомендовавшие себя с точки зрения скорости и селективности удаления лигнина из древесины водно-органические растворы [6, 7, 9]: ацетон — вода (60:40 об. %); этанол — вода (60:40 об. %); уксусная кислота — вода (80:20 об. %). Благодаря одинаковым условиям обработки, можно провести сравнение реакционной способности компонентов полисахаридного комплекса по продолжительности варки и в зависимости от природы варочной среды.

#### *Методическая часть*

Для экспериментов применяли щепу стандартных размеров. Исходная древесина осины содержала целлюлозы (по Кюршнеру, без учета остаточных пентозанов), пентозанов, лигнина и эфирорастворимых соответственно 56,8; 21,4; 21,9; 1,5 %. Варки проводили в 2-литровом качающемся автоклаве с автоматической регулировкой температуры при начальном давлении кислорода 1,5 МПа. Условия варки: жидкостный модуль 10; температура 145 °С; продолжительность подъема до температуры варки 30 мин.

После варки и отделения от отработанного варочного раствора волокнистый полуфабрикат промывали теплым варочным раствором, водой и дефибрировали на лабораторном дефибрере «Sprout Waldrom» в два прохода при зазоре дисков 25 и 10 миллидюймов. Выход технической целлюлозы определяли по среднему значению двух параллельных варок, относительная ошибка не превышала 2 %.

Для сравнения использовали сваренную из того же сырья сульфатную целлюлозу. Условия варки: жидкостный модуль 4; расход эффективной щелочи 14 %; сульфидность 25 %; температура 170 °С (подъем 40 мин); продолжительность варки 100 мин.

Содержание остаточных гемицеллюлоз в технической целлюлозе определяли как пентозаны бромид-броматным полумикрометодом [4, с. 115]. Такой подход оправдан, так как свыше 80 % гемицеллюлоз осины представлены глюкуроноксиланом и арабином [3]. Содержание лигнина определяли по Комарову с 72 %-й серной кислотой [4, с. 162], целлюлозу — условно по разности между массой волокнистого полуфабриката и содержанием в нем лигнина, пентозанов, экстрактивных веществ. (Количество последних было примерно одинаковым во всех случаях и составляло 0,6...0,8 %.)

Углеводный состав технической целлюлозы анализировали после гидролиза с 72 %-й серной кислотой [2] и перевода в ТМС-производные [1] методом газожидкостной хроматографии. Использовали набивную колонку  $3 \times 3000$  мм из нержавеющей стали с 5 %-м ПФМС-6 на хромосорбе АW 60...80 меш. Условия хроматографирования в изотермическом режиме: газ-носитель — гелий (скорость 30 мл/мин); температура термостата колонок 180 °С; температура испарителя 220 °С; температура детектора (ДИП) 230 °С; объем вводимых проб — 2 мкл; внутренний стандарт — инозит.

### Обсуждение результатов

В табл. 1 представлены результаты контрольной сульфатной варки и кислородно-органо-сольвентных варок осинового щепы в средах различной природы. Приведенные данные подтверждают ранее сделанные выводы [6, 7, 9, 10] о преобладании выхода кислородно-органо-сольвентной технической целлюлозы (ТЦ) по сравнению с сульфатной для листовых пород древесины. Причем, как явствует из экспериментальных данных, кислородно-ацетоновая ТЦ имеет больший выход при сопоставимом содержании остаточного лигнина, чем кислородно-этанольная и кислородно-уксуснокислотная.

Зависимости, дающие наглядное представление о деструкции основных компонентов древесного комплекса в ходе делигнификации в водно-органических средах, показаны на рис. 1. Анализ закономерностей удаления лигнина, выхода волокнистых полуфабрикатов и их отдельных углеводных компонентов от продолжительности варки указывает на то, что эти зависимости носят сложный характер. В течение первого часа варки на стадии подъема температуры и быстрой делигнификации наблюдается интенсивное удаление гемицеллюлоз. Именно за счет этого, в основном, происходит падение выхода волокнистых полуфабрикатов. Далее скорость делигнификации заметно снижается, особенно в водно-ацетоновой и водно-этанольной средах. Замедление делигнификации сопровождается усилением деструкции целлюлозы и переходом фрагментов деструкции в раствор. Из-за высокой скорости делигнификации в водно-уксуснокислотном растворе меньше чем через 2 ч удаляется свыше 94 % лигнина. К этому моменту динамика деструкции целлюлозы приобретает экспоненциальный характер (рис. 1).

Таблица 1

Вид и продолжительность варки*	Выход ТЦ, % абс. сухой древесины	Массовая доля в ТЦ, %	
		лигнина	пентозанов
Кислородно-ацетоновая:			
60 мин (КА1)	85,0	13,9	19,9
150 мин (КА2)	75,8	11,0	19,9
210 мин (КА3)	61,3	5,5	16,0
Кислородно-этанольная:			
60 мин (КЭ1)	75,8	15,2	21,9
150 мин (КЭ2)	69,2	12,9	22,0
210 мин (КЭ3)	58,5	6,5	17,0
Кислородно-уксуснокислотная:			
60 мин (КУ1)	62,2	7,2	11,5
100 мин (КУ2)	52,8	2,4	14,0
Сульфатная (СФА)	51,5	3,0	15,2

\* Продолжительность варки включает в себя время выхода на конечный температурный режим.

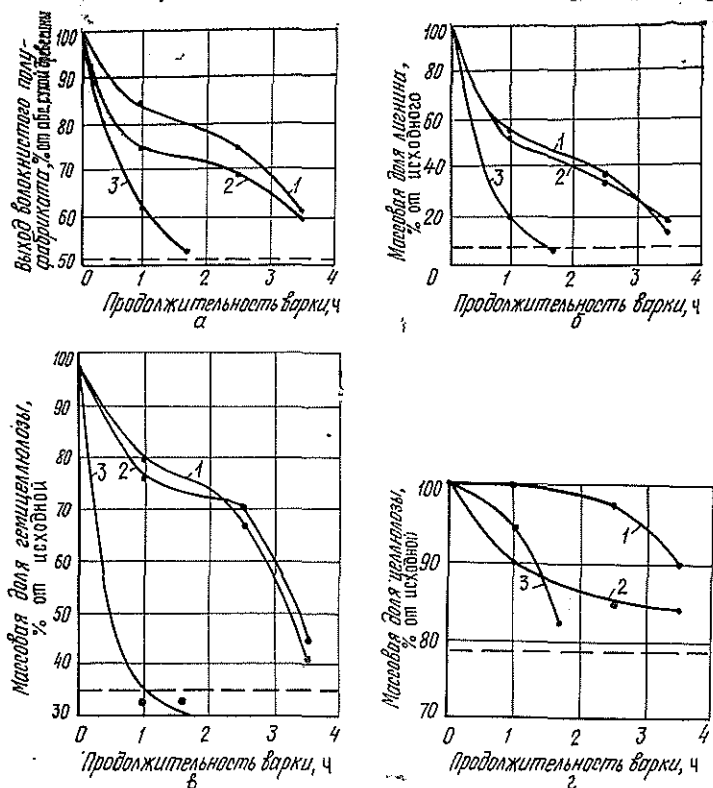


Рис. 1. Зависимость выхода волокнистого полуфабриката (а), доли лигнина (б), гемицеллюлозы (в) и целлюлозы (г) от продолжительности делигнификации в различных средах: 1 — ацетон — вода; 2 — этанол — вода; 3 — уксусная кислота — вода. (Пунктирной линией обозначен выход компонентов древесины для сульфатной варки)

После 2,5 ч делигнификации в водно-ацетоновой и водно-этанольной средах вновь наблюдается ускорение удаления лигнина, что сопровождается усилением деструкции гемицеллюлоз и целлюлозы.

Столь необычная кинетика окислительной делигнификации в средах вода — ацетон и вода — этанол объяснена топахимическими закономерностями удаления лигнина из различных слоев клеточной стенки, обусловленными морфогическим строением ксилемы осины и реакционным механизмом окислительно-гидролитической деструкции лигнина [8]. Был сделан вывод, что уже на ранних стадиях варки удаляется заметное количество лигнина сложной срединной пластины. Быстрое удаление лигнина подслоя  $S_2$  вторичной клеточной стенки наблюдается после 50 %-й делигнификации.

Логично предположить, что профили кривых делигнификации и удаления гемицеллюлоз, представленные на рис. 1, отражают взаимосвязанные явления и обусловлены топахимическими факторами процесса. Вышесказанное подтверждают результаты химического анализа углеводного состава полученных волокнистых полуфабрикатов (табл. 2).

На рис. 2 показаны зависимости удаления основных составных частей полисахаридного комплекса древесины от продолжительности делигнификации в среде ацетон — вода. Наибольшей деструкции в течение первого часа варки подвержены арабиан и галактап, входящие в состав пектиновых веществ и расположенные преимущественно в слож-

Таблица 2

Материал	Углеводный состав ТЦ, %				
	Глюкоза	Ксилоза	Манноза	Галактоза	Арабиноза
Древесина	59,3	26,4	5,6	4,8	3,9
Техническая целлюлоза:					
СФА	75,4	16,8	2,6	4,4	0,8
КУ2	75,8	11,0	6,3	6,2	0,7
КЭ2	71,2	15,4	7,7	4,3	1,4
КА1	66,3	22,0	5,5	4,4	2,2
КА2	68,1	21,7	5,1	4,0	1,3
КА3	72,6	18,5	4,5	3,5	1,9

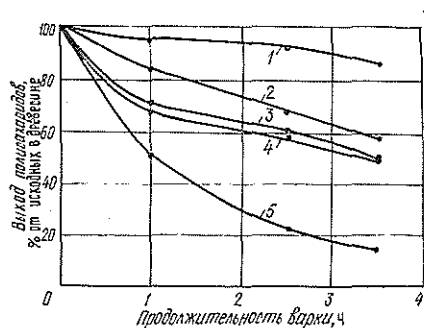


Рис. 2. Динамика изменения выхода полисахаридов в условиях кислородно-ацетоновой делигнификации: 1 — глюкоза; 2 — манноза; 3 — ксилоза; 4 — галактан; 5 — арабиноза

ной срединной пластине [5]. Глюкоманнан и глюкуроноксилан распределены по слоям клеточной стенки достаточно равномерно [5]. Рассчитанные как манноза и ксилоза, исходя из данных углеводного состава (табл. 2), эти гемицеллюлозы также имеют наибольшую скорость распада в течение первого часа варки, после чего скорость их удаления из клеточной стенки существенно не меняется. Растворение деструктурированной целлюлозы происходит наиболее сильно после удаления 80 % лигнина (см. рис. 1) и обусловлено, по-видимому, увеличением доступности проникновения варочных реагентов в ее аморфные области.

В случае делигнификации в водно-уксуснокислотной среде происходит достаточно равномерный провар по толщине клеточной стенки [8] и это находит свое отражение в плавной динамике удаления гемицеллюлоз (рис. 1).

Диаграммы на рис. 3 демонстрируют полисахаридный состав сульфатной и кислородно-органосольвентной ТЦ с близким содержанием остаточного лигнина и позволяют оценить их относительную реакционную способность в процессе деструкции. Все кислородно-органосольвентные способы делигнификации характеризуются неплохой сохранностью целлюлозы и гемицеллюлоз. Некоторое падение выхода ксилана в случае кислородно-уксуснокислотной варки объяснимо хорошей растворимостью фрагментов его частичной деструкции в варочном растворе. В ходе кислородно-уксуснокислотного и кислородно-этанольного процессов наблюдается наилучшее удержание глюкоманнана и галактана в составе волокнистых полуфабрикатов. Самое высокое удержание глюкуроноксилана отмечено в случае кислородно-ацетоновой варки. Очевидно, различная динамика удаления гемицеллюлоз связана с природой водно-органических сред и, в значительной степени, обусловлена суммарным влиянием специфической и неспецифической сольватации на окислительно-гидролитические превращения и растворимость деструктурированных фрагментов полиоз.

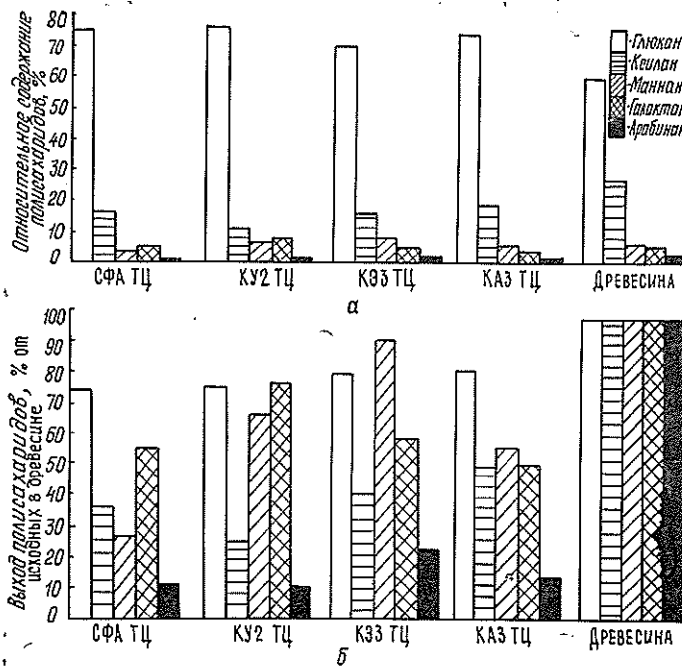


Рис. 3. Полисахаридный состав волокнистых полуфабрикатов: а — относительное содержание полисахаридов; б — выход полисахаридов.

Химический состав кислородно-органосольвентной ТЦ (кроме кислородно-уксусноуксусной) характеризуется понижением удельной доли целлюлозы и повышением доли нецеллюлозных полисахаридов (рис. 3). Наибольшая массовая доля гемицеллюлоз обнаружена в составе кислородно-этанольной ТЦ.

Анализируя полученные данные, можно сказать, что увеличение выхода волокнистых полуфабрикатов в кислородно-органосольвентных средах по сравнению с сульфатным способом достигается не только за счет сохранности гемицеллюлоз, но и за счет снижения перехода в варочный раствор фрагментов деструкции целлюлозы. Учитывая содержание последней в общем балансе полисахаридов ТЦ, необходимо отметить, что именно высокий выход целлюлозного компонента является решающим в увеличении выхода кислородно-органосольвентных волокнистых полуфабрикатов. Основной причиной сохранности целлюлозного компонента в условиях кислородной делигнификации в средах органический растворитель — вода по сравнению с сульфатной варкой, по-видимому, следует считать отсутствие ступенчатой деструкции концевых звеньев макромолекул целлюлозы (пилинг).

Таким образом, выполненное исследование позволяет оценить общие закономерности изменения химического состава полисахаридного комплекса в ходе кислородно-органосольвентной делигнификации в средах различной природы и предположить их связь с особенностями топохимии удаления лигнина из слоев клеточной стенки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Количественный химический анализ растительного сырья / В. И. Шарков, Н. И. Куйбина, Ю. П. Соловьева, Т. А. Павлова.— 2-е изд., испр. и доп.— М.: Лесн. пром-сть, 1976.— 72 с. [2]. Методы химии углеводов / Пер. с англ.; Под редакцией Н. К. Кочеткова.— М.: Мир, 1967.— С. 443. [3]. Никитин Н. И. Химия древесины и целлюлозы.— Л.; М.: Изд-во АН СССР, 1962.— 711 с. [4]. Оболенская А. В.,

Ельницкая З. П., Леонович А. А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы // Учеб. пособие для вузов.— М.: Экология, 1991.— 320 с. [5]. Шарков В. И., Куйбина Н. И. Химия гемцеллюлоз.— М.: Лесн. пром-сть, 1972.— 440 с. [6]. Deineko I. P., Nikitina O. V. Delignification of wood in low-molecular-weight alcoholic media // TAPPI J.— 1992.— Vol. 75, N 9.— P. 136—140. [7]. Delignification by oxygen in acetone-water media / M. Ya. Zarubin, I. P. Deineko, D. V. Evtuguin, D. Robert // TAPPI J.— 1989.— Vol. 72, N 11.— P. 163—168. [8]. Evtuguin D. V., Nikandrov A. B., Zarubin M. Ya. Oxygen-organosolv high yield pulp? // Submitted for proceedings of 3rd EWLP (Stockholm, Aug. 1994). [9]. Kostukevich N. G., Deineko I. P. Delignification by oxygen in acetic acid as new method of pulping // Lignocellulosciences, technology development and use: Proceedings / Ed.: J. F. Kennedy, G. O. Phillips, P. A. Willfams.— London: Ellis Horwood Ltd., 1992.— P. 331—337. [10]. Peculiarities of papermaking properties of the oxygen-organosolv pulp / D. V. Evtuguin, J. Silvy, A. Robert, M. Ya Zarubin // Proceeding of 7 th ISWPC (Beijing, China, 25—27 May 1993.— Vol. 3.— P. 167—173.

Поступила 31 мая 1994 г.

УДК 684.0.863. : 547.458.81

Д. В. ЕВТЮГИН, Н. Г. КОСТЮКЕВИЧ, М. Я. ЗАРУБИН

С.-Петербургская лесотехническая академия



Костюкевич Наталья Гарриевна родилась в 1955 г., окончила в 1977 г. Ленинградскую лесотехническую академию, ассистент кафедры химии древесины С.-Петербургской лесотехнической академии. Имеет 17 печатных трудов в области разработки специальных фильтровальных материалов, химии новых окислительных методов делигнификации в средах вода—уксусная кислота, общих вопросов химии древесины и целлюлозы.

## ДЕСТРУКЦИЯ ПОЛИСАХАРИДОВ В ПРИСУТСТВИИ КИСЛОРОДА В ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ СРЕДАХ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ. 2. ДЕПОЛИМЕРИЗАЦИЯ МАКРОМОЛЕКУЛ ПОЛИСАХАРИДНОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ КИСЛОРОДНО-ОРГАНОСОЛЬВЕНТНОЙ ДЕЛИГНИФИКАЦИИ

На основе экспериментальных данных высказано предположение, что из всех многочисленных факторов процесса кислородной варки в системах органических растворителей деструкцию получаемой целлюлозы в значительной степени определяют окислительные стадии. Невысокие показатели механической прочности кислородно-органосольвентной технической целлюлозы являются следствием сильной деполимеризации макромолекул полисахаридного комплекса.

On the basis of experimental data it has been assumed that of all numerous factors of oxygen pulping process in the systems of organic solvents the destruction of the hemicelluloses obtained is to a great extent determined by oxidizing stages. Low indicators of mechanical strength of oxygen-organosolvent technical cellulose are the results of high depolymerization of polysaccharide complex macromolecules.

Деструкция целлюлозы в процессе ее выделения из растительных материалов и отбелки является одной из основных причин снижения потребительских свойств получаемых волокнистых полуфабрикатов.

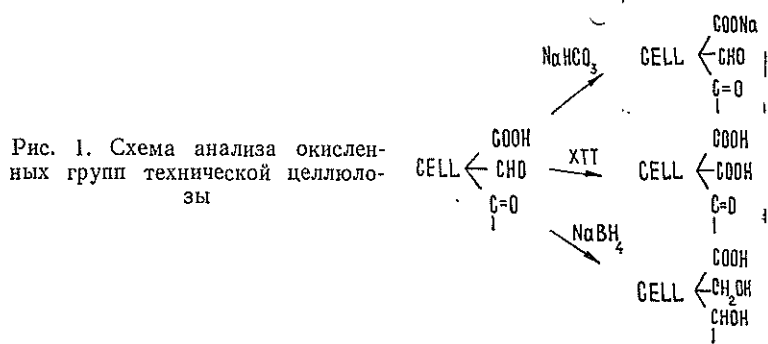
Практически по всем основным показателям механической прочности кислородно-органо-сольвентная техническая целлюлоза (ТЦ) существенно уступает сульфатной [2—4]. Особенно заметно это проявляется в случае кислородно-ацетоновой и кислородно-этанольной ТЦ. Невысокое качество кислородно-органо-сольвентных волокнистых полуфабрикатов при одновременно высоком выходе в процессе делигнификации древесного сырья объясняют, главным образом, деструкцией макромолекул полисахаридного комплекса [12, 13]. Вместе с тем, ни в одной из известных работ не приводятся данные, позволяющие всесторонне оценить степень такой деструкции и связать ее со свойствами волокнистых полуфабрикатов.

Задача нашего исследования — дать сравнительную характеристику степени деструкции полисахаридного комплекса кислородно-органо-сольвентной ТЦ, полученной в средах различной природы, и на основании химического анализа попытаться предположить возможные направления окислительно-гидролитического распада.

### Методическая часть

В экспериментах использовали кислородно-органо-сольвентную небеленую ТЦ из древесины осины, полученную в средах ацетон — вода (60:40 об. %); этанол — вода (60:40 об. %) и уксусная кислота — вода (80:20 об. %) путем варки до различных степеней делигнификации. (Химический состав ТЦ приведен в предыдущей нашей статье.) Степень полимеризации (СП) по ГОСТ 25438—82 в кадоксене определяли после выделения из волокнистых полуфабрикатов холоцеллюлозы обработкой надуксусной кислотой [6, с. 102]. Для сравнения молекулярно-массового распределения (ММР) кислородно-ацетоновой и сульфатной ТЦ из осинового щепы были получены волокнистые полуфабрикаты высокой степени делигнификации (97...98 %). После выделения из них холоцеллюлозы хлоритным методом в ацетатном буфере (рН 4,9; температура 70 °С) проведен анализ ММР ТЦ в виде трикарбонилатов целлюлозы методом эксклюзионной хроматографии с применением детектора, измеряющего малоугловое рассеяние лазерного луча (Chromatix КМХ-6) и позволяющего непосредственно определять молекулярные веса элюируемых фракций. Теоретические основы метода и практика выполнения эксперимента подробно описаны в работе [10].

Окисленные группы анализировали согласно схеме, приведенной на рис. 1. Карбоксильные группы определяли по стандарту TAPPI



T237от—83, содержание альдегидных групп — фотоколориметрически после реакции с хлоридом 2, 3, 5-трифенилтетразолия по Саболксу [6, с. 211]. Содержание кетонных групп рассчитывали по разнице между числом альдегидных и общих карбонильных групп, определенных коли-

чественным газометрическим способом путем восстановления с  $\text{NaBH}$  [6, с. 214]. Во всех опытах содержание окисленных групп вычисляли как среднее из 3—5 опытов после анализа на грубые промахи. Относительные ошибки определения общих карбонильных групп составляли не более 8 %, альдегидных и карбоксильных — не более 2 %.

Показатели механической прочности отливок с массой  $75 \text{ г/м}^2$  после размола в центробежном размалывающем аппарате определяли по стандартным методикам.

### Обсуждение результатов

Степень деструкции полисахаридного комплекса ТЦ может быть оценена исходя из результатов измерения их молекулярных масс и содержания окисленных групп. Нами определены значения средневязкостной СП макромолекул полисахаридов, входящих в состав исследованных волокнистых полуфабрикатов. (маркировка в табл. 1 предыдущей статьи).

Для образцов КА1, КА2, КА3, КЭ1, КЭ2, КЭ3, КУ1, КУ2, СФА получены следующие СП: 1150, 980, 680, 1100, 960, 920, 1050, 980, 1750. После удаления гемицеллюлозы из волокнистого полуфабриката для образцов КА3, КЭ3, КУ2 и СФА найдены СП, соответственно равные 1000, 1200, 1350 и 2400. Кислородно-органо-солевые ТЦ имеют невысокие значения СП, заметно уступающие при сопоставимой степени делигнификации сульфатной целлюлозе (образцы КА3, КЭ3, КУ2, СФА). Причем высокая степень деполимеризации заметна уже на ранних стадиях кислородно-органо-солевой делигнификации, когда удаляется менее 50 % лигнина, считая от исходного в древесине (образцы КА1, КЭ1).

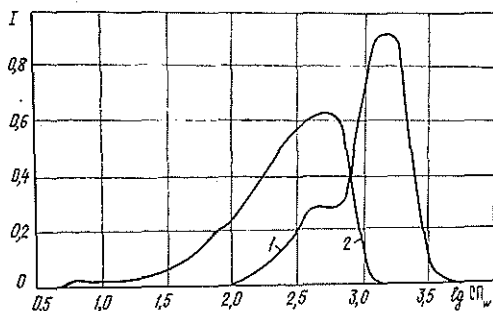


Рис. 2. Нормированные кривые молекулярно-массового распределения сульфатной 1 ( $\text{СП}_w = 2400$ ;  $\text{СП}_n = 1200$ ;  $P = 2,00$ ) и кислородно-ацетоновой 2 ( $\text{СП}_w = 680$ ;  $\text{СП}_n = 130$ ;  $P = 5,23$ ) технической целлюлозы ( $I$  — относительная интенсивность)

Ранее при анализе ММР кислородно-уксуснокислотной и кислородно-этанольной целлюлозы было отмечено смещение максимума кривой ММР в низкомолекулярную область по сравнению с сульфатной целлюлозой [11]. Этот факт был объяснен укорочением целлюлозных цепей в результате окислительной деструкции. Сравнение кривых ММР кислородно-ацетоновой и сульфатной ТЦ (рис. 2) обнаруживает появление у первой из ТЦ низкомолекулярных фракций полисахаридов, способствующих заметному увеличению полидисперсности образца. Полученный результат может быть следствием не только деструкции целлюлозного компонента волокнистого полуфабриката, но и, как показано в предыдущей статье, результатом высокого содержания подвергшихся распаду гемицеллюлоз, в частности глюкоманнана, обладающего даже в исходной древесине низкой молекулярной массой ( $\text{СП} < 80$  [7]).

Принимая во внимание, что наличие гемицеллюлоз способно занижать величину средневязкостной степени полимеризации ТЦ, для оцен-



ки деполимеризации собственно целлюлозы из волокнистых полуфабрикатов удаляли путем щелочной экстракции по стандарту ANSI/ASTM D—1103 полнозы и вновь определяли средневязкостную СП. Полученные результаты убедительно свидетельствуют, что деполимеризация целлюлозы при кислородно-органо-сольвентных варках значительно выше, чем при сульфатной, а природа водно-органической среды делигнификации оказывает влияние на СП целлюлозы. В среднем СП сульфатной целлюлозы примерно в два раза выше кислородно-органо-сольвентной.

Очевидно, причина столь сильной деполимеризации кроется в факторах самого процесса окислительной делигнификации в средах органический растворитель — вода. Присутствие органического растворителя оказывает сильное влияние на каталитическую активность протона в реакциях гидролиза гликозидных цепей за счет уменьшения эффективной плотности водной сольватной оболочки и увеличения вероятности атаки неподеленной электронной пары атома кислорода гликозидной связи. Особенно это заметно при добавлении к воде апротонных растворителей [1]. Усиление статистического гидролиза может быть вызвано непосредственным участием органического растворителя в распаде макромолекул полисахаридов (в средах с уксусной кислотой — ацетолиз, в средах вода — этанол — этанолиз) и образования изопропилиденов в присутствии ацетона. Хорошо известен факт ускорения гидролитических процессов в присутствии окислителей. Природа этого явления еще до конца не ясна, однако очевидно, что в каждом конкретном случае будут иметь место свои особенности. Экспериментально установлено, что присутствие в целлюлозной макромолекуле карбоксильных групп в 6-м положении элементарного пиранозного звена делает гидролиз близлежащей гликозидной связи более легким [14], по некоторым данным, примерно в два раза при аналогичных условиях гидролиза по сравнению с неокисленной молекулой [5]. Наличие окисленных групп в других положениях за счет индуктивного эффекта и изменения конформаций звеньев способно также существенно влиять на устойчивость гликозидных связей к гидролизу [16]. Как показывает анализ работ по окислению целлюлозы в водных средах, близких к нейтральным, различные активные формы кислорода могут прямо участвовать в разрыве гликозидной связи путем атаки первого углеродного атома пиранозного цикла [15]. Таким образом, деструкция полисахаридов в кислой среде в присутствии окислителя является сложным процессом, где окислительные и гидролитические стадии зачастую тесно взаимосвязаны.

Дифференцированный анализ окисленных групп оксидцеллюлозы всегда помогает оценить степень их полимераналогичных превращений и предположить некоторые направления деструкции в ходе того или иного окислительного процесса. В табл. 1 приведены результаты анализа содержания различных окисленных групп в образцах кислородно-органо-сольвентной целлюлозы. Полученные данные свидетельствуют, что уровень содержания карбоксильных, альдегидных и кетонных групп меняется в зависимости от природы варочной среды. Содержание лактонно связанных карбоксильных групп приближенно оценивали после обработки деионизированных образцов раствором 0,01 М NaOH в течение 45 мин в атмосфере азота. Максимальная разница в определении карбоксильных групп прослеживается в случае с кислородно-этанольной ТЦ и обусловлена, помимо наличия лактонов, омылением сложных этиловых эфиров полисахаридов [13]. В случае с кислородно-уксусно-кислотной целлюлозой снижение содержания карбоксильных групп после омыления объясняется удалением наиболее лабильных ацетильных групп, наличие которых завышало первоначальное значение за счет реакции с гидрокарбонатом натрия.

Таблица 1

Образец	COOH —	COOH — после омыле- ния лак- тонов	CHO —	CO —	Всего окисленных групп
КА2	7,0	7,4	3,4	7,8	18,6
КА3	7,2	7,6	3,1	6,4	17,1
КЭ1	7,5	8,6	—	—	—
КЭ2	6,4	7,6	—	—	—
КЭ3	6,5	7,5	2,0	4,4	13,9
КУ1	4,0	—	2,9	—	—
КУ2	4,7	3,7	3,6	2,6	9,9
СФА	7,7	—	0,3	2,9	—

Примечание. Содержание окисленных групп в ТЦ выражается в ммоль/100 г абс. сухой целлюлозы.

Среди волокнистых полуфабрикатов с высокой степенью делигнификации, у которых влияние функциональных групп остаточного лигнина минимально, наибольшее количество карбоксильных и кетонных групп наблюдается у кислородно-ацетоновой ТЦ (сравнить данные для КА3, КЭ3 и КУ2). Это находится в соответствии с данными о самой высокой СП полисахаридов именно в системе ацетон — вода. Вне зависимости от природы водно-органической варочной среды при сопоставимом содержании остаточного лигнина прослеживается четкая зависимость между увеличением содержания окисленных групп в ТЦ и усилением деполимеризации макромолекул полисахаридов (табл. 1). Все вышесказанное позволяет предполагать, что деструкция полисахаридов

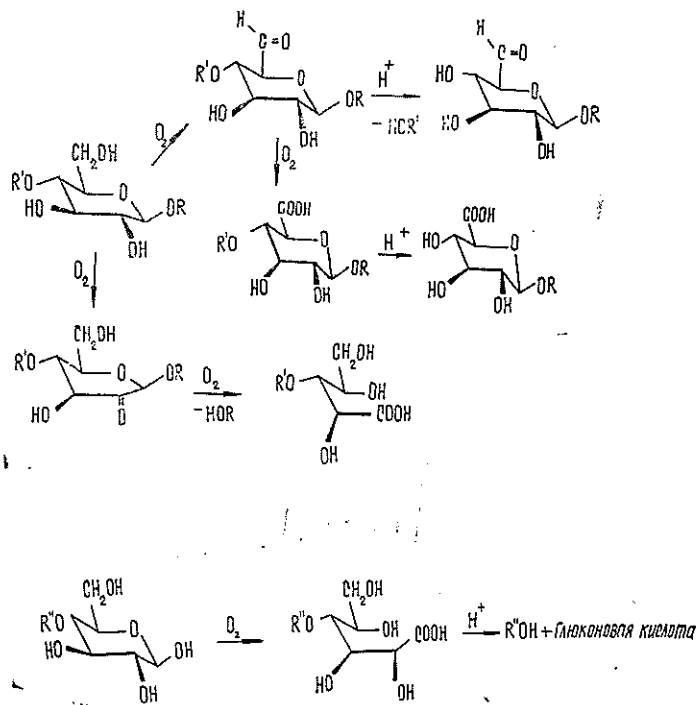


Рис. 3. Гипотетическая схема окислительно-гидролитической деструкции целлюлозы в процессе кислородно-органо-солевой варки

в ходе кислородно-органосольвентной делигнификации включает в себя окислительную и гидролитическую стадии, причем первая из них, по-видимому, в значительной мере определяет скорость деполимеризации.

Сравнение содержания окисленных групп в сульфатной и кислородно-органосольвентной ТЦ показывает, что если количество карбоксильных и кетонных групп у них одного порядка, то содержание альдегидных групп расходится более чем на порядок (табл. 1). Вместе с тем, значения средневязкостной СП различаются лишь в 2—2,5 раза. Это позволяет утверждать, что окисление спиртовых групп до альдегидных — основной результат полимераналогичных превращений. Наиболее вероятным направлением окисления, по аналогии с известными окислительными процессами, по-видимому, является первичная спиртовая группа. На основании данных проведенного исследования, общих знаний органической химии и некоторых выводов предыдущей работы [13] может быть представлена гипотетическая схема окислительно-гидролитических превращений целлюлозы в водно-органических средах, приводящих к снижению ее молекулярной массы (рис. 3). Очевидно, более точные сведения о механизмах деструкции, в частности о влиянии ацетилирования на деполимеризацию целлюлозы [13] в ходе варки, могут быть получены с использованием модельных соединений.

Таблица 2

Образец	Разрывная длина, м	Сопротивление		Плотность отливка, г/см <sup>3</sup>	Белзна, %	Средневзвешенная длина волокон, мм	Модуль сдвига, МПа
		раздира-нию, мН	продавлива-нию, кПа				
КАЗ	7 000	210	185	0,73	40	0,56	1 060
КЭЗ	8 000	260	190	0,73	36	0,60	1 190
КУ2	8 450	250	195	0,80	25	0,63	1 300
СФА	10 350	495	350	0,82	25	0,79	1 285

Снижение СП заметно сказывается на таких показателях механической прочности целлюлозы, как сопротивление раздиранию и разрывная длина [9]. При этом для волокнистых полуфабрикатов, полученных даже различными методами делигнификации, наблюдается линейная зависимость между упомянутыми характеристиками и СП в определенных интервалах значений [8].

В табл. 2 приведены некоторые показатели механической прочности кислородно-органосольвентных и сульфатной ТЦ. Между разрывной длиной, сопротивлением раздиранию и СП приведенных образцов имеется прямая зависимость с коэффициентами корреляции соответственно 0,986 и 0,990. Таким образом, есть основание считать, что деполимеризация макромолекул полисахаридного комплекса в процессе кислородно-органосольвентной варки является одной из основных причин снижения прочностных свойств кислородно-органосольвентной ТЦ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

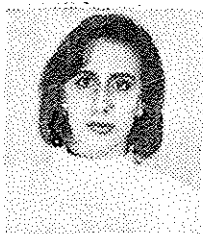
- [1]. Влияние диоксиана на скорость кислотно-каталитического расщепления о-гликозидных связей / Т. С. Селиверстова, Л. Г. Матусевич, М. А. Кушнер, В. М. Резников // Химия древесины.—1985.—№ 1.—С. 70—73. [2]. Дейнеко И. П., Евтюгин Д. В. Новый вариант кислородной варки // Лесн. журн.—1989.—№ 4.—С. 135—136.—(Изв. высш. учеб. заведений). [3]. Дейнеко И. П., Костюкевич Н. Г., Измайлова Н. Ф. Свойства кислородно-уксуснокислотной целлюлозы // Лесн. журн.—1990.—№ 1.—С. 100—103.—(Изв. высш. учеб. заведений). [4]. Дейнеко И. П., Никитина О. В. Кислородная варка щепы в водно-спиртовых растворах // Лесн. журн.—1989.—№ 1.—С. 128—130.—(Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Древесина (химия, ультраструктура, реакции) / Пер. с англ. Д. Фенгел, Г. Вегенер; Предисл. Леоновича А. А.—М.: Лесн. пром-сть, 1988.—512 с. [6]. Оболенская А. В., Ельницкая З. П., Леонович А. А. Лабораторные работы по хи-

мни древесины и целлюлозы // Учеб. пособие для вузов.—М.: Экология, 1991.—320 с. [7]. Шарков В. И., Куйбина Н. И. Химия гемицеллюлоз.—М.: Лесн. пром-сть, 1972.—440 с. [8]. Clark J. A. Properties and treatment of pulp for paper // Cellulose and Cellulose Derivatives, Part 2.—New York; London: Ed. Enterscience Publ. Inc., 1954.—P. 666—668. [9]. Clark J. A. Pulp technology and treatment for paper.—San Francisco: Ed. Miller Freeman Pulp. Inc., 1974.—784 p. [10]. Molecular weight distribution of cellulose by on-line size exclusion chromatography low angle laser light scattering. Part 1. / J. M. Lauriol, P. Froment, F. Pla, D. Robert // Holzforschung.—1987.—Vol. 42, N 2.—P. 109—112. [11]. Neto C. P. Delignification par les procedes alkalins et par solvolysse oxidante en milieux ethanol-eau et acid acetique-eau // These doctoral d'INPG. 26 Fev.—Grenoble, 1992.—298 p. [12]. Neto C. P., Robert A. Delignification du bois d'Eucalyptus en milieu acid acetique-eau. Effect d'addition d'oxygen sous pression. // Holzforschung.—1992.—Vol. 46, N 1.—P. 69—76. [13]. Polysaccharides behaviour during oxygen delignification in organic solvent-water media / Neto C. P., Evtuguin D. V., Zarubin M. Ya, Robert A. // Extended Abstract of 2-nd EWLP, 2—4 Sept.—Grenoble, France, 1992.—P. 73—74. [14]. Раньбу В. Г. «Weak links» in polysaccharides chains as related to modified groups // J. Polym. Sci.—1961.—Vol. 53.—P. 131—140. [15]. Rozmarin G. h. Fundamentari macromoleculare ale chimiei Lemnului. Bucuresti: Editura Cehnica, 1984.—P. 370—375. [16]. Szejtli J. Saurehydrolyse glycosidischer Bindungen. Leipzig: VEB Fashbuchverlag, 1976.

Поступила 31 мая 1994 г.

УДК 676.1.022.6.001.5

М. О. ЛЕОНОВА, Л. Ф. ЛЕВИНА, С. И. СУВОРОВА, И. Л. ШАПИРО, Р. З. ПЕН



Леорова Марина Олеговна родилась в 1970 г., окончила в 1992 г. Сибирский технологический институт, аспирант кафедры технологии целлюлозы, бумаги и химических волокон СТИ. Имеет 4 печатных труда.



Левина Лариса Федоровна родилась в 1941 г., окончила в 1964 г. СТИ, кандидат технических наук, доцент кафедры ТЦБ и ХВ СТИ. Имеет более 30 печатных трудов в области технологии целлюлозы и изучения свойств волокнистых полуфабрикатов.



Суворова Светлана Ивановна родилась в 1936 г., окончила в 1959 г. СТИ, кандидат технических наук, доцент кафедры ТЦБ и ХВ СТИ. Имеет более 30 печатных трудов в области химии и технологии целлюлозы.

Шапиро Ида Львовна родилась в 1941 г., окончила в 1963 г. СТИ, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры ТЦБ и ХВ СТИ. Имеет более 40 печатных трудов в области химии лигнина, изучения технологии и свойств целлюлозы из древесины лиственницы; разработки новых методов делигнификации.



Пен Роберт Зусьевич родился в 1936 г., окончил в 1959 г. Сибирский технологический институт, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии целлюлозы, бумаги и химических волокон СТИ. Имеет более 180 печатных трудов в области химии делигнификации; технологии и свойств целлюлозы из древесины лиственницы; математического моделирования технологических процессов.



## НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ ДЕЛИГНИФИКАЦИЯ ДРЕВЕСИНЫ. 2. ВАРКА ОСИНОВОЙ ЩЕПЫ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ПРОПИТКОЙ И НИЗКИМ ЖИДКОСТНЫМ МОДУЛЕМ

В лабораторных условиях решена проблема пропитки производственной осиновой щепы варочным реагентом. Применен метод планирования эксперимента Коно-2. За основной фактор варьирования приняты продолжительность варки и расход катализатора (серной кислоты).

**Under laboratory conditions a problem of cooking agent impregnation of industrial aspen chips has been solved. Method of experiment planning, KONO-2 has been applied. Cooking time and catalyst consumption (sulphuric acid) are taken as a main varying factor.**

Выполненное ранее исследование делигнификации древесины в системах органическая кислота — пероксид водорода — вода — катализатор [3] выявило принципиальную возможность получения указанным способом волокнистых полуфабрикатов с широким диапазоном варьирования выхода и свойств. Однако из-за трудностей протекания массообменных процессов опыты проводили в условиях, далеких от промышленных: варкам подвергали древесину в виде опилок или тонкой стружки при высоком жидкостном модуле (10 и выше). Дальнейшие исследования показали, что варка щепы нормальных размеров при жидкостном модуле, приближенном к производственным условиям, возможна только с применением принудительной пропитки варочным раствором.

Древесную щепу можно рассматривать как пористое тело со сквозными и квазитупиковыми капиллярами. Пропитка таких тел затрудняется тем, что давление находящегося в капиллярах воздуха возрастает по мере проникновения жидкости. Скорость пропитки определяется движущей силой процесса — перепадом давлений  $\Delta P$ .

При атмосферном давлении защемленный газ в капиллярах находится под давлением, равным сумме капиллярного и атмосферного давлений ( $P_k + P_0$ ), и движущий перепад давлений  $\Delta P$  равен нулю [1]:

$$\Delta P = P_k + P_0 - P_0 \frac{l_0}{l_0 - l} - \rho g l. \quad (1)$$

где  $l_0$  — длина капилляра;

$l$  — длина пропитанного участка капилляра;

$\rho$  — плотность жидкости;

$g$  — ускорение свободного падения.

Предельная степень пропитки характеризуется следующим соотношением:

$$\varphi_\infty = \frac{l_\infty}{l_0} = \frac{P_k}{P_k + P_0} l_0 / l_0 = \frac{P_k}{P_k + P_0}. \quad (2)$$

При произвольных давлениях, когда внешнее давление на жидкость  $P_n$  и давление газа в капиллярах перед началом пропитки  $P_1$  отличается от атмосферного, предельную степень пропитки находят из условия равенства давления защемленного газа и внешнего давления в момент установления капиллярного равновесия:

$$\varphi_\infty = (P_k + P_n - P_1) / (P_k + P_n). \quad (3)$$

Анализируя выражение (3), можно сделать вывод о возможности использования предварительного вакуумирования образцов или нагнетания жидкостей под действием избыточного внешнего давления для существенного повышения полноты и скорости пропитки.

Варкам с принудительной пропиткой путем предварительной вакуумизации подвергали древесину осины в виде щепы нормальных размеров (производственной рубки). Варочный раствор состоял из равных объемов ледяной уксусной кислоты и 18 %-го водного раствора пероксида водорода. В качестве катализатора использовали серную кислоту [4].

Для принудительной пропитки щепы варочным раствором использовали лабораторную установку, состоящую из толстостенного стеклянного сосуда для древесины, емкости для варочного раствора и водоструйного вакуум-насоса. Необходимое для варки количество древесины помещали в пропиточный сосуд, эвакуировали воздух до достижения остаточного давления около 60 мм рт. ст., выдерживали в течение 10 мин и открывали кран на шланге, соединяющем пропиточный сосуд с емкостью варочного раствора, который быстро заполнял сосуд и частично впитывался в щепу. Спустя 10 мин избыточное количество жидкости сливали. При пропитке вакуумированной щепы впитавшийся варочный раствор составлял две части на одну часть щепы (по массе). Без предварительной вакуумизации за то же время варочный раствор лишь смачивал поверхность щепы, почти не проникая внутрь.

К подготовленным образцам прибавляли варочный раствор до достижения жидкостного модуля 4. Варки проводили в изотермических условиях при температуре 80 °С. Переменные факторы (продолжительность варки и расход катализатора) варьировали в соответствии с планом эксперимента Коно-2 второго порядка (для последнего фактора принята логарифмическая шкала) [2]. Условия и результаты эксперимента приведены в табл. 1 (данные в числителе). Кроме общепринятых характеристик, вычисляли степени конверсии лигнина и углеводов в виде отношения количества растворившегося в ходе варки компонента к его количеству в исходной древесине.

Зависимость каждого из выходных параметров от переменных факторов варки аппроксимировали уравнениями регрессии второго поряд-

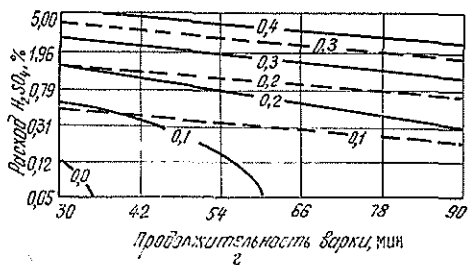
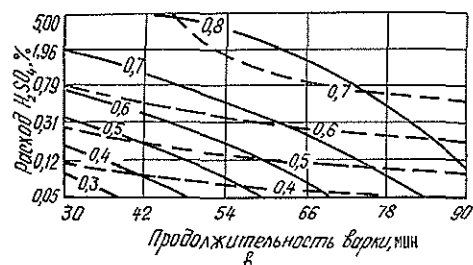
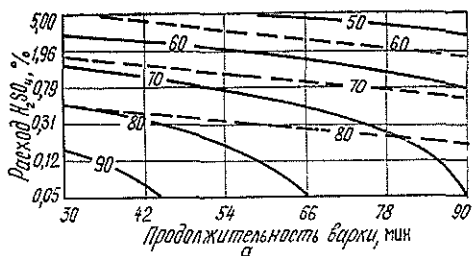
Таблица 1

Условия и результаты эксперимента при жидкостном модуле 4 (числитель) и 2 (знаменатель)

Продолжительность варки, мин	Расход катализатора, %	Выход полуфабриката, %	Содержание остаточного лигнина, %	Степень конверсии	
				лигнина	углеводов
90	5,00	45,8/52,2	7,2/8,6	0,85/0,79	0,46/0,58
30	5,00	54,7/59,8	9,5/11,9	0,76/0,72	0,37/0,33
90	0,05	68,6/93,3	7,4/13,9	0,76/0,41	0,19/0,00
30	0,05	97,9/97,5	18,1/16,0	0,17/0,27	0,00/0,00
90	0,50	64,6/67,9	6,0/9,2	0,82/0,71	0,23/0,22
30	0,50	79,1/82,9	10,9/11,9	0,59/0,57	0,11/0,08
60	5,00	46,9/54,0	8,3/11,1	0,82/0,72	0,51/0,39
60	0,05	83,9/96,2	12,5/13,4	0,51/0,40	0,07/0,00
60	0,50	72,9/76,7	8,6/10,2	0,71/0,63	0,15/0,13

ка, которые использовали для построения изолиний свойств (см. рисунок, сплошные линии).

Увеличение продолжительности процесса и расхода катализатора приводит к снижению выхода, причем уже небольшие количества серной кислоты (0,05...0,10 %) дают заметный каталитический эффект. Дальнейшее увеличение расхода катализатора менее эффективно, хотя проявляется во всем изученном диапазоне варьирования (см. рисунок а). При больших расходах серной кислоты (3...5 %) проявляется ее отрицательное влияние на варку: увеличивается деструкция полисахаридов (см. рисунок г) и, вероятно, появляются конденсационные процессы в лигнине. На это указывает замедление его растворения (см. рисунок в) и наблюдавшееся визуально явное потемнение целлюлозы. В результате содержание остаточного лигнина в целлюлозе при варках с повышенным расходом серной кислоты оказывается даже выше, чем при варках с малыми и умеренными расходами катализатора (см. рисунок б).



Зависимость выхода волокнистого полуфабриката (а), содержания лигнина (б), степени конверсии лигнина (в) и углеводов (г) от переменных факторов варки при жидкостном модуле 4 (сплошные линии) и 2 (пунктирные линии)

Анализ результатов позволил выявить область изученного факторного пространства с хорошими технологическими характеристиками: продолжительность варки 1 ч, расход серной кислоты 0,5 %. В этих условиях делигнификация протекает достаточно селективно, практически без деструкции углеводов. Получен волокнистый полуфабрикат с выходом из древесины 73 % и содержанием лигнина 10 %, имеющий следующие прочностные свойства, определенные по стандартным методикам: разрывная длина 5100 м, удлинение 1,4 %, сопротивление продавливанию 137 кПа.

С учетом высокой эффективности принудительной пропитки древесины варочным раствором была сделана попытка провести варочный процесс при сверхнизком жидкостном модуле. С этой целью выполнена серия опытов в тех же условиях, которые описаны выше, но без добавок дополнительного количества варочного раствора к пропитанной щепе после отбора свободно стекающей жидкости. Жидкостный модуль при этом равнялся 2. Значения переменных факторов и выходных параметров приведены в табл. 1 (данные в знаменателе). Результаты обработки отражены на рисунке (пунктирные линии). Уменьшение модуля замедляет варочный процесс, однако практически не изменяет селективности делигнификации. При интерполяции по времени к одной и той же степени конверсии лигнина (табл. 2) и одинаковом расходе катализатора (0,5 %) продолжительность варки увеличивается с 57 до 90 мин. Остальные характеристики процесса остаются практически неизменными.

Таблица 2  
Результаты интерполяции характеристик варки

Показатели	Значения показателей для жидкостного модуля	
	4	2
Продолжительность варки, мин	57	90
Выход полуфабриката, %	72,9	72,0
Содержание лигнина, %	8,8	8,9
Степень конверсии:		
лигнина	0,70	0,70
углеводов	0,15	0,16

Полученные результаты открывают возможность практической реализации варки как в котлах периодического действия (при жидкостном модуле 4,0... 4,5), так и в установках непрерывного действия (при модуле 2... 3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Аксельруд Г. А., Альтшулер М. А. Введение в капиллярно-химическую технологию.—М.: Химия, 1983.—264 с. [2]. Пен Р. З., Менчер Э. М. Статистические методы в целлюлозно-бумажном производстве.—М.: Лесн. пром-сть, 1973.—119 с. [3]. Пен Р. З., Суворова С. И., Леонова М. О. Низкотемпературная окислительная делигнификация древесины и свойства волокнистых полуфабрикатов // Лесн. журн.—1993.—№ 2—3.—С. 57—60.—(Изв. высш. учеб. заведений). [4]. Зильбергейт М. А., Резников В. М. Изучение основных закономерностей делигнификации древесины водными растворами органических надкислот.—Минск, 1981.—15 с.—Деп. в ОНИИТЭХИМ 22.06.81, № 503 ХП-Д81.

Поступила 14 июля 1994 г.



УДК 542.943 : 547.992.3 + 539.19

А. Ю. ПОВАРОВА, Э. И. ЧУПКА

Поварова Анна Юрьевна родилась в 1969 г., окончила в 1993 г. Ленинградский технологический институт, аспирант ВНИИБа. Основное направление научной деятельности: исследование каталитического окисления компонентов древесины в водно-органических средах.



Чупка Эдуард Имерихович родился в 1936 г., окончил в 1964 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией АО ВНИИБ. Имеет 285 научных трудов в области исследования окислительно-восстановительных превращений компонентов древесины в условиях делигнификации.



## ЭФФЕКТИВНОСТЬ КИСЛОТНО-ОСНОВНОГО И ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО КАТАЛИЗА ПРИ ОКИСЛЕНИИ ДРЕВЕСИНЫ В ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ СРЕДАХ

### 3. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ КИСЛОРОДА И ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ ОКИСЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ И ЛИГНИНА В ЩЕЛОЧНЫХ СРЕДАХ

Хемиллюминесцентным методом исследовано влияние давления кислорода и температуры на скорость окисления древесины осины и диоксан-лигнина Пеппера в водно-щелочной и водно-спиртово-щелочной средах, микроманометрическим — кинетика потребления кислорода при окислении древесины осины в щелочной и этанольно-щелочной системах.

By hemiluminescent method it has been investigated the influence of oxygen pressure and temperature on oxidizing rate of aspen wood and pepper dioxanlignin in aqueous-alkali and aqueous-spirit-alkali mediums, by macromanometric - kinetics of oxygen consumption at aspen wood oxidizing in alkali and ethanol-alkali systems.

Ранее [4, 5] хемиллюминесцентным методом было установлено, что скорость окисления березовой древесины и лигнина пероксидом водорода в водно-органических средах при нейтральных значениях рН линей-

но возрастает с повышением доли органического растворителя. Для холоцеллюлозы такая зависимость характеризуется максимумом при определенном соотношении вода:органический растворитель, что позволяет за счет изменения этого соотношения повысить селективность процесса окисления древесины, добиваясь максимальной скорости окисления лигнина при минимальной скорости окисления углеводов. Кроме того, отмечено резкое повышение скорости окисления древесины и лигнина как в водных, так и в водно-органических средах при переходе в сильнощелочную область. При этом эффективность щелочного катализа в водно-органических системах существенно выше, чем в водно-щелочной.

Оценка неспецифических и специфических эффектов среды при изучении влияния растворителя на электронную структуру и спектрально-люминесцентные свойства модельных соединений лигнина была выполнена методами квантовой химии. Показано, что неспецифическое влияние растворителя на энергии мгновенного отрыва электрона от электронейтральных молекул модельных соединений лигнина (т. е. на их способность к окислению)  $I^0 > 1$  эВ. В то же время специфические эффекты как протонных, так и апротонных растворителей незначительны (0,05...0,10 эВ). Влияние растворителя на электронные спектры модельных соединений лигнина несущественно. Нами установлено значительное понижение энергии отрыва электрона от молекул замещенных фенолов, обусловленное диссоциацией их фенольных гидроксильных групп. Растворитель оказывает на анион стабилизирующее воздействие, однако суммарный эффект диссоциации и неспецифической сольватации не меняет соотношения  $I(\text{RO}^-) < I(\text{ROH})$ , обуславливающего более легкую окисляемость замещенных фенолов в щелочных растворах (основной катализ). Данные о влиянии растворителя на реакционную способность интермедиатов окисления лигнина в щелочных средах свидетельствуют об увеличении эффективности щелочного катализа начальной стадии окисления модельных соединений лигнина при переходе от водных к водно-органическим средам, что согласуется с полученными экспериментальными данными.

Таким образом, щелочной катализ может являться одним из наиболее эффективных путей ускорения процесса окислительной делигнификации в водно-органических средах [6].

При применении в качестве окислителя пероксида водорода значительное его количество расходуется непроизводительно на реакцию самораспада. Было установлено [2, 6], что механизмы окисления пероксидом водорода и кислородом сходны, так как в обоих случаях процесс идет с образованием и потреблением гидроксильного радикала. Поэтому представляет практический и теоретический интерес использование в качестве окислителя кислорода.

В данном сообщении для выбора оптимальных условий проведения процесса окислительной делигнификации в водно-органических средах (0,1 н. NaOH и 0,1 н. NaOH:60 об. % этанола) исследовано влияние давления кислорода и температуры на динамику окисления древесины и лигнина в щелочной области значений рН. Хемилюминесцентным методом изучена динамика окисления кислородом древесины осины и диоксан-лигнина Пеппера при варьировании следующих параметров: избыточного давления кислорода  $p_{\text{O}_2}$  от 0 до 7,5 атм; температуры от 40 до 70 °С.

Исследование динамики хемилюминесценции при окислении древесины (концентрация 40 г/л) и лигнина (5 г/л) в щелочной и этанольно-щелочной средах при разном давлении  $\text{O}_2$  и температуре  $t = 60$  °С позволило сделать вывод, что интенсивность  $I_{\text{хл}}$  и светосумма  $S_{\text{хл}}$  хеми-

Рис. 1. Зависимость интенсивности (сплошная линия) и светосуммы хемилюминесценции (штриховая линия) при окислении древесины осины (1, 1\*) и диоксан-лигнина (2, 2\*) в щелочной (1, 2) и этанольно-щелочной (1\*, 2\*) средах от давления  $p_{O_2}$

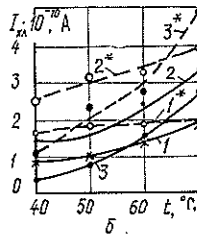
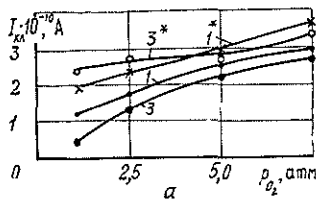
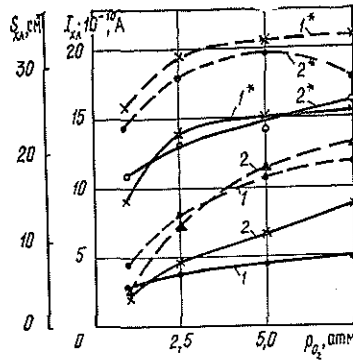


Рис. 2. Динамика изменения стационарного уровня  $I_{хл}$  при окислении кислородом воздуха древесины (1, 1\*, 2, 2\*) и лигнина (3, 3\*) в щелочной (1, 2, 3) и этанольно-щелочной (1\*, 2\*, 3\*) средах в зависимости от давления  $O_2$  в системах при  $t = 60^\circ C$  (а) и температуры (б) ( $I, I^* - p_{O_2} = 0$  атм; 2, 2\* — 5 атм; 3, 3\* — 2,5 атм;  $p_{O_2}$  — избыточное)

люминесценции (рис. 1) как в щелочной, так и в этанольно-щелочной средах возрастают с увеличением давления кислорода. Зависимость  $S_{хл}$  при окислении лигнина от  $p_{O_2}$  в этанольно-щелочной среде характеризуется максимумом при  $p_{O_2} = 5$  атм. При переходе из щелочной среды в этанольно-щелочную наблюдается увеличение  $I_{хл}$  и  $S_{хл}$  соответственно в 3 и 1,5—2 раза как для древесины, так и для лигнина. Необходимо отметить, что динамика  $I_{хл}$  характеризуется стационарным уровнем, зависящим от давления кислорода (рис. 2, а).

Температурные зависимости  $I_{хл}$  при окислении древесины кислородом воздуха и избыточным  $p_{O_2} = 5$  атм в щелочной и этанольно-щелочной средах подчиняются уравнению Аррениуса, что дает возможность оценить энергии активации  $E_{акт}$ , значения которых практически не зависят от смены среды (рис. 3). Увеличение  $E_{акт}$  с ростом избыточного  $p_{O_2}$  от 0 до 5 атм может быть обусловлено повышением стационарного уровня в том же интервале давлений в 1,5—2 раза.

Кроме того, нами исследовано влияние температуры на  $I_{хл}$  при окислении диоксан-лигнина Пеппера кислородом (избыточное  $p_{O_2} = 2,5$  атм). Полученная температурная зависимость, представленная на рис. 3, подчиняется уравнению Аррениуса с энергиями активации для щелочной и этанольно-щелочной сред соответственно 55,3 и 59,9 кДж/моль.

Следует отметить, что при изменении температуры от 40 до 70 °C происходит повышение стационарного уровня  $I_{хл}$ , которое для процесса окисления древесины составляет 1,5—2 раза, для лигнина — 5—7 раз (см. рис. 2, б).

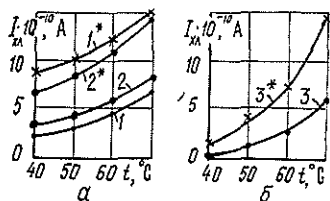


Рис. 3. Температурные зависимости  $I_{хл}$  при окислении древесины (а) и лигнина (б) кислородом воздуха (1, 1\*) при  $P_{O_2} = 5$  атм (2, 2\*) и 2,5 атм (3, 3\*) в щелочной (1, 2, 3) и этанольно-щелочной (1\*, 2\*, 3\*) средах

Полученные данные об окислении древесины и лигнина кислородом подтверждают повышение эффективности щелочного катализа процесса окисления при переходе от щелочной к этанольно-щелочной среде. Рост  $I_{хл}$  при смене среды наблюдается во всем диапазоне исследованных давлений и температур.

При окислении древесины повышение температуры оказывает более значительное влияние на изменение  $I_{хл}$ , чем применение повышенного давления кислорода. Для процессов окисления лигнина существенны оба фактора. Однако более значительное влияние на скорость окисления кислородом как древесины, так и лигнина, по данным хемилюминесценции, оказывает переход от щелочной к этанольно-щелочной среде, что позволяет снизить рабочее давление и температуру.

Ранее установлено [3], что хемилюминесценция при окислении лигнина определяется потреблением кислорода, о чем свидетельствует отсутствие хемилюминесценции при продувке реактора аргоном (бескислородная среда). Нами изучено изменение количества и скорости потребления  $O_2$  микроанометрическим методом ( $t = 50^\circ C$ ) в щелочной и этанольно-щелочной средах (1 н. NaOH и 1 н. NaOH : 60 об. % этанола) при окислении древесины осины. Результаты показывают (рис. 4), что в этанольно-щелочной среде скорость потребления кислорода  $V_{O_2}$  снижается. При этом, если в щелочной среде процесс окисления протекает на сравнительно низкую глубину и характеризуется наличием стационарного уровня, то в случае этанольно-щелочной среды, несмотря на то, что скорость окисления ниже, процесс не характеризуется стационарным уровнем, а протекает на большую глубину. Таким образом, общее потребление  $O_2$  увеличивается. Например, если при проведении процесса в щелочной среде стационарный уровень соответствует  $V_{O_2} = 48 \cdot 10^{-8}$  моль, то для этанольно-щелочной среды при продолжительности окисления  $\tau = 14$  мин общее потребление  $O_2$  возрастает до  $140 \cdot 10^{-8}$  моль, т. е. приблизительно в 3 раза.

При сравнении данных о потреблении кислорода, полученных микроанометрическим методом, с результатами исследования динамики хемилюминесценции окисления древесины следует отметить, что оба метода показывают увеличение количества потребленного  $O_2$  и  $I_{хл}$

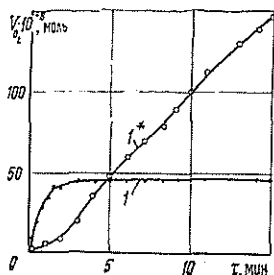


Рис. 4. Кинетические кривые потребления  $O_2$  при окислении древесины осины в щелочной (I) и этанольно-щелочной (I\*) средах

приблизительно в 3 раза при переходе из щелочной в этанольно-щелочную среду.

Вероятно, помимо вышеперечисленных, не менее значимым фактором может явиться использование катализаторов (окислительно-восстановительный катализ), содержащих металлы переменной валентности [1].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Каталитическое окисление древесины и ее компонентов в условиях окислительных способов делигнификации. 1. Влияние феррицианида калия на скорость окисления древесины и ее компонентов / Э. И. Чупка, С. Ж. Трофимова, С. В. Егорова, И. М. Лужанская // Химия древесины.—1991.—№ 5.—С. 19—25. [2]. Лужанская И. М. Кинетика ингибированного окисления древесины в условиях щелочной варки с предгидролизом: Дис. ... канд. хим. наук.—Л., 1989.—189 с. [3]. Сергеев А. Д. Хемиллюминесценция при окислении лигнина в условиях щелочных способов делигнификации: Дис. ... канд. хим. наук.—Л., 1984.—137 с. [4]. Щелочной катализ при окислении древесины и ее компонентов в водно-органических средах / Э. И. Чупка, Д. Г. Селентьев, С. Г. Семенов, Н. В. Ходырева // Химия древесины.—1993.—№ 4.—С. 6—13. [5]. Чупка Э. И., Ходырева Н. В., Семенов С. Г. Эффективность кислотно-основного и окислительно-восстановительного катализа при окислении древесины в водно-органических средах. 1. Квантово-химическая оценка влияния растворителя на скорость окисления фенолов, моделирующих нуклеофильные фрагменты лигнина // Лесн. журн.—1993.—№ 2.—3.—С. 60—67.—(Изв. высш. учеб. заведений). [6]. Chupka E. I. The main trends in activity of laboratory of physical-chemical analysis in pulp and paper industry // Pulping Conference, Marriott Copley Place Hotel, Boston, November 1—5, 1992.—USA: TAPPI PRESS, 1992.—Book 3.—P. 1273—1292.

Поступила 27 апреля 1994 г.

УДК 676.16.06

**Э. И. ЧУПКА**, Л. П. АНИСИМОВА, Б. А. МОИСЕЕВ, Н. Е. РИХТЕР

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт бумаги»  
С.-Петербургская лесотехническая академия

### ИНГИБИРОВАННОЕ ОКИСЛЕНИЕ В УСЛОВИЯХ СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ С ПРЕДОБРАБОТКОЙ ДРЕВЕСИНЫ\*

Исследована возможность эффективного предотвращения деструкции целлюлозы и увеличения скорости делигнификации в ходе сульфатной варки при введении стадии предварительной обработки щепы различными химическими добавками в нейтральных и слабокислых средах.

A possibility of efficient preventing the destruction of cellulose and increasing the rate of delignification in the process of sulphate pulping when introducing a stage of chip pretreatment by different chemical additives in neutral and low-acid mediums has been investigated.

В настоящее время повышение коэффициента использования древесного сырья — одна из актуальных задач целлюлозно-бумажной промышленности. В качестве первоочередных мер могут быть использованы те, которые позволяют увеличить выход целлюлозы без изменения основного технологического процесса и увеличения капитальных затрат. К ним относится модификация существующих способов делигнификации путем использования различных химических добавок. Хорошо

\* Публикуется в порядке обсуждения.

известно, что применение гидразина, боргидрида натрия, аминов, полисульфидов, антрахинона и многих других веществ повышает выход целлюлозы или ускоряет щелочную варку. Общим для этих веществ является то, что они выполняют роль ингибиторов радикальных реакций, позволяющих блокировать нежелательные процессы окислительно-го сочетания в лигнине и деструкцию полисахаридной части [4].

Однако, если ингибированному окислению в щелочной среде посвящено достаточно исследований, то эффективность ингибированного окисления в нейтральной и слабокислой средах практически не изучена. Ранее было показано, что уже в момент контакта древесины со щелочью (до начала делигнификации) за счет кислорода, находящегося в порах, резко инициируются окислительные превращения древесных компонентов, в первую очередь полифенолов [3]. Эти процессы несравненно медленнее протекают при значениях рН ниже рК фенольных гидроксидов лигнина [5]. Поэтому, если до начала контакта со щелочью у активных центров в щепе уже будет находиться потенциальный ингибитор, то эффективность блокирования окисления будет выражена в большей степени. Было показано, что проведение предварительной обработки щепы (пропитка или пропарка) перед варкой водными растворами таких ингибиторов, как гидразин и амины (моноэтаноламин и этилендиамин), увеличивает эффективность тушения хемилюминесценции при контакте со щелочными растворами в 10—20 раз [2] и снижает расход этих реагентов при последующей варке на 30...50 % с сохранением основных качественных показателей полуфабриката [1]. Эти данные позволяют предположить, что уже на начальных стадиях в лигнине может происходить окисление с образованием новых, более устойчивых к действию щелочей, С—С связей между фенольными фрагментами лигнина. Если это так, то предобработка ингибиторами при нейтральных и слабокислых значениях рН может привести за счет блокировки полирекомбинационных процессов к ускорению и углублению делигнификации.

Кроме того, введение стадии предварительной обработки древесины водными растворами ингибиторов (предгидролиз) позволяет умень-

Таблица 1

Показатели сульфатной целлюлозы после варки с предобработкой и отбелки Д-Щ-Д

Добавки, % от абс. сухой древесины		После варки			После отбелки		
на предобработку	на варку	Выход, % от древесины	Степень полимеризации	Доля лигнина, %	Выход, % от древесины	Степень полимеризации	Белизна, %
Варка осины с предгидролизом							
Контроль	—	32,8	1350	1,6	30,2	1450	86,2
5 % нитрита натрия	—	41,5	1750	1,7	39,5	1800	82,6
» » »	1 % антрахинона	42,4	1940	1,5	40,2	1960	85,3
Варка ели с предгидролизом							
Контроль	—	39,3	1200	4,4	36,5	1050	76,6
5 % нитрита натрия	—	48,0	1350	3,9	44,6	1240	74,4
—	25 % гидразина	42,9	1500	3,2	40,5	1300	78,0
5 % нитрита натрия	25 % гидразина	49,0	1450	3,3	45,8	1300	76,1
Контрольная сульфатная варка без предгидролиза							
—	—	45,0	1400	3,9	43,2	960	75,8

Примечание. 1. Условия предгидролиза: стоянка при температуре 170 °С в течение 80 мин; гидромодуль 1:4. 2. Режим сульфатной варки: подъем температуры от 80 до 170 °С в течение 90 мин; стоянка при 170 °С—80 мин; гидромодуль 1:4; расход щелочи к массе древесины 18 % (ель) и 15 % (осина); сульфидность 25 %.

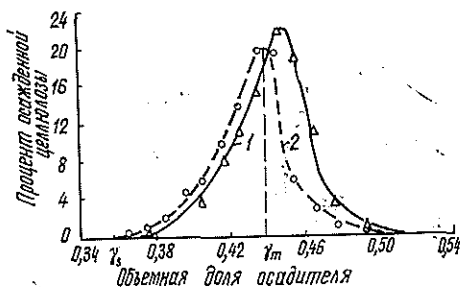
шить содержание токсичных сернистых веществ в газовых выбросах, предотвращая их образование при сульфатной варке [7].

Цель настоящей работы — исследовать возможность эффективного предотвращения деструкции целлюлозы и увеличения скорости делигнификации в ходе сульфатной варки за счет введения стадии предварительной обработки щепы различными химическими добавками в нейтральных и слабнокислых средах.

Было обнаружено, что ингибирование деструкции полисахаридов древесины на стадии предгидролиза (слабокислая среда) приводит при последующих сульфатных варках к стабилизации углеводного комплекса [6]. Так, применение нитрита натрия в количестве 5 % от массы абс. сухой древесины увеличивает выход полуфабриката на 6...8 %, а среднюю степень полимеризации (СП) — примерно в 1,5 раза по сравнению с контролем (табл. 1).

Для оценки влияния ингибированного предгидролиза на изменение молекулярно-массового распределения (ММР) целлюлозы был применен разработанный нами метод турбидиметрического титрования из бесцветного раствора железовиннонатриевого комплекса. Начальная концентрация целлюлозы в растворе  $3 \cdot 10^{-5}$  г/см<sup>3</sup>. Осадитель — смесь глицерина с водой в соотношении 1:6. Оптическую плотность (мутность) раствора измеряли на фотоэлектрическом турбидиметре при температуре  $(25,0 \pm 0,1)$  °С в многоходовой кювете с длиной оптического хода 350 мм. Показателем неоднородности ММР исследуемых препаратов может служить полуширина нормированной дифференциальной кривой турбидиметрического титрования в координатах «процент осажденной целлюлозы — объемная доля осадителя  $\gamma$ ».

Рис. 1. Дифференциальные кривые ТТ сульфатной небеленой целлюлозы осины: 1 — водный предгидролиз; 2 — сульфатная варка с ингибированным предгидролизом (5% нитрита натрия)



Согласно полученным данным (рис. 1), дифференциальная кривая турбидиметрического титрования (ТТ) небеленой целлюлозы после ингибированного предгидролиза и последующей сульфатной варки (кривая 2) смещена относительно аналогичной кривой ТТ контрольного опыта (кривая 1) в сторону меньшей объемной доли осадителя. Добавка нитрита натрия на предгидролиз повышает не только молекулярную массу (ММ) наиболее высокомолекулярной фракции в небеленой целлюлозе (порог осаждения  $\gamma_s$ ) и среднюю СП, величина которой коррелирует с объемной долей осадителя, отвечающей максимуму на дифференциальной кривой титрования  $\gamma_m$ , но, что еще более существенно, повышает однородность ММР, так как уменьшается полуширина дифференциальной кривой ТТ (табл. 2).

Следовательно, окислительная деструкция целлюлозы играет существенную роль в условиях предгидролиза. Ингибирование на этой стадии приводит к сохранению при последующей сульфатной варке высокомолекулярной составляющей ММР целлюлозы, деструктирующей при проведении варки по обычной схеме.

Т а б л и ц а 2

Влияние ингибирующих добавок при предгидролизе на показатели ММР сульфатной небеленой целлюлозы осины и холоцеллюлозы (по данным турбидиметрического титрования)

Исследуемый образец	$\overline{СП}$	$\gamma_s$	$\gamma_m$
Сульфатная целлюлоза:			
с водным предгидролизом	1350	0,374	0,448
с ингибированным нитритом натрия предгидролизом	1750	0,366	0,440
Холоцеллюлоза:			
контрольной сульфатной варки	730	0,380	0,436
сульфатной варки с ингибированным тиосульфатом предгидролизом	1050	0,354	0,426
исходная	1400	0,342	0,410

Важное значение имеет тот факт, что при ингибировании окислительной деструкции компонентов древесины как на стадии предгидролиза, так и в процессе сульфатной варки эффект увеличения выхода полуфабриката не является величиной суммарной (см. табл. 1). Так, например, при введении нитрита натрия на предгидролиз еловой щепы выход целлюлозы увеличивается с 39,3 до 48,0 %; при введении 25 % гидразина на стадии сульфатной варки — с 39,3 до 42,9 %. При совместном ингибировании стадии предгидролиза и варки выход составляет 49,0 %, т. е. введение добавки на стадии предобработки в слабокислой среде в большей степени повышает выход целлюлозы после сульфатной варки, чем при ингибировании окислительной деструкции в щелочной среде. При этом достигается экономия расхода щелочи на варку до 20 %.

Итак, с помощью предобработки древесины различными химическими добавками можно предотвратить окислительную деструкцию углеводов при последующей сульфатной варке.

Рассмотрим, как влияет предобработка в нейтральной среде на скорость последующей делигнификации на примере обработки восстановителем — тиосульфатом натрия. Полученные результаты сульфатных варок (выход, жесткость и средняя СП) после предварительной обработки щепы при температуре 170 °С в течение 80 мин 1 %-м водным раствором тиосульфата натрия показывают, что такая обработка снижает жесткость с 54 до 37 п. е., одновременно увеличивая выход полуфабриката на 2,4 % и среднюю СП с 1500 до 1700.

Чтобы убедиться, что ингибированное окисление в условиях предобработки древесины приводит к стабилизации углеводного комплекса, были проведены модельные сульфатные варки холоцеллюлозы с предобработкой (в тех же условиях, что и древесина) раствором тиосульфата натрия и без него. Для характеристики изменения ММР сняты кривые ТТ полученных образцов (рис. 2). Численные значения основных

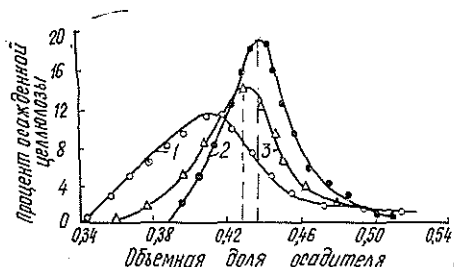


Рис. 2. Дифференциальные кривые ТТ холоцеллюлозы осины: 1 — исходная холоцеллюлоза; 2 — контрольная сульфатная варка холоцеллюлозы; 3 — сульфатная варка с ингибированным предгидролизом (5% тиосульфата натрия)



параметров нормированных дифференциальных кривых титрования, характеризующих однородность ММР образцов, приведены в табл. 2. Наибольшую полуширину, а следовательно, и наименее однородное ММР имеет исходная холоцеллюлоза из осины. Низкие значения показателей  $\gamma_s$  и  $\gamma_m$  указывают на высокую СП исходной холоцеллюлозы, что согласуется с данными вискозиметрического метода. В результате обычной сульфатной варки средняя СП холоцеллюлозы понижается и увеличивается однородность ее ММР. Введение тиосульфата натрия на стадии предобработки холоцеллюлозы приводит к характерным изменениям в положении и форме кривых ТТ, однозначно указывающих на стабилизацию углеводного комплекса. Об эффективности стабилизирующего действия добавки можно судить по изменению показателей  $\gamma_s$  и  $\gamma_m$  относительно показателей кривых ТТ, полученных для образца холоцеллюлозы контрольного опыта.

Однако нельзя исключить, что эффект увеличения выхода и стабилизации качественных показателей целлюлозы, достигнутый при использовании ингибиторов, может быть нивелирован в процессе последующей отбелки. Была проведена сравнительная отбелка двуокисью хлора по схеме Д<sub>1</sub>—Щ—Д<sub>2</sub> образцов, полученных при ингибировании стадии предгидролиза и последующей варки см. табл. 1). Результаты опытов показывают, что стабилизирующее действие химических добавок, введенных на стадиях предгидролиза и варки, сохраняется и при отбелке. Это проявляется в повышении выхода и СП беленой целлюлозы с предобработкой по сравнению с целлюлозой контрольного опыта.

Таким образом, введение стадии предобработки древесины растворами ингибиторов в нейтральной и слабокислой средах, которую можно рассматривать как ингибированный предгидролиз, позволяет повысить выход полуфабриката или проводить более углубленную делигнификацию. Выигрыш в увеличении выхода сохраняется и при дальнейшей отбелке полуфабриката.

Достигнутый положительный эффект стабилизации высокомолекулярных фракций целлюлозы и экономии щелочи на варку дает возможность подойти к разработке способов получения целлюлозы как для химпереработки (особенно полинозных волокон), так и для производства бумаги с одновременным решением вопросов утилизации «щелоков» после стадий предобработки и облагораживания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Влияние ингибиторов окислительной деструкции полисахаридов на качественные показатели сульфатной небеленой целлюлозы / Э. И. Чупка, Л. П. Анисимова, С. В. Егорова, и др. // *Целлюлоза, бумага, картон*.—1992.—№ 2.—С. 25—27.
- [2]. Кондакова М. Э., Чупка Э. И. Исследование механизма химических превращений древесины при щелочных обработках методом хемилюминесценции // *Тез. докл. третьего Всесоюз. совещ. по хемилюминесценции*.—Рига, 1990.—С. 117.
- [3]. Начальные стадии окисления древесины и ее компонентов / Э. И. Чупка, И. М. Лужанская, М. Э. Кондакова, С. Ж. Трофимова // *Бум. пром-сть*.—1990.—№ 11.—С. 13—15. [4]. Чупка Э. И. Ингибированное и каталитическое окисление при модификации щелочных и окислительных способов делигнификации древесины // *Бум. пром-сть*.—1990.—№ 10.—С. 12—14. [5]. Чупка Э. И., Лужанская И. М. Кислотно-основной катализ окислительных превращений углеводов в условиях предгидролиза древесины // *Химия древесины*.—1988.—№ 3.—С. 87—91. [6]. Чупка Э. И., Шалимова Т. В. Кинетическая неоднородность технических целлюлоз. Сообщение 4. Ингибирование окислительной деструкции полисахаридов в условиях предгидролиза // *Химия древесины*.—1990.—№ 3.—С. 81—84. [7]. Эффективность предварительной обработки древесины в условиях щелочных способов делигнификации / Э. И. Чупка, М. Э. Кондакова, И. Л. Бутаева и др. // *Химия древесины*.—1991.—№ 6.—С. 1—10.

УДК 676.1.022

Э. И. ГЕРМЕР, Р. А. ГОРЕНКОВ

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт бумаги»



Гермер Эмиль Исакович родился в 1937 г., окончил в 1962 г. Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института бумаги. Имеет свыше 140 научных трудов по химии и технологии варки целлюлозы, в настоящее время занимается технологией, химией и катализом новых способов делигнификации древесины.

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ  
КИСЛОРОДНО-ЩЕЛОЧНОЙ ДЕЛИГНИФИКАЦИИ  
ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
С ПОМОЩЬЮ 1, 10-ФЕНАНТРОЛИНА.  
5. РОЛЬ МЕТАЛЛОВ, СОДЕРЖАЩИХСЯ В ДРЕВЕСИНЕ,  
В РЕАЛИЗАЦИИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ  
1, 10-ФЕНАНТРОЛИНА**

Установлено, что ускоряющее действие 1, 10-фенантролина при кислородно-щелочной делигнификации древесины связано с наличием в ней металлов переменной валентности.

It has been stated that an accelerating action of 1, 10-phenanthroline at oxygen-alkali delignification of wood is bound up with the presence in it of metals with variable valence.

Каталитическое действие 1, 10-фенантролина (далее фенантролина) при кислородно-щелочной (КЩ) делигнификации древесины объясняется активацией структур протолигнина, связанных с металлами переменной валентности (МПВ), и кислорода в составе сложного комплекса общего вида  $\text{Lign} - \text{M}^{n+} \dots \text{Phen} \dots \text{O}_2$  (где Lign — структура макромолекулы лигнина; М — металл переменной валентности; Phen — 1, 10-фенантролин) [1, 9]. Однако прямые экспериментальные доказательства такого механизма действия фенантролина пока отсутствуют.

Доказательством вышеупомянутого каталитического действия фенантролина могло бы явиться нивелирование его влияния на КЩ делигнификацию при удалении из древесины перед варкой МПВ.

Однако реализация такого простого, на первый взгляд, эксперимента достаточно сложна. Это связано с тем, что определенная часть МПВ исключительно трудно удаляется из древесины (и даже из целлюлозы). Полностью освободиться от них вообще практически невозможно. Например, после непрерывной обработки сульфитной целлюло-

зы в потоке 0,1 н. раствора HCl в течение 14 сут. оставалось железа, меди, марганца соответственно 11 ... 18; 0,2 ... 0,9; 0,2 мг на 1 кг целлюлозы [10]. Причем, содержание меди в этом случае находится в том же диапазоне, что и ее содержание в необработанной древесине. По данным [5, с. 177] оно составляет 0,1 ... 1,0 мг/кг (максимальное из известных значений — около 2,5 мг/кг [2]).

Полностью удалить многие МПВ из древесины или целлюлозы не удается даже при использовании растворов сильных комплексообразователей (трилон Б, диэтилдитиокарбаматы щелочных металлов и др.) или чередовании обработок комплексообразующими соединениями и кислотами, а также при сильном измельчении (например, древесины до тонкой муки).

Трудно однозначно сказать чем это объясняется: образованием ли в процессе биогенеза особо прочных связей между некоторой частью МПВ и отдельными структурами лигнина и полисахаридов или малодоступностью определенной части компонентов древесной ткани? Мы склоняемся больше к первому из этих предположений.

Наши предварительные опыты по удалению МПВ из древесных опилок не привели к заметному снижению каталитического действия фенантролина. Мы объясняем это недостаточной эффективностью предобработки опилок, так как упомянутый выше принципиальный механизм его действия представляется нам наиболее вероятным, если основываться на известных механизмах каталитического действия комплексов фенантролина при окиснении широкого ряда органических соединений [4, 7].

Поэтому исследование повторили, во-первых, существенно усилив обработку для более полного удаления МПВ и, во-вторых, используя для нее (и для последующей КЩ делигнификации) не только обычные древесные опилки, но и эти же опилки, подвергнутые незначительной щелочной предобработке (см. методическую часть). При этом содержание лигнина в таких опилках стало выше примерно на 10 % отн., поскольку в процессе предобработки, как этого и следовало ожидать, преимущественно удалялись легкогидролизуемые гемицеллюлозы и экстрактивные вещества, а не лигнин. Цель предварительной обработки — увеличить проницаемость древесной ткани для реагентов, используемых при удалении из нее металлов.

Кроме того, опилки, прошедшие щелочную предобработку, после отмытки щелочного раствора не высушивали, а подвергали во влажном состоянии удалению металлов. Это исключало слипание внутренних пор, что дополнительно увеличивало проницаемость древесной ткани.

Удаление металлов из опилок, не прошедших щелочную предобработку, осуществляли по схеме «трилон Б — HCl — трилон Б» с длительной обработкой растворами указанных веществ и тщательной диффузионной промывкой между ступенями. При удалении металлов из опилок, прошедших щелочную предобработку, первая ступень исключалась (см. методическую часть).

Далее и те и другие опилки подвергали КЩ варке: каждый вид делигнифицируемого материала варили одинаковое время в совершенно идентичных условиях с добавкой фенантролина и без нее (контрольная варка). О наличии или отсутствии действия фенантролина судили по величине  $\Delta K$ , являющейся разностью между числами Каппа целлюлозы, полученной в результате КЩ варки одних и тех же опилок без добавки и с добавкой фенантролина. Чем меньше  $\Delta K$ , тем ниже каталитическое действие фенантролина.

В таблице приведены результаты упомянутых выше варок. Они показывают, что эффективность действия фенантролина при варке осинных опилок после удаления из них металлов снизилась на 37 %

Результаты кислородно-щелочных варок с добавкой (знаменатель) и без добавки (числитель) 1, 10-фенантролина

Но- мер вар- ки	Опилки	Продол- житель- ность варки при тем- пературе 150 °С, мин	Выход целлюло- зы, % от массы абс. су- хой дре- весины	Число Каппа	$\Delta K$
1, 2	Осиновые	115	$\frac{65,8}{61,3}$	$\frac{45,8}{18,4}$	27
3, 4	То же после удаления металлов	115	$\frac{62,2}{59,8}$	$\frac{46,2}{28,7}$	17
5, 6	То же преобработанные* после удаления металлов	90	$\frac{63,1}{62,0}$	$\frac{38,7}{37,5}$	1
7, 8	Еловые	90	$\frac{64,7}{64,5}$	$\frac{89,4}{79,8}$	10
9, 10	То же преобработанные* после удаления металлов	160	$\frac{\dots}{62,9}$	$\frac{47,5}{43,3}$	4

\* Перед удалением металлов из опилок их подвергали неглубокой щелочной обработке для повышения проницаемости древесной ткани.

(сравнить  $\Delta K$  у варок 1, 2 и 3, 4), а при наличии преобработки, позволяющей ожидать более полное удаление металлов, фенантролин вообще не оказал ускоряющего действия на их КЩ делигнификацию — число Каппа целлюлозы в варках с добавкой фенантролина и без нее фактически одинаковое (варки 5 и 6).

Для исходных еловых опилок величина  $\Delta K$  относительно невелика — всего 10 (варки 7, 8). Поскольку сравниваемые варки были прекращены до достижения достаточно глубокой степени делигнификации, то, естественно, что чем меньше удалено лигнина в процессе варки, тем меньше проявляется эффективность действия фенантролина. (Максимальное значение  $\Delta K = 25 \dots 30$  достигается при степени делигнификации древесного остатка в катализированной варке около 90 % [8], что в случае варки древесины ели это соответствует 25...30 ед. Каппа при степени провара древесного остатка в соответствующей контрольной варке 50...60 ед. Каппа.) Поэтому, чтобы получить древесные остатки меньшей жесткости, КЩ варки преобработанных опилок, из которых удалены металлы, проводили более продолжительное время (варки 9, 10). Необходимо отметить, что при варке аналогично обработанных осиновых опилок (варки 5, 6) каталитическое действие фенантролина практически полностью отсутствовало. Полученное в данном случае  $\Delta K = 4$  также находится почти на пределе того значения, которое можно интерпретировать как значимую величину, а не просто как допустимую разницу в параллельных варках.

Для того, чтобы сделать окончательный вывод, необходимо убедиться, что в процессе обработки, удаляющей из опилок МПВ, с лигнином не произошли какие-либо значительные инактивационные изменения, которые могли бы быть причиной отмеченной выше нивелировки действия фенантролина при КЩ варке.

Из данных таблицы видно, что такие изменения отсутствуют — число Каппа целлюлозы от некатализированной варки исходных осиновых опилок и тех же опилок, из которых удалены металлы, фактически одинаково при равной продолжительности делигнификации (варки 1 и

3). Это говорит о том, что даже продолжительная кислотная обработка при комнатной температуре не приводит к инактивации лигнина в древесине, что согласуется с положениями работы [6, с. 271].

Некоторое снижение выхода целлюлозы от варок опилок, из которых удалены металлы (сравнить варки 1 и 3, 2 и 4), вполне естественно и является следствием упомянутого выше процесса кислотки.

Нет также никаких оснований допускать какое-либо заметное воздействие на лигнин и трилона Б — второго компонента, использованного для удаления металлов из опилок (если не учитывать его роль в удалении из древесины МПВ, способных оказывать даже в следовых количествах ощутимое влияние на окисление фенольных соединений и, следовательно, лигнина [3, с. 8]).

Что касается щелочной предобработки опилок, то она, несколько стабилизируя полисахаридную часть древесины, лишь способствовала (как и следовало ожидать) ускорению последующей КЩ делигнификации. Это свидетельствует об отсутствии инактивации лигнина и в данном случае.

Таким образом, выполненные эксперименты однозначно показали, что ускоряющее действие фенантролина на КЩ делигнификацию древесины связано с наличием в ней именно металлов, вероятнее всего металлов переменной валентности, большинство из которых образует с фенантролином (в отличие от кальция, магния и подобных им) весьма стабильные комплексы, способные катализировать окисление многих органических соединений, в том числе и ароматических.

#### Методическая часть

Щелочная предобработка опилок (размер приблизительно 2 мм) проводилась в стальном автоклаве раствором NaOH (концентрация 26 г/л) при гидромодуле 6. Время подъема температуры от комнатной до 150 °С (осина) и 160 °С (ель) соответственно за 37 и 43 мин. После предобработки осинные опилки имели число Каппа 129 (примерно 23 % лигнина), а еловые — 163 (примерно 30 % лигнина).

Удаление металлов из исходных опилок проводили в три ступени; из опилок, подвергнутых щелочной предобработке — в две, начиная со второй. 1-я ступень — обработка раствором трилона Б (концентрация 10 г/л) при гидромодуле 50 в течение 48 ч с последующей трехкратной диффузионной промывкой бидистиллятом после обычной промывки на воронке Бюхнера; 2-я ступень — обработка 0,5 н. HCl, гидромодуль 50, продолжительность 244 ч с последующей трехкратной диффузионной промывкой бидистиллятом в течение 48 ч; 3-я ступень — аналогична 1-й ступени, но ее продолжительность 335 ч с последующей трехкратной диффузионной промывкой бидистиллятом в течение 240 ч.

Кислородно-щелочные варки проводили парами в двух стальных автоклавах вместимостью 130 мл каждый, помещенных в глицериновую баню, установленную на площадку с возвратно-поступательным движением в горизонтальной плоскости (76 двойных перемещений в 1 мин). Условия варки: 2 г абс. сухих опилок; концентрация NaOH (квалификация о.с.ч.) 7,5 г/л; гидромодуль 30; температура бани 150 °С. Кислород закачивали однократно перед варкой до давления 2,94 МПа. 1, 10-фенантролин (фирма «Хемапол», ЧССР) добавляли в количестве 0,5 % от массы абс. сухой древесины в расчете на основное вещество ( $C_{12}H_8N_2$ ) в виде  $C_{12}H_8N_2 \cdot HCl \cdot H_2O$  (ч. д. а.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Гермер Э. И. Интенсификация кислородно-щелочной делигнификации лигноцеллюлозных материалов с помощью о-фенантролина. 4. Влияние pH варочного про-

цесса на кинетику делигнификации // *Химия древесины*.—1992.—№ 4—5.—С. 46—55. [2]. Исследование влияния каталитически активных металлов и стабилизаторов на процесс кислородно-щелочного облагораживания целлюлозы. 1. О содержании каталитически активных металлов в производственном потоке целлюлозного завода / Г. Л. Аким, Л. Г. Давыдовская, Г. Г. Савинова, Е. Н. Потиха // *Химия древесины*.—1982.—№ 1.—С. 51—53. [3]. Рогинский В. А. Фенольные антоксианты (Реакционная способность и эффективность).—М.: Наука, 1988.—247 с. [4]. Сахаров А. М., Скибида И. П. Механизм окисления кетонов в присутствии комплексов меди с *o*-фенантролином в щелочных средах // *Изв. АН СССР. Сер. хим.*—1980.—№ 3.—С. 523—528. [5]. Фенгел Д., Вегенер Г. Древесина (Химия, ультраструктура, реакции) / Пер. с англ.—М.: Лесн. пром-сть, 1988.—512 с. [6]. Шорыгина Н. Н., Резников В. М., Елкин В. В. Реакционная способность лигнина.—М.: Наука, 1976.—368 с. [7]. Эмануэль О. Н., Скибида И. П. Механизм окисления ароматических углеводородов в присутствии комплексов меди с *o*-фенантролином // *Окисление органических соединений в жидкой фазе*.—Л.: Наука, 1978.—С. 86—93. [8]. Germer E. I. Oxygen-alkali delignification catalysis with 1, 10-phenanthroline // 6-th ISWPCh.—1991.—Melbourn, Australia, 1991.—Vol. 2.—P. 143—149. [9]. Germer E. I. pH effect on the catalysis of oxygen-alkaline delignification by 1, 10-phenanthroline // *Ligno-cellulosics-Science, Technology, Development and Use.* / Ed. J. E. Kennedy, G. O. Phillips, P. A. Williams.—Ellis Horwood Ltd., 1992.—P. 227—237. [10]. Sjöström E., Välttilä O. Inhibition of carbohydrate degradation during oxygen bleaching. Part 1. Comparison of various additives // *Paperi ja Puu*.—1972.—Vol. 54, N 11.—P. 695—705.

Поступила 17 января 1994 г.

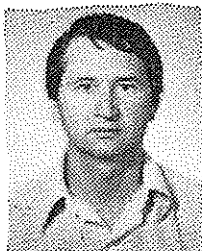
УДК 676.1.022.62

*А. В. ВУРАСКО, С. Ю. МЕНЬШИКОВ, А. Я. АГЕЕВ,  
Л. А. ПЕТРОВ, В. Д. СКОБЕЛЕВА, Г. Ф. БЕЛЯЕВА,  
В. Г. КОКШАРОВ, Е. И. АНДРЕЙКОВ*

Уральская государственная лесотехническая академия



Вураско Алеся Валерьевна родилась в 1965 г., закончила в 1988 г. Уральский лесотехнический институт, младший научный сотрудник Института органического синтеза УрО РАН. Имеет 15 печатных трудов в области каталитического окисления органических соединений в процессе натронной варки.



Меньшиков Сергей Юрьевич родился в 1958 г., окончил Уральский государственный университет в 1980 г., научный сотрудник Института органического синтеза УрО РАН. Имеет 38 печатных трудов в области каталитического окисления органических соединений.

Агеев Аркадий Яковлевич родился в 1936 г., окончил в 1966 г. Уральский лесотехнический институт, заведующий кафедрой ХД и ТЦБП Уральской государственной лесотехнической академии. Имеет 150 печатных трудов в области реологии волокнистых суспензий, теории и технологии бумагоподобных материалов.



Кокшаров Валерий Григорьевич родился в 1940 г., окончил в 1961 г. Уральский политехнический институт, старший научный сотрудник ВУХИН. Имеет 53 печатных трудов в области технологии продуктов основного органического синтеза.



## КАТАЛИТИЧЕСКАЯ ДЕЛИГНИФИКАЦИЯ ДРЕВЕСИНЫ

Показана возможность получения антрахинонсодержащих катализаторов путем окисления коксохимического сырья («сырой антрацен», антраценовая фракция) различными окислителями (озон, пероксид водорода, азотная кислота и хромовый ангидрид) и их воздействие на щелочную и сульфатную делигнификацию древесины.

Possibility of producing anthraquinone catalysts by oxidizing coke-chemical raw materials (crude anthracene, anthracene fraction) by different oxidizers (ozone, hydrogen peroxide, nitric acid and chromic anhydride) and their influence on alkaline and sulphate delignification of wood have been revealed.

В мировом производстве широко используется процесс каталитической делигнификации древесины, характеризующийся высокими экономическими и природоохранными показателями. В качестве катализаторов используют антрахинон (АХ) и дигидродигидроксиантрацен (ДДА), в щелочной среде избирательно действующие на лигнин древесины. Это позволяет удалить лигниновую часть древесины без разрушения гемиллюлозной и волокнистой частей, что обеспечивает улучшение структуры целлюлозного продукта и увеличение его выхода в полуфабрикате до 98 %.

В России производство катализатора на основе ДДА не разрабатывается, так как нет достаточной сырьевой базы. Существующие технологии производства АХ [3] неэффективны, а его получение из чистого антрацена в больших количествах проблематично из-за отсутствия предприятий по централизованной переработке каменноугольной смолы и значительных капитальных вложений. Более перспективна технология получения АХ из антраценсодержащего коксохимического сырья.

Нами был изучен процесс делигнификации древесины в присутствии антрахинонсодержащего катализатора (АХК), полученного из дешевого и доступного коксохимического сырья — «сырого антрацена» (СА) производства Челябинского металлургического комбината, а также в присутствии оксидата антраценовой фракции (ОАФ). Ресурсы

антраценовой фракции (АФ) на коксохимических предприятиях России составляют 220 тыс. т/год. В качестве окислителей для АХК и ОАФ были предложены озон, пероксид водорода, азотная кислота, хромовый ангидрид. Исследования показали, что использование озона приводит к получению более чистого продукта (содержание АХ и АХК превышает 90 %), для других окислителей этот показатель составляет около 50 %, что требует обогащения СА. В табл. 1 приведен качественный и количественный состав исходного коксохимического сырья и продуктов его озонлиза (ОСА — оксидат сырого антрацена).

Таблица 1

Компонент	Массовая доля компонента, %, в коксохимическом сырье и продуктах его озонлиза			
	АФ	СА	ОАФ : ОСА = = 1 : 1	АХК
Нафталин	4,71	—	0,66	—
Метилнафталины	1,37	0,12	0,18	—
Аценафтен	1,51	0,08	0,23	0,15
Дифениленоксид	0,91	1,10	1,05	0,25
Флуорен	2,10	4,60	3,42	1,18
Фенантрен	14,83	14,10	8,50	2,63
Антрацен	5,25	36,80	0,43	0,30
Карбазол	2,55	22,90	3,90	0,41
Флуорантен	4,60	0,70	1,20	—
Пирен	3,59	0,40	0,15	—
Антрахинон	—	—	3,09	92,00

При изучении окисления модельных соединений [7] в ОАФ и АХК предполагается наличие таких продуктов, как бензохинон, нафтохинон, флуоренон, фенантренхинон, биантрон и др., присутствие которых, по литературным данным [4—6, 8, 9], благоприятствует процессу каталитической делигнификации древесины. Для того чтобы оценить влияние этих соединений на делигнификацию были проведены опытные варки древесины сосны с ОАФ (4,55 % АХ), полученного путем пероксидного жидкофазного каталитического окисления АФ [1, 2].

Опытные варки сосновой щепы размером  $30 \times 5 \times 2$  мм с использованием ОАФ проводили в групповом автоклаве с воздушным обогревом. Режим варок: подъем температуры от 50 до 175 °С — 100 мин; продолжительность стоянки при 175 °С — 70 мин; гидромодуль 1 : 7. Результаты опытных варок в присутствии ОАФ и АФ приведены в табл. 2.

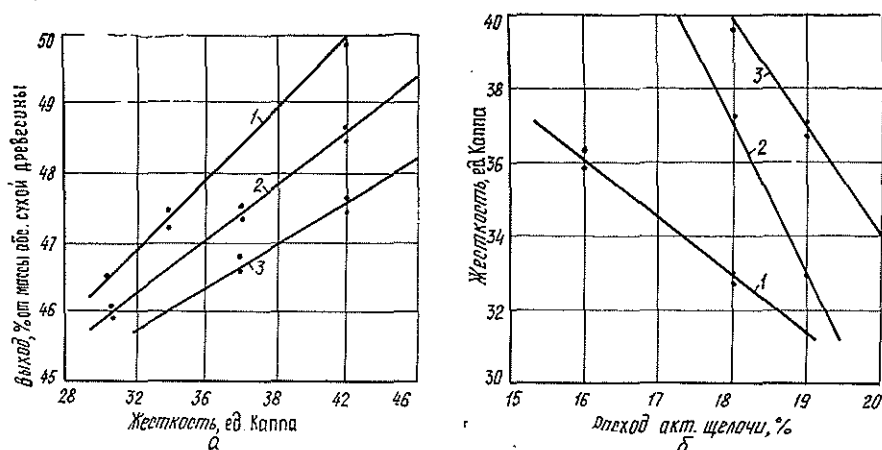
Как свидетельствуют данные табл. 2, введение 0,1...1,0 % ОАФ (0,005...0,050 % АХ) и 12...16 % щелочи от массы абс. сухой древесины обеспечивает повышение выхода целлюлозы до 42,5...52,1 %. Получаемая этим способом целлюлоза относится к категории средней жесткости, высшего качества. Введение 0,05 % ОАФ не обеспечивает содержание лигнина в количестве 9,8 %. Увеличение доли ОАФ до 2% приводит к снижению выхода целлюлозы с 49,2 до 48,6 %. Добавление менее 12 % и более 18 % активной щелочи приводит к возрастанию доли лигнина в полуфабрикате и снижению выхода целлюлозы до 42,5 %. Необходимо отметить, что результаты варок с ОАФ лучше, чем с 0,01 % АХ. Это объясняется присутствием в ОАФ других кислородсодержащих продуктов, которые также действуют как катализаторы делигнификации древесины. По мнению авторов работы [9], результат активности флуоренона можно объяснить исходя из механизма взаимодействия восстановленной формы катализатора с *n*-хинонметидами. Бензохинон и нафтохинон являются неустойчивыми в щелочной среде уже при комнатной температуре [5]. Фенантренхинон в условиях варки



Таблица 2

Показатели	Значение показателей при массовой доле катализатора, % от веса абс. сухой древесины												
	ОАФ												АХ
	0,05	0,10		0,50	1,00				2,00	0,10			
		1	2		1	2	3	4					
Активная щелочь, ед. Na <sub>2</sub> O	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	12,0	14,0	16,0	18,0	14,0	14,0	0,10
В том числе:	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	12,0	14,0	16,0	18,0	14,0	14,0	14,0
гидроксид натрия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
сульфид натрия	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Древесный остаток:	46,0	46,2	50,8	49,5	55,4	43,2	50,6	49,1	46,6	43,2	50,6	49,1	49,1
выход, % от веса абс. сухой древесины	90,0	96,2	97,0	96,9	94,2	98,4	96,9	90,0	97,9	98,4	96,9	90,0	90,0
массовая доля, % от древесного остатка:	9,8	3,1	2,9	3,0	5,7	1,6	3,6	9,6	2,0	1,6	2,9	9,6	9,6
а) целлюлозы	42,5	44,5	49,2	47,9	52,1	45,6	50,0	44,3	45,6	—	48,6	44,3	44,3
б) лигнина													
Выход целлюлозы, % от веса абс. сухой древесины													

восстанавливается при потенциале 0,59 В, полностью растворяется и более не подвергается окислению. Флуоренон устойчив в процессе варки, вторая стадия его восстановления протекает при отрицательном потенциале и является необратимой. Хотя он относительно легко растворяется в щелочной среде, но, не обладая совокупностью всех свойств, необходимых для катализатора, значительно уступает АХ в активности [6]. Соединения 1, 4-нафтохинон [8], антрон и биантрон [4] в жестких условиях варочного процесса окисляются до АХ. Проведенные исследования показали, что ОАФ успешно заменяет АХ и способствует интенсификации натронных и сульфатных варок древесины. Однако серьезной проблемой при использовании этого катализатора является экологическая безопасность производства, так как наряду с АХ в варочный процесс вводится целая гамма канцерогенных конденсированных ароматических и гетероциклических соединений и продуктов их окисления. Поэтому более безопасен для применения в производственных условиях АХК.



Зависимость выхода древесного остатка от жесткости (а) и жесткости от расхода щелочи (б) при различном расходе АХК: 1—0,10; 2—0,05; 3—0,00 %

Нами проведены опытные варки нормальной фракции щепы древесины сосны с использованием АХК, полученного озонлизом СА с содержанием АХ свыше 90 %, в групповом автоклаве с воздушным обогревом. Для варок использовали производственный белый щелок, содержащий 30 % сульфидов. Расход активной щелочи 16, 18, 20 % с добавкой 0,05; 0,10; 0 % АХК от веса абс. сухой древесины. Режим опытных варок: подъем температуры от 70 до 130 °С — 45 мин; пропитка при температуре 130 °С — 45 мин; подъем температуры от 130 до 175 °С — 70 мин; варка при 175 °С — 50 мин; гидромодуль 1 : 4.

По результатам испытаний определено влияние добавки АХК на изменение выхода целлюлозы, степени делигнификации и расхода щелочи на варку. Установлено, что добавка АХК на 1,0...1,5 % увеличивает выход целлюлозы при одинаковой степени делигнификации, причем с повышением доли добавки от 0,05 до 0,10 % почти пропорционально увеличивается и выход целлюлозы (см. рисунок а).

Из результатов опытных варок следует, что добавка АХК позволяет при одном и том же расходе щелочи получать целлюлозу с более низким числом Каппа. Наибольшее снижение числа Каппа наблюдается при варке жестких целлюлоз (см. рисунок б).

Полученные экспериментальные результаты были введены в ЭВМ и обработаны с помощью метода наименьших квадратов.

При варке до определенного числа Каппа применение АХК позволяет снизить расход щелочи на варку. Например, при числе Каппа 36 ед. и доле АХК 0,05 % расход щелочи снижается на 2 % от веса абс. сухой древесины.

Сравнив полученные результаты, можно сделать вывод, что предлагаемые нами каталитические добавки ОАФ и АХК оказывают на процесс делигнификации влияние, аналогичное промышленному техническому АХ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. А. с. 1657225 СССР. Способ получения катализатора для делигнификации древесины / В. С. Соболев, А. Я. Агеев, С. Ю. Меньшиков, Л. А. Петров, А. В. Вураско, Н. Х. Черкасов, А. Г. Теслер, и В. Л. Волков.— № 4738522/04; Заявлено 31.07.89; Опубл. 23.06.91, Бюл. № 23 // Открытия. Изобретения.— 1991.— № 23. [2]. А. с. 1693149 СССР. Способ получения целлюлозы / В. С. Соболев, А. Я. Агеев, С. Ю. Меньшиков, Л. А. Петров, А. В. Вураско, Н. Х. Черкасов, А. Г. Теслер и В. Л. Волков.— № 4724832/12; Заявлено 31.07.89, Опубл. 23.11.91; Бюл. № 43 // Открытия.

Изобретения.—1991.—№ 43. [3]. Горелик М. В. Химия антрахинонов и их производных.—М.: Химия, 1983.—260 с. [4]. Дейнеко И. П., Никандров А. Б., Шевченко С. М. Каталитическая активность при щелочной варке продуктов взаимодействия антрахинона с компонентами древесины // Химия древесины.—1984.—№ 2.—С. 113—114. [5]. Евстигнеев Э. И., Шалимова Т. В. Редокс-свойства, каталитическая активность и стабилизирующий эффект при натронной варке некоторых соединений ряда хинонов. 1. Потенциалы восстановления, устойчивость и растворимость // Химия древесины.—1985.—№ 1.—С. 50—54. [6]. Евстигнеев Э. И., Шалимова Т. В. Редокс-свойства, каталитическая активность и стабилизирующий эффект при натронной варке некоторых соединений ряда хинонов. 2. Влияние на варку // Химия древесины.—1985.—№ 1.—С. 55—59. [7]. Жидкофазное окисление антрацена пероксидом водорода в присутствии оксидных ванадиевых бронз  $\text{Si}_x\text{V}_2\text{O}_5$  / С. Ю. Меньшиков, А. В. Вураско, Л. А. Петров и др. // Нефтехимия.—1992.—Т. 32, № 2.—С. 162—164. [8]. Шевченко С. М., Никандров А. Б., Дейнеко И. П. Влияние формы введения катализатора на эффективность антрахиноновой варки // Химия древесины.—1986.—№ 4.—С. 41—44. [9]. Eskert R. C., Amos L. W. Catalysis of alkaline pulping by fluorenone // TAPPI.—1980.—Vol. 63, N 11.—P. 89—93.

Поступила 5 мая 1994 г.

УДК 676.16 : 543.42

Д. А. СУХОВ, О. Ю. ДЕРКАЧЕВА, В. И. КОМАРОВ, Я. В. КАЗАКОВ

Сухов Дмитрий Александрович родился в 1944 г., окончил в 1966 г. Ленинградский государственный университет, кандидат физико-математических наук, доцент, зам. проректора по научной работе С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Область научных интересов — молекулярная физика и строение полимеров.

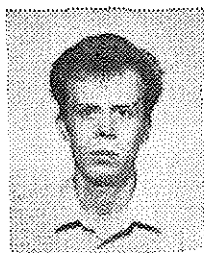


Деркачева Ольга Юрьевна родилась в 1965 г., окончила в 1987 г. Ленинградский государственный университет, инженер кафедры физики С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Область научных интересов — спектроскопия растительных полимеров.



Комаров Валерий Иванович родился в 1946 г., окончил в 1969 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии ЦБП Архангельского государственного технического университета. Имеет 97 печатных работ в области исследования свойств деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.





Казаков Яков Владимирович родился в 1966 г., окончил в 1990 г. Архангельский лесотехнический институт, аспирант кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства Архангельского государственного технического университета. Имеет 14 научных трудов в области деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.

## ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ СТЕНКИ ВОЛОКНА ХВОЙНОЙ ДРЕВЕСИНЫ В ПРОЦЕССЕ СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ

Приведены результаты ИК-Фурье спектроскопического анализа изменений компонентного состава волокнистого полуфабриката и структуры его компонентов в процессе сульфатной варки.

The results of IR-Furie spectroscopic analysis of variations in component composition of fibrous semi-finished product and structure of its components in the process of sulphate pulping are presented.

Свойства технической целлюлозы для производства бумаги во многом определяются химическим составом и физической структурой стенки волокна, которые обусловлены морфологическим строением древесины, а также видом и интенсивностью теплового и химического воздействия в процессе делигнификации [4].

По рентгеноструктурным данным [7] целлюлоза является полуупорядоченным полиморфным полимером. Существование целлюлозы разной структуры подтверждается также методами колебательной и ЯМР спектроскопии [1, 2]. Кристаллиты природной целлюлозы имеют элементарную ячейку типа 1 ( $C1$ ), а кристаллиты мерсеризованной целлюлозы — ячейку типа 2 ( $C2$ ). Различия упаковки полимерных цепей в упорядоченных областях структур  $C1$  и  $C2$  отражают особенности конформационного строения их макромолекул, которые, в значительной мере, определяются различиями в пространственной организации их систем внутри- и межмолекулярных водородных связей [6]. Кроме упорядоченных областей, целлюлоза содержит и неупорядоченные, при этом с помощью методов ИК-Фурье спектроскопии и многоканальной спектроскопии комбинационного рассеяния света было экспериментально установлено, что конформационные различия макромолекул в неупорядоченных областях целлюлоз  $C1$  и  $C2$  также сохраняются [3].

Проведенные ранее исследования процесса перехода целлюлозы  $C1$  в  $C2$  позволили выявить в мерсеризованных волокнах спектральные признаки упорядоченных областей целлюлозы  $C2_{уп}$  и характерные для неупорядоченных областей признаки, содержание которых можно описывать параметром  $C2_{неуп}$  [8]. Если полностью мерсеризованная древесная или хлопковая целлюлоза являются двухкомпонентной модификационно однородной системой, в которой все макромолекулы имеют одну и ту же конформацию  $C2$ , то в колебательных спектрах целлюлозных волокнистых полуфабрикатов древесного и хлопкового происхождения, помимо нативной целлюлозы, проявляются целлюлозоподобные компоненты с конформацией макромолекул, несколько отличной от конформации макромолекул  $C1$ , которые по спектральному сходству с  $C2_{неуп}$  назвали также «неупорядоченной целлюлозой  $C2_{неуп}$ ». Было

также обнаружено определенное сходство спектров выделенных гемицеллюлоз со спектрами  $C2_{\text{неуп}}$ . По сравнению с хлопковой целлюлозой содержание этого компонента в технической целлюлозе намного выше и составляет почти половину её углеводного комплекса.

В общем случае физическую структуру целлюлозной матрицы можно рассматривать как суперпозицию целлюлозы модификаций  $C1$  и  $C2$  со своими упорядоченными и неупорядоченными областями:

$$C = C1 + C2 = (C1_{\text{уп}} + C1_{\text{неуп}}) + (C2_{\text{уп}} + C2_{\text{неуп}}),$$

где в состав компонента  $C2_{\text{неуп}}$  могут входить также гемицеллюлозы и другие углеводные компоненты. Компонент  $C2_{\text{уп}}$  присутствует преимущественно в целлюлозе, обработанной концентрированными растворами щелочей. Каждый структурный компонент характеризуется своим набором физико-химических и механических свойств, поэтому свойства матрицы во многом будут определяться относительным содержанием ее компонентов. Применение специального математического обеспечения для обработки спектральных данных позволяет вычислить относительное содержание каждого из этих структурных компонентов и, тем самым, получить важную информацию о структуре и свойствах целлюлозных материалов. Определенный вклад в формирование свойств технической целлюлозы вносят и такие сокомпоненты углеводного комплекса, как лигнин и остаточная вода. Метод ИК-Фурье спектроскопии обладает достаточно высокой чувствительностью не только для анализа конформационного и фазового структурного состояния целлюлозных макромолекул, но также и определения содержания остаточного лигнина и воды в широком диапазоне их концентраций.

Настоящая работа, выполненная на кафедре физики СПбГТУРП и на кафедре технологии ЦБП АГТУ, имела цель изучить изменения компонентного состава и структуры основных составляющих стенки волокна в процессе делигнификации хвойной древесины сульфатным способом.

На основании анализа спектров поглощения, снятых на спектрометре IFS-113v фирмы «Брукер» (Германия) в спектральном диапазоне  $4000 \dots 400 \text{ см}^{-1}$  с разрешением  $2 \text{ см}^{-1}$ , приведено описание изменений структуры и компонентного состава древесной целлюлозы (углеводной части, остаточного лигнина и остаточной воды) в процессе сульфатной варки с использованием следующих параметров:  $C1_{\text{уп}}$  и  $C1_{\text{неуп}}$  — относительное содержание упорядоченных и неупорядоченных областей, образованных макромолекулами нативной целлюлозы (конформация  $C1$ );  $C2_{\text{неуп}}$  — относительное содержание целлюлозных макромолекул с конформацией, отличной от конформации макромолекул нативной целлюлозы, а также других поли- и олигосахаридов;  $M_0$  ( $1512 \text{ см}^{-1}$ ) — относительное содержание остаточного лигнина (величина нулевого момента полосы поглощения с максимумом у  $1512 \text{ см}^{-1}$ );  $M_0$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) — относительное содержание остаточной воды (величина нулевого момента полосы поглощения с максимумом у  $1645 \text{ см}^{-1}$  после пятичасового вакуумирования образцов);  $M_1$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) — степень связывания молекул остаточной воды компонентами системы (величина первого момента — положение центра тяжести,  $\text{см}^{-1}$ , этой спектральной полосы);  $M_2$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) — степень структурной однородности молекул остаточной воды (величина второго момента полосы поглощения,  $\text{см}^{-1}$ ).

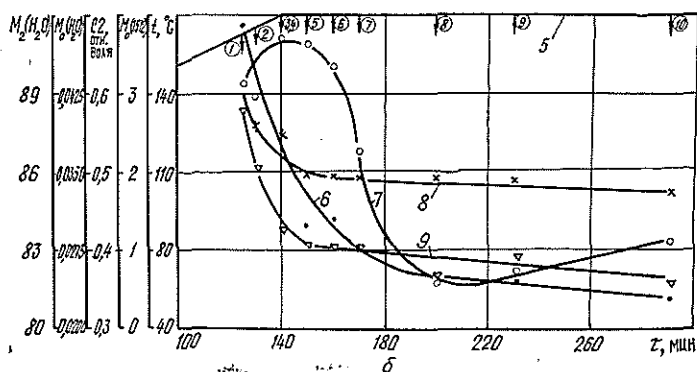
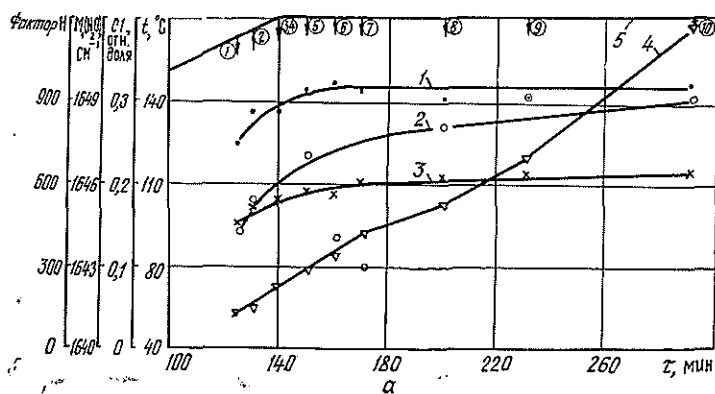
В лаборатории АГТУ были проведены сульфатные варки еловой древесины в 2-литровых автоклавах с белым щелоком, который отобран в варочном цехе Соломбальского ЦБК, по заданному температурному графику. Для эксперимента использовали технологическую щепу после фракционирования на анализаторе АЛГ-М с сита, имеющего диаметр

Результаты количественного анализа изменений состава и структуры основных компонентов стенки волокна хвойной древесины в процессе сульфатной варки

Но- мер образ- ца	Углеводы			Лигнин		Остаточная вода			Фак- тор Н
	$C1_{уп}$	$C1_{неуп}$	$C2_{неуп}$	$M_0(1512)$	Число Каппа	$M_0(H_2O)$	$M_1(H_2O)$	$M_2(H_2O)$	
1	0,152	0,246	0,602	3,80	54,6	0,0408	1644,3	89,3	128
2	0,171	0,285	0,544	3,20	51,9	0,0355	1645,4	88,9	152
3	0,182	0,278	0,562	2,50	43,5	0,0334	1645,4	90,3	211
4	0,173	0,287	0,540	2,10	35,1	0,0295	1643,0	91,1	226
5	0,190	0,310	0,496	1,30	32,5	0,0280	1647,0	90,9	289
6	0,186	0,320	0,496	1,40	30,8	0,0280	1644,0	90,0	337
7	0,200	0,311	0,489	1,00	27,4	0,0280	1643,0	86,8	421
8	0,205	0,301	0,493	0,67	22,9	0,0250	1648,0	81,8	515
9	0,210	0,301	0,489	0,61	20,8	0,0270	1649,0	82,2	690
10	0,210	0,317	0,473	0,39	20,7	0,0240	1649,0	83,4	1160

Примечание. Размерности приведены в тексте.

отверстий 20 мм. Щепка не содержала сучков и гнили, имела хороший отруб. Расход активной щелочи на варку составлял 18 % при степени сульфидности белого щелока 30 %. Изменяя продолжительность стоян-



Изменение компонентного состава стенки древесного волокна в процессе сульфатной варки: а — 1 —  $C1_{неуп}$ ; 2 —  $M_1(H_2O)$ ; 3 —  $C1_{уп}$ ; 4 — фактор Н; 5 — температура  $t$ ; б — 6 —  $M_0(1512)$ ; 7 —  $M_2(H_2O)$ ; 8 —  $C2_{неуп}$ ; 9 —  $M_0(H_2O)$  (цифры в кружках обозначают номер образца в таблице)

ки на конечной температуре (170 °C) от 0 до 120 мин, получали целлюлозу с различной степенью делигнификации. В таблице приведены результаты спектроскопического анализа десяти образцов волокнистых полуфабрикатов, а также значения числа Каппа. По данным анализа в исследованных образцах компонент  $C_2$  отсутствовал.

Данные, приведенные в таблице и на рисунке, показывают, что в процессе делигнификации происходит направленное изменение компонентного состава стенок древесного волокна и конформационно-фазового структурного состояния макромолекул целлюлозной матрицы. Удаление лигнина в ходе варки сопровождалось уменьшением содержания компонента  $C_2$  (коэффициент корреляции  $k = 0,96$ ) и возрастанием относительного содержания структурных компонентов нативной целлюлозы  $C_{1уп}$  ( $k = -0,95$ ) и  $C_{1неуп}$  ( $k = -0,88$ ). Целлюлозная матрица становилась более гомогенной, при этом наблюдалась тенденция нативной целлюлозы к «рекристаллизации». Так, относительное содержание упорядоченных областей нативной целлюлозы в углеводном комплексе исследованного небеленого полуфабриката в ходе рассмотренного процесса делигнификации увеличилось примерно на треть и составило 21 %; доля неупорядоченной нативной целлюлозы возросла до 32 %; доля части углеводного остатка, описываемого параметром  $C_{2неуп}$ , снизилась до 47 %.

Результаты определения содержания остаточного лигнина в образцах целлюлозы химическим и спектроскопическим методами обнаруживают тесную корреляцию ( $k = 0,98$ ) и позволяют получить уравнение регрессии для вычисления числа Каппа с использованием данных спектроскопии:

$$\text{Число Каппа} = 16,15 + 10,11 M_0 (1512 \text{ см}^{-1}).$$

Обращает на себя внимание более широкий диапазон изменений значений спектроскопического параметра  $M_0$  ( $1512 \text{ см}^{-1}$ ), оценивающего относительное содержание остаточного лигнина по сравнению с данными химического анализа. При изменении числа Каппа в рассмотренном ряду образцов в 2,5 раза спектральный параметр изменяет свое значение почти на порядок.

Важным сокомпонентом древесного вещества является связанная вода. Результаты спектроскопического анализа полосы деформационных колебаний молекул воды в спектральном диапазоне 1600...1700  $\text{см}^{-1}$  позволяют получить новую информацию о состоянии остаточной воды в небеленом целлюлозном волокнистом полуфабрикате. Величина параметра  $M_0$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ), характеризующего относительное содержание остаточной воды, в процессе делигнификации уменьшается примерно на 40 % симбатно с уходом лигнинного ( $k = 0,88$ ) и углеводного  $C_{2неуп}$  ( $k = 0,87$ ) компонентов. При этом наблюдается описываемое параметром  $M_2$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) сужение контура этой спектральной полосы, что свидетельствует о тенденции упорядочения структурной организации молекул связанной воды. Одновременно с этим поведение параметра  $M_1$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) указывает на сдвиг полосы в высокочастотную область спектра. Все это позволяет предположить, что в ходе делигнификации удаляется часть наиболее прочно связанной, по-видимому с уходящими гемицеллюлозами, воды. Оставшиеся в небеленом полуфабрикате молекулы воды характеризуются несколько меньшей энергией связи, но являются более структурно организованными. Анализ данных таблицы указывает также на существование корреляции значений параметра фактора Н с параметрами  $C_{1уп}$  ( $k = 0,76$ ),  $M_0$  ( $1512 \text{ см}^{-1}$ ) ( $k = -0,75$ ),  $M_2$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ( $k = -0,74$ ). Этот интегральный показатель, характеризующий влияние температуры и продолжительности варки, де-

монстрирует меньшую тесноту связи с исследуемыми характеристиками, чем содержание лигнина в образцах.

Данные проведенных исследований позволяют на количественном уровне подтвердить некоторые высказанные ранее соображения об особенностях надмолекулярной структуры технической целлюлозы. Так, можно предположить, что спектральный параметр  $C2_{\text{неуп}}$  описывает целлюлозные макромолекулы, находящиеся на поверхности микрофибрилл и фибрилл (по некоторым оценкам их доля может составлять 42 % [5]), конформация которых отличается от конформации полимерных цепей нативной целлюлозы и которые вместе с гемицеллюлозами, олигосахаридами и др. углеводными компонентами могут входить в состав межфибриллярного вещества. Внутренние области микрофибрилл и фибрилл, по-видимому, сформированы из менее дефектных цепей макромолекул нативной целлюлозы, образующих свои упорядоченные  $C1_{\text{уп}}$  и неупорядоченные  $C1_{\text{неуп}}$  участки. При этом значения структурного параметра, характеризующего относительное содержание упорядоченных макромолекул нативной целлюлозы в волокнах хлопковой и технической целлюлозы, различаются примерно в три раза. Подобного рода различия характерны также для параметра  $C2_{\text{неуп}}$  [9]. Высокие значения параметра  $C2_{\text{неуп}}$  и относительно низкие  $C1_{\text{уп}}$  для исследованной древесной целлюлозы свидетельствуют о структурной неоднородности и дефектности ее макромолекул. Фазовое состояние и совершенство надмолекулярной организации структуры целлюлозной матрицы определяются уровнем конформационной однородности и взаимной пространственной упорядоченности укладки макромолекулярных цепей. При этом очевидно, что целлюлоза, имеющая более совершенную структуру, должна обладать более высокими эксплуатационными свойствами.

Результаты работы демонстрируют широкие возможности ИК-Фурье спектроскопии как неразрушающего экспресс-метода для оценки изменения состава и структуры основных компонентов стенки волокна целлюлозы в процессе делигнификации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Блоквелл Д., Маршессо Р. / Целлюлоза и ее производные. Т. 1 / Под ред. Н. Байкля и Л. Сегала.— М.: Мир, 1974.— С. 9—43. [2]. Жбанков Р. Г., Козлов П. В. Физика целлюлозы и ее производных.— Минск: Наука и техника, 1983.— 296 с. [3]. Исследование целлюлозных материалов методом колебательной спектроскопии / П. М. Валов, Д. А. Сухов, С. Ю. Маслов, А. Н. Жилкин // Бум. пром-сть.— 1989.— № 2.— С. 26—28. [4]. Клеточная стенка древесины и ее изменение при химическом воздействии / И. И. Бейнарт, Н. Н. Ведерников, В. С. Громов и др.— Рига: Зинатне, 1972.— 509 с. [5]. Основные представления о волокнах, применяемых в бумажной промышленности: Материалы симпозиума.— М.: Гослесбумиздат, 1962.— 95 с. [6]. Сухов Д. А., Жилкин А. Н., Валов П. М. Полосы ОН- и СН-валентных колебаний макромолекул ориентированных целлюлозных волокон по данным спектроскопии комбинационного рассеяния света // Журнал прикладной спектроскопии.— 1990.— Т. 52, № 5.— С. 830—835. [7]. Эллефсен О., Теннесен Б. Целлюлоза и ее производные. Т. 1 / Под ред. Байкля и Л. Сегала.— М.: Мир, 1974.— С. 154—182. [8]. Cellulose structure in relation to paper properties / D. A. Sukhov, A. N. Zhilkin, P. M. Valov, O. A. Terentiev // Tappi Journal.— 1991.— V. 74, N 3.— P. 201—204. [9]. Sukhov D. A., Derkacheva O. Yu., Privalov V. I. Cellulose structure-properties relationships // Cellulose: Materials for selective separations and other technologies.— Ed.: J. F. Kennedy, G. O. Phillips, P. A. Williams, Ellis Horwood Ltd., 1993.— P. 185—194.

Поступила 3 июня 1994 г.



УДК 676.16 : 543.42

В. И. КОМАРОВ, Я. В. КАЗАКОВ, Д. А. СУХОВ, О. Ю. ДЕРКАЧЕВА

Архангельский государственный технический университет  
С.-Петербургский государственный технологический университет  
растительных полимеров**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ СТЕНКИ ВОЛОКНА  
НА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ, ДЕФОРМАЦИОННЫЕ  
И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
СУЛЬФАТНОЙ НЕБЕЛЕННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ**

ИК-Фурье спектроскопический анализ и физико-механические испытания неподвергнутых размолу образцов сульфатной целлюлозы, полученных с помощью варок различной длительности, позволили выявить высокий уровень корреляции фундаментальных, деформационных и прочностных характеристик со структурной организацией целлюлозной матрицы и компонентным составом волокна технической целлюлозы. Показано, что величина адгезионной способности материала определяется в большей степени характеристикой структурной организации молекул остаточной воды, а способность к уплотнению — характеристиками структурной организации макромолекул целлюлозной матрицы. Изменение этих фундаментальных характеристик в ходе варки определяет величины показателей деформативности и прочности неразмолотой сульфатной небеленой целлюлозы.

Fourie IR-spectroscopic analysis and physico-mechanical tests of unbeaten sulphate pulp samples, obtained by cookings of different duration, made it possible to reveal a high level of correlation of fundamental, deformation and strength characteristics with a structural organization of the cellulose matrix and a component fibre composition of the chemical pulp. It has been shown that the value of adhesive capacity of the material is determined to a greater extent by a characteristic of structural molecule organization of the residual water while compacting capacity - by characteristics of structural macromolecule organization of the cellulose matrix. The values of deformity and strength indicators of unbeaten sulphate unbleached pulp are determined by the change in those fundamental characteristics in the course of pulping.

При проведении сульфатных варок различной длительности были получены образцы целлюлозы с широким диапазоном химического состава и характеристик деформативности и прочности. С помощью ИК-Фурье спектроскопии были получены данные, позволяющие рассмотреть часть вопросов, связанных со структурными неоднородностью и дефектностью технической целлюлозы. Результаты изложены в нашей предыдущей статье на с. 99—104.

В данной статье приведено описание изменений структуры и компонентного состава древесной целлюлозы (углеводной части, остаточного лигнина и остаточной воды) в процессе сульфатной варки с использованием следующих параметров:  $C1_{уд}$  и  $C1_{неуп}$  — относительное содержание упорядоченных и неупорядоченных областей, образованных макромолекулами нативной целлюлозы (конформация  $C1$ );  $C2_{неуп}$  — относительное содержание целлюлозных макромолекул с конформацией, отличной от конформации макромолекул нативной целлюлозы, а также других поли- и олигосахаридов;  $M_0$  ( $1512 \text{ см}^{-1}$ ) — относительное содержание остаточного лигнина (величина нулевого момента по-

лосы поглощения с максимумом у  $1512 \text{ см}^{-1}$ );  $M_0 (\text{H}_2\text{O})$  — относительное содержание остаточной воды (величина нулевого момента полосы поглощения с максимумом у  $1645 \text{ см}^{-1}$  после 5-часового вакуумирования образцов);  $M_1 (\text{H}_2\text{O})$  — степень связывания молекул остаточной воды компонентами системы (величина первого момента — положение центра тяжести этой спектральной полосы,  $\text{см}^{-1}$ );  $M_2 (\text{H}_2\text{O})$  — степень

Таблица 1  
Физико-механические характеристики полученных образцов целлюлозы

Но- мер об- раз- ца	Чис- ло Кап- на	Фундаментальные характеристики					Прочностные характеристики					Деформационные характеристики					
		$l_{\text{ср}}$ мм	$V$ $\text{см}^3/\text{г}$	$F_{\text{ср}}$ МПа	$L_0$ м	$l_{\text{р}}$ мм	$F$ , Н	$L$ , м	$\sigma_{\text{р}}$ МПа	$A_{\text{р}}$ мДж	$D$ , кПа	$R$ , мН	$E_L$ , МПа	$E_D$ , МПа	$\epsilon_{\text{р}}$ %	$EI$ , $\frac{\text{МН} \times \text{см}^2}{\text{см}}$	$F_{\text{нрп}}$ МПа
1	54,6	2,4	2,65	0,19	7840	2,17	10,7	850	3,3	2,9	39	433	1020	470	103	688	178
2	51,9	2,5	2,39	0,19	7320	3,00	15,0	1200	4,8	5,1	42	533	1440	461	121	1220	193
3	43,5	2,4	2,75	0,17	7570	3,69	11,3	900	3,6	2,8	37	330	1170	561	73	804	200
4	35,1	2,4	2,21	0,21	8620	3,37	15,6	1350	5,5	4,3	58	509	1540	807	102	1363	235
5	32,5	2,5	2,22	0,18	7650	3,94	10,8	950	3,8	4,5	36	408	2080	353	68	825	203
6	30,8	2,5	2,29	0,17	7830	3,46	13,3	1100	4,5	4,5	44	439	1340	457	114	1189	230
7	27,4	2,5	2,46	0,25	7980	2,66	28,3	2200	10,3	14,2	74	1075	2660	480	165	2405	294
8	22,9	2,4	2,23	0,28	8210	2,84	32,0	2750	13,2	21,9	100	1107	2830	481	124	2542	330
9	20,8	2,4	2,08	0,24	8240	2,83	26,5	2100	9,3	15,5	71	1011	2720	354	166	2619	285
10	20,7	2,5	2,17	0,24	8390	3,37	30,1	2500	11,3	20,8	82	1260	2810	418	184	2464	297

структурной однородности молекул остаточной воды (величина второго момента полосы поглощения,  $\text{см}^{-1}$ ).

Цель данной работы — изучить взаимосвязь характеристик структуры стенки волокна с характеристиками фундаментальных, деформационных и прочностных свойств образцов волокнистого полуфабриката. Для исключения влияния процесса размола физико-механические свойства исследовали у отливок из неразмолотой целлюлозы массой  $75 \text{ г/м}^2$ . Испытания проводили по стандартным методикам и методикам, изложенным в работах [2—7]. Экспериментальные данные представлены в табл. 1. Численные данные характеристик структуры стенки волокна также представлены в нашей предыдущей работе на с. 99—104.

Фундаментальные свойства волокна изменяются в зависимости от продолжительности варки. Удаление лигнина в процессе варки приводит к возрастанию адгезионной способности поверхности волокна  $F_{\text{св}}$ , что особенно заметно проявляется при изменении числа Каппа с 32,5 до 27,4 ед. При этом снижается величина показателя пухлости  $V$ , характеризующего способность волокон к уплотнению во влажном состоянии. В данном случае этот процесс практически не отражается на величине средней длины волокна  $l_{\text{ср}}$ . Нулевая разрывная длина  $L_0$ , характеризующая собственную прочность волокна, возрастает на 7% ( $l_{\text{к}}$  — критическая длина волокна).

Такие изменения фундаментальных характеристик в процессе удаления лигнина приводят к повышению всех характеристик прочности, наиболее значительный прирост которых наблюдается при изменении степени делигнификации с 30,8 до 27,4 ед. Каппа. ( $P$  — разрушающее усилие;  $L$  — разрывная длина;  $\sigma_p$  — разрушающее напряжение;  $A_p$  — работа разрушения;  $\Pi$  — сопротивление продавливанию;  $R$  — сопротивление раздиранию).

Таблица 2

## Коэффициенты парной корреляции

Показатели физико-механических свойств	$C_1$ уп	$C_1$ неуп	$C_2$ неуп	$M_0(1512)$	$M_0(\text{H}_2\text{O})$	$M_1(\text{H}_2\text{O})$	$M_2(\text{H}_2\text{O})$
Число Каппа	-0,93	-0,81	0,91	0,99	0,96	-0,51	0,67
$l_{\text{ср}}$	-0,04	0,39	-0,23	-0,00	-0,07	-0,20	0,37
$\rho$	0,88	0,66	-0,76	-0,85	-0,83	0,50	-0,57
$V$	-0,89	-0,70	0,78	0,85	0,85	-0,48	0,54
$F_{\text{св}}$	0,66	0,32	-0,54	-0,62	-0,58	0,38	-0,85
$L_0$	0,40	0,23	-0,36	-0,53	-0,55	0,16	-0,44
$l_{\text{к}}$	0,21	0,48	-0,31	-0,26	-0,39	0,13	0,38
$P$	0,80	0,48	-0,68	-0,75	-0,69	0,49	-0,91
$L$	0,80	0,49	-0,69	-0,76	-0,72	0,51	-0,90
$\rho^{\alpha}$	0,80	0,49	-0,68	-0,76	-0,71	0,50	-0,90
$A_p$	0,83	0,49	-0,70	-0,77	-0,71	0,64	-0,94
$\Pi$	0,73	0,42	-0,61	-0,72	-0,69	0,45	-0,87
$R$	0,79	0,48	-0,68	-0,74	-0,66	0,53	-0,90
$E_1$	0,90	0,63	-0,83	-0,87	-0,80	0,62	-0,83
$E_2$	-0,41	-0,30	0,39	0,31	0,16	-0,61	0,42
$\epsilon_p$	0,81	0,47	-0,69	-0,76	-0,68	0,63	-0,96
$EI$	0,61	0,41	-0,56	-0,55	-0,46	0,34	-0,76
$E_{\text{изг}}$	0,83	0,53	-0,73	-0,79	-0,72	0,49	-0,90
$G_0$	0,85	0,59	-0,76	-0,85	-0,81	0,44	-0,85

Примечание.  $\rho$  — плотность,  $\text{г/см}^3$ .

Для деформационных характеристик увеличение продолжительности варки приводит к возрастанию начального модуля упругости при растяжении  $E_1$ ; модуля упругости при изгибе  $E_{изг}$ ; жесткости при изгибе  $EI$ ; динамического модуля сдвига  $G_0$  и деформации разрушения  $\epsilon_p$ . Величина модуля упругости в области предразрушения  $E_2$  обнаружилась большой разброс.

Таким образом, увеличение продолжительности сульфатной варки приводит к изменению как структурной организации и компонентного состава стенки волокна технической целлюлозы, так и ее физико-механических характеристик. Для оценки корреляции исследуемых характеристик и определения степени влияния структуры стенки волокна на фундаментальные, деформационные и прочностные свойства целлюлозы были рассчитаны коэффициенты парной корреляции  $r$  [1], которые представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что среди фундаментальных характеристик наилучшие корреляционные зависимости с  $C1_{уп}$  имеют межволоконные силы связи и пухлость ( $r = 0,88$ ). Все прочностные характеристики обнаружили прямую взаимосвязь с относительным содержанием упорядоченных областей макромолекул нативной целлюлозы  $C1_{уп}$ . Такие характеристики, как разрушающее усилие, разрывная длина, разрушающее напряжение и работа разрушения, имеют коэффициент корреляции не ниже 0,80 при величине значимости коэффициента корреляции 0,67. Для сопротивления продавливанию и раздиранию коэффициент корреляции имеет величину порядка 0,75. Модуль упругости в области предразрушения и жесткость при изгибе не обнаружили взаимосвязь высокого уровня с характеристикой  $C1_{уп}$ , тогда как остальные деформационные характеристики имели коэффициент корреляции больше 0,81.

Численное значение коэффициента корреляции параметров  $C1_{уп}$  и  $C2_{уп}$  с физико-механическими характеристиками во всех случаях оказалось выше, чем с содержанием лигнина в образцах. Наиболее высокая корреляция обнаружена для содержания лигнина и  $\Pi$ ,  $E_1$  и  $G_0$ .

Математическая обработка спектральной кривой поглощения остаточной воды, содержащейся в стенке волокна после 5 ч вакуумирования образцов, позволила установить особенности влияния этого компонента структуры на бумагообразующие свойства волокон. Относительное содержание остаточной воды в структуре  $M_0$  снижается с уменьшением относительной доли компонента  $C2_{неуп}$ , описывающего содержание неупорядоченной (аморфной) составляющей, включающей в себя, в том числе, и гемиллюлозы, проявляющие ярко выраженные гидрофильные свойства. Эта характеристика воды не оказывает влияния на величину  $F_{св}$  ( $r = -0,58$ ) и значимо влияет на величину  $V$  ( $r = 0,85$ ), а также на все прочностные характеристики ( $r = -0,69 \dots -0,72$ ) и модули упругости  $E_1$  и  $G_0$  (соответственно  $r = -0,80$  и  $r = -0,85$ ).

Наиболее высокий уровень корреляции был выявлен при рассмотрении спектрального параметра, характеризующего степень структурной организации молекул остаточной воды  $M_2$ . Среди фундаментальных характеристик этот параметр оказывает наиболее существенное влияние на межволоконные силы связи ( $r = -0,85$ ). На пухлость его влияния не значимо ( $r = 0,54$ ). Прочностные характеристики обнаружили коэффициент корреляции от  $-0,87$  для  $\Pi$  до  $-0,94$  для  $A_p$ . Из деформационных характеристик наиболее высокий коэффициент корреляции у  $E_1$  ( $r = -0,83$ );  $E_{изг}$  ( $r = -0,90$ );  $\epsilon_p$  ( $r = -0,96$ ).

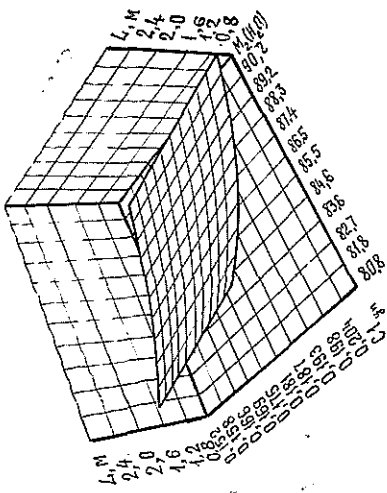
Свойства целлюлозных волокнистых материалов зависят от многих факторов. В парном корреляционном анализе, исследуя влияние каждого из параметров структуры на качественные показатели, мы искусственно подавляем влияние других параметров, рассматривая их как

помехи. При этом наблюдается весьма тесная связь характеристик качества со всеми параметрами компонентного состава и структуры стенки волокна, а также между самими параметрами структуры. В этом случае полезно рассчитать множественные коэффициенты корреляции, которые выражают степень связи между одной случайной величиной и всеми остальными исследуемыми величинами. Они служат для определения совокупного влияния на изучаемую величину других величин [1]. Необходимо учитывать тот факт, что при исследованиях свойств волокна целлюлозы невозможно непосредственно изучить влияние одной из структурных характеристик на показатели качества при сохранении постоянных значений остальных.

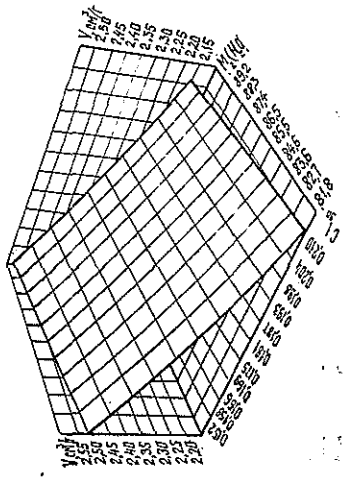
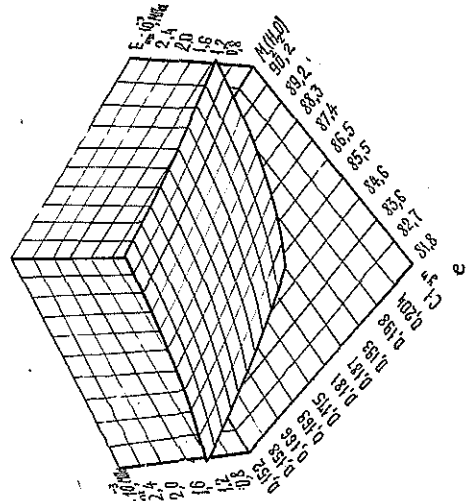
При проведении корреляционного анализа по результатам эксперимента в расчетах за исходные факторы были приняты следующие:  $x_1 - C_{1уп}$ ;  $x_2 - C_{2неуп}$ ;  $x_3 - M_0(H_2O)$ ;  $x_4 - M_2(H_2O)$ . Исходными данными для множественного корреляционного анализа являются парные коэффициенты корреляции всех возможных сочетаний факторов. Расчеты проводились с помощью ЭВМ по специально разработанной

Таблица 3

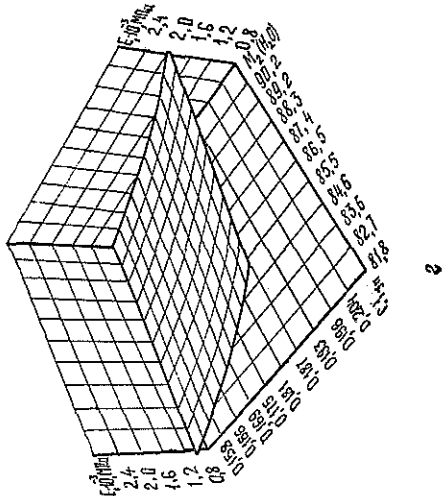
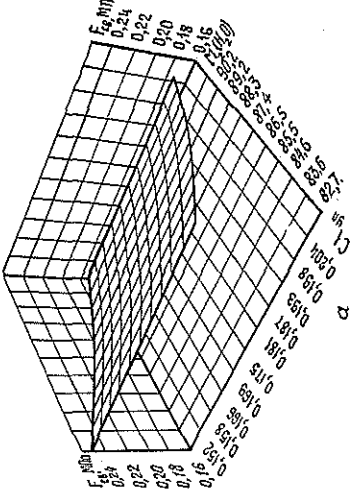
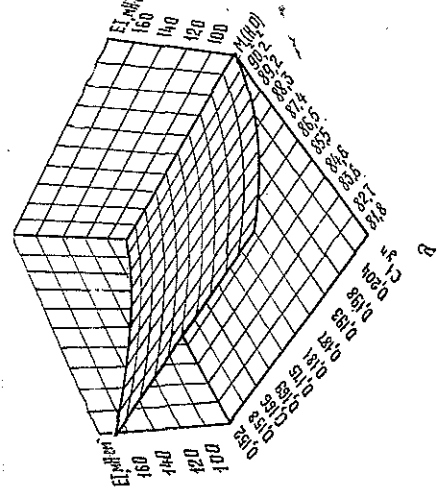
Множественные коэффициенты корреляции	Показатели физико-механических свойств целлюлозы (Y)												
	$E_1$	$E_2$	$\epsilon_p$	$EI$	$E_{Hr}$	$G_0$	$\sigma_p$	$A_p$	$\Pi$	$R$	$V$	$F_{св}$	$I_k$
$r_{y, 12}$	0,91	0,41	0,85	0,62	0,86	0,86	0,83	0,87	0,78	0,83	0,67	0,74	0,56
$r_{y, 13}$	0,90	0,65	0,82	0,65	0,84	0,86	0,80	0,83	0,73	0,80	0,77	0,66	0,53
$r_{y, 14}$	0,93	0,44	0,97	0,76	0,93	0,91	0,92	0,96	0,88	0,92	0,61	0,85	0,83
$r_{y, 23}$	0,83	0,40	0,75	0,46	0,76	0,86	0,78	0,78	0,82	0,70	0,75	0,72	0,43
$r_{y, 24}$	0,92	0,46	0,98	0,78	0,94	0,91	0,92	0,96	0,88	0,92	0,72	0,85	0,74
$r_{y, 34}$	0,93	0,43	0,98	0,76	0,94	0,94	0,94	0,97	0,91	0,92	0,75	0,86	0,81
$r_{y, 123}$	0,92	0,77	0,86	0,65	0,86	0,90	0,85	0,88	0,84	0,83	0,77	0,78	0,51
$r_{y, 124}$	0,93	0,46	0,98	0,80	0,94	0,91	0,92	0,96	0,88	0,92	0,74	0,85	0,84
$r_{y, 234}$	0,93	0,75	0,98	0,82	0,94	0,95	0,94	0,97	0,93	0,92	0,75	0,87	0,82
$r_{y, 134}$	0,94	0,65	0,98	0,76	0,94	0,95	0,94	0,97	0,94	0,92	0,81	0,88	0,84
$r_{y, 1234}$	0,94	0,79	0,98	0,82	0,94	0,95	0,94	0,97	0,94	0,92	0,83	0,89	0,86



б



б



программе. Сначала рассматривали связь  $Y$  с двумя из вышеуказанных факторов  $x$  (6 вариантов), затем — с тремя (4 варианта) и четырьмя (1 вариант).

Результаты множественного корреляционного анализа представлены в табл. 3. Отметим, что множественные коэффициенты корреляции имеют большую величину, чем парные. При рассмотрении связи физико-механических показателей с двумя структурными параметрами одновременно видно, что наибольший уровень связи демонстрируют  $x_1$  или  $x_2$  в сочетании с  $x_4$ . Если принять во внимание очень тесную корреляцию  $x_1$  и  $x_2$  между собой, то можно сделать вывод о том, что величины физико-механических характеристик, в основном, определяются парой показателей, один из которых — относительное содержание структурных компонентов целлюлозы  $C1_{уп}$  или  $C2_{неуп}$ , а другой — степень структурной организации молекул остаточной воды  $M_2$  ( $H_2O$ ).

Множественные коэффициенты корреляции физико-механических характеристик с тремя параметрами одновременно имеют еще более высокое значение, причем наиболее сильно сказывается одновременное влияние факторов  $x_3$  и  $x_4$ .

По результатам множественного корреляционного анализа были выбраны характеристики  $x_1$  и  $x_4$  (как демонстрирующие наибольшую взаимосвязь) для получения уравнений регрессии. При этом ограничились двумя влияющими факторами, так как при большем их числе затруднено графическое изображение взаимосвязи факторов. На рисунке приведены поверхности, полученные при использовании в качестве модели уравнения  $Y = b_0 x_1^{b_1} x_4^{b_2}$ . На основании анализа рисунков можно сделать заключение, что степень влияния  $x_1$  и  $x_4$  на межволоконные силы связи  $F_{св}$ , пухлость материала  $V$ , разрывную длину  $L$ , модуль упругости при растяжении  $E_r$ , жесткость при изгибе  $EI$  и модуль упругости при изгибе  $E_{изг}$  различна. Полученные для деформационных характеристик поверхности по-разному отражают их зависимость от содержания одного из компонентов структуры и прочно связанной воды.

Таким образом, в результате проведенной работы на количественном уровне установлена взаимосвязь между структурой волокон образцов неразмолотой древесной целлюлозы, полученной только за счет изменения продолжительности сульфатной варки, и их основными показателями физико-механических свойств.

Высокие значения коэффициентов корреляции позволяют заключить, что бумагообразующие свойства небеленого целлюлозного волокнистого полуфабриката в значительной степени определяются уровнем структурной организации целлюлозной матрицы и молекул остаточной воды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Денисенко В. П., Тертицкий М. И. Корреляционный анализ в целлюлозно-бумажном производстве.— М.: Лесн. пром-сть, 1968.— 152 с. [2]. Ерыхов Б. П. Неразрушающие методы исследования целлюлозно-бумажных и древесных материалов — М.: Лесн. пром-сть, 1977.— 248 с. [3]. Иванов С. Н. Определение межволоконных сил связи в бумаге // Бум. пром-сть.— 1948.— № 3.— С. 6—9. [4]. Кларк Д. ж. Технология целлюлозы.— М.: Лесн. пром-сть, 1983.— 456 с. [5]. Комаров В. И. Критическая длина волокна — фактор деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов // Лесн. журн.— 1993.— № 4.— С. 79—83.— (Изв. высш. учеб. заведений). [6]. Комаров В. И., Фляте Д. М. Определение жесткости бумаги при изгибе // Целлюлоза, бумага и картон.— 1971.— № 30.— С. 11—13. [7]. Хабаров Ю. Г., Комаров В. И. Оценка последовательности разрушения целлюлозных волокнистых материалов // Бум. пром-сть.— 1986.— № 6.— С. 16—17.

УДК 676.017.42

*В. И. КОМАРОВ*

Архангельский государственный технический университет

**ЖЕСТКОСТЬ ПРИ ИЗГИБЕ  
ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ.  
АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ  
И ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ**

Изложены сведения об используемых в настоящее время методах определения жесткости при изгибе целлюлозно-бумажных материалов; расчета жесткости отдельных слоев многослойного картона и толщины слоя материалов, в котором возникает предельное состояние при сжатии в плоскости листа. Рассмотрено влияние основных технологических факторов на свойства получаемого материала.

Information of current methods of pulp and paper materials' flexural rigidity determination as well as calculation of some plies rigidity of multiply board and thickness of materials ply, in which ultimate condition at compression in the plane of a sheet occurs, has been presented. Influence of the main technological factors on the properties of a material obtained has been considered.

Целлюлозно-бумажные материалы при дальнейшей переработке или использовании в качестве конечного продукта должны обладать жесткостью при изгибе. В первую очередь, это относится к печатным видам бумаги; картону для производства тары и упаковки (особенно для упаковки жидких продуктов, так как упаковочные машины требуют высокой жесткости и стабильности его размеров); мешочной бумаге; некоторым видам высокопрочной бумаги; специальным видам бумаги. Эта весьма важная характеристика во многих случаях не регламентируется отечественными стандартами, что является отступлением от системного подхода к оценке механического поведения материала [36].

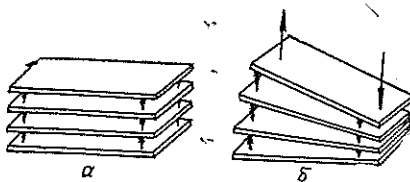
Изгиб — это деформация тела под действием внешних сил или моментов, сопровождающаяся изменением кривизны деформируемого объекта. Различают несколько видов изгиба: чистый, поперечный, косой, продольный. В дальнейшем нас будет интересовать самый распространенный вид — поперечный. Для того, чтобы ясно представить деформацию изгиба и ее связь с другими видами деформации, С. Э. Хайкин [43] предлагает использовать модель, представленную на рис. 1. Изгиб в данном случае моделируется наклоном верхней пластинки. При этом расстояния между соседними пластинками в разных местах изменяются по-разному: с одной стороны они увеличиваются, с другой — уменьшаются. Таким образом, деформация изгиба сводится к растяжениям и сжатиям, различным в различных частях тела, т. е. представляет неоднородный процесс.

Жесткость при изгибе изотропного материала определяется произведением модуля упругости материала  $E$  и момента инерции поперечного сечения образца  $I$ . В случае прямоугольного сечения (как у бумаги)

$$I = b\delta^3/12, \quad (1)$$



Рис. 1. Модель деформации изгиба без приложения (а) и с приложением нагрузки (б)



где  $b$  и  $\delta$  — ширина и толщина образца.

Таким образом, жесткость при изгибе является комплексной характеристикой:

$$EI = E (b\delta^3/12). \quad (2)$$

Отметим, что  $E$  характеризует способность бумажного листа сопротивляться деформированию в зависимости от свойств этого листа, которые определяются природой исходных материалов и технологическими факторами производства. Величина  $I$  зависит от геометрических размеров поперечного сечения образца.

Для определения жесткости бумаги и картона при изгибе используют большое количество методов с применением приборов различных конструкций. В работе [18] эти методы условно разделены на следующие группы.

1. Статические или динамические методы при испытании образцов на растяжение.

2. Непосредственное испытание образцов на изгиб, который осуществляют под действием собственного веса; собственного веса совместно с сосредоточенной нагрузкой; специальной нагрузки без действия собственного веса.

3. Определение жесткости пространственно-изогнутых образцов (кольца, дуги).

4. Специальные методы.

Каждая группа методов имеет свои достоинства и недостатки.

К первой группе относится широко используемый в зарубежной практике метод определения жесткости по Кларку [9]. В этом случае жесткость  $S$  определяется по уравнению

$$S = EI/bW = E\delta^3/12W. \quad (3)$$

Здесь  $W$  — масса  $1 \text{ м}^2$  образца.

Существует несколько способов определения  $\delta$  и  $E$  (модуля Юнга), необходимых для вычисления жесткости по уравнению (3).

При рассмотрении механических свойств бумаги предметом дискуссии чаще всего становится толщина и рассчитываемая с ее применением плотность бумаги. Важнейшее значение имеет эта характеристика и в случае определения жесткости. Авторы работы [9] справедливо утверждают, что стандартная методика измерения толщины с использованием микрометра не обладает достаточной надежностью, так как в этом случае измеряется максимальная толщина ограниченной площади. Ими был проведен эксперимент по измерению толщины образцов лабораторного изготовления с массой  $1 \text{ м}^2$  15...125 г стандартным способом и способом плавучести в ртути (рис. 2). Показано, что значения  $\delta$  полученные стандартным способом, больше. По мере увеличения массы  $1 \text{ м}^2$  образцов возрастает расхождение между величинами  $\delta$ , измеренными разными способами. У отливок массой  $125 \text{ г/м}^2$  это расхождение достигает 38 мкм, у образцов бумаги машинной выработки — 4...6 мкм. Очевидно, что измерение способом плавучести (вытеснения) в ртути дает результат, приближающийся к истинной,

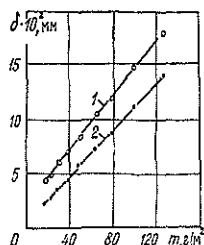


Рис. 2. Толщина бумаги  $\delta$ , измеренная стандартным методом (1) и методом плавучести в ртути (2) ( $m$  — масса 1 м<sup>2</sup> образца)

усредненной по площади образца,  $\delta$ . Однако высокая токсичность ртути не позволяет широко использовать этот метод на практике.

Значения модуля упругости, измеренные статическими и динамическими методами, в случае истинно упругого тела должны совпадать. Для не вполне упругих материалов величина модуля упругости будет зависеть от метода измерения. Автором данного обзора была проведена работа по количественной оценке различия величин модуля упругости, определеннного динамическими и статическими методами [19]. Использовано четыре метода.

Первый метод (динамический) был разработан А. П. Рудаковым в Институте высокомолекулярных соединений (ИВС) АН СССР. Расчет производят по уравнению

$$E = f_0/x_0 (l/S), \quad (4)$$

где  $E$  — динамический модуль упругости, измеренный в режиме «растяжение — сжатие» при частоте 590 Гц;

$f_0$  — амплитуда динамической силы;

$x_0$  — амплитуда смещений;

$l$  — начальная длина образца;

$S$  — площадь поперечного сечения образца.

Деформация образца составляет примерно 0,03 %.

Второй метод (динамический, резонансный) основан на принципе продольного маятника [46]. Работа была проведена во ВНИИ им. Попова (ИРПА). Расчет производят по уравнению

$$E = 4\pi^2\nu^2 (Ml/b\delta), \quad (5)$$

где  $E$  — динамический модуль упругости, измеренный резонансным методом;

$\nu$  — резонансная частота первой гармоники;

$M$  — масса сосредоточенного груза, на который действует возбуждающая гармоническая сила от генератора звуковой частоты;

$l$  — длина образца;

$\delta, b$  — толщина и ширина образца.

Деформация образца составляет примерно 0,1 %.

Третий метод (статический) основан на экспериментальном получении зависимости «усилие — удлинение» с последующим превращением ее в зависимость «напряжение — деформация» при обработке на ПЭВМ [42].

Деформация образца при расчете модуля упругости составляет 0,2...0,3 %. Расчет производят по уравнению

$$E = \sigma/\epsilon. \quad (6)$$

Здесь  $E$  — статический модуль упругости;

$\sigma$  — напряжение;

$\epsilon$  — деформация.

Четвертый метод (статический) основан на фиксации стрелы прогиба вертикально закрепленной консоли, горизонтальная нагрузка на которую создается специальной рычажной системой [29]. Статический модуль упругости при изгибе рассчитывают по уравнению

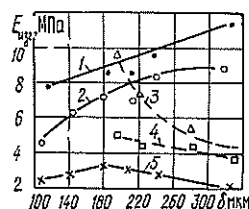
$$E_{изг} = 12EI/b\delta^3, \quad (7)$$

где  $EI$  — жесткость при изгибе;  
 $b, \delta$  — ширина и толщина образца.

Стрела прогиба свободного конца образца составляет до 8 % от испытываемой длины.

Для сравнительных испытаний использовали лабораторные образцы бумаги массой 75...240 г/м<sup>2</sup> из сульфатной небеленой целлюлозы, размолотой до 25 °ШР (плотность образцов 0,68...0,74 г/см<sup>3</sup>) и производственного картона для гладких слоев гофрированного картона с массой 125...200 г/м<sup>2</sup>.

Рис. 3. Влияние толщины материала, обусловленной массой 1 м<sup>2</sup>, на модуль упругости, определенный динамическим (1, 2) и статическим (3, 4, 5) методами: 1 — разработанный ИВС; 2 — ИРПА; 3 — при приложении растягивающей нагрузки; 4, 5 — изгибающей нагрузки (сплошная линия — лабораторные образцы сульфатной небеленой целлюлозы; пунктирная — картон машинного производства)



Результаты эксперимента представлены на рис. 3. Для однородного изотропного упругого материала все эти зависимости должны представлять прямые, параллельные оси абсцисс, а при полной применимости закона Гука — единую прямую. Измеренный различными методами модуль упругости в этом идеальном случае — инвариантная характеристика упругих свойств материала.

По принятому определению [41] бумага является упругопластическим материалом, в некоторых работах ее рассматривают как упруговязкопластический или вязкоупругий материал [1, 2, 8]. Кроме того, в зависимости от условий формования листа, бумага, в большей или меньшей степени, является анизотропным материалом с неопределенным распределением напряжений внутри структуры. Поэтому фактически не наблюдается зависимости  $E = f(\delta)$  в виде прямой линии, параллельной оси абсцисс.

Таким образом, величина модуля упругости бумаги зависит от методики определения. Модуль упругости, измеренный динамическим методом, имеет большую величину. Обращает на себя внимание различный ход кривых, отображающих изменение модуля упругости при испытаниях на растяжение и изгиб.

К старейшим способам второй группы методов определения жесткости при изгибе относится испытание бумаги, когда образец закреплен консольно (горизонтально), а изгиб происходит под действием собственного веса. В этом случае реализуются различные виды измерения: во-первых, фиксируется величина деформации конца образца; во-вторых, иногда определяют длину образца, при которой его свободный конец свисает вертикально; в-третьих, измеряют величину угла, составленного концом полоски бумаги с краем зажима [6, 14, 48, 53]. Наиболее характерны метод Кларка и метод, описанный Клейнертом [53].

Метод, предложенный Кларком, заключается в определении критической длины полоски тонкой бумаги, один конец которой помещен

в зажим. При повороте этого конца на  $90^\circ$  свободный конец изгибается и перекидывается с одной стороны на другую. Длина полоски увеличивается до тех пор, пока при повороте зажима образец не изогнется точно на  $90^\circ$ . Расчет жесткости производят по уравнению

$$S = L^3/100. \quad (8)$$

Здесь  $L$  — свободная (критическая) длина образца.

В работе [10] утверждается, что справедлива следующая зависимость:

$$S = L^3/100 = E\delta^3/12 W. \quad (9)$$

Клейнерт дает описание прибора для определения длины  $l$  образца бумаги, под действием собственного веса изгибающегося на угол  $\alpha$ , который жестко фиксирован и равен  $43^\circ$ . Сопротивление изгибу рассчитывают по уравнению

$$B = m_A l^3/8, \quad (10)$$

где  $m_A$  — масса  $1 \text{ м}^2$  бумаги.

Эти методы просты и обеспечивают воспроизводимость результатов.

Из методов с использованием изгиба под действием сосредоточенной нагрузки наибольшее распространение нашли схемы приборов фирмы «Lorentzen and Wettre», представленные на рис. 4—6 и математически выраженные формулами (11) — (15).

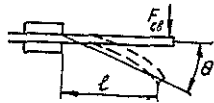


Рис. 4. Схема работы прибора для определения сопротивления изгибу

$$S^b = \frac{Fl^2\theta}{\theta\pi b}, \quad (11)$$

где  $S^b$  — жесткость при изгибе, Н · м;

$F$  — сила, Н;

$l$  — длина, м;

$\theta$  — угол (задается от  $5$  до  $30^\circ$  или фиксируется  $5,0; 7,5; 15,0; 20,0; 25,0; 30,0^\circ$ );

$b$  — ширина, м.

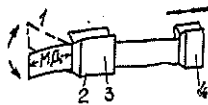


Рис. 5. Схема работы прибора для определения жесткости при изгибе резонансным методом: 1 — амплитуда колебания образца; 2 — вибрирующий зажим; 3 — приложение силы к зажиму; 4 — фиксирующий зажим (МД — машинное направление)

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{k^2}{l^2} \left( \frac{S^b}{w} \right)^{0,5}, \quad (12)$$

где  $f_r$  — резонансная частота, Гц;

$k$  — безразмерная константа, равная  $1,875$ ;

$l$  — длина свободного конца полоски, м;

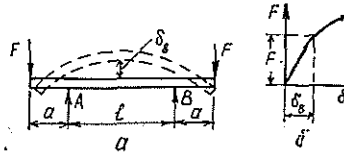
$S^b$  — жесткость при изгибе, мН · м;

$w$  — масса  $1 \text{ м}^2$  образца, г.

Если  $f_r = 25$ , то уравнение приобретает вид

$$S^b = 2 \cdot 10^3 l^4 w. \quad (13)$$

Рис. 6. Схема работы прибора для определения жесткости при изгибе очень жестких материалов (а) и зависимость  $F - \delta$  (б)



$$S^b = \frac{M}{bk}; \quad (14)$$

$$S^b = \frac{F}{b\delta} \frac{al^2}{8}, \quad (15)$$

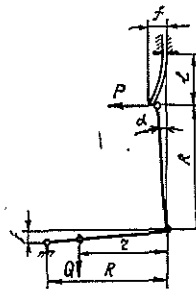
где  $S^b$  — жесткость при изгибе, Н · м;  
 $M$  — изгибающий момент, Н · м;  
 $b$  — ширина образца, м;  
 $k$  — величина, обратная радиусу кривизны;  
 $F$  — нагружающая сила, Н;  
 $\delta_b$  — стрела прогиба, м;  
 $a$  — расстояние от точки приложения силы до опоры, м;  
 $l$  — расстояние между точками опоры, м.

Схема с четырехточечной нагрузкой (см. рис. 6) используется для испытания очень жестких материалов типа гофрированного картона [48, 54].

Примером метода определения жесткости при изгибе под действием специальной нагрузки на образец, но без действия собственного веса, является прибор ЖБИ-1, нашедший широкое применение в отечественной практике [29]. На рис. 7 показана схема испытания вертикально закрепленного образца бумаги. Расчет жесткости при изгибе осуществляют по уравнению

$$EI = Qrl^3 / (3Rf), \quad (16)$$

Рис. 7. Схема работы прибора ЖБИ-1



где  $EI$  — жесткость при изгибе;  
 $Q$  — масса дополнительного груза;  
 $r$  — плечо приложения груза;  
 $l$  — длина испытываемого образца;  
 $R$  — плечо маятника;  
 $f$  — стрела прогиба.

Стандартным в России служит метод [4], схема испытаний которого представлена на рис. 8. За результат испытания принимают силу изгиба  $F_{изг}$  или момент изгиба  $M_{изг}$ . Расчет ведут по уравнению

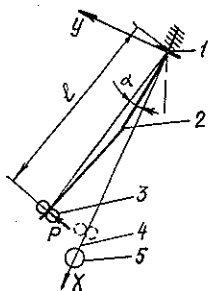


Рис. 8. Схема работы прибора ЖСК-2: 1 — зажимные губки для крепления образца; 2 — испытуемый образец; 3 — изгибающее устройство с роликовым захватом; 4 — маятниковый силовизмеритель; 5 — штатив для установки дополнительных грузов ( $P$  — деформирующая сила;  $l$  — испытуемая длина образца;  $\alpha$  — заданный угол изгиба ( $7,5$  или  $15,0^\circ$ );  $\beta$  — угол отклонения маятника от вертикали, определяющий изгибающий момент)

$$E_{\text{изг}} = M_{\text{изг}}/5. \quad (17)$$

К группе методов, определяющих жесткость пространственно-изогнутых образцов, относится используемый в России метод определения жесткости при сжатии кольца [5]. Метод основан на нахождении усилия, необходимого для смятия при осевом сжатии поставленной на ребро и свернутой в кольцо полоски бумаги или картона.

В этом случае, очевидно, нужно говорить не о жесткости, а о возникновении после достижения максимальной нагрузки условия стабильного равновесия. Это приводит к чрезмерной деформации путем бокового перемещения образца картона или бумаги, называемого потерей устойчивости. Потеря устойчивости зависит как от жесткости при изгибе материала, так и от ряда других факторов [35].

К группе специальных методов относят методы определения жесткости бумажных тарелок; стенок картонных коробок, защемленных по периметру и др. [50]. В работе [52] отмечается, что сопротивление сжатию — наиболее важная характеристика ящиков из гофрокартона, определяющая допустимую высоту штабелей при хранении и перевозках. На сопротивление сжатию влияют сопротивление гофрокартона торцевому сжатию, его толщина и жесткость при изгибе, периметр ящика, дефекты, возникающие при его изготовлении.

Сопротивление гофрокартона торцевому сжатию ECT (edgewise crush test) зависит от суммы прочностных характеристик всех компонентов. Этот показатель обычно оценивают по результатам экспериментального определения сопротивления картона для плоских слоев сжатию кольца RCT (ring crush test) и торцевого сопротивления гофров CCT (corrugated crush test). Недавно введен новый метод испытания, при котором сжатию подвергается очень короткий участок материала и определяется показатель SCT (short span crush test). Для прогнозирования сопротивления гофрокартона торцевому сжатию можно пользоваться следующими уравнениями:

$$\text{ECT} = 0,73 (\text{RST}_1 + \text{RST}_2 + \alpha \text{CCT}_r) + 1,60 \text{ (при } r = 0,95) \quad (18)$$

или

$$\text{ECT} = 0,53 (\text{SCT}_1 + \text{SCT}_2 + \alpha_1 \text{SCT}_r) + 1,49 \text{ (при } r = 0,83); \quad (19)$$

для пятислойного (два слоя гофров)

$$\begin{aligned} \text{ECT} = & 0,69 (\text{RCT}_1 + \text{RCT}_2 + \text{RCT}_3 + \alpha_1 \text{CCT}_{r1} + \\ & + \alpha_2 \text{CCT}_{r2}) + 2,27 \text{ (при } r = 0,92) \end{aligned} \quad (20)$$

или

$$\text{ECT} = 0,45 (\text{RCT}_1 + \text{SCT}_2 + \text{SCT}_3 + \alpha_1 \text{SCT}_{r_1} + \alpha_2 \text{SCT}_{r_2}) + 2,74 \quad (\text{при } r = 0,88), \quad (21)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, определяемый несущей способностью гофров заданного профиля;

$r$  — коэффициент корреляции принятой модели.

Индексы 1, 2, 3 соответствуют первому, второму (наружные) и третьему (средний) картонам для плоских слоев, а также первому и второму слоям гофров.

Хотя показатель SCT характеризует истинное сопротивление слоев сжатию, сочетание показателей RCT и SCT отражает влияние условий изготовления и переработки гофрокартона. Поэтому для уравнений (18) и (20) получены более высокие значения  $r$ , чем для уравнений (19) и (21).

Жесткость гофрокартона при изгибе обычно не контролируют, так как прибор «4-Point Bending Stiffness Tester» не нашел широкого пространства. При этом необходимо проводить расчеты по уравнению

$$D = \sum^n E_i I_i, \quad (22)$$

где  $D$  — жесткость гофрокартона при изгибе;

$E_i$  — модуль упругости  $i$ -го слоя;

$I_i$  — момент инерции  $i$ -го слоя.

Вычисления по этой формуле очень трудоемки в связи с тем, что момент инерции гофров нужно определять методами численного интегрирования по их профилю. Но теоретически доказано, что жесткость гофрокартона зависит, главным образом, от его суммарной толщины (жесткость пропорциональна квадрату толщины), а общая толщина гофрокартона — от профиля гофров и степени сохранения их высоты в процессах переработки. При неизменной общей толщине гофрокартона, т. е. при определенном профиле гофров главным фактором, влияющим на жесткость, является сумма значений массы  $1 \text{ м}^2$  картона для плоских слоев.

Зависимость между сопротивлением ящиков сжатию и характеристиками гофрокартона можно описать эмпирической формулой Мак Ки

$$\text{BCT} = 375 \text{ECT}^{0,75} \text{FR}^{0,25} z^{0,50} \quad (\text{при } r = 0,96), \quad (23)$$

где BCT — сопротивление ящиков сжатию, Н;

ECT — сопротивление гофрокартона торцевому сжатию, кН/м;

$\text{FR} = \sqrt{D_m D_c}$  — среднее геометрическое значение жесткости гофрокартона при изгибе, Н · м;

$D_m$  — жесткость гофрокартона при изгибе в машинном направлении (в ящике — в горизонтальном направлении), Н · м;

$D_c$  — жесткость гофрокартона в поперечном направлении (в ящике — в вертикальном направлении), Н · м;

$z$  — периметр ящика, м.

Поскольку жесткость гофрокартона при изгибе обычно неизвестна, формулу (23) использовать трудно. Поэтому выведены более удобные эмпирические формулы для ящиков из гофрокартона:

трехслойного

$$\text{BCT} = 17,7 \text{ECT}^{1,06} d^{0,85} (L + B)^{0,31} \quad (\text{при } r = 0,90); \quad (24)$$

пятислойного

$$\text{ВСТ} = 17,7 \text{ЕСТ}^{0,85} d^{0,65} (L + B)^{0,38} \quad (\text{при } r = 0,95), \quad (25)$$

где  $d$  — толщина гофрокартона, мм;  
 $L$  — длина ящика, мм;  
 $B$  — ширина ящика, мм.

По этим формулам можно прогнозировать сопротивление сжатию любого ящика с учетом его размеров и свойств гофрокартона.

Анализ данных литературы показывает, что в зарубежной практике наибольшее распространение получили методы определения жесткости, представленные на рис. 4—6, а в отечественной — на рис. 7, 8.

Отметим, что, по данным справочника [54], для обеспечения требований стандарта [13] необходимы не только прочностные испытания целлюлозно-бумажных материалов, но и определение еще ряда характеристик деформативности (табл. 1).

При проведении испытаний целлюлозно-бумажных материалов на изгиб возникают две проблемы. Первая связана с выбором метода, который лучшим образом позволяет оценить потребительские свойства материала, вторая — обусловлена появлением в структуре материала, наряду с упругими, также вязких и пластических деформаций [17, 47—49]. Кроме того, целлюлозно-бумажные материалы отличаются анизотропией, поэтому использовать уравнения сопротивления материалов можно с известным приближением.

Прибор ЖБИ-1 (см. рис. 7), используемый отечественными исследователями, благодаря наличию оптической системы отсчета результатов позволяет весьма точно измерять малые деформации образца. На опытном образце этого прибора были выявлены оптимальные условия испытаний и, в первую очередь, исследовано влияние испытываемой длины образца и деформирующей силы на рассчитываемую величину жесткости при изгибе [25, 43]. Результаты эксперимента представлены на рис. 9, 10. Для опытов применяли образцы с массой 240 г/м<sup>2</sup> и степенью помола волокна 25 °ШР. Было показано, что величина испытываемой длины образца оказывает влияние на измеряемую жесткость при изгибе. Для получения сравнимых результатов испытываемая длина должна быть одинаковой и, с целью уменьшения вероятности развития пластических

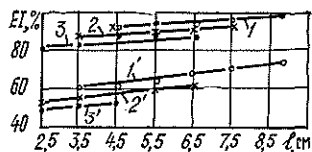


Рис. 9. Влияние изменения длины образца на измеряемую жесткость бумаги при изгибе для различных значений деформирующей силы: 1, 1' — 3,06; 2, 2' — 6,12; 3, 3' — 15,30 мН; 1, 2, 3 — образцы сульфатной небеленой целлюлозы; 1', 2', 3' — образцы сульфитной беленой целлюлозы

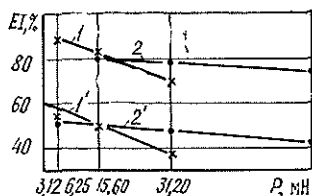


Рис. 10. Влияние изменения деформирующей силы на измеряемую жесткость бумаги при изгибе для различных значений длины образца: 1, 1' — 3,5; 2, 2' — 2,5 см; 1, 2 — образцы сульфатной небеленой целлюлозы; 1', 2' — образцы сульфитной беленой целлюлозы



Таблица 1

Образец	Деформация разрушения	Поглощение энергии при растяжении	Модуль упругости	Сопротивление изгибу	Жесткость при изгибе	Прочность при сжатии
Бумага для печати	++	++	++	+	+-	+
Крафт-лайнер или флютинг	++	++	++	+	+-	+
Мешочная и др. высокопрочные виды бумаги	+	+	+	+	+	+
Коробочный картон	+	+	+	+	+	+
Гофрированный картон	-	-	-	-	-	-

Таблица 2

Образец	Изгиб*			Растяжение $\sigma$ , МПа
	Р, мН	$\delta$ , см	$\sigma_{\text{раст}}$ , кПа	
Картон машинного производства с массой 1 м <sup>2</sup> , г/м <sup>2</sup> :	62,50	0,0295	2,16	19,0
	62,50	0,0370	1,37	17,2
Сульфатная небеленая целлюлоза лабораторного изготовления (масса 75 г/м <sup>2</sup> ) со степенью помола, °ШР:	3,12	0,0161	0,15	2,2
	3,12	0,0124	0,25	10,3
	3,12	0,1140	0,30	12,6
	3,12	0,1020	0,38	13,3

\* Длина образца при испытании составляла 2,5 см.

деформаций, длина образца должна быть минимально возможной. Увеличение деформирующей нагрузки приводит к снижению измеряемой величины жесткости.

В работе [17] показано, что упругопластические материалы (древесина, слоистые пластики, целлюлоза, бумага, картон и др.) при изгибе в растянутой зоне поперечного сечения работают упруго вплоть до разрыва крайних волокон, а в сжатой зоне — упругопластически. Справедливость данного утверждения в случае целлюлозно-бумажных материалов для растянутой зоны образца можно проверить, используя уравнение Навье:

$$\sigma = M/W, \quad (26)$$

где  $M$  — постоянно действующий изгибающий момент,  $M = Pl$ ;  
 $W$  — момент сопротивления сечения образца,  $W = b\delta^3/6$ .

Из табл. 2 видно, что напряжение  $\sigma_{\text{раст}}$ , возникающее в крайнем слое подвергнутого изгибу образца, на 3—4 порядка ниже предела упругости  $\sigma_1$  материала при испытании на растяжение.

В зоне сжатия механическое поведение целлюлозно-бумажных материалов гораздо сложнее. Экспериментально установлено, что величина начального модуля упругости  $E_1$  при испытании материала на растяжение выше модуля упругости при изгибе  $E_{\text{изг}}$ . Можно предположить, что

$$E_{\text{изг}} = (E_1 + E_{\text{сж}})/2, \quad (27)$$

где  $E_{\text{сж}}$  — модуль упругости при сжатии материала в плоскости листа.

Необходимо отметить парадоксальность поведения целлюлозно-бумажных материалов при сжатии в плоскости листа. Под действием напряжений, примерно на четыре порядка меньших предела упругости при растяжении в зоне сжатия, по всей видимости, возникает предельное состояние.

В работах [17, 38, 45] показана возможность расчета слоя структуры материала, в котором возникает предельное состояние. Принимаем

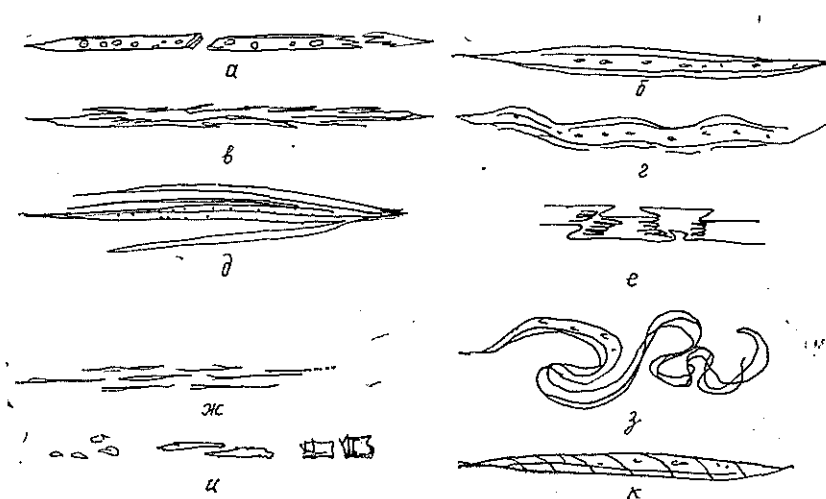
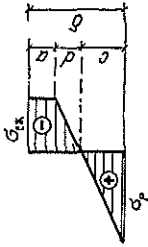


Рис. 11. Влияние процесса размола на волокно целлюлозы: а — укорочение волокна; б — уменьшение люмена; в — увеличение поверхности; г — размягчение; д — расслоение; е — продольное сжатие; ж — фибриллирование; з — изменение формы; и — образование мелких частиц; к — изменение структуры

Таблица 3

Эпюра и уравнения для расчета*	$n_0$														
	1,4	1,8	2,2	2,6	3,0	3,4	3,5	4,2	4,6	5,0	5,4	5,8	6,2	6,6	7,0
	$K_1$	0,17	0,28	0,38	0,44	0,50	0,54	0,58	0,62	0,64	0,67	0,71	0,72	0,74	0,75
	$K_2$	0,35	0,26	0,20	0,15	0,12	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03
	$K_3$	0,48	0,46	0,42	0,41	0,38	0,36	0,33	0,31	0,30	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23

\*  $E_{СЖ} = 2E_{длг} + E_1$  (28);  $a = \delta \frac{n_0 - 1}{n_0 + 1} = K_1 \delta$  (29);  $d = \delta \frac{2}{(n_0 + 1)^2} = K_2 \delta$  (30);  $c = \delta \frac{2n_0}{(n_0 + 1)^2} = K_3 \delta$  (31);

$n_0 = \frac{\sigma_{раст}}{\sigma_{СЖ}} = \frac{E_1}{E_{СЖ}}$  (32)

Таблица 4

Выход целлюлозы, %	Массовая доля лигнина в целлюлозе, %	Жесткость при изгибе отдельного волокна $EI \cdot 10^6$ , мН · см <sup>2</sup>		Физико-механические показатели бумаги				
		до сушки	после 1 мин сушки при температуре 110 °С	Толщина $\delta \cdot 10^3$ , м	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Жесткость при изгибе, мН · см <sup>2</sup>	Модуль упругости при изгибе, МПа	Межволоконные силы связи, МПа
43,0	3,40	6,34	8,42	154	0,65	120	2630	0,63
43,4	4,60	6,55	10,00	154	0,61	154	2800	0,64
46,4	6,40	7,25	11,60	154	0,58	188	2940	0,73
49,6	9,25	8,58	13,80	154	0,53	223	2590	0,67

мые вид эпюры нормальных напряжений и уравнения для расчетов представлены в табл. 3.

Предельное состояние в данном случае может возникать не только в результате достижения предела упругости при сжатии, но и при потере устойчивости отдельных волокон, т. е. возникновении бокового перемещения. Величина критической силы, вызывающей потерю устойчивости, зависит от жесткости волокна, его длины и способа закрепления в структуре материала. Жесткость отдельного волокна зависит от многих факторов — природы, анатомического строения, способа получения технической целлюлозы, химического состава, механического воздействия, длины и др. Наглядное представление об изменениях волокна в процессе размола дает рис. 11.

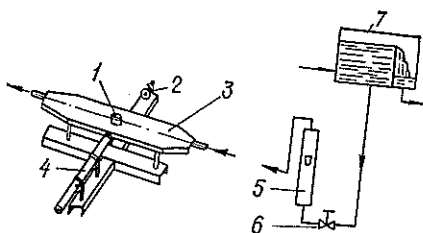


Рис. 12. Прибор для определения жесткости при изгибе индивидуального волокна: 1 — держатель волокна; 2 — окуляр; 3 — водная камера; 4 — источник света; 5 — расходомер; 6 — вентиль; 7 — резервуар с водой

Определить жесткость отдельного волокна достаточно сложно. В лабораторной практике нашел применение метод Самуэльсона [55], сущность которого заключается в следующем: волокно фиксируется консольно в стенке канала, по которому течет вода в ламинарном режиме (рис. 12). Изгиб волокна, вызванный протекающей водой, наблюдается через монокулярную лупу. Нагрузка на волокно может изменяться в зависимости от скорости воды в канале. Жесткость при изгибе волокна  $EI_b$ ,  $\text{Н} \cdot \text{м}^2$ , определяется по уравнению

$$EI_b = (11/80)[\mu k / (1 - 0,63b/a)] \times \\ \times (Q/4ab)(1/y)(l^3/b)(1 - 13l/33b), \quad (33)$$

где  $\mu$  — абсолютная вязкость воды,  $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ ;  
 $k$  — коэффициент,  $k = 20$ ;  
 $a, b$  — половины сторон прямоугольного канала,  $a = 0,03$  м;  
 $b = 0,02$  м;  
 $Q$  — скорость потока в канале, определяемая расходом воды,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $y$  — деформация волокна, м;  
 $l$  — испытываемая длина волокна, м.

Жесткость может быть рассчитана, если известна деформация  $y$ , соответствующая скорость потока  $Q$  и испытываемая длина волокна  $l$ .

В работе [16] показано влияние жесткости при изгибе исходных волокон на жесткость бумаги при изгибе. Данные эксперимента представлены в табл. 4. Образцы изготавливали из сульфатной небеленой целлюлозы массой  $100 \text{ г}/\text{м}^2$ . Из анализа данных табл. 4 следует, что с повышением содержания в волокне лигнина возрастает его жесткость, причем сушка волокна при достаточно высокой температуре ( $110^\circ\text{C}$ ) значительно увеличивает эту характеристику. Жесткость бумаги при изгибе линейно возрастает с увеличением жесткости исходных волокон.

В работе [32] для расчета жесткости при изгибе отдельных слоев картона хром-эрзац (в этом материале свойства отдельных слоев и

их толщина изменяются в широких пределах) предложено использовать зависимости теории многослойных композитов.

Эксперименты с лабораторными и промышленными образцами многослойного картона показали, что жесткость картона при изгибе  $S$  удовлетворительно описывается известным уравнением С. П. Тимошенко.

$$S = D - B^2/A. \quad (34)$$

Здесь  $A, B, D$  — матрицы жесткости, вычисляемые с помощью уравнений

$$A = \sum_{k=1}^N E_k (Z_k - Z_{k-1}); \quad (35)$$

$$B = 1/2 \sum_{k=1}^N E_k (Z_k^2 - Z_{k-1}^2); \quad (36)$$

$$D = 1/3 \sum_{k=1}^N E_k (Z_k^3 - Z_{k-1}^3), \quad (37)$$

где  $E_k$  — модуль упругости  $k$ -го слоя;  
 $Z_k$  — координаты слоев (рис. 13),

$$Z_0 = -\delta/2 \quad (k=0); \quad (38)$$

$$Z_k = Z_{k-1} + \delta_k \quad (k=1, 2, \dots, N), \quad (39)$$

$\sigma$  — толщина картона;  
 $\sigma_k$  — толщина  $k$ -го слоя.

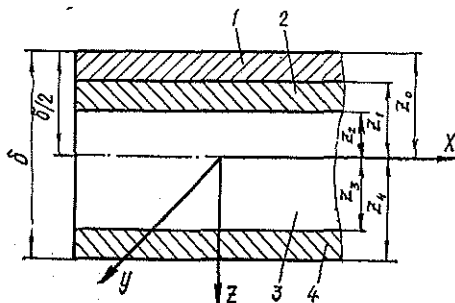
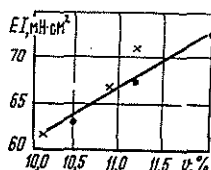


Рис. 13. Расположение слоев в четырехслойном картоне хром-эрзац: 1 — поверхностный; 2 — подкладочный; 3 — средний; 4 — нижний

При определении жесткости при изгибе, равно как и других характеристик механических свойств, необходимо учитывать взаимосвязь средних значений показателей с неоднородностью структуры материала. В работе [22] показано, что с увеличением среднего значения жесткости при изгибе у образцов сульфатной небеленой целлюлозы коэффициент вариации этой характеристики возрастает (рис. 14). Это указывает на важность статистической обработки экспериментальных данных.

Рис. 14. Связь жесткости при изгибе с коэффициентом вариации  $v$  для образцов целлюлозы, полученной непрерывным способом варки (·) и периодическим (x)



Резюмируя вышеизложенное, отметим, что для практических целей наибольший интерес представляют методы определения жесткости при изгибе, которые в данном обзоре отнесены ко второй группе, так как методы, отнесенные к первой группе, дают завышенные результаты, не учитывающие поведение материала при сжатии в плоскости листа, а методы третьей и четвертой групп характеризуются большей специфичностью. Предлагаемый способ измерения жесткости при изгибе бумаги и картона по методу консольно закрепленной в вертикальном положении балки предельно прост и универсален (прибор ЖБИ-1) [29]. Он дает воспроизводимые результаты, учитывая неоднородность испытываемых материалов. Показанный в [17] способ расчета слоя материала, в котором возникает предельное состояние, может быть полезен при оценке характера процессов производства, решении задачи улучшения свойств материала проведением поверхностной проклейки и др.

Таблица 5

Образец	СП, °ШР	$EI$ , мН · см <sup>2</sup>	$E_{изг}$ , МПа	$\delta$ , см	$F_{св}$ , МПа	
Полумасса: льняная	25	116	20,8	0,0164	0,75	
	35	110	23,8	0,0155	1,14	
	45	104	30,2	0,0140	1,49	
	60	98	35,7	0,0130	1,61	
	75	92	38,0	0,0125	1,75	
хлопковая	15	95	29,6	0,0137	0,99	
	25	85	29,6	0,0132	1,21	
	35	85	32,8	0,0128	1,38	
	45	87	35,8	0,0125	1,58	
	60	87	38,7	0,0122	1,70	
Сульфитная целлюлоза: небеленая	14	109	16,9	0,0174	0,20	
	25	106	26,6	0,0147	1,38	
	35	101	28,9	0,0141	1,50	
	45	93	28,6	0,0137	1,57	
	60	97	32,3	0,0134	2,02	
	75	74	27,0	0,0129	2,24	
	беленая	14	100	17,0	0,0167	0,22
		25	103	24,0	0,0150	1,38
		35	98	28,0	0,0141	1,48
		45	100	32,0	0,0136	1,75
60		100	30,8	0,0137	1,79	
25	76	27,0	0,0132	2,11		
Сульфатная целлюлоза: небеленая	15	119	10,9	0,0206	0,57	
	25	99	26,5	0,0144	1,75	
	35	84	21,7	0,0146	1,73	
	45	80	20,4	0,0142	2,02	
	60	86	25,6	0,0140	2,14	
	75	86	25,6	0,0140	2,47	
	беленая	15	103	8,2	0,0216	0,21
		25	103	18,0	0,0166	1,40
		35	90	21,8	0,0149	1,42
		45	105	24,0	0,0152	1,61
60		98	27,0	0,0143	1,78	
75	85	28,1	0,0133	2,30		
Сульфатная беленая ли- ственная целлюлоза	13	162	30,4	0,0162	0,48	
	25	156	56,5	0,0133	1,18	
	35	150	60,0	0,0126	1,88	
	45	148	65,9	0,0122	2,18	
	60	140	65,0	0,0120	2,30	
	75	133	73,9	0,0113	2,40	

Вопрос о влиянии различных технологических факторов на жесткость бумаги при изгибе освещен в литературе недостаточно. В доступной автору литературе удалось обнаружить только один обзор по данному вопросу [10], причем жесткость при изгибе определялась по методу Кларка. В качестве факторов, оказывающих влияние на жесткость при изгибе, рассмотрены природа волокнистого материала и способы получения полуфабрикатов; качество сырья; процессы производства целлюлозы; фракционный состав по длине волокна; размол; мокрое прессование; сушка; влияние химических добавок; процессы производства на КДМ.

Вид волокнистого материала и степень помола. Результаты изучения влияния вида волокнистого материала и степени помола (СП) на жесткость бумаги при изгибе представлены в табл. 5 [28]. С повышением степени помола бумажной массы до 75 °ШР при постоянной массе образцов (100 г/м<sup>2</sup>) уменьшается жесткость при изгибе, что объясняется понижением величины момента инерции поперечного сечения образца вследствие уменьшения его толщины, вызванной повышенной усадкой материала.

Большей жесткостью при изгибе обладают образцы из сульфатной лиственной беленой целлюлозы, которые обнаружили высокие значения модуля при изгибе.

Проблема расширения сырьевой базы целлюлозно-бумажного производства за счет более полного использования различного вида древесных отходов с каждым годом становится более актуальной. Опилки, являясь многотоннажными отходами лесопиления, могут быть применены для производства сульфатной целлюлозы.

Показатели физико-механических свойств сульфатной небеленой целлюлозы из различных видов сырья представлены в табл. 6 [26]. Целлюлоза, полученная из опилок, имела примерно в 2 раза меньшую сред-

Таблица 6

Образец целлюлозы	$l_{\text{ср}}$ , мм	СП, °ШР	$EI$ , мН · см <sup>2</sup>	$E_{\text{изг}}$ , МПа	$\delta$ , см	$F_{\text{св}}$ , МПа
Из опилок древесины: сосны	1,07	18	168	1340	0,0216	0,58
		21	183	3122	0,0167	1,32
		30	149	3742	0,0147	1,46
		60	106	3621	0,0133	1,67
кедра	1,20	17	100	853	0,0211	0,58
		22	125	3639	0,0140	1,46
		30	115	3588	0,0137	2,08
		61	94	3406	0,0130	1,56
лиственницы	1,06	15	159	1049	0,0230	0,28
		21	165	3217	0,0160	1,07
		32	110	2953	0,0144	1,46
		61	94	3406	0,0130	1,56
Из смеси опилок древесных сосны, кедра, лиственницы	1,03	17	161	872	0,0245	0,39
		21	149	3255	0,0154	1,24
		31	128	3055	0,0150	1,61
		60	96	3747	0,0127	2,06
Из смеси щепы древесных сосны, кедра, лиственницы	2,49	17	184	1753	0,0203	0,46
		22	133	3371	0,0147	1,35
		31	136	3849	0,0141	1,47
		58	114	4049	0,0131	1,36
Лиственная небеленая	0,89	19	212	2573	0,0187	0,32
		21	172	3363	0,0160	0,69
		30	135	4977	0,0129	1,48
		63	88	3930	0,0121	1,70

ную длину волокна по сравнению с целлюлозой из щепы и повышенную способность к размолу. Величина межволоконных сил связи у образцов с невысокой степенью помола целлюлозы из опилок значительно выше, чем из лиственной целлюлозы, и практически равна (кроме целлюлозы из опилок лиственницы) величине межволоконных сил связи у образцов целлюлозы из щепы. При размоле целлюлозы до 30 °ШР и выше величина межволоконных сил связи у целлюлозы, полученной из опилок, в ряде случаев, больше, чем у целлюлозы из щепы или лиственной целлюлозы, что свидетельствует о более высокой степени разработки волокон целлюлозы из опилок в процессе размола. Деформационные свойства целлюлозы из опилок ниже, чем из щепы, но сравнимы с показателями лиственной целлюлозы.

При производстве бумаги в композиции по волокну часто в различных соотношениях используют смеси лиственной и хвойной беленой целлюлозы. Влияние этих соотношений на величину жесткости при изгибе представлено на рис. 15. Каждый компонент композиции размалывали отдельно до 25 °ШР, масса 1 м<sup>2</sup> образца составляла 100 г.

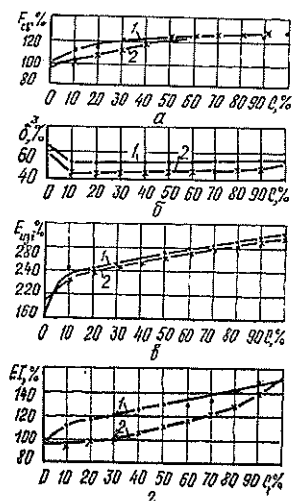


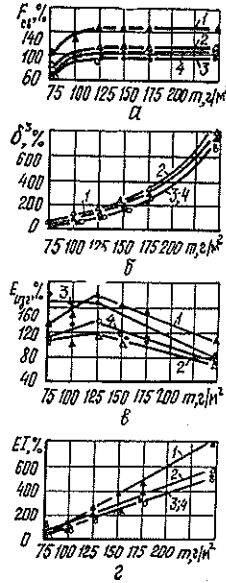
Рис. 15. Влияние композиции по волокну на физико-механические свойства бумаги: а —  $F$ ; б —  $\delta^3$ ; в —  $E_{изг}$ ; г —  $EI$  (те же обозначения на рис. 16—19); 1 — сульфатная хвойная беленая целлюлоза + сульфатная лиственная беленая целлюлоза; 2 — сульфитная хвойная беленая целлюлоза + сульфатная лиственная беленая целлюлоза

Увеличение доли лиственной целлюлозы  $C$  в образце приводит к возрастанию жесткости бумаги при изгибе. Короткие волокна лиственной целлюлозы способствуют получению более однородной бумаги с равномерной структурой, что ведет к значительному возрастанию модуля упругости. Именно этот показатель в данном случае решающим образом влияет на величину жесткости бумаги при изгибе.

Масса 1 м<sup>2</sup> материала. Влияние этого фактора на жесткость при изгибе показано на рис. 16. В этом случае волокнистые материалы размалывали до 25 °ШР, а бумагу изготавливали с массой от 75 до 240 г/м<sup>2</sup>. Как и следовало ожидать, с увеличением массы 1 м<sup>2</sup> жесткость бумаги при изгибе возрастает [40]. В данном случае это обуславливается значительным увеличением толщины бумаги, а значит и возрастанием момента инерции поперечного сечения. Снижение величины модуля упругости у образцов с массой от 150 до 240 г/м<sup>2</sup> объясняется изменяющимися условиями формования листа на сетке. Увеличение концентрации массы в напорном устройстве вызывает флокуляцию волокон, что приводит к неравномерному распределению отдельных фракций с различной длиной волокна по площади и толщине листа бумаги. Это влияет на величину модуля упругости при изгибе.

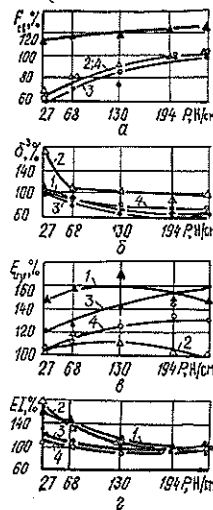


Рис. 16. Влияние массы  $1 \text{ м}^2$  бумаги  $m$  на ее физико-механические свойства: 1 — сульфатная небеленая целлюлоза; 2 — сульфатная беленая; 3 — сульфитная небеленая; 4 — сульфитная беленая



Мокрое прессование. Влияние линейного давления  $P$  на жесткость бумаги при изгибе показано на рис. 17. Увеличение линейного давления при мокром прессовании в исследованном интервале незначительно уменьшает жесткость при изгибе бумаги, изготовленной из сульфитной беленой и небеленой целлюлозы, в то время как жесткость при изгибе бумаги из сульфатной целлюлозы снижается значительно. В этом случае обращает на себя внимание характер изменения модуля упругости. Если у образцов бумаги из сульфитных видов целлюлозы он непрерывно возрастает с увеличением линейного давления, то у образцов из сульфатной целлюлозы величина модуля упругости имеет максимум, после которого она уменьшается. Можно предположить, что природа волокна оказывает влияние на структуру листа, а следовательно и на величину модуля упругости.

Рис. 17. Влияние мокрого прессования на физико-механические свойства бумаги: 1 — сульфатная небеленая целлюлоза; 2 — сульфатная беленая; 3 — сульфитная небеленая; 4 — сульфитная беленая



Параметры бумаги, изготовленной из сульфатной беленой целлюлозы, размолотой до 25 °ШР, приняты за 100 % (см. рис. 14—16) имеют следующие значения:  $EI = 101 \text{ мН} \cdot \text{см}^2$ ;  $E_{\text{изг}} = 1763 \text{ МПа}$ ;  $\delta^3 = 4,56 \cdot 10^6 \text{ см}^3$ ;  $F_{\text{св}} = 1,38 \text{ МПа}$ .

Жесткость исходных волокон. При работе образца на изгиб подвергаются деформации изгиба и отдельные волокна, образующие лист бумаги. Однако, говоря о взаимосвязи деформационных свойств бумаги и исходных волокон, следует иметь ввиду существующее различие в свободной длине (не связанной поперечными связями) отдельных волокон и волокон, связанных между собой на сопряженных поверхностях в структуре бумажного листа. Известно, что в бумажном листе, изготовленном из неразмолотой целлюлозы, 20...33 % длины волокна свободны, в то время как в бумажном листе, изготовленном из хорошо размолотой целлюлозы, свободная длина волокна составляет 5 % от всей длины. Таким образом, взаимное закрепление волокон имеет принципиальное значение. Оно приводит к появлению нового качества — волокна перестают быть индивидуальными, образуют единую систему.

Число факторов, влияющих на жесткость при изгибе отдельного волокна, весьма велико. Можно отметить следующие: толщина клеточной стенки; структура и состав; форма и площадь поперечного сечения; деформации волокон (изгибы, сплющивания и т. д.); влажность волокон. На жесткость отдельного волокна влияют не только морфологические особенности волокна и его химический состав (особенно содержание лигнина), но и технологические факторы изготовления бумаги, такие, как размол и сушка. Влияние вида волокна, химического состава и процесса размола показано выше. Здесь отметим, что при размоле изменяется геометрия поперечного сечения волокна, что ведет, как правило, к уменьшению момента инерции. Любое повреждение стенки волокна снижает модуль упругости. Однако, при проведении эксперимента чрезвычайно трудно количественно проследить взаимосвязь между жесткостью отдельного волокна и жесткостью материала.

Качественную оценку связи этих характеристик позволяет дать эксперимент по влиянию температуры сушки на физико-механические свойства материала. Известно, что под воздействием повышенной температуры растительные волокна становятся более жесткими, как вследствие их ороговения, так и из-за снижения относительного содержания пластифицирующей волокна влаги. В табл. 7 представлены результаты эксперимента по исследованию влияния температуры поверхности цилиндра при сушке бумаги на ее физико-механические свойства [18]. Как видно из табл. 7 (где  $S$  — сухость бумаги после сушки), с увеличением температуры сушки  $t$ , уже начиная с 94 °С, жесткость бумаги при изгибе возрастает, что обусловлено увеличением как момента инерции, так и модуля упругости бумаги. Величина межволоконных сил

Таблица 7

Целлюлоза	$t$ , °С	$S$ , %	$\delta$ , см	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$EI$ , мН·см <sup>2</sup>	$E_{\text{изг}}$ , МПа	$F_{\text{св}}$ , МПа
Сульфатная небеленая	80	87,0	0,0137	0,73	88,4	2750	1,385
	94	93,5	0,0138	0,73	90,3	2770	1,385
	110	98,0	0,0144	0,70	97,2	2500	1,719
	130	99,0	0,0146	0,69	126,8	3250	1,650
Сульфитная беленая	80	87,0	0,0130	0,77	80,5	2996	0,825
	94	93,5	0,0130	0,77	77,5	2860	0,864
	110	98,0	0,0134	0,75	100,0	3340	1,345
	130	99,0	0,0135	0,74	119,0	3850	1,080

связи у образцов бумаги, подвергавшихся воздействию повышенной температуры при сушке, снижалась, в то время как модуль упругости повышался. Это можно объяснить только возрастанием модуля упругости отдельного волокна.

Авторами работы [11] изучено влияние процесса ускоренного термического старения ( $t = 120^\circ\text{C}$ ) на жесткость бумаги при изгибе (степень помола  $60^\circ\text{ШР}$  и масса  $100\text{ г/м}^2$ ). Результаты исследования представлены в табл. 8, из которой видно, что при возрастании продолжительности воздействия повышенной температуры на бумагу, наряду с процессами старения, наблюдается увеличение жесткости при изгибе материалов, изготовленных из различных волокнистых полуфабрикатов.

Таблица 8

Беленая целлюлоза	Продолжительность старения, сут	$EI$ , $\text{мН} \cdot \text{см}^2$	$E_{\text{изг}}$ , МПа
Хлопковая	0,00	36,4	491
	0,75	38,2	510
	1,50	40,0	540
	3,00	43,0	570
	4,50	44,0	580
	6,00	46,0	608
Сульфатная: из сосны	0,00	51,0	2020
	0,75	53,0	2160
	1,50	57,0	2285
	3,00	58,0	2302
	4,50	67,7	2720
	6,00	83,4	2935
из березы	0,00	47,1	1885
	0,75	50,0	1982
	1,50	51,0	2035
	3,00	54,0	2160
	4,50	56,0	2390
	6,00	64,7	2590

На жесткость бумаги при изгибе оказывают влияние степень ориентации волокон в бумажном листе и разносторонность бумажного листа [27]. Образцы бумаги для испытаний изготавливали на лабораторной бумагоделательной машине и аппарате ЛОА-2 из целлюлозы, размолотой до  $25^\circ\text{ШР}$ . Масса образцов постоянна и составляла  $100\text{ г/м}^2$ . Степень ориентации волокон определяли отношением разрывной длины образца, измеренной в машинном и поперечном направлениях. Результаты исследования приведены в табл. 9.

Увеличение ориентации волокон в продольном направлении бумаги приводит к значительному возрастанию ее жесткости при изгибе в этом же направлении. При деформировании образцов на лицевую сторону листа бумаги наблюдалась во всех случаях большая величина жесткости при изгибе по сравнению с деформированием на сеточную сторону. Известно, что волокнистый материал при сжатии вдоль волокон оказывается более слабым, чем при растяжении. Под сжимающей нагрузкой одно или несколько волокон теряют устойчивость, образуются складка, а все остальные волокна следуют за ней. Отсюда возрастание числа волокон, работающих на сжатие, уменьшение пористости (в случае лицевой стороны листа) приводят к увеличению прочности при сжатии и, как результат, повышению жесткости при изгибе.

Таблица 9

Целлюлоза	Образец	Степень ориентации волокон	$\delta$ , см	$EI$ , мН·см <sup>2</sup>		$E_{изг}$ , МПа	
				при деформации на сторону			
				сеточную	лицевую	сеточную	лицевую
Сульфатная небеленая	Отливка с листоотливного аппарата	1,00	0,0141	98,1	108,0	2790	3060
	Бумага машинного изготовления	1,67	0,0143	117,9	157,0	3200	4270
			0,0143	106,0	127,5	2890	3475
	То же	2,82	0,0143	175,0	192,0	4760	5240
0,0143			66,6	82,5	1830	2240	
Сульфитная беленая	Отливка с листоотливного аппарата	1,00	0,0139	74,6	98,1	2210	2905
	Бумага машинного изготовления	2,24	0,0141	127,5	161,0	3670	4560
			0,0141	114,0	149,0	3230	4240
	То же	3,00	0,0141	143,0	165,0	4060	4690
			0,0141	60,0	89,3	1700	2530

Примечание. В числителе представлены данные для продольного направления испытания образцов; в знаменателе — поперечного.

Различные по длине фракции целлюлозных полуфабрикатов, имеющие различные когезионную способность и жесткость отдельного волокна, в различной степени определяют жесткость бумаги (табл. 10).

Таблица 10

Образец	$l_{ср}$ , мм	СП, ЧШР	$\frac{EI}{\delta}$ , мН·см <sup>2</sup>	$E_{изг}$ , МПа	$\delta$ , см	$F_{св}$ , МПа	
Сульфатная небеленая целлюлоза: нефракционированная	1,90	13	94	1840	0,0160	0,38	
	1,20	25	71	4292	0,0110	1,59	
	0,56	35	60	3617	0,0110	1,39	
	0,51	45	68	4081	0,0110	1,61	
	фракция 1	2,20	12	90	1465	0,0170	0,41
		1,60	25	77	4628	0,0110	1,10
		0,51	35	59	4720	0,0110	1,30
	фракция 2	0,44	45	68	5440	0,0110	1,30
		1,72	14	73	1187	0,0170	0,16
		1,71	25	76	4552	0,0110	1,21
	фракция 3	0,49	35	63	3811	0,0113	1,46
		0,39	45	65	3895	0,0110	1,48
		1,20	16	66	1067	0,0170	0,18
1,01		25	60	2787	0,0120	1,27	
Дефибрерная древесная масса: нефракционированная (100 %)	0,38	35	64	3865	0,0110	1,47	
	0,25	45	68	5456	0,0100	1,56	
	—	—	161	1490	0,1205	0,60	
	фракция 1 (18,4 %)	—	—	269	667	0,0318	0,13
	фракция 2 (10,3 %)	—	—	215	834	0,0274	0,15
	фракция 3 (9,5 %)	—	—	236	1000	0,0267	0,36
	фракция 4 (7,1 %)	—	—	140	1050	0,0220	0,39

Примечание. В скобках приведено относительное содержание фракций.

У дефибрерной древесной массы наибольшей жесткостью при изгибе обладают образцы, изготовленные из грубодисперсной фракции 1. Эти образцы характеризуются значительным моментом инерции поперечного сечения, который в данном случае обуславливает большую жесткость при изгибе. В случае сульфатной небеленой целлюлозы закономерности формирования жесткости при изгибе другие. Она определяется величиной модуля упругости при изгибе. Причем наиболее длиноволокнистая фракция 1 имеет более высокие значения модуля упругости при изгибе образцов, изготовленных как из неразмолотого, так и размолотого волокна. В работах [37] высказывается предположение, что в процессе размола жесткие целлюлозные волокна (фракция 1, как правило, содержит более жесткие волокна) преимущественно фибриллируются. Этим, очевидно, можно объяснить повышенные значения модуля упругости при изгибе фракции 1 волокна сульфатной небеленой целлюлозы.

В работах [12, 30], показано, что у образцов термомеханической массы (ТММ) наблюдаются те же закономерности влияния длины волокна на жесткость при изгибе, что и у дефибрерной механической массы (ДДМ). Единственное отличие заключается в том, что у образцов ДДМ жесткость при изгибе выше.

Авторы работы [32] исследовали жесткость при изгибе картона с высоким содержанием в композиции макулатуры. Установлено, что при изготовлении многослойного картона с повышением степени помола волокна относительное уменьшение момента инерции поперечного сечения выше, чем возрастание модуля упругости, что приводит к снижению жесткости при изгибе. Наибольшую величину имели те виды макулатуры, в композиции которых древесная масса и наполнитель отсутствуют вообще или их содержание минимально. Показано, что максимальное значение жесткости картона может быть достигнуто, если слои с высоким модулем упругости расположены снаружи, а слои с большим моментом инерции поперечного сечения — внутри полотна картона. При постоянной массе  $1 \text{ м}^2$  картона существует оптимальное соотношение массы наружных и внутренних слоев, при котором величина жесткости достигает максимального значения. Соотношение масс слоев регламентируется разностью плотностей наружных и внутреннего слоев.

Химические добавки. При выработке видов бумаги, для которых важна определенная жесткость при изгибе, в ее композицию

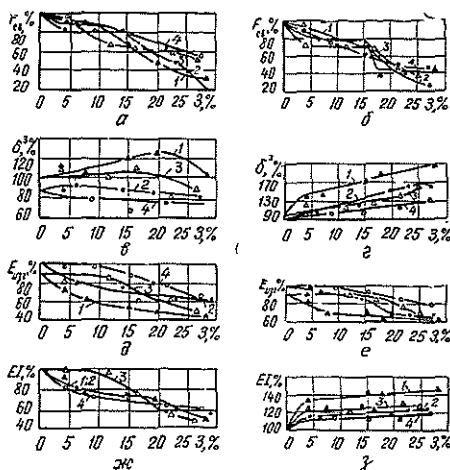


Рис. 18. Влияние наполнителей на физико-механические свойства бумаги из сульфатной (1, 3) и сульфитной (2, 4) беленой целлюлозы с постоянной (а, в, д, ж) и переменной (б, г, е, з) массой  $1 \text{ м}^2$ : а, б —  $E$ ; в, г —  $\delta^3$ ; д, е —  $E_{\text{изг}}$ ; ж, з —  $EI$ ; 1, 2 — наполнитель гипс; 3, 4 — каолин (3 — зольность)

часто вводят различные добавки. В работе [18] была предпринята попытка количественно оценить характер воздействия некоторых вспомогательных веществ на жесткость бумаги при изгибе. В опытах использовали сульфитную и сульфатную беленые виды целлюлозы, которые размалывали до 25 °ШР. При выполнении графиков, отражающих результаты исследования, по оси ординат в процентах отложены характеристики исследуемых образцов. За 100 % приняты значения параметров бумаги с массой 100 г/м<sup>2</sup>, изготовленной из сульфатной беленой целлюлозы без добавок (рис. 17, 18, 20):  $EI = 98,1 \text{ мН} \cdot \text{см}^2$ ;  $E = 3240 \text{ МПа}$ ;  $\delta^3 = 2,74 \cdot 10^6 \text{ см}^3$ ;  $F_{\text{св}} = 1,37 \text{ МПа}$ .

Результаты исследования влияния наполнителей на жесткость бумаги при изгибе представлены на рис. 18. В качестве наполнителей применяли каолин (наиболее распространенная добавка) и гипс, о котором в литературе имеются сведения, что он придает бумаге повышенную жесткость (не указано какую). Известно, что введение наполнителя влияет на физико-механические свойства листа бумаги. При этом они зависят как от свойств наполнителя, так и уменьшения количества волокнистого материала на 1 м<sup>2</sup> бумаги, если ее масса остается постоянной. Чтобы учесть влияние этих факторов, изготавливали отливки двух видов:

с постоянной массой 1 м<sup>2</sup> (100 г), т. е. введение наполнителя (увеличение зольности) сопровождалось соответствующим уменьшением количества волокнистого материала;

с переменной массой 1 м<sup>2</sup>, т. е. количество волокнистого материала оставалось постоянным, а увеличивалась масса 1 м<sup>2</sup> бумаги.

С повышением зольности модуль упругости, как и межволоконные силы связи, уменьшались у всех испытанных образцов бумаги. Толщина, а следовательно, и момент инерции поперечного сечения у образцов с постоянной массой 1 м<sup>2</sup> изменялись мало, в то время как у образцов с переменной массой 1 м<sup>2</sup> эти параметры значительно увеличивались. Это и обусловило характер изменения жесткости бумаги при изгибе с увеличением зольности. У образцов бумаги с постоянной массой 1 м<sup>2</sup> возрастание зольности вызвало снижение жесткости при изгибе, а с переменной массой — увеличение. Отметим, что гипс, как более грубодисперсный наполнитель, вызывает большее снижение модуля упругости бумаги и жесткости при изгибе в случае постоянной массы 1 м<sup>2</sup>. В случае переменной массы гипс с увеличением зольности образцов способствует значительному возрастанию их толщины, а в результате — жесткости при изгибе. Фракционный состав использованных наполнителей представлен в табл. 11.

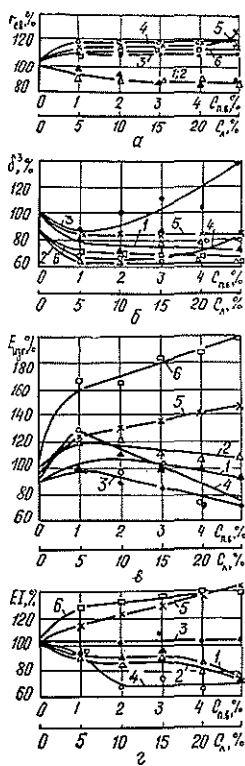
Результаты исследования влияния проклеивающих веществ на жесткость бумаги при изгибе представлены на рис. 19. Для проклейки использовали наиболее широко применяемые вещества — белый канифольный клей, крахмал и хлоропреновый латекс Л-7.

С увеличением концентрации белого канифольного клея в бумаге жесткость ее при изгибе уменьшается, при этом несколько снижается момент инерции поперечного сечения образцов. Величина модуля упругости имеет максимум при массовой доле клея в бумажной массе

Таблица 11

Наполнитель	Фракционный состав наполнителей, %, при диаметре частиц, мкм				
	> 20	10...20	5...10	1...5	<1
Каолин	2,0	8,2	10,8	27,4	51,4
Гипс	4,0	18,3	24,0	34,7	19,0

Рис. 19. Влияние проклеивающих веществ на физико-механические свойства бумаги из сульфатной (1, 3, 5) и сульфитной (2, 4, 6) блененой целлюлозы; 1, 2 — белый канифольный клей; 3, 4 — латекс Л-7; 5, 6 — картофельный крахмал ( $C_{п.в}$  — массовая доля проклеивающего вещества в бумажной массе;  $C_{л}$  — доля латекса)



1...2 %, несмотря на то, что межволоконные силы связи с ростом концентрации клея постоянно уменьшаются. Очевидно, это можно объяснить структурными изменениями, связанными с наличием проклеивающего вещества в макро- и микропорах бумаги.

Введение крахмального клейстера способствует увеличению жесткости бумаги при изгибе, что обусловлено значительным возрастанием модуля упругости.

Влияние латекса, который по своей природе является эластомером, на жесткость бумаги при изгибе зависело от вида использованного волокнистого полуфабриката. Жесткость при изгибе бумаги, изготовленной из сульфатной блененой целлюлозы, практически не изменилась даже при введении 25 % латекса. У образцов бумаги из сульфитной блененой целлюлозы жесткость при изгибе снижалась при введении до 10 % латекса, а затем оставалась постоянной.

В работе [3] представлены результаты исследований, которые позволили уточнить и расширить представления об эффективности добавок сульфатного лигнина для упрочнения бумаги. Образцы изготавливали из сульфатной целлюлозы марки НС-2, размолотой до 28 ШР. Проклейка сульфатным лигнином сопровождалась ростом межволоконных сил связи в бумаге и образованием более плотной структуры бумажного листа. Введение 2 % лигнина обеспечило в данном случае максимальную жесткость при изгибе, определяемую в большей степени величиной модуля упругости при изгибе (рис. 20).

Авторы работы [44] исследовали влияние соединений алюминия на физико-механические свойства бумаги, в том числе и на жесткость при изгибе. Было показано, что введение 5 % алюмината натрия при контактно-конвективной сушке ( $t = 200^\circ\text{C}$ ) в течение 1 мин повышает жесткость при изгибе на 29 %, а в течение 10 мин — на 46 %.

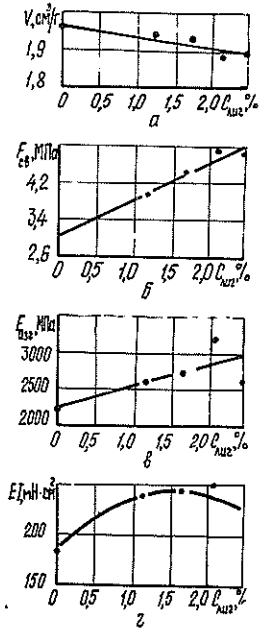


Рис. 20. Влияние сульфатного лигнина на физико-механические свойства бумаги: а — пухлость  $V$ ; б —  $F_{св}$ ; в —  $E_{изг}$ ; г —  $EI$  ( $C_{лг}$  — массовая доля лигнина)

Для получения некоторых видов бумаги, обладающих пониженной жесткостью, часто применяют пластификаторы. В качестве пластификаторов бумаги обычно используют водные растворы глицерина, сорбита, гликолей и др. Глицерин часто применяют для изготовления упаковочных видов бумаги. На рис. 21 приведены результаты эксперимента по установлению влияния глицерина на жесткость бумаги при изгибе. Пластификаторы уже давно используются в бумажной промышленности, но точный механизм их воздействия на бумагу еще неясен. Однако очевидно, что пластификация является результатом распределения вводимого вещества по границам раздела элементов надмолекулярной структуры. Повышение содержания пластификатора приводит

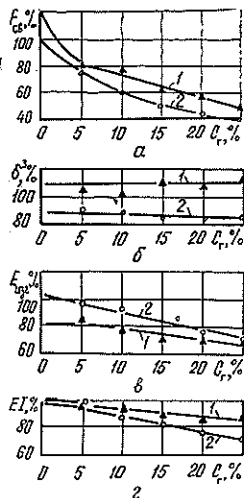


Рис. 21. Влияние пластификатора на физико-механические свойства бумаги из сульфатной небеленой (1) и беленой (2) целлюлозы: а —  $F$ ; б —  $\delta^3$ ; в —  $E_{изг}$ ; г —  $EI$  ( $C_{г}$  — массовая доля глицерина)



к разделению фаз. Такая неоднородность системы должна способствовать понижению механических свойств материала.

С введением пластификатора снижается жесткость бумаги при изгибе, при этом уменьшаются модуль упругости и межволоконные силы связи. Момент инерции поперечного сечения образцов практически остается постоянным.

В работе [39] приведены сведения о влиянии различных видов смол, применяемых для придания бумаге влагопрочности, на жесткость бумаги при изгибе (табл. 12). В ходе испытаний изготавливали образцы бумаги с массой 75 г/м<sup>2</sup> и степенью помола 35 ± 2 °ШР. Из данных табл. 12 видно, что наибольшее увеличение жесткости наблюдалось у образцов сульфатной небеленой целлюлозы.

Всякое изменение влажности бумаги, изготовленной из растительных волокон, сопровождается изменением ее размеров, что определенным образом должно влиять на жесткость при изгибе. В работе [51] рассмотрена зависимость жесткости картона от влажности. Жесткость при изгибе определяли при помощи динамического резонансного метода. Испытывали 14 видов коробочного картона французского производства, начиная с низкосортного серого макулатурного и кончая высококачественным мелованным. Эксперимент показал, что при изменении относительной влажности воздуха от 30 до 80 % влажность картона возрастает в 2 раза (от 6 до 12 %), толщина образцов повышается в среднем на 6 %, а жесткость уменьшается в среднем на 20 %, в том числе в машинном и поперечном направлениях соответственно на 15 и

Таблица 12

Мас- совая доля смо- лы, %	Жесткость бумаги при изгибе, мН · см <sup>2</sup> , при добавке смолы		
	мочевинформаль- дегидной		мела- мино- формаль- дегид- ной
	анион- ной	катион- ной	
0	41,7	41,7	41,7
	43,6	43,6	43,6
1	49,5	42,7	47,5
	46,6	50,5	59,2
2	50,5	39,8	52,4
	55,4	57,3	56,3
3	49,5	40,8	46,6
	58,2	52,5	72,9
4	56,3	46,6	43,6
	60,0	58,2	75,7
5	51,5	39,8	46,6
	67,0	66,0	74,9
6	53,4	40,8	54,4
	71,8	73,8	80,6
8	55,4	41,7	52,5
	77,6	63,1	76,7
10	57,2	47,6	51,5
	71,1	—	—

Таблица 13

СП, °ШР	t, °C	F <sub>св</sub> , МПа	δ, см	EI, мН × × см <sup>2</sup>	E изг., МПа
12	60	0,19	0,0154	93	2050
	70	0,26	0,0152	106	2416
	80	0,35	0,0150	105	2468
	90	0,29	0,0144	71	1922
25	60	1,52	0,0102	58	4335
	70	1,28	0,0108	62	3953
	80	1,57	0,0122	53	2348
	90	1,88	0,0110	59	5384
35	60	1,46	0,0089	36	4096
	70	1,38	0,0108	58	3667
	80	1,59	0,0127	55	2131
	90	1,54	0,0102	57	4238
60	60	1,24	0,0099	58	4849
	70	1,44	0,0092	60	6066
	80	1,57	0,0095	54	5103
	90	1,53	0,0087	46	5515

Примечание. В числителе приведены данные для сульфитной беленой целлюлозы; в знаменателе — для сульфатной.

24 %. Исследованию подвергали также образцы картона, которые предварительно кондиционировали при 80 % относительной влажности и температуре 20 °С. Затем их выдерживали при той же относительной влажности, начиная с большей. Авторы приходят к следующим выводам: при снижении влажности воздуха уменьшаются влажность и толщина картона и повышается его жесткость; при ее повышении увеличиваются толщина и влажность картона, но при этом снижается его жесткость. Резкое повышение влажности воздуха делает процесс изменений необратимым. При установлении первоначальной влажности физические свойства картона несколько изменятся, т. е. не будут идентичны начальным.

В работе [20] оценено влияние комплекса факторов изготовления образцов бумаги в лабораторных условиях, в том числе продолжительности взаимодействия целлюлозы с водой. Сульфатную небеленую целлюлозу концентрацией около 20 % хранили при температуре 20 °С в течение 240 ч. Пробы для изготовления образцов и испытаний отбирали через каждые 24 ч. Кривые, характеризующие изменение жесткости при изгибе, имеют положительный экстремум в области 120...192 ч взаимодействия, а их ход зависит от степени помола волокна.

Технологические процессы. Получение товарной сульфатной небеленой целлюлозы включает производственные процессы, при реализации которых сырье, а затем целлюлозная суспензия подвергаются активным физико-химическому, механическому и тепловому воздействиям [21, 23, 34]. В работе [34] показана зависимость характеристик деформативности и прочности целлюлозы от размеров (длина, толщина) щепы различных фракций. Если расположить характеристики физико-механических свойств целлюлозы в порядке возрастания воздействия на них характеристик качества щепы, то получим следующий ряд: сопротивление продавливанию; сопротивление раздиранию; жесткость при изгибе; начальный модуль упругости при испытании на растяжение; разрушающее усилие; разрушающее напряжение; разрывная длина. Отмечено, что вариация длины щепы оказывает большое воздействие на изменение жесткости при изгибе.

Известно, что охлаждение массы в нижней части варочного котла непрерывного действия, которое прекращает или сильно тормозит химические реакции перед дальнейшим механическим воздействием при выгрузке, позволяет сохранить физико-механические свойства целлюлозы. В табл. 13 представлены результаты эксперимента, при проведении которого температура массы, выгружаемой из аппарата «Камюр», составляла 90, 80, 70, 60 °С [23]. Наибольшая величина жесткости при изгибе для всех исследуемых степеней помола наблюдалась у образцов сульфатной небеленой целлюлозы из массы, выгруженной при температуре 70 °С. Отмечена следующая тенденция — величина межволоконных сил связи в образцах снижается с уменьшением температуры выгружаемой массы. Это является косвенным свидетельством увеличения прочности (очевидно и жесткости) отдельных волокон целлюлозы, которое можно объяснить меньшей деструкцией последних при выгрузке из варочного аппарата. Интеграция двух факторов — жесткости волокна и достаточной величины межволоконных сил связи, обуславливают в этом случае максимальную жесткость при изгибе.

В табл. 14 представлены экспериментальные данные изменения жесткости при изгибе образцов сульфатной небеленой целлюлозы в технологическом потоке ее производства [21]. Закономерность изменения жесткости при изгибе в этом случае определяется степенью помола волокна. Для образцов со степенью помола 60 °ШР закономерность изменения жесткости при изгибе была подтверждена и в более поздней работе [24]. Процессы промывки, сортирования и сушки оказывают

Таблица 14

Место отбора пробы	$l_{\text{ср}}$ , мм	СП, °ШР	$F_{\text{св}}$ , МПа	$\delta$ , см	$EI$ , МН·см <sup>2</sup>	$E_{\text{изг}}$ , МПа
После варки	2,51	15	0,95	0,0175	212	3165
		25	2,14	0,0131	98	3470
		35	2,36	0,0122	87	3841
		60	2,48	0,0119	110	5246
После промывки	2,74	15	0,76	0,0158	135	2732
		25	1,89	0,0115	99	5197
		35	2,24	0,0120	82	3810
		60	2,50	0,0122	138	6070
После сортирования	2,16	15	0,96	0,0161	174	3341
		25	2,08	0,0133	116	3908
		35	2,38	0,0140	97	2834
		60	2,52	0,0128	101	3834
После сушки	1,71	15	0,56	0,0192	169	1925
		25	2,00	0,0115	87	4586
		35	2,16	0,0135	126	4101
		60	2,33	0,0132	129	4483

Таблица 15

Материал	Образец	$EI$ , МН·см <sup>2</sup>	$E_{\text{изг}}$ , МПа
Полуфабрикат	Основного слоя	664	2450
	Двухслойный	1043	2700
Бумажная масса после РПО	Основного слоя	671	3000
	Двухслойный	1083	3750
Масса из напорного ящика КДМ	Основного слоя	646	3200
	Двухслойный	1037	3800
Картон: машинного направления поперечного	Двухслойный	1675	3250
	Двухслойный	565	1750

Таблица 16

Температура обработки отходов, °С	Процент отходов в композиции	Массовая доля, %	
		ТММ	ДММ
80	10	27...30/25...40	63...60/65...50
80	20	— /24...34	— /56...46
80	30	— /35	— /35
130	10	23...30/3...13	67...60/87...77
130	20	15...23/3...35	65...57/77...45
130	30	13...60/85...44	57...10/35...26

Примечание. В числителе приведены данные оптимизации по прочности, в знаменателе — по деформативности.

сильное влияние на относительное содержание фракции с различной длиной волокна и на состояние поверхности волокна, что и обуславливает величину жесткости при изгибе.

В работе [7] проанализировано влияние процессов производства в технологическом потоке картоноделательной машины на деформатив-

ность и прочность картона для гладких слоев гофрированного картона. В табл. 15 показано изменение жесткости при изгибе образцов, отобранных в технологическом потоке. Авторы делают вывод, что свойства покровного слоя, несмотря на относительно невысокую его массовую долю, во многом определяют деформативность картона.

В работе [31] показано, что при оптимизации свойств газетной бумаги по характеристикам прочности или деформативности (в том числе и жесткости при изгибе) композиция по волокну должна быть разной (табл. 16).

Результаты исследований влияния различных факторов на жесткость целлюлозно-бумажных материалов при изгибе можно обобщить следующим образом.

1. Изменение модуля упругости при изгибе и момента инерции поперечного сечения образца оказывают конкурирующее влияние на величину жесткости при изгибе.

2. Величина жесткости при изгибе определяется в большей степени модулем упругости образца при изгибе в случаях использования целлюлозы различного вида; увеличения зольности бумаги; проклейки связующими веществами; введения пластификатора; сушки; увеличения степени ориентации волокна и степени дисперсности фракций с различной длиной волокна у целлюлозы.

3. Момент инерции поперечного сечения образца оказывает решающее значение на жесткость при изгибе в случаях размола волокна; увеличения массы  $1 \text{ м}^2$ , давления мокрого прессования, зольности бумаги при постоянном содержании волокна в композиции; проклейки гидрофобными материалами; повышения жесткости отдельного волокна; увеличения степени дисперсности фракции с различной длиной волокна у механических масс.

4. Установлено, что технологические факторы по разному влияют на характеристики деформативности и прочности.

В заключение отметим, что нами в 1993 г. [15] был опубликован обзор по вопросам механических свойств целлюлозно-бумажных материалов, в котором главное внимание уделялось статическим характеристикам, определяющим свойства материала при приложении растягивающей нагрузки. На практике бумага часто испытывает и деформации изгиба. В данном случае нами была предпринята попытка изложить в обобщенном виде сведения об используемых в настоящее время методах определения жесткости при изгибе технической целлюлозы, бумаги и картона и влиянии основных технологических факторов на величину этой характеристики.

Использование бумаги сопровождается многими сложными явлениями, для понимания которых необходимы исследования динамических свойств материала (ползучести, релаксации напряжений, способности выдерживать ударные и повторяющиеся нагрузки и др.). Для их изучения и интерпретации настоящая работа может принести определенную пользу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Аким Э. Л. Обработка бумаги.— М.: Лесн. пром-сть, 1979.— 232 с. [2]. Бабурин С. В., Княряннов А. И. Реологические основы процессов целлюлозно-бумажного производства.— М.: Лесн. пром-сть, 1983.— 192 с. [3]. Влияние проклейки сульфатных лигнинов на физико-механические свойства бумаги / А. Ф. Троянская, А. А. Соколова, И. П. Барабанова, В. И. Комаров // Бум. пром-сть.— 1984.— № 11.— С. 18—19. [4]. ГОСТ 9582—75. Бумага и картон. Метод определения жесткости при статическом изгибе.— Введ. 01.01.77; Продлен до 01.01.97. [5]. ГОСТ 10711. Бумага и картон. Метод определения разрушающего усилия при сжатии кольца.— Введ. 01.01.74; Продлен до 01.01.2001. [6]. Грант Ю. Лабораторный справочник по производству целлюлозы и бумаги.— М.: Лесн. пром-сть, 1965.— 421 с. [7]. Гурьев А. В., Комаров В. И., Чижев Г. И. Формирование характеристик деформатив-

ности и прочности в технологическом потоке КДМ // Лесн. журн.—1994.—№ 1.—С. 86—91.—(Изв. высш. учеб. заведений). [8]. Ерыхов Б. П. Неразрушающие методы исследования целлюлозно-бумажных и древесных материалов.—М.: Лесн. пром-сть, 1977.—246 с. [9]. Жесткость бумаги. Часть 1. Субъективные оценки жесткости и определение жесткости по Кларку / М. Ода, Т. Кадоя, М. Усуда, М. Кимура // Ками па гикеси.—1979.—Т. 33, № 3.—С. 35—40. [10]. Жесткость бумаги. Часть 2. Влияние различных факторов на жесткость / М. Ода, Т. Кадоя, М. Усуда, М. Кимура // Ками па гикеси.—1979.—Т. 33, № 4.—С. 76—82. [11]. Иванов Г. А. Исследование изменений свойств бумаги в процессе ускоренного термического старения: Дис. ... канд. техн. наук.—Л.: ЛТА, 1973.—148 с. [12]. Изменение свойств древесных волокон в процессе производства термомеханической массы / Г. И. Чижев, Е. П. Елкина, С. С. Пузырев и др. // Лесн. журн.—1988.—№ 4.—С. 84—89.—(Изв. высш. учеб. заведений). [13]. ИСО 9001—87. Системы качества. Модель для обеспечения качества при проектировании и (или) разработке, производстве, монтаже и обслуживании.—М.: Изд-во стандартов, 1988.—С. 13—25. [14]. Казаровичкий Л. А. Бумага и краска в процессе печатания.—М.: Книга, 1965.—240 с. [15]. Комаров В. И. Анализ зависимости напряжение—деформация при испытании на растяжение целлюлозно-бумажных материалов // Лесн. журн.—1993.—№ 2—3.—С. 123—131.—(Изв. высш. учеб. заведений). [16]. Комаров В. И., Дьяков Н. А. Влияние жесткости при изгибе исходных волокон на жесткость бумаги при изгибе / Химическая переработка древесины: Науч. тр.—Л.: РИО ЛТА, 1972.—152.—С. 39—43. [17]. Комаров В. И. Деформативность целлюлозно-бумажных материалов при изгибе // Лесн. журн.—1994.—№ 1.—С. 96—103.—(Изв. высш. учеб. заведений). [18]. Комаров В. И. Исследование жесткости бумаги при изгибе: Дис. ... канд. техн. наук.—Л., ЛТА.—1972.—160 с. [19]. Комаров В. И. К вопросу измерения модуля упругости бумаги // Химическая переработка древесины: Науч. тр. № 152.—Л.: ЛТА, 1972.—С. 62... 66. [20]. Комаров В. И., Личутин Т. Ф. Лабораторная оценка физико-механических свойств сульфатной небеленой целлюлозы // Лесн. журн.—1985.—№ 6.—С. 85—90.—(Изв. высш. учеб. заведений). [21]. Комаров В. И., Личутин Т. Ф., Легкодох Н. Г. Изменение физико-механических свойств целлюлозы в производственных процессах ее получения // Хим. переработка древесины: Межвуз. сб. науч. тр.—Л.: РИО ЛТА, 1982.—С. 64—68. [22]. Комаров В. И., Личутин Т. Ф. Оценка качества сульфатной небеленой целлюлозы // Бум. пром-сть.—1984.—№ 8.—С. 11—12. [23]. Комаров В. И., Личутин Т. Ф., Пахтусова В. П. Влияние температуры целлюлозы, выгружаемой из аппарата «Камюр», на ее физико-механические свойства // Химическая переработка древесины: Межвуз. сб. науч. тр.—Л.: РИО ЛТА, 1982.—С. 61—64. [24]. Комаров В. И., Личутин Т. Ф. Формирование физико-механических свойств сульфатной небеленой целлюлозы в процессе производства // Бум. пром-сть.—1985.—№ 3.—С. 15—17. [25]. Комаров В. И. Опыты по уточнению методики работы на приборе ЖБИ-1 // Химия и технология бумаги: Межвуз. сб. науч. тр.—Л.: РИО ЛТИ ЦБП, 1975.—Выпуск 3.—С. 7—9. [26]. Комаров В. И., Прокшин Г. Ф. Бумагообразующие свойства сульфатной целлюлозы из опилок древесины // Прокшин Г. Ф. Основы теории варки целлюлозы: Конспект лекций.—Л.: РИО ЛТА, 1979.—С. 35—41. [27]. Комаров В. И., Фляте Д. М. Влияние степени ориентации волокон и разносторонности бумаги на ее жесткость при изгибе // Целлюлоза, бумага и картон.—1972.—№ 18.—С. 8—9. [28]. Комаров В. И., Фляте Д. М. Жесткость бумаги при изгибе // Бум. пром-сть.—1973.—№ 6.—С. 3—4. [29]. Комаров В. И., Фляте Д. М. Определение жесткости бумаги при изгибе // Целлюлоза, бумага и картон.—1971.—№ 30.—С. 11—13. [30]. Комаров В. И., Чижев Г. И., Пузырев С. С. Деформативность механической массы // Бум. пром-сть.—1989.—№ 10.—С. 14—15. [31]. Комаров В. И., Чижев Г. И., Пузырев С. С. Оптимизация композиции по волокну газетной бумаги для получения заданных величин характеристик деформативности и прочности // Бум. пром-сть. Специальное приложение.—1990.—С. 62—67. [32]. Король П. В. Увеличение содержания макулатуры в коблочном картоне хром-эрац: Дис. ... канд. техн. наук.—Л.: ЛТА, 1986.—180 с. [33]. Легоцкий С. С., Лаптев Л. Н. Размол бумажной массы.—М.: Лесн. пром-сть, 1981.—93 с. [34]. Личутин А. Ф., Комаров В. И. Влияние размеров щепы на стабильность физико-механических свойств сульфатной небеленой целлюлозы // Целлюлоза, бумага и картон: Экспресс-инф.—М.: ВНИПИЭИлеспром, 1988.—Вып. 10.—С. 2—15. [35]. Макклнтток Ф. Аргон А. Деформация и разрушение материалов.—М.: Мир, 1970.—443 с. [36]. Маркочев В. М. Испытания материалов и системный подход к проблеме прочности // Завод. лаборатория.—1987.—№ 6.—С. 57—63. [37]. Основные представления о волокнах, применяемых в бумажной промышленности: Материалы симпозиума в г. Кембридж, 1957.—М.: Гослесбумиздат, 1962.—500 с. [38]. Пановко Я. Г. К расчету деревянных изгибаемых элементов с учетом пластических деформаций в сжатой зоне // Тр. МАДИ.—1937.—№ 7.—С. 78—91. [39]. Смирнова Е. А. Исследование условий применения мочевино-фирмальдегидных смол для приготовления влагопрочной бумаги: Дис. ... канд. техн. наук.—Л.: ЛТА, 1973.—160 с. [40]. Фляте Д. М., Комаров В. И. Влияние некоторых

факторов на жесткость бумаги при изгибе // *Материалы научно-техн. конф.* 1971.—Л.: РИО ЛТА, 1971.—С. 67—72. [41]. Фляте Д. М. Свойства бумаги.—М.: Лесн. пром-сть, 1986.—680 с. [42]. Хабаров Ю. Г., Комаров В. И. Оценка последовательности разрушения целлюлозных волокнистых материалов // *Бум. пром-сть.*—1988.—№ 6.—С. 16—17. [43]. Хайкин С. Э. Физические основы механики.—М.: Наука, 1971.—751 с. [44]. Хованский В. В. Применение соединений алюминия для улучшения свойств бумаги: Дис. ... канд. техн. наук.—Л.: ЛТА, 1979.—197 с. [45]. Яценко В. Ф. Прочность и ползучесть слоистых пластиков (сжатие, растяжение, изгиб).—Киев: Наукова думка, 1966.—204 с. [46]. Bardone-Sacerdote. Proc. 3-rd Internal Conder Acoust., Stuttgart, 1959.—New-York, 1959.—V. 2. [47]. Brecht W., Blicstad F. // *Papierfabrikant.*—1949.—38.—S. 17. [48]. Brecht W., Klingelhoffner H., Knittweis H.-I Die Resonanzmethode als dynamisches Verfahren der Steifigkeitsprüfung von Papieren, Kartons und Pappen // *Das Papier.*—1971.—N 2.—S. 57—65. [49]. Brecht W., Muller F. Über die Steifigkeitsprüfung von Papier, Karton und Pappen // *Das Papier.*—1960.—N 14.—S. 7—9. [50]. Cope P. // *Tappi*, 1961, N 9. [51]. Gillet M., Bouitemry M. The humidity influence ober the board stiffness // *Pap., cartone, compl.*—1971.—S. 13—17. [52]. Kaimilainen M., Toroi M. Optimum composition board with regard to the compression resistance of boxes // *Paperi ja puu.*—1986.—V 69, N 9.—P. 666—668. [53]. Kleinert R. Steifigkeitsmessverfahren für Papier, Karton und Papp // *Zellstoff und Papier.*—1971.—N 8.—S. 228—232. [54]. *Paper Testing and Process Optimization. Catalog 1994.* Lorentzen and Wettre.—201 s. [55]. Samuelsson L. G. // *Svensk Papperstidning.*—1963.—N 15.

Поступила 18 апреля 1994 г.

УДК 676.1.024.3

*О. А. ТЕРЕНТЬЕВ, В. С. КУРОВ, Э. И. ДАВЫДЕНКО*



Терентьев Отто Алексеевич родился в 1934 г., окончил в 1958 г. Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина, доктор технических наук, профессор, академик, ректор С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет более 400 научных трудов в области гидродинамики и реологии водно-волокнистых суспензий.



Куров Виктор Сергеевич родился в 1953 г., окончил в 1976 г. Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, доктор технических наук, профессор кафедры процессов и аппаратов химической технологии С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет около 90 научных трудов в области гидродинамики и реологии водно-волокнистых суспензий.



Давыденко Эдуард Иванович родился в 1963 г., окончил в 1985 г. ЛТИ ЦБП, аспирант С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет 3 научных труда в области гидродинамики и реологии водно-волокнистых суспензий.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПУЛЬСАЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ ФЛОКУЛ В ПОТОКЕ ВОЛОКНИСТОЙ СУСПЕНЗИИ

Получены зависимости для коэффициентов турбулентной диффузии флокул с учетом полидисперсности дисперсной фазы.

Dependences for turbulent diffusion coefficients of the floccules including polydispersity of the dispersed phase have been derived.

Равномерность распределения волокон в формируемом листе и снижение массоемкости бумаги определяется степенью диспергированности волокон в потоке и пульсационными процессами в массопроводящих и массонапускных системах. При массоподаче отдельные волокна, сталкиваясь между собой, образуют флокулы различных размеров, оказывающие отрицательное влияние на качество вырабатываемой бумаги. В инженерных расчетах напорных ящиков бумагоделательной машины (БДМ) необходимо иметь возможность оценить степень флокулирования турбулентного потока волокнистой суспензии перед напуском на сеточный стол. Для этой оценки следует получить соотношения коэффициентов турбулентной диффузии флокул и отдельных волокон. Если суспензия достаточно разбавлена, когда можно пренебречь влиянием взаимодействия между флокулами (или волокнами) на значения коэффициента турбулентной диффузии флокул, то анализ пульсационного движения волокнистой суспензии с учетом ее полидисперсности можно провести в рамках модели Г. Н. Абрамовича [1]. В соответствии с этой моделью турбулентное течение двухфазной смеси рассматривается как перенос частиц пульсационными объемами (молями) дисперсионной среды. Эти объемы, увлекая содержащиеся в них частицы, тормозятся силами лобового сопротивления частиц.

Запишем уравнение сохранения количества движения полидисперсной суспензии в дискретном представлении:

$$dV'_g + \sum_{i=1}^{\infty} x_i^0 dV'_{p_i} = 0, \quad (1)$$

где  $V'_g$ ,  $V'_{p_i}$  — соответственно пульсационные скорости дисперсионной среды и флокул сорта  $i$ ;  
 $x_i^0$  — массовая концентрация флокул сорта  $i$  в потоке волокнистой суспензии;  
 $i$  — параметр, который определим как количество волокон, образующих флокулу.

Для флокулы сорта  $i$  можно записать уравнение пульсационного движения [3]

$$\frac{dV'_{p_i}}{dt} = K_i (V'_g - V'_{p_i}), \quad (2)$$

где  $K_i = \frac{1}{2} \rho C_w \frac{S_i}{m_i}$ ;  
 $\rho$  — плотность дисперсионной среды;  
 $C_w$  — коэффициент лобового сопротивления, зависящий от критерия Рейнольдса флокулы;  
 $S_i$ ,  $m_i$  — миделево сечение и масса флокулы сорта  $i$ .

В настоящей работе рассмотрен случай постоянных значений коэффициента  $C_w$  (т. е. случай, когда  $Re \geq 800$ ).

Для флокул размером  $r/l_u \geq 0,02$  можно принять  $V'_{p_0} = 0$  [1] ( $r$  — радиус флокул;  $l_u$  — длина пути смешения по скорости,  $V'_{p_0}$  —

пульсационная скорость флокул в начале формирования пульсационного моля).

После интегрирования уравнения (1) получим

$$V'_g - V'_{g_0} = - \sum_{i=1}^{\infty} x_i^0 V'_{p_i}. \quad (3)$$

Здесь  $V'_{g_0}$  — пульсационная скорость дисперсионной среды в начале формирования пульсационного моля.

Для сорта  $j$ , взятого из совокупности сортов флокул  $i = 1, 2 \dots$ , по уравнению (2) после интегрирования можно получить выражение

$$\frac{1}{V'_g - V'_{p_j}} - \frac{1}{V'_{g_0} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{\infty} x_i^0 V'_{p_i}} = K_j (1 + x_j^0) t_{p_j}, \quad (4)$$

где  $t_{p_j}$  — время взаимодействия флокул сорта  $j$  с пульсационным молем дисперсионной среды.

Согласно [1], можно принять

$$t_{p_j} = \frac{2l_u}{|V'_{p_0} + V'_{p_j}|}.$$

Отсюда, с учетом (3), для флокул сорта  $j$  получим

$$t_{p_j} = \frac{2l_u (1 + x_j^0)}{V'_{g_0} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{\infty} x_i^0 V'_{p_i} - V'_{r_j}}.$$

Здесь  $V'_{r_j} = V'_g - V'_{p_j}$ .

Подставляя полученное выражение в формулу (4), имеем соотношение

$$n_j = \frac{V'_{r_j}}{V'_{g_0} - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{\infty} x_i^0 V'_{p_i}} = 1 + K_j (1 + x_j^0)^2 l_u - \sqrt{(1 + K_j (1 + x_j^0)^2 l_u)^2 - 1}. \quad (5)$$

Из формул (3) и (5) следует

$$\frac{V'_g}{V'_{g_0}} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{\infty} x_i^0 \frac{1 - n_i}{1 + n_i x_i^0}}; \quad (6)$$

$$\frac{V'_{p_j}}{V'_{g_0}} = \frac{1 - n_j}{(1 + n_j) \left( 1 + \sum_{i=1}^{\infty} x_i^0 \frac{1 - n_i}{1 + n_i x_i^0} \right)}, \quad (7)$$

где  $n_i$  и  $n_j$  вычисляются аналогично.

Зная функцию распределения флокул по размерам, по формуле (6) можно оценить степень влияния дисперсной фазы на турбулентную структуру потока волокнистой суспензии. Используя формулу (7), можно оценить значения коэффициента турбулентной диффузии флокул.



Заметим, что для случая монодисперсной системы ( $i = 1$ ) выражения (6) и (7) переходят в известные формулы Г. Н. Абрамовича [1]:

$$\frac{V'_g}{V'_{g_0}} = \frac{1 + \alpha^0 n}{1 + \alpha^0}; \quad \frac{V'_p}{V'_{g_0}} = \frac{1 - n}{1 + \alpha^0},$$

где  $n$  вычисляется по формуле (5) и в данном случае характеризует степень увлечения флокул пульсационными молями дисперсионной среды.

Для коэффициента турбулентной диффузии флокул  $D_{tp}$  монодисперсного потока имеет место соотношение [3]

$$\frac{D_{tp}}{\nu_{t_0}} = \frac{1}{S_{cp}^0} \left( \frac{V'_p}{V'_{g_0}} \right)^2, \quad (8)$$

где  $\nu_{t_0}$  — коэффициент турбулентной вязкости дисперсионной среды [2];

$S_{cp}^0$  — число Шмидта, обычно принимаемое постоянной величиной,  $S_{cp}^0 = 1,6$  [3].

Отсюда для монодисперсной системы, с учетом формулы (5), получим выражение

$$\bar{D}_{tp} = (V \sqrt{(1 + a)^2 - 1} - a)^2, \quad (9)$$

где

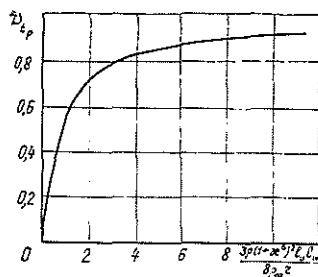
$$\bar{D}_{tp} = \frac{S_{cp}^0 (1 + \alpha^0)^2 D_{tp}}{\nu_{t_0}};$$

$$a = \frac{3\rho (1 + \alpha^0)^2 l_u C_w}{8\rho_\phi r};$$

$\rho_\phi$  — плотность флокулы.

На рисунке приведены результаты расчета по формуле (9) безразмерного коэффициента турбулентной диффузии флокул  $\bar{D}_{tp}$ . Как видно из рисунка, при больших значениях параметра  $a$  значения коэффициента турбулентной диффузии флокул слабо зависят от радиуса флокулы. Отсюда следует, что для некоторых конкретных условий течения можно выделить область значений параметра  $a$ , которую можно охарактеризовать усредненным значением коэффициента турбулентной диффузии флокул. Так, например, при изменении степени дисперсности водно-волокнистой суспензии от размеров отдельных волокон до размеров наиболее крупных флокул ( $r = 5$  мм) области значений параметра  $a$  (6,67... 37,10) соответствует область значений безразмерного коэффициента турбулентной диффузии флокул (0,873... 0,974).

Зависимость безразмерного коэффициента турбулентной диффузии флокул  $\bar{D}_{tp}$  от параметра  $\frac{3\rho(1+\alpha^0)^2 l_u C_w}{8\rho_\phi r}$  для монодисперсной суспензии



В наших расчетах принято следующее:  $C_w = 2,5$ ;  $\rho_{\phi} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>; радиус канала  $R = 0,25$  м; длина волокон 1,2 мм; плотность волокон 1200 кг/м<sup>3</sup>; диаметр волокон 30 мкм;  $l_u = 0,14 R$  [4] (на оси канала); концентрация суспензии 1,0 %.

Также произведен расчет коэффициентов турбулентной диффузии флокул для течения полидисперсной водно-волоконистой суспензии концентрацией 0,5 % в проточной части напорного ящика БДМ. Рассчитанное по формулам (7) и (8) среднее значение  $\bar{D}_{tp}$  составило 0,900, а по формуле (9) — 0,953. Совпадение результатов можно считать вполне удовлетворительным для инженерных расчетов, связанных с оценкой состояния потока волоконистой суспензии перед напуском.

Как показали результаты исследований, турбулентный перенос полидисперсной водно-волоконистой суспензии в некоторых случаях удается описать усредненным значением коэффициента турбулентной диффузии флокул.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй.— М.: Наука, 1984.— 716 с. [2]. Терентьев О. А., Смирнова Э. А., Куров В. С. Влияние турбулентности на реологические параметры бумажной массы // Лесн. журн.— 1990.— № 2.— С. 97—101.— (Изв. высш. учеб. заведений). [3]. Турбулентные течения газозвеси. / А. А. Шрайбер, Л. Б. Гавин, В. А. Наумов, В. П. Яценко— Киев: Наукова думка, 1987.— 240 с. [4]. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя.— М.: Наука, 1974.— 712 с.

Поступила 13 мая 1994 г.