

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

5—6

1994



ИЗДАТЕЛЬ — АРХАНГЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор — акад. **О. М. Соколов**.  
Заместители главного редактора:  
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**, акад. **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**, проф. **В. И. Санев**, акад. **О. А. Терентьев**, проф. **Н. И. Федоров**, чл.-кор. **В. Я. Харитонов**, чл.-кор. **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» № 5—6

Редакторы **Н. П. Бойкова**, **Л. С. Окулова**. Корректор **Е. Б. Краснова**

Сдан в набор 11.11.94. Подписан в печать 25.04.95.  
Форм. бум. 70 × 108<sup>3/16</sup>. Бумага мелованная. Гарнитура литературная. Печать высокая.  
Усл. печ. л. 12,775. Усл. кр.-отг. 19,872. Уч.-изд. л. 24,11. Тираж 1000 экз. Заказ 2536.  
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

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

### МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

А. Н. Обливин, Л. А. Спирин. Математическая модель прогнозирования физико-механических свойств ДСП . . . . .	7
Л. С. Суrowцева, Э. А. Волкова. Об использовании низкокачественных пиломатериалов на заготовки для поддонов . . . . .	18
А. Е. Алексеев. Влияние ширины пласти на характер деформированного состояния брусьев . . . . .	20
А. Е. Алексеев. Влияние глубины обработки на характер деформированного состояния брусьев . . . . .	23

### ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

Л. А. Миловидова, Г. В. Комарова. Возможность снижения жесткости лиственной сульфатной целлюлозы перед отбелкой . . . . .	27
Г. А. Пазухина, М. В. Теплоухова, Ф. Х. Хакимова. Делигнификация органосольвентной целлюлозы перуксусной кислотой и пероксидом водорода на ранних стадиях отбелки . . . . .	32
Г. А. Пазухина, М. В. Теплоухова, Ф. Х. Хакимова. Отбелка щелочной органосольвентной целлюлозы из осины перуксусной кислотой и пероксидом водорода . . . . .	37
А. Г. Апушкинский, Д. А. Пономарев. Сульфатная варка древесины березы в присутствии лесохимической смолы . . . . .	40
Э. А. Коржичка, Л. В. Голубева, М. А. Коржова. Получение сульфитной целлюлозы из древесины березы . . . . .	43
Н. Н. Калинин, Э. И. Федорова, П. В. Осипов, Т. А. Меркулова. Озон — активатор гипохлоритной отбелки целлюлозы . . . . .	47
Л. Ф. Кулешов, А. А. Ноговицын, В. В. Миронова. Повышение надежности подогревателей систем принудительной циркуляции варочных установок целлюлозы . . . . .	50
И. Д. Кугушев, Ю. Н. Швецов. Расчет оптимальных параметров работы отсасывающей части бумагоделательной машины . . . . .	53
Ю. М. Чернобережский, А. Н. Николаев, А. Б. Дягилева. Решение проблем охраны окружающей среды в рамках ГНТП (Обзор работ, выполненных в 1993 г. по направлению «Комплексное использование и воспроизводство древесного сырья») . . . . .	57
Е. В. Новожилов, Е. Д. Гельфанд. Локальная очистка щелочосодержащих сточных вод сульфит-целлюлозного производства с попутным получением кормовых дрожжей . . . . .	62
А. Н. Николаев, Л. Н. Николаева, И. В. Гордеева. Биоадсорбционная и адсорбционно-коагуляционная очистка сточных вод ЦБП . . . . .	65
А. Н. Николаев, И. В. Гордеева. О снижении сероводородного загрязнения среды предприятиями ЦБП . . . . .	71
Л. Н. Григорьев. Критерий сравнительной оценки способов очистки выбросов в атмосферу . . . . .	77
Н. К. Дерманов, Г. И. Ионсен. Абсорбционно-каталитическая очистка от сероводорода дымовых газов содорегенерационных котлоагрегатов сульфатно-целлюлозного производства . . . . .	80
Ю. С. Иванов, Л. О. Иоффе, Ш. Ф. Двоскин, А. Б. Бродерзон. Кислородно-щелочная целлюлоза, полученная в пульсационном аппарате . . . . .	86
А. К. Веретнов, А. В. Бывшев, И. М. Кольцова. Строение волокнистой структуры целлюлозных суспензий . . . . .	93
В. В. Петрова. Структура целлюлозы поздней и ранней древесины ели по данным рентгеновской дифракции на больших и крайне малых углах . . . . .	97
А. А. Леонович, Л. О. Иоффе. Изменение температуры стеклования целлюлозы при ее инклюдировании . . . . .	102
П. П. Тиранов. Улучшение реологических свойств пасты сульфатного лигнина . . . . .	105
К. Г. Боголицын, Н. В. Рябева, Н. Н. Волкова, И. Вадсе. Исследование конформационных превращений диоксанлигнина в органических растворителях . . . . .	109

А. И. Киприанов, Д. А. Пономарев, Е. А. Демченко. Использование жидких продуктов пиролиза древесины . . . . .	117
С. Н. Васильев, М. Ю. Троскина, В. И. Рошин, В. И. Ягодин. Математическое описание процесса экстрагирования биологически активных веществ из древесной зелени . . . . .	122
С. Н. Васильев, В. И. Рошин, В. И. Ягодин, М. Ю. Троскина, Е. Г. Аксенова, Р. Ш. Абиев. Исследование кинетических закономерностей процесса извлечения биологически активных веществ из древесной зелени . . . . .	126
С. Н. Васильев, М. В. Барчукова, В. И. Ягодин, М. Ю. Троскина. Влияние измельчения сырья при извлечении биологически активных веществ древесной зелени . . . . .	131

#### ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

О. В. Иванов, Ю. Н. Стрижев, В. С. Соловьев. К вопросу об оценке эффективности автоматизации технологических объектов управления . . . . .	137
М. М. Кудряшов. Цена лесных ресурсов в условиях экономического кризиса . . . . .	141
Т. В. Авраменко. Номенклатура продукции мебельного производства в условиях рыночной экономики . . . . .	144
Ю. А. Шутова, А. И. Старшинов. Оптимизация технологического процесса транспортировки в условиях стохастической неопределенности . . . . .	147

#### МЕТОДИКА И ПРАКТИКА ПРЕПОДАВАНИЯ

О. М. Соколов, В. И. Раковский. Новая профессия для российского рынка недвижимости . . . . .	151
Л. А. Корельская. Язык как средство межкультурного общения для специальных целей . . . . .	153

#### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

Ф. В. Аглиуллин. Продуктивность сосновых древостоев, сформировавшихся в процессе постепенных рубок . . . . .	156
А. И. Жиров, А. К. Монахов, М. А. Шубина. О корреляции между высотой дубовых древостоев и оптической плотностью РЛ-изображения . . . . .	158
А. И. Барабин, А. А. Елисеев. Новый подход к оценке потенциальных и фактических урожаев семян лиственницы . . . . .	160
А. Н. Торицын, В. Н. Яковлев. Влияние показателей качества изготовления пильных цепей на их эксплуатационные характеристики . . . . .	162
Т. С. Исупова. К вопросу о разнотолщинности полотен ленточных пил . . . . .	163
Л. Г. Шаповалова, Ю. А. Варфоломеев, Б. В. Лабудин, А. В. Вешняков. Деформации высоких деревянных сооружений при изменении влажности . . . . .	165
Э. Н. Сабуров, Т. Г. Загоскина. Исследование потока в периферийной области циклонных камер . . . . .	171
В. Б. Куктыш, А. Э. Пищр, В. В. Аксенов. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление в последовательно установленных пучках оребренных труб . . . . .	183

#### НОВОСТИ НАУКИ

Валерий Н. Сойфер. Соросовские профессора высшей школы названы . . . . .	189
--	-----

#### ИЗ ЖИЗНИ ВУЗОВ

Е. С. Романов. Презентация Архангельского государственного технического университета . . . . .	195
--	-----

#### НАУЧНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ И СОВЕЩАНИЯ

А. Н. Обливин, Н. В. Скуратов. IV Международная конференция ИЮФРО по сушке древесины . . . . .	198
--	-----

#### НЕКРОЛОГИ

Московский государственный университет леса, Архангельский государственный технический университет, Санкт-Петербургская лесотехническая академия, Архангельский институт леса и лесохимии, редколлегия и редакция «Лесного журнала», коллеги и ученики. Памяти Ивана Степановича Мелехова . . . . .	202
---	-----

Указатель статей, помещенных в «Лесном журнале» в 1994 г. . . . .	206
---	-----

## CONTENTS

### MECHANICAL TECHNOLOGY OF WOOD AND WOOD SCIENCE

A. N. Oblivin, L. A. Spirin. Mathematical Forecast Model of Physico-Mechanical Properties of Particleboards . . . . .	7
L. S. Surovtseva, Z. A. Volkova. On Use of Low-Grade Lumber for Workpieces for Trays . . . . .	18
A. E. Alexeev. Layers Width Effect on Deformed Condition of Beams . . . . .	20
A. E. Alexeev. The Effect of Processing Depth on the Character of Deformed Condition of Beams . . . . .	23

### CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD

L. A. Milovidova, G. V. Komarova. A Possibility of Decreasing the Hardwood Sulphate Pulp Rigidity Before Bleaching . . . . .	27
G. A. Pazukhina, M. V. Teploukhova, F. Kh. Khakimova. Delignification of Organosolvent Cellulose by Peracetic Acid and Peroxide of Hydrogen at the Early Stages of Bleaching . . . . .	32
G. A. Pazukhina, M. V. Teploukhova, F. Kh. Khakimova. Bleaching of alkaline organosolvent aspen pulp by peracetic acid and peroxide of hydrogen . . . . .	37
A. G. Apushkinsky, D. A. Ponomaryov. Sulphate Pulping of Birch Wood in the Presence of Woodchemical Resin . . . . .	40
Z. A. Korzhitskaya, L. V. Golubeva, M. A. Korzhova. Birch Sulphite Pulp Yield	43
N. N. Kalinin, E. I. Fyodorova, P. V. Osipova, T. A. Merkulova. Ozon ~ Activator of Hypochlorite Pulp Bleaching . . . . .	47
L. F. Kulchshov, A. A. Nogovitsyn, V. V. Mironova. Heaters Reliability Improvements of Forced Circulation Systems for Pulp Digesters . . . . .	50
I. D. Kugushev, Yu. N. Shvetsov. Calculation of Optimal Parameters of Paper Machine's Suction Part Operation . . . . .	53
Yu. M. Chernoberezhsky, A. N. Nikolaev, A. B. Dyagileva. Resolution of Environment Protection Problems within GSTP (Review of scientific transactions carried out in 1993 on the linb of "Comprehensive Use and Reproduction of Wood Raw Materials") . . . . .	57
E. V. Novozhilov, E. D. Gel' fand. Local Treatment of Alkali-Contented Effluents (ACE) of Sulphite-Cellulose Production . . . . .	62
A. N. Nikolaev, L. N. Nikolaeva, I. V. Gordecva Bioadsorbing and Adsorbing-Coagulating PPP Effluents Treatment . . . . .	65
A. N. Nikolaev, I. V. Gordecva. On PPP Hydrosulphuric Environmental Pollution Reduction . . . . .	71
L. N. Grigoryev. Griterion for Comparative Estimation of Purification methods of Discharges into Atmosphere . . . . .	77
N. K. Dermanov, G. I. Ionsen. Absorbing-Catalyst Flue Gases Purification of sulphate pulping soda recovery boiler-furnaces from hydrogen sulphide . . . . .	80
Yu. S. Ivanov, L. O. Ioffe, Sh. F. Dvoskin, I. A. Nikiforov, A. B. Broderzon Oxygen-Alkaline Cellulose Obtained in Pulsatory Apparatus. . . . .	86
A. K. Veretnov, A. V. Byvshev, I. M. Kol' tsova. Composition of Fibrous Structure of Pulp Suspensions . . . . .	93
V. V. Petrova. Structure of Autumn and Spring Spruce Wood Pulp by the data of X-Ray Diffraction at Large and Extremely Small Angles . . . . .	97
A. A. Leonovitch, L. O. Ioffe. Change of Cellulose Vitrification Temperature While its Including . . . . .	102
P. P. Tiranov. Improvement of Rheological Properties of Sulphate Lignin Paste . . . . .	105
K. G. Bogolitsyn, N. V. Ryabeva, N. N. Volkova, I. Vadsyo. Investigation into Conformation Changes of Dioxane Lignin in Organic Solvents. . . . .	109
A. I. Kiprianov, D. A. Ponomarev, E. A. Demchenko. Utilization of Fluid Products of Wood Pyrolysis . . . . .	117

<i>S. N. Vasiliev, M. Yu. Troskina, V. I. Roshchin, V. I. Yagodin.</i> Mathematical Description of Extracting Process of Bioactive Substances from Wood Greenery. . .	122
<i>S. N. Vasiliev, V. I. Roshchin, V. I. Yagodin, M. Yu. Troskina, E. G. Akscnova, R. Sh. Abiev.</i> Research in to Kinetic Regularities of Extracting the Bioactive Substances from Wood Greenery. . . . .	126
<i>S. N. Vasiliev, M. V. Barchukova, V. I. Yagodin, M. Yu. Troskina.</i> Influence of Raw Material Disintegration on Extracting the Bioactive Substances of Wood Dreenergy	131

#### ECONOMICS AND MANAGEMENT

<i>O. V. Ivanov, Yu. N. Strizhev, V. S. Solovyev.</i> On Problem of Efficiency Evaluation of Automated Technological Objects of Management . . . . .	137
<i>M. M. Kudryashov.</i> The Value of Forest Resources under the Conditions of Economic Crisis . . . . .	141
<i>T. V. Avramenko.</i> Range of Furniture-Making Products in Market Economy Conditions	144
<i>Yu. A. Shutova, A. I. Starshinov.</i> Optimization of Technological Transportation Process Under Conditions of Stochastic Uncertainty . . . . .	147

#### METHODS AND EXPERIENCE OF FEACHING

<i>O. M. Sokolov, V. I. Rakovsky.</i> New Speciality for Russia Real Property Market . . .	151
<i>L. A. Korlskaya.</i> Language as Means of Intercultural Communication for Specific Purposes . . . . .	153

#### SUMMARIES AND EXCHANGE OF EXPERIENCE

<i>F. V. Agliullin.</i> Productivity of Pine Stands Formed in the Process of Gradual Cuttings	156
<i>A. I. Zhirov, A. K. Monakhov, M. A. Shubina.</i> On Correlation between Oak Stands Height and Optical Density of PL-Display . . . . .	158
<i>A. I. Barabin, A. A. Elisccv.</i> New Approach to the Estimation of Potential and Actual Larch Seed Yield . . . . .	160
<i>A. N. Toritsyn, V. N. Yakovlev.</i> Influence of Quality Indicators of Making Chain Saws on their Operating Characteristics. . . . .	162
<i>T. S. Isupova.</i> On problem of Irregular Band Saw Blades Strength . . . . .	163
<i>L. G. Shapovalov, Yu. A. Varfolomecv, B. V. Labudin, A. V. Veshnyakov.</i> Strain of High Wooden Structures in the Humidity Change . . . . .	165
<i>E. N. Saburov, T. G. Zagoskina.</i> Research into the Flow in the Peripheral Area of Cyclone Chambers . . . . .	171
<i>V. B. Kuntysch, A. E. Piir, V. V. Akscnov.</i> Heat Transter and Aerodynamical Resistance of In-line Finned Tubes Arrays. . . . .	183

#### NEWS OF SCIENCE

<i>Valcyr N. Soyfer.</i> Soros Professors of Higher Educational Instilutions are Designated . .	189
---	-----

#### FROM THE LIFE OF HIGHERSCHOOLS

<i>E. S. Romanov.</i> Presentation of Arkhangelsk State Science & Engineering University . .	195
--	-----

#### & LEARNED CONFERENCES

<i>A. N. Oblivin, N. V. Scuratov.</i> The 2 nd IUFRO International Conference on Timber Drying . . . . .	198
--	-----

#### OBITUARY

<i>Moscow State Forest University, Archangelsk State Science &amp; Engineering University, Petersburg Forestry &amp; Enginccring Academy, Archangelsk Institute of Timber and Wood Chemistry, the Editorial Board and Iditorial Staff of "Lesnoi Zhurnal", Colleagues and pupils.</i> In Memory of Ivan S. Melckhov . . . . .	202
---	-----

Index of Articles Issued in "Lesnoi Zhurnal" in 1994 . . . . .	206
--	-----

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.815-41

А. Н. ОБЛИВИН, Л. А. СПИРИН

Московский государственный университет леса

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДСП

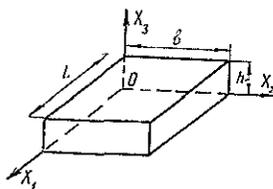
Приведена комплексная математическая модель прогнозирования динамики физико-механических свойств ДСП, сформулированная в виде системы дифференциальных и интегральных уравнений в соответствии с информационным («вход — выход») принципом декомпозиции, а также примеры по определению конечных свойств готовых изделий.

A comprehensive mathematical model of forecasting the dynamics of particleboards' physico-mechanical properties formulated in a form of differential and integral equations in accord with data ("input-output") decomposition principle as well as examples on determining the properties of final products have been presented.

Физико-механические свойства, которыми обладают древесностружечные плиты (ДСП), определяют их качество, эксплуатационные особенности и области применения.

Выполним обоснование модели, позволяющей исследовать динамику физико-механических свойств ДСП в технологическом цикле их производства.

Рис. 1. Система координат, принятая при моделировании ( $L$ ,  $b$ ,  $h$  — длина, ширина и толщина плиты)



Если рассматривать формируемую плиту в системе координат  $0, X_1, X_2, X_3$  (рис. 1), то для произвольного момента времени уравнение, определяющее состояние равновесия для любого фиксированного слоя плиты в параллелепипеде  $G = \{0 \leq x_1 \leq L, 0 \leq x_2 \leq b, 0 \leq x_3 \leq h\}$  [6] имеет вид

$$\sigma_z - p(x) \Pi(x) - \sigma_{сж}(x) [1 - \Pi(x)] - \sigma_{кл}(x) F_{кл}(x) = 0, \quad (1)$$

- где  $\sigma_z$  — давление на ДСП со стороны плит пресса;  
 $p(x)$  — давление парогазовой смеси в точке  $x$ ;  
 $\Pi(x)$  — пористость плиты в точке  $x$ ;  
 $\sigma_{сж}(x)$  — напряжение сжатия в скелете слоя с координатой  $x$ ;  
 $\sigma_{кл}(x)$  — напряжение в клеевой прослойке;  
 $F_{кл}(x)$  — доля единицы площади слоя, занятая клеем;  
 $x$  — точка (вектор) в пространстве  $0, X_1, X_2, X_3$ .

Для уравнения равновесия (1) характерны два частных случая.

1. Если давление на ДСП со стороны плит пресса велико, а прочность клеевых швов практически равна нулю, то уравнение (1) имеет вид

$$\sigma_{\tau} - p(x) \Pi(x) - \sigma_{сж}(x) [1 - \Pi(x)] = 0. \quad (2)$$

2. В процессе прессования давление со стороны плит пресса снижается, а парогазовое давление внутри ДСП нарастает. В некоторый момент времени  $\tau$  напряжение сжатия  $\sigma_{сж}(x) = 0$ , а значит, в точке  $x$  напряжение растяжения уравнивается нарастающей прочностью клеевых швов. Для этого случая уравнение (1) примет вид [6]

$$\sigma_{\tau} - p(x) \Pi(x) + \sigma_{кл}(x) F_{кл}(x) = 0. \quad (3)$$

Следовательно, условие прочности ДСП (отсутствие расслаивания от избыточного давления парогазовой смеси):

$$\sigma_{кл}(x) F_{кл}(x) > [p(x) \Pi(x) - \sigma_{\tau}] = \sigma_p(x), \quad (4)$$

где  $\sigma_p(x)$  — напряжение растяжения в ДСП перпендикулярно плоскости  $(x_1, 0, x_2)$ , и отнесено ко всей площади сечения.

Предел прочности материала (напряжение растяжения, при котором еще не происходит его разрушение) в этом направлении  $\sigma_p(x)$  является функцией температуры  $T(x)$ , влагосодержания  $U(x)$  и степени отверждения связующего  $v(x)$ . В свою очередь, эти показатели зависят не только от координаты слоя, но и от времени  $\tau$ , т. е.

$$\sigma_p(x, \tau) = \sigma_p(T(x, \tau), U(x, \tau), v(x, \tau)). \quad (5)$$

Таким образом, для описания динамики прочностных свойств ДСП необходима следующая информация:

закон (диаграмма) нагружения (прессования)  $\sigma_{\tau}$ ;  
 профиль (распределение) плотности ДСП  $\rho(x, \tau)$ ;  
 поля давления  $P(x, \tau)$ , температуры  $T(x, \tau)$ , влагосодержания  $U(x, \tau)$  и степени отверждения связующего  $v(x, \tau)$ .

Изменением перечисленных выше характеристик можно существенно влиять на прочностные свойства готовых изделий.

Из перечня данных, необходимых для расчета физико-механических свойств ДСП, вытекает декомпозиция модели исследуемого процесса.

1. Формирование (уточнение на последующих итерациях процесса моделирования) диаграммы прессования  $\sigma_{\tau}$  (модель нагружения).

2. Определение плотности, а значит, и пористости ДСП по сечению  $\Pi(x, \tau)$  (реологическая модель).

3. Определение теплофизических характеристик ДСП (модель теплопереноса).

4. Расчет прочностных свойств готовых изделий (модель расчета прочностных показателей).

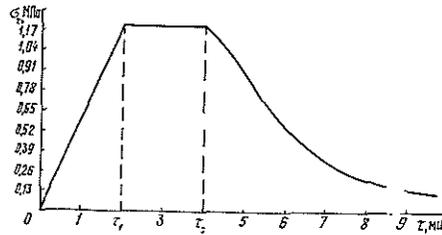
Расчеты по моделям 2-го, 3-го и 4-го типов должны проводиться итерационно, поскольку реологические свойства плит существенно зависят от теплофизических и механических характеристик ДСП, которые, в свою очередь, определяются реологическими свойствами плит.

Рассмотрим более подробно модели исследуемого процесса.

#### *Модель нагружения плит пресса*

Первоначально зададим некоторый эмпирический закон нагружения, подлежащий уточнению на последующих шагах моделирования.

Рис. 2. Типовая диаграмма прессования ( $\tau_1$  — время смыкания плит пресса;  $\tau_2 - \tau_1$  — время выдержки под постоянным давлением;  $\sigma_\tau$  — давление;  $\tau$  — продолжительность прессования)



Типовая диаграмма прессования изображена на рис. 2. Ее можно описать математически следующим образом:

$$\sigma_\tau = \begin{cases} a\tau & \text{при } \tau \leq \tau_{см}; \\ a\tau_{см} & \text{при } \tau_{см} \leq \tau \leq \tau_{см} + \tau_в; \\ \sigma_0 e^{-(t/c)^k} + \sigma_\infty & \text{при } \tau > \tau_{см} + \tau_в, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\tau$  — текущий момент времени;  
 $\tau_{см}$  — время смыкания плит пресса;  
 $\tau_в$  — время выдержки давления на плиты пресса;  
 $t = \tau - \tau_{см}$ ;  
 $\sigma_\infty$  — равновесное напряжение в плите после окончания процесса релаксации;  
 $a, \sigma_0, k, c$  — коэффициенты, определяемые технологией прессования, которые могут быть приняты за компоненты вектора управляющих параметров.

*Реологическая модель прессования*

Пористость ДСП в точке  $x$  определяется по выражению

$$P(x) = 1 - \frac{\rho_0(x)[1 + \varepsilon(x)]}{\rho_d}, \quad (7)$$

где  $\rho_0(x)$  — начальная плотность ДСП;  
 $\varepsilon(x)$  — деформация слоя плиты, имеющего координату  $x$ ;  
 $\rho_d$  — плотность древесины.

Древесина и материалы на ее основе не обладают свойством линейности реологического поведения, и следовательно, для них не выполняется принцип суперпозиции напряжений из-за необратимого изменения внутренней структуры материала в процессе деформирования.

При расчете общей деформации будем исходить из предположения, что в любой момент времени она является суммой упругой  $\varepsilon_e(x)$ , вязкой или упругопаздывающей  $\varepsilon_v(x)$  и остаточной  $\varepsilon_p(x)$  составляющих, т. е.

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_e(x) + \varepsilon_v(x) + \varepsilon_p(x), \quad (8)$$

При выдерживании под нагрузкой упругая деформация со временем убывает. Предполагается, что длительный модуль упругости растет по мере роста остаточной деформации, т. е. происходит упрочение материала.

При снятии нагрузки мгновенно восстанавливается упругая часть деформации, а затем в течение бесконечного времени происходит возврат вязкоупругой части. Дальнейшего роста остаточной деформации не происходит, т. е. при  $\sigma_\tau = 0$

$$\frac{\partial \varepsilon(x)}{\partial \tau} = 0. \quad (9)$$

Остаточная деформация имеет ограниченный рост, определяемый фракционным составом, температурой и влажностью ДСП, степенью осмоления брикета, то есть

$$\varepsilon_p(x) = \xi \varepsilon(x), \quad (10)$$

где  $\xi$  — некоторый коэффициент, зависящий от перечисленных свойств.

Таким образом, количественная характеристика реологических свойств ДСП может быть получена из решения следующей системы уравнений:

$$\varepsilon(x) = \frac{1}{H} \sigma_\tau + \varepsilon_v(x) + \varepsilon_p(x); \quad (11)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_v(x)}{\partial \tau} = \begin{cases} K_1 \sigma_\tau - \mu \varepsilon_v(x) & \text{при } \varepsilon_v < \frac{K_1 \sigma_\tau}{\mu}; \\ 0 & \text{при } \varepsilon_v = \frac{K_1 \sigma_\tau}{\mu}; \end{cases} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_p(x)}{\partial \tau} \begin{cases} K_2 \sigma_\tau [\xi \varepsilon(x) - \varepsilon_p(x)] & \text{при } \varepsilon_p(x) < \xi \varepsilon(x); \\ 0 & \text{при } \varepsilon_p(x) = \xi \varepsilon(x); \end{cases} \quad (13)$$

$$H = H_0 + \gamma \varepsilon_p(x), \quad (14)$$

где  $H$  — жесткость древесины;  
 $H_0, K_1, K_2, \mu, \xi, \gamma$  — коэффициенты, значения которых являются решениями обратной задачи параметрической идентификации, получаемыми на основе экспериментальных данных.

При конкретных начальных условиях система уравнений (11) — (14) может быть решена, если заданы законы деформирования ( $\varepsilon(x, \tau) = \varepsilon(\tau)$ ) или нагружения ( $\sigma_\tau = \sigma(\tau)$ ).

Существенным моментом в реологии ДСП является и то, что  $H$  и  $\varepsilon$  древесины существенно зависят от температуры и влажности.

Аппроксимируем эти величины выражениями

$$H(x) = H_0 + \gamma \varepsilon_p(x) + AU + BT + CUT; \quad (15)$$

$$\varepsilon(x) = \frac{1}{H} \sigma_\tau + \varepsilon_v(x) + \varepsilon_p(x) + \alpha U + \beta T + \delta UT, \quad (16)$$

где  $U = U(x, \tau)$  — влагосодержание материала ДСП;  
 $T = T(x, \tau)$  — температура ДСП;  
 $A, B, C, \alpha, \beta, \delta$  — коэффициенты, полученные в результате обработки экспериментальных данных усушки и разбухания.

Таким образом, в результате решения системы уравнений (7), (9) — (16) может быть определена пористость ДСП в каждой точке пресуемой плиты для любого момента времени.

### Модель теплопереноса при прессовании ДСП

Поскольку прессование является высокотемпературным процессом, то естественно предположить, что перенос влаги в плите осуществляется, в основном, парогазовой смесью и термодиффузией влаги [2].

Во время нагревания ДСП при переходе температуры через точку кипения будет происходить фазовое превращение влаги. Температура на поверхности фазового перехода сохраняется постоянной.

На основе закона сохранения массы вещества локальная производная объемной концентрации парогазовой смеси по времени равна сумме дивергенции потока этой смеси, а также источников и стоков парогазовой смеси.

Этот закон позволяет записать уравнение неразрывности для парогазового потока:

$$\Pi(x, \tau) \frac{\partial \rho_{пг}}{\partial \tau} = - \sum_{i=1}^3 (q_{пxi}) + I_{ф.п}(x, \tau) + I_{конд}(x, \tau), \quad (17)$$

где  $\Pi(x, \tau)$  — пористость плиты;  
 $\rho_{п.г}(x, \tau)$  — плотность парогазовой смеси;  
 $q_{пxi}$  — массовые потоки вдоль осей координат,

$$q_{пxi} = -K_{xi} \frac{\partial}{\partial x_i} (P_{п.г}); \quad i = 1, 2, 3; \quad (18)$$

$K_{xi}$  — коэффициенты проницаемости плиты вдоль соответствующих координат;

$P_{п.г}(x, \tau)$  — парогазовое давление в плите;

$I_{ф.п}(x, T)$  — источник пара, обусловленный фазовым переходом кипения;

$I_{конд}(x, T)$  — сток пара, обусловленный конденсацией.

Основным источником парогазовой смеси является испаряющаяся влага, масса которой будет пропорциональна давлению насыщенного пара  $P_{п.н}$ . Кроме того, испарение относится к числу фазовых переходов первого рода, протекающих при постоянной температуре.

Следовательно, концентрация генерируемого пара связана однозначно с температурой кипения по уравнению кривой насыщения

$$I_{ф.п} = I_{ф.п}(x, T_{ф.п}).$$

Конденсация пара (сток) возможна лишь в тех точках плиты, где температура ДСП будет равна точке росы для данного парциального давления пара и данного влагосодержания парогазовой смеси.

Изменение влагосодержания ДСП за счет переноса влаги в виде жидкой фазы, учитывающее термодиффузию, запишем как

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} (a_m \rho_0 \delta \frac{\partial T}{\partial x_i}); \quad i = 1, 2, 3, \quad (19)$$

где  $a_m$  — коэффициент влагопроводности ДСП;  
 $\delta$  — термоградиентный коэффициент.

Результирующее изменение влагосодержания в ДСП при прессовании можно определить из выражения

$$\rho_0 \frac{\partial u}{\partial \tau} = \rho_0 \frac{\partial u_B}{\partial \tau} + \Pi(x, \tau) \frac{\partial \rho_{п.г}}{\partial \tau} + I_{ф.п}(x, \tau) + I_{конд}(x, \tau). \quad (20)$$

Дифференциальное уравнение переноса тепловой энергии имеет вид

$$C(U, T) \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \lambda_{xi}(U, T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + \sum_{i=1}^3 C_{п.г} \left( K_{xi} \frac{\partial P_{п.г}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + \Delta H \frac{\partial v}{\partial \tau} + \Delta H_{\phi} \frac{\partial U}{\partial \tau}, \quad (21)$$

где  $C(U, T)$  — удельная теплоемкость ДСП;  
 $\rho$  — плотность плиты;  
 $\lambda_{x_i}(U, T)$  — теплопроводность плиты по координате  $x_i$ ;  
 $C_{п.г}$  — удельная теплоемкость парогазовой смеси;  
 $\Delta H$  — тепловой эффект химической реакции отверждения;  
 $\frac{\partial v}{\partial \tau}$  — реакция отверждения связующего;  
 $\Delta H_{\phi}$  — тепловой эффект фазового перехода.

В этом уравнении выражение  $\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \lambda_{x_i}(U, T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right]$  определяет перенос энергии теплопроводностью по координате  $x_i$ , а  $C_{п.г} \left( K_{x_i} \frac{\partial P_{п.г}}{\partial x_i} \right) \times \times \frac{\partial T}{\partial x_i}$  характеризует конвективный перенос энергии парогазовой смеси по координате  $x_i$ .

Источники энергии определяются фазовыми переходами и химической реакцией отверждения связующего. При движении поверхности фазового перехода происходит выделение (поглощение) скрытой теплоты кипения (конденсации).

Сформулируем те дополнительные условия, которые должны выполняться на поверхности кипения (конденсации).

Пусть поверхностью раздела фаз является функция  $x = \xi(\tau)$ . За время  $(\tau, \tau + \Delta\tau)$  граница фазового перехода  $X = \xi$  переместится от точки  $\xi = x^1$  до точки  $\xi = x^1 + \Delta\xi$ . При этом испаряется (либо конденсируется) масса  $\rho \Delta\xi$  ( $\rho_v$  — плотность испаряющейся (конденсирующейся) жидкости) и поглощается (либо выделяется) соответствующее количество теплоты  $r \Delta\xi$  ( $r$  — скрытая теплота фазового перехода).

На основе теплового баланса для точек границы фазового перехода  $\xi = x^1$  и  $\xi = x^2$  должно выполняться условие

$$\left[ \lambda_1(U, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x^1} - \lambda_2(U, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x^2} \right] \Delta\tau = r \rho_v \Delta\xi. \quad (22)$$

Здесь  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  — коэффициенты теплопроводности первой и второй фаз.

Переходя к пределу при  $\Delta\tau = 0$ , получаем дополнительное условие на границе раздела фаз

$$\left[ \lambda_1(U, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\xi} - \lambda_2(U, T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\xi} \right] = r \rho_v \frac{\partial \xi}{\partial \tau}. \quad (23)$$

На этой границе температура постоянна и равна температуре фазового перехода  $T(x, \tau) = T_{\phi}$ . Тепловые потоки разрывны и их разность равна  $r \rho_v \frac{\partial \xi}{\partial \tau}$ , где величина  $\partial \xi / \partial \tau$  представляет собой скорость движения фронта границы фазового перехода. Естественно, что в каждой из фаз температура  $T(x, \tau)$  должна удовлетворять уравнению теплопроводности (19).

Кроме того, в состав модели тепломассопереноса при прессовании ДСП должны войти следующие уравнения:

давления насыщенного пара

$$P_{п.п}(T) = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \alpha_3 T^3 + \alpha_4 T^4, \quad (24)$$

где  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  — известные аппроксимационные коэффициенты; состояния парогазовой смеси

$$\rho_{п.г}(T, \tau) = P_{п.г} / (R_{п.г} T), \quad (25)$$

где  $R_{п.г}$  — универсальная газовая постоянная для парогазовой смеси; реакции отверждения связующего

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = (1 - v) f(T_{см}, C_c), \quad (26)$$

где  $v$  — степень отверждения смолы;  
 $f(T_{см}, C_c)$  — функция, задающая скорость отверждения смолы в зависимости от температуры смолы  $T_{см}$  и концентрации связующего  $C_c$ ;

изменения концентрации связующего

$$\frac{\partial C_c}{\partial \tau} = \begin{cases} \frac{-C_c^2 P_v}{\rho_{см} \bar{m} (1 - \Pi(\mathbf{x}))} \frac{\partial U}{\partial \tau}, & \text{если } \frac{\partial U}{\partial \tau} < 0; \\ 0, & \text{если } \frac{\partial U}{\partial \tau} \geq 0, \end{cases} \quad (27)$$

где  $\bar{m}$  — отношение массы связующего в абс. сухом состоянии к исходной массе абс. сухой стружки;  
 $\rho_{см}$  — плотность смолы.

#### Начальные условия для задачи тепломассопереноса

Начальные условия относительно определяемых функций вполне естественны и сводятся к заданию равномерного распределения по толщине плиты парогазового давления, температурного и влажностного полей:

$$P_{п.г}(x_1, x_2, x_3, \tau) |_{\tau=0} = P_a; \quad (28)$$

$$T(x_1, x_2, x_3, \tau) |_{\tau=0} = T_0; \quad (29)$$

$$U(x_1, x_2, x_3, \tau) |_{\tau=0} = U_0, \quad (30)$$

где  $P_a$  — атмосферное давление.

#### Граничные условия для задачи тепломассопереноса

Граничные условия на верхней и нижней плоскостях ДСП будут определяться температурой плит пресса:

$$T(x_1, x_2, 0, \tau) = T_n(\tau). \quad (31)$$

На боковых поверхностях ДСП происходит теплообмен с окружающей средой, а следовательно, относительно тепловых потоков граничные условия на боковых гранях параллелепипеда  $G = \{0 \leq x_1 \leq L, 0 \leq x_2 \leq b, 0 \leq x_3 \leq h\}$  запишутся следующим образом:

$$\lambda_{x_1} \frac{\partial T(x_1, x_2, x_3, \tau)}{\partial x_1} + \alpha_{x_1} (T_c - T(x_1, x_2, x_3, \tau)) = 0; \quad (32)$$

$$\lambda_{x_2} \frac{\partial T(x_1, x_2, x_3, \tau)}{\partial x_2} + \alpha_{x_2} (T_c - T(x_1, x_2, x_3, \tau)) = 0, \quad (33)$$

где  $\alpha_{x_i}$  — коэффициент теплоотдачи на поверхности ДСП;  
 $T_c$  — температура окружающей среды.

Граничные условия для массового потока на плоскостях прессования будут существенно зависеть от типа поддонов, на которых производится прессование.

Так, для непроницаемых поддонов эти условия кусочно непрерывны, а точку разрыва можно найти по моменту, когда давление прессования упадет до величины, определяемой парогазовым давлением на основе выражения

$$\sigma_{ср} = \frac{1}{Lb_1} \iint_{(S)} (\Pi(\mathbf{x}))^2 P(\mathbf{x}) ds \geq \sigma_c, \quad (34)$$

т. е. усредненного по верхней площади  $S$  плиты значения парогазового давления с учетом пористости ДСП.

В этом случае между поддоном и ДСП образуется некоторая воздушная прослойка (контактный слой), через которую будет осуществляться массообмен с окружающей средой. Интенсивность его прямо пропорциональна разности давлений в ДСП и контактном слое. Значение коэффициента пропорциональности (коэффициента массообмена)  $\beta_p$  будет определяться гидродинамическими характеристиками этого образовавшегося слоя, который, в свою очередь, будет зависеть и от значения разности ( $\sigma_{cp} - \sigma_\tau$ ), определяемой по выражению (34):

$$\frac{\partial P_{п.г}(x_1, x_2, \overset{h}{0}, \tau)}{\partial x_3} = 0, \text{ если } \sigma_\tau \geq P_{п.г}(x_1, x_2, \overset{h}{0}, \tau); \quad (35)$$

$$- K_p \frac{\partial P_{п.г}(x_1, x_2, \overset{h}{0}, \tau)}{\partial x_3} + \beta_p (P_a - P_{п.г} \times \\ \times (x_1, x_2, \overset{h}{0}, \tau)) = 0, \text{ если } \sigma_\tau \leq \sigma_{cp}, \quad (36)$$

где  $\beta_p$  — коэффициент влагообмена, отнесенный к разности парциальных давлений;

$K_p$  — коэффициент молярного переноса пара.

Таким образом, когда  $(\sigma_{cp} - \sigma_\tau) \leq 0$ , задача должна решаться с граничным условием (35) (граничное условие второго рода), а когда  $(\sigma_{cp} - \sigma_\tau) \geq 0$ , то в расчетах температурных и влажностных полей будет участвовать выражение (36), т. е. граничное условие третьего рода.

В случае прессования на проницаемых поддонах граничные условия для парогазового давления на поверхностях соприкосновения плит пресса и ДСП можно записать в виде уравнения

$$- K_p \frac{\partial P_{п.г}(x_1, x_2, \overset{h}{0}, \tau)}{\partial x_3} + \beta_p (P_a - P_{п.г}(x_1, x_2, \overset{h}{0}, \tau)) = 0, \quad (37)$$

где коэффициенты молярного переноса пара будут определяться фильтрационными характеристиками проницаемого поддона.

Что касается граничных условий по переносу массы на боковых поверхностях ДСП, то они будут одинаковы для прессования как на непроницаемых, так и на проницаемых поддонах:

$$- K_p \frac{\partial P_{п.г}(\overset{l}{0}, x_2, x_3, \tau)}{\partial x_1} + \beta_p (P_a - P_{п.г}(\overset{l}{0}, x_2, x_3, \tau)) = 0; \quad (38)$$

$$- K_p \frac{\partial P_{п.г}(x_1, \overset{b}{0}, x_3, \tau)}{\partial x_2} + \beta_p (P_a - P_{п.г}(x_1, \overset{b}{0}, x_3, \tau)) = 0. \quad (39)$$

В уравнениях (38) и (39) коэффициенты влагообмена  $\beta_p$  являются функциями внешних условий (температуры внешней среды и равновесного влагосодержания), в которых ведется прессование.

Вышеприведенная система уравнений (19), (21) — (39) может быть решена, если известны теплофизические характеристики ДСП, а также величины, описывающие кинетику отверждения связующего [3].

#### *Алгоритмические аспекты математического моделирования физико-механических свойств ДСП*

Реологическая модель представляет собой коэффициентную обратную задачу. Она состоит в том, что на основании материалов экспериментов необходимо найти выражение для функции и значения параметров, входящих в коэффициенты уравнений (11) — (16).

Распространенным способом решения задач типа (11) — (16) является сведение их к экстремальным задачам о минимуме функционала, оценивающего невязку выполнения условия (11).

При выборе численного метода для решения задачи тепломассопереноса при прессовании ДСП, сформулированной в терминах частных производных, основное внимание должно быть уделено аппроксимационной точности и устойчивости вычислительной схемы. Данные требования в достаточной для практики степени могут быть удовлетворены схемами разностных аппроксимаций.

Универсальным методом, пригодным для решения задач тепломассопереноса с переменными и даже разрывными коэффициентами в произвольной области любого числа измерений, является локально-одномерный метод. При его построении основную роль играет возможность представления операторов уравнений переноса теплоты и массы в виде суммы операторов более простой структуры, что в уравнениях (17), (19) реализовано через аддитивность операторов дивергенции потоков массы и теплоты [4].

Учет фазовый переход в предлагаемой модели можно двумя способами.

Первый состоит в том, что кроме температуры и влагосодержания, определяется в явном виде функция, характеризующая положение фронта фазового перехода  $\xi(\tau)$ , т. е. и для уравнения (17) в вычислительную схему включается его разностная аппроксимация. Однако этот подход ведет просто к увеличению размерности численного метода.

Второй подход основан на введении  $\delta$ -функции Дирака, с помощью которой уравнение (17) запишется следующим образом [5]:

$$\begin{aligned} [C(U, T) + r\delta(T - T_\phi)] \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{x_i} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \\ &+ \sum_{i=1}^3 C_{п.г} \left( K_{x_i} \frac{\partial P_{п.г}}{\partial x_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} + \Delta H \frac{\partial v}{\partial \tau}; \\ C(U, T) &= \begin{cases} C_1(U, T); & T < T_\phi; \\ C_2(U, T); & T > T_\phi; \end{cases} \\ \lambda_{x_i}(U, T) &= \begin{cases} \lambda_1(U, T); & T < T_\phi; \\ \lambda_2(U, T); & T > T_\phi. \end{cases} \end{aligned} \quad (40)$$

Для численного решения сформулированной задачи можно применить метод сглаживания, когда  $\delta$ -функция приближенно заменяется  $\delta$ -образной функцией  $\delta(T - T_\phi, \Delta)$ , отличной от нуля только на интервале  $(T_\phi - \Delta, T_\phi + \Delta)$  и удовлетворяющей условию нормировки

$$\int_{T_\phi - \Delta}^{T_\phi + \Delta} \delta(T - T_\phi, \Delta) dT = 1. \quad (41)$$

Так как  $\delta$ -образная функция формируется по температуре, то данный прием применим для любого числа измерений и любого числа фаз.

Следовательно, описанный выше прием существенно упрощает метод решения задачи тепломассопереноса при прессовании ДСП.

Исходя из требований аппроксимационной точности и устойчивости вычислительных схем были проведены тестовые расчеты для задачи тепломассообмена. Один из этих результатов приведен на рис. 3, 4. Сравнение результатов тестирования и экспериментальных данных по высокотемпературному прессованию подтвердило приемлемость пред-

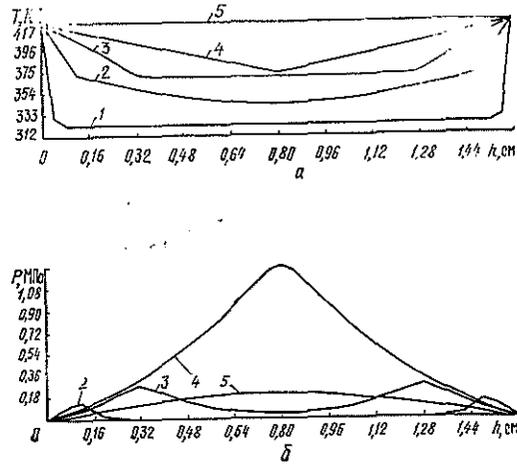


Рис. 3. Распределение температуры  $T$  (а) и давления  $P$  (б) по толщине плиты при различной продолжительности процесса: 1—0,0; 2—0,1; 3—1,3; 4—6,9; 5—8,3 мин

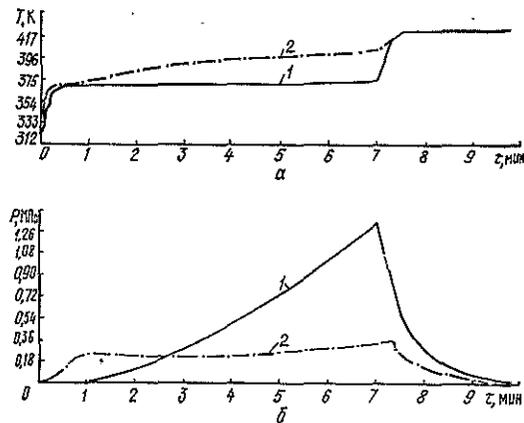


Рис. 4. Распределение температуры (а) и давления (б) в центре плиты (1) и на 1/3 ее толщины (2)

лагаемых моделей и численных методов для расчетов физико-механических свойств ДСП.

Расчет прочностных свойств готовых изделий может быть проведен в соответствии с методиками, изложенными в [6].

#### Результаты расчетов физико-механических свойств ДСП

В подавляющем большинстве практических задач оптимального управления приходится отыскивать глобальное решение исходя из некоторого априори известного опорного решения (что в рамках многомерной оптимизации уже является очень сложной вычислительной задачей), которое на последующих шагах вычислительного алгоритма может быть улучшено в соответствии с выбранным критерием оптимизации.

Предлагаемая выше комплексная модель прогнозирования физико-механических свойств ДСП позволяет реализовать определение этого опорного решения, а также может составить ядро вычислительной схемы поиска экстремума функции многих переменных, к которой, как правило, сводятся все численные методы оптимального управления [1].

Компонентами вектора управления в рассматриваемой задаче являются коэффициенты, определяющие режим прессования (выражение (6)), температура плит пресса, влагосодержание ДСП, параметры, характеризующие расход связующего, фракционный состав ДСП.

Пример расчетов конечных прочностных характеристик приведен на рис. 5.

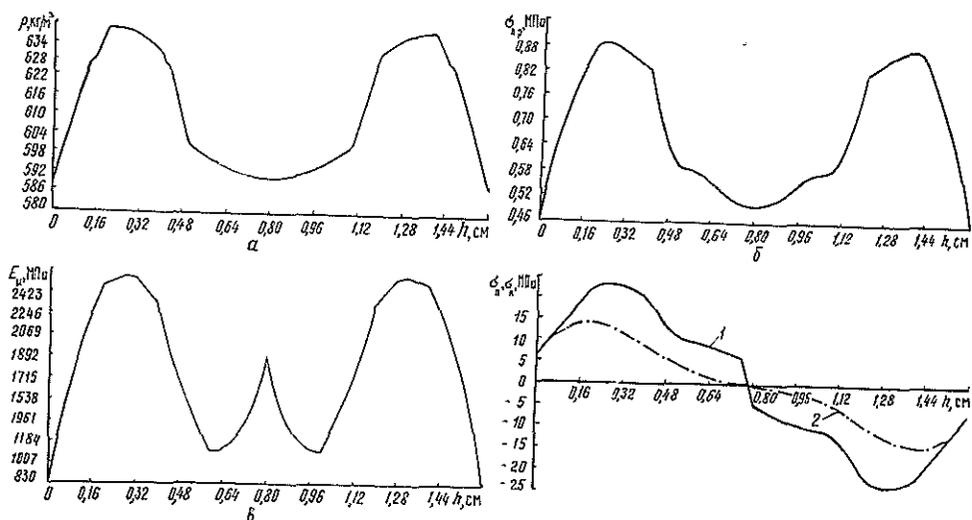


Рис. 5. Конечные прочностные характеристики плиты:  $a$  — распределение плотности  $\rho$  по толщине;  $b$  — предел прочности при растяжении  $\sigma_{п.р}$ ;  $v$  — модуль упругости при изгибе  $E_n$ ;  $z$  — предел прочности при изгибе; 1 — распределение прочности  $\sigma_n$ ; 2 — распределение напряжений  $\sigma_n$

Таким образом, анализ результатов расчетов свидетельствует о корректности предлагаемой модели прогнозирования физико-механических свойств ДСП и позволяет рекомендовать данную модель при проведении инженерных расчетов, связанных с определением прочностных характеристик ряда композиционных материалов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Евтушенко Ю. Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации.— М.: Наука, 1982.— 432 с. [2]. Лыков А. В. Тепло-массообмен. Справочник.— М.: Энергия, 1978.— 479 с. [3]. Обливин А. Н., Воскресенский А. К., Семенов Ю. П. Тепло- и массоперенос в производстве древесностружечных плит.— М.: Лесн. пром-сть, 1978.— 192 с. [4]. Самарский А. А. Теория разностных схем.— М.: Наука, 1977.— 656 с. [5]. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики.— М.: Наука, 1977.— 735 с. [6]. Тулузак Д. В. Формирование прочности древесностружечных плит в процессе прессования: Дис. ... канд. техн. наук.— М., 1991.— 266 с.

Поступила 8 августа 1994 г.

УДК 674.093.6

*Л. С. СУРОВЦЕВА, З. А. ВОЛКОВА*

Суровцева Любовь Савват'евна 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.

### ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НИЗКОКАЧЕСТВЕННЫХ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ НА ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ПОДДОНОВ

Рассмотрена возможность использования низкокачественных пиломатериалов длиной 2...6 м IV сорта (ГОСТ 8486—86) для выработки заготовок для поддонов.

The possibility of using low-grade lumber of 2...6 m long, IV grade (GOST 8486 - 86) for making workpieces for trays has been considered.

При переработке лесоматериалов необходимо обеспечить наиболее полное и рациональное использование древесины.

В статье рассматривается задача выработки заготовок для поддонов из пиломатериалов, внутреннего рынка, получаемых попутно при выпилке пиломатериалов экспортного назначения на лесопильно-деревообрабатывающих предприятиях г. Архангельска.

Партия пиломатериалов, предлагаемая к раскрою, была представлена в основном досками IV сорта (ГОСТ 8486—86) длиной 2...6 м, шириной 100...225 мм, толщиной 22 и 25 мм, влажностью 60...80%. Распределение досок по сечениям в процентах от их общего числа приведено в табл. 1.

Доля пиломатериалов толщиной 22 и 25 мм составила соответственно 50,3 и 49,7%. Кроме того, у 7% досок по их длине имела место разнотолщинность в пределах от 0,2 до 1,5 мм.

Таблица 1

Размеры сечения, мм	Доля досок, %	Размеры сечения, мм	Доля досок, %
25 × 225	15,9	25 × 150	11,1
22 × 225	4,7	22 × 150	8,2
25 × 200	2,9	25 × 125	4,6
25 × 200	7,6	22 × 125	7,0
25 × 175	12,3	25 × 100	3,5
22 × 175	18,1	22 × 100	3,5

Качество досок определяется в основном дефектами обработки, а также пороками древесины. Обзол имели до 74 % досок, в том числе: частично на одной кромке — 20,5 %, на двух — 29,8 %; полностью на одной кромке — 4,1 %, на двух — 11,1 %; частично на одной и полностью на другой — 8,2 %. Сплошного обзола (горбыля) не наблюдалось. Сплошную синеву имели 5,3 %, от общего числа досок; синеу и гниль — 5,2 %; сучки размером более 30 мм — 1,8 %.

Доски на заготовки для поддонов раскраивали по спецификации покупателя. Согласно его требованиям заготовки для поддонов должны иметь влажность  $(20 \pm 2)$  % и разнотолщинность до 2 мм, не должны содержать обзол, синеву, гниль, червоточину и сучки размером более 30 мм. По спецификации заготовки при толщине 22 мм должны иметь ширину 145 и 100 мм, при толщине 14...19 мм — 73...117 мм. Длина заготовок для различных сечений изменялась в пределах от 800 до 1200 мм.

При раскросе низкокачественных пиломатериалов стояла задача получения наибольшего объемного выхода спецификационных заготовок. Анализ раскроса досок на заготовки показал, что объемный выход колебался от 0 до 90 % в основном из-за наличия пороков и дефектов обработки, а также из-за несоответствия толщины доски толщине заготовки. Только у 38 % досок объемный выход составил более 50 %. Из 12,3 % досок вообще было невозможно получить спецификационные заготовки из-за синевы, гнили и сучков. У остальных пиломатериалов объемный выход колебался от 11 до 50 %. Средний объемный выход в исследуемой партии досок составил 42,5 %, норма расхода досок для производства 1 м<sup>3</sup> заготовок для поддонов — 2,34 м<sup>3</sup>.

Для увеличения объемного выхода была предпринята попытка скорректировать спецификацию покупателя с учетом размерно-качественной характеристики досок. По результатам раскроса установлено, что основное количество заготовок (около 70 %) имело ширину 145 или 100 мм и длину 1200 мм. Поэтому в предлагаемой нами спецификации оставлены ширины 75, 100, 145 мм, длины 800, 1000, 1200 мм и толщины 22, 25 мм.

При выпуске заготовок толщиной, равной или близкой к толщине доски, кроме увеличения объемного выхода, значительно уменьшается объем снимаемого слоя древесины. При выработке заготовок толщиной 22 и 25 мм толщину снимаемого слоя до 3 мм (с учетом припусков на усушку) имеют 93,6 % досок, свыше 3 мм — 6,4 %. Последние необходимо фрезеровать дважды. При толщине заготовок 22 мм 52 % пиломатериалов необходимо фрезеровать два раза для получения спецификационной толщины заготовок, что резко увеличивает трудо- и энергозатраты, а также усложняет технологию выработки заготовок для поддонов.

При распиловке досок для заготовок длиной 1200, 1000, и 800 мм получен выход соответственно 45,8; 37,6 и 16,6 %. При раскросе пиломатериалов длиной 2 м спецификационные заготовки имели длину, крат-

Таблица 2

Длина заготовок, мм	Доля заготовок, %, при кратности, шт.				
	1	2	3	4	5
1200	28	16	20	24	12
1000	12	30	20	19	19
800	11	57	5	22	5

ную длине доски. Распределение заготовок для поддонов, выпиленных по длине доски, приведено в табл. 2.

Средний объемный выход заготовок по новой спецификации составил 47,6 %; норма расхода пиломатериалов на выпуск 1 м<sup>3</sup> заготовок — 2,1 м<sup>3</sup>, т. е. применение новой спецификации позволило уменьшить норму расхода на 0,24 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Высокая норма расхода связана с низким качеством пиломатериалов. Но если цена 1 м<sup>3</sup> заготовок будет не менее чем в 2,5 раза превышать цену 1 м<sup>3</sup> пиломатериалов IV сорта длиной 2...6 м (ГОСТ 8486—86), то, несмотря на низкий выход заготовок для поддонов, предприятие, их производящее, может получить прибыль от реализации при незначительных затратах на производство.

Поступила 28 июля 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 более 70 научных трудов в области базирования при производстве пиломатериалов.

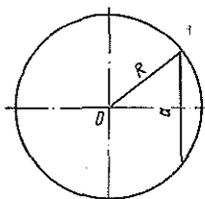
### ВЛИЯНИЕ ШИРИНЫ ПЛАСТИ НА ХАРАКТЕР ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БРУСЬЕВ

Рассмотрен вопрос эффективного раскроя бревен на пиломатериалы стандартных размеров исходя из условия деформируемости продольной оси в прямоугольной системе координат в зависимости от ширины формируемой технологической базы.

The problem of efficient logs cutting into lumber of standard dimensions subject to deformation condition of longitudinal axis in the Dekart system of coordinates depending on the width of the formed technological base has been considered.

Для разработки требований по снижению средствами технологии способности древесины к деформированию рассмотрены основные факторы пооперационного создания параметров ряда предметов труда (ПТ) [1].

Рис. 1. Схема обозначения параметров ( $R$  — радиус поперечного сечения;  $a$  — ширина пласти)



Одним из таких параметров является ширина формируемой пласти готового продукта (рис. 1). Как и глубина обработки (толщина удаляемого слоя древесины при формировании пласти), ширина обработки также является независимым фактором. В зарубежной практике при планировании раскря лесоматериалов определяют положение «первой открытой пласти», «первого реза», «наилучшей начальной поверхности (ННП)» [2—7]. Создание базы в значительной степени способствует наилучшей реализации всего плана распиловки, контролируемого микропроцессором, когда количество принимаемых решений превосходит возможности оператора.

В свою очередь, выполнение программы раскря по системе ННП также характеризуется условиями, задаваемыми размерами обрабатываемых бревен и технологическими факторами, относящимися к поставкам. Поскольку ширина и глубина обработки — производные назначаемой ширины поставки, то, например, для разработки требований к установке положения бревен или брусьев перед раскром необходимо оценить изменение предельного охвата диаметра вершинного торца предмета обработки (ПО) поставом пил при различных способах ориентирования.

Экспериментальная оценка влияния ширины пласти на характер деформированного состояния брусьев выполнена в следующей последовательности.

В качестве параметра оптимизации выбрана местная логарифмическая деформация  $\Psi$  в осевой зоне ПО, выраженная площадями координатной ячейки на комлевом торце бревна в начале  $S_0$  и конца  $S_k$  эксперимента:

$$\Psi = \ln(S_0/S_k). \quad (1)$$

Для оценки состояния брусьев применяли установку и методики ЦНИИМОДа, разработанные при нашем участии. Опытные распиловки бревен выполняли в лесопильном цехе АО «Лесозавод № 2» (г. Архангельск) в 1986—1992 гг. Анализировали результаты замеров брусьев, отношение ширины открытой пласти  $a$  которых к радиусу  $R$  бревна составляло 1,2; 1,5; 2,0.

Данные измерений приведены на рис. 2. Для охвата большего числа вариантов в отношении  $a/R$  принимали два значения ширины открытой пласти, причем

$$a_2 > a_1. \quad (2)$$

При этом подходе в поле анализа попадали и глубокие брусья, выпиленные из крупномерных бревен. Таким образом были проанализированы результаты замеров брусьев разной толщины, выпиленных из бревен широкого диаметра.

Характер распределения 1 и 2 (рис. 2) свидетельствует о значимости влияния величины  $a/R$  на деформационное состояние бруса. Наибольшее значение плотности вероятностей попадания случайной вели-

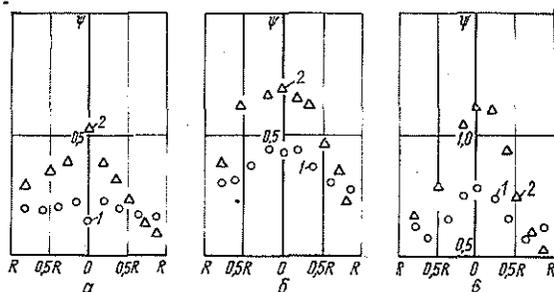


Рис. 2. Характер распределения значений функции  $\Psi$  в зависимости от  $a/R$ : а — 1,2; б — 1,5; в — 2,0; 1 — распределение 1; 2 — распределение 2

ны (проекция координаты опытной ячейки по вершинному торцу на комлевом) группируется в интервале  $[0,5R \dots 0,5R]$ . Однозначно рассматривается увеличение значений комплексного показателя (логарифмический коэффициент деформации  $\Psi$ ) с повышением  $a/R$ .

Влияние ширины формируемой пласти на характер деформированного состояния брусьев, как производной глубины обработки  $\Delta h$ , рассмотрен отдельно. Можно констатировать, что возрастание деформационной способности при  $a = \text{const}$  происходит с уменьшением диаметра перерабатываемых бревен.

При малых значениях отношения  $a/R$  увеличение ширины открытой пласти влияет на повышение  $\Psi$  скачкообразно. Причем если группировка  $\Psi$  по наименьшей открытой пласти 100 мм (рис. 2, а, распределение 1) имеет максимум в точках  $0,5R$  и  $R$  при незначительном перепаде, то с увеличением  $a$  наблюдается картина искривления оси бруса в большинстве случаев (рис. 2, а, распределение 2). Другой граничный случай при отношении  $a/R = 2$  характеризуется тремя максимумами (рис. 2, в, распределение 1) и в основе своей повторяет распределение 2 (рис. 2, а) с увеличением  $a$  (рис. 2, в, распределение 2).

Наиболее сконцентрированными по плотности относительно 0 являются распределения 1 и 2, приведенные на рис. 2, б. Они характеризуют большинство выявленных случаев. Отношение  $a/R = 1,5$  показывает, что анализу подвергали практически все выпиленные брусья, т. е. весь диапазон диаметров перерабатываемых бревен. Изменению деформационного состояния брусьев способствует в этом случае оба параметра:  $a$  и  $R$ . При одновременном изменении параметров независимо от направленности распределение не имеет минимума.

Полученные результаты позволяют перейти к рассмотрению вопроса о влиянии ориентации бревен перед раскроем на характер деформированного состояния бруса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Алексеев А. Е. О построении процесса производства пилопродукции с учетом способности древесины к деформированию // Лесн. журн.—1994.—№ 2.—С. 74—78.—(Изв. высш. учеб. заведений). [2]. Blackman T. Shutdown by its first owner, revamped mill makes money // Forest Industries.—1981.—Vol. 108, N 8.—P. 48—49. [3]. Carriage, computer networks increase recovery at headrig // Forest Industries.—1980.—Vol. 107, N 1.—P. 44—45. [4]. Griffin G. Computerized carriage boosts overrun by 10 % // Forest Industries.—1984.—Vol. 3, N 9.—P. 24—25. [5]. Moul A. Primary Breakdown // British Columbia Lumberman.—1980.—Vol. 66, N 4.—P. 16—21. [6]. Usenius A. Pelkanohiuksesta // Sahamies.—

1981.— N 9.— P. 259—262. [7]. Willamette. Pony mill upgrading results in improved utilization // Forest Endusties.— 1980.— Vol. 107, N 1.— P. 1.

Поступила 23 мая 1994 г.

УДК 674.093

А. Е. АЛЕКСЕЕВ

Архангельский государственный технический университет

### ВЛИЯНИЕ ГЛУБИНЫ ОБРАБОТКИ НА ХАРАКТЕР ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БРУСЬЕВ

Рассмотрен вопрос эффективного раскроя бревен на пиломатериалы стандартных размеров исходя из условия деформируемости продольной оси в прямоугольной системе координат в зависимости от величины снимаемого слоя древесины при формировании технологической базы.

The problem of efficient logs cutting into lumber of standard dimensions subject to deformation condition of longitudinal axis in the Dekart system of coordinates depending on the size of peeling while forming the technological base has been considered.

При любом реологическом поведении макромеханизм деформирования может быть оценен геометрически. Методика фиксирования и анализа заключается в исследовании полей траекторий  $Z = z(xy)$  в деформируемом объеме, определении жестких  $C_i$  (возникающих непосредственно после механической обработки) и деформационных  $V_i(x, y, z)$  (происходящих с течением времени) перемещений.

Выявление механизма процесса деформирования с помощью вариационных уравнений дает возможность анализировать деформируемость предметов труда (ПТ) методом скольжения баз, построенных для геометрических элементов поперечного сечения предметов обработки (ПО) и полученных в прямоугольной системе координат. При этом достигается взаимосвязь условий формообразования с соотношением размеров ПО и ПТ. Установление характерных стадий процесса деформирования позволяет решить вопрос о сохранении и длительности применения принятых граничных условий при реализации схемы формообразования ПТ.

Возникновение деформаций обуславливается удалением связующей влаги. Деформационное состояние точки в процессе выдержки или сушки описывается тензором конечных деформаций [2]:

$$T_e = \begin{pmatrix} E_{xx} & E_{xy} \\ E_{yx} & E_{yy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $E_{xx}$ ,  $E_{yy}$  — деформации точки в направлении осей  $X$  и  $Y$ ;  
 $E_{xy}$ ,  $E_{yx}$  — деформации сдвига.

В качестве рабочей принимали гипотезу о том, что увеличение толщины удаляемого слоя древесины влечет за собой изменение напряжений, способствующих искривлению продольной оси бруса. За параметр оптимизации выбран логарифмический коэффициент  $\Psi$ , представляющий собой отношение площадей координатной ячейки до  $S_0$  и после  $S_k$  проведения эксперимента:

$$\Psi = \ln(S_0/S_k). \quad (2)$$

Компоненты тензора конечных деформаций  $T_e$  определяют по следующим формулам [2]:

$$E_{xx} = 1/2 [(a_1/a_0)^2 - 1]; \quad (3)$$

$$E_{yy} = 1/2 [(b_1/b_0)^2 - 1]; \quad (4)$$

$$E_{xy} = E_{yx} = (a_1/a_0)(b_1/b_0)^2 \cos \rho, \quad (5)$$

где  $a_0, b_0$  — размеры элементарной ячейки до эксперимента в направлениях осей  $X$  и  $Y$ ;

$a_1, b_1$  — размеры элементарной ячейки после эксперимента в направлениях осей  $X$  и  $Y$ ;

$\rho$  — угол между сторонами ячейки после эксперимента.

Аналізу подвергали результаты обмера брусьев, у которых отношение толщины  $\Delta h$  удаляемого слоя древесины при их формировании к толщине бруса  $H$  (рис. 1) равнялось 5, 10, 15 %.

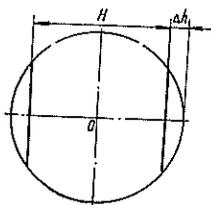


Рис. 1. Схема обозначения параметров:  $H$  — толщина бруса;  $\Delta h$  — толщина (глубина) удаляемого слоя древесины

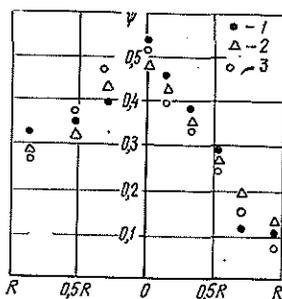


Рис. 2. Характер распределения значений функции  $\Psi$  в зависимости от  $\Delta h/H$ : 1 — 5; 2 — 10; 3 — 15 %

На рис. 2 приведены данные, характеризующие изменение положения координатных ячеек после формирования брусьев в указанных выше условиях.

При единичном характере изменения деформированного состояния бруса наблюдается асимметричность поля распределения отклонений, характеризующаяся разной насыщенностью рассеивания показаний и наличием зон поочередно перекрывающихся накопленных частот. Асимметрия определяется условиями формирования технологических баз. При формировании технологической базы с одной стороны бревна — на всю длину, а с другой — на длину удаляемой горбыльной зоны, наблюдается нарастание интенсивности искривления у вершинного торца. Далее интенсивность искривления ослабевает. Наибольшее значение накопленной частоты отклонения положения вершинного торца бревна относительно комлевого соответствует центру торца комля. Для принятой ориентации бревна перед раскроем (угол охвата вершинного торца бревна направляющими  $135^\circ$ ) и заданной шкале положения вершинного торца на комлевом наиболее вероятное искривление продольной оси

бревна может достигать величины  $R - r$  ( $R, r$  — комлевой и вершинный радиусы).

Обратное решение плоской задачи показывает, что искривление продольной оси бревна происходит несимметрично. Простая кривизна наблюдается на расстоянии до  $1/3$  длины от вершинного торца. Таким образом, искривление продольной оси бревна, спроецированное на плоскость комлевого торца, имеет завышенное относительно фактического значение.

Указанное состояние бруса в подавляющем большинстве случаев не определяется визуально и может не оказывать влияния на размеры пиломатериалов с учетом регламентируемых допусков. Для получения пиломатериалов на втором проходе брус кантуют на угол  $90^\circ$ , плоскость искривления оказывается в плоскости положения пил. Влияние стадийности обработки и технологии формирования сечений пиломатериалов на характер их деформированного состояния будет раскрыто отдельно.

Перемена ритмичности и интенсивности искривления от  $\Delta h/H$  связана с изменением технологических факторов, относящихся к поставкам. Толщина удаляемого слоя — субъект рационального использования объема древесины бревна при выработке пиломатериалов. Ранее решенная задача рационального планирования раскроя заключалась в определении поставок для каждой пары тонкой и толстой досок, удовлетворяющих выполнению одного из заданных критериев, которые обеспечивают получение наибольшего выхода пиломатериалов или толстых досок, а также др. [1]. При этом каждый из рассмотренных вариантов отличается от другого числом досок и их положением. Последнее определяется ориентацией бревна (бруса) по поставу инструмента лесопильного станка. При равенстве ряда поставок по числу досок толщина удаляемого слоя  $\Delta h$  для оптимальных различна. Для одних и тех же условий расчет поставок производили при изменении положения толстых досок в пределах пропиленной пласти бруса с шагом 1 мм. Выбирали один или несколько вариантов, обеспечивающих выполнение одного из заданных критериев. При равенстве выходов варианты отличались положением досок в поставе и толщиной удаляемого слоя. Поэтому на рис. 2 в изученных пределах наблюдается пересечение распределений относительных частот отклонений.

Учитывая изложенное, необходимо выделить два момента, характеризующих роль фактора  $\Delta h$  в понимании механики процесса деформирования.

Первый момент. При существующем плане раскроя толщина удаляемого слоя древесины не может служить фактором, влияющим на деформированное состояние предмета после обработки, поскольку является зависимой величиной. Для одного значения  $\Delta h/H$  можно составить разные поставки досок. Это отношение после детерминирования может быть включено в состав факторов, влияющих на искривление оси бревна по окончании его обработки. Абстрагируясь, например от поставок, и задавая минимальную ширину технологической базы (положение первой открытой пласти), можно достаточно точно выявить влияние глубины обработки  $\Delta h$  на процесс деформирования.

Второй момент. Глубина обработки как независимый фактор для изучения процесса деформирования предмета после его обработки может быть использована на стадии подготовки бревна к распиловке, т. е. при окантовке, базоформировании, оцилиндровке. На этапах первичной обработки обычно задают параметры полуфабриката — толщину и ширину. Финские специалисты в области лесопиления оценивают продуктивную зону в объеме бревна вписанным цилиндром. Таким образом, постоянное в пределах обусловленных границ значение толщины удаляемого слоя является однозначным и статически определенным.

Возвращаясь к рассмотрению условий деформированного состояния пилопродукции после механической обработки (после рассмотрения понятия  $\Delta h$ ), приведем эмпирическую зависимость влияния отношения  $\Delta h/H$  на логарифмический коэффициент деформации:

$$\Psi = 0,347 - 0,019 \ln(x).$$

Здесь сумма квадратов отклонений равна 0,2489;  $x = \Delta h/H$ .

При отношении  $x = \Delta h/H$ , равном 5, 10, 15 %, различие  $\Psi$  составляет соответственно 0,325; 0,306; 0,296.

Таким образом, с увеличением  $\Delta h$  при формировании технологической базы наблюдается снижение деформаций, что выражается в уменьшении искривления продольной оси бревна после его обработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Алексеев А. Е., Постников В. М. Расчет поставов при различных способах установки бревна перед раскромом // Совершенствование технологии подготовки сырья к раскрою: Науч. тр.—Архангельск. ЦИИМОД, 1988.—С. 87—96. [2]. Зарипов Ш. Г., Ларченко В. М., Ратников Н. В. К вопросу о деформационном состоянии древесины при сушке // Научно-технический и социальный прогресс лесопромышленного комплекса Восточно-Сибирского региона.—Красноярск: СибТИ, 1990.—С. 14.

Поступила 23 мая 1994 г.

## ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 947.992.3 : 630\*861.15

Л. А. МИЛОВИДОВА, Г. В. КОМАРОВА

Миловидова Любовь Анатольевна родилась в 1946 г., окончила в 1970 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии ЦБП Архангельского государственного технического университета. Имеет более 60 научных трудов в области производства беленых волокнистых полуфабрикатов.



Комарова Галина Владимировна родилась в 1947 г., окончила в 1970 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат химических наук, доцент кафедры технологии ЦБП Архангельского государственного технического университета. Имеет более 60 научных трудов в области производства белой целлюлозы.



## ВОЗМОЖНОСТЬ СНИЖЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ЛИСТВЕННОЙ СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ПЕРЕД ОТБЕЛКОЙ

Определены оптимальные условия предварительных обработок лиственной сульфатной целлюлозы водными растворами диоксида серы. Показано, что проведение предварительной обработки водным раствором диоксида серы (расход диоксида серы 5 кг/т, температура 40...60 °С, продолжительность 40...60 мин) приводит к снижению жесткости целлюлозы на 12...14 % при сокращении расхода хлора на отбелку на 15...17 % с сохранением белизны и прочности целлюлозы.

Optimal conditions of hardwood sulphate pretreatment with sulphur dioxide in aqueous solutions have been determined. It has been shown that carry out the sulphur dioxide aqueous solution pretreatment (sulphur dioxide consumption 5 kg/t, temperature 40...60 °C, time 40...60 min) results in pulp rigidity decrease by 12...14 % at chlorine bleaching consumption by 15...17 % retaining the whiteness and strength of pulp.

Переход на бесхлорные схемы отбелки сегодня возможен только путем совершенствования технологии отбелки кислородом и его соединениями. Включение ступени отбелки озоном в значительной степени решает проблему получения бесхлорной целлюлозы с высокой степенью белизны. Вместе с тем применение озона еще в большей степени, чем использование традиционных отбеливающих реагентов (пероксид водо-

рода и диоксид хлора), требует повышения степени делигнификации на стадиях отбелилки кислородом. По некоторым данным [3], максимально возможное снижение числа Каппа перед ступенью озоновой отбелилки обеспечивает лучшее сохранение вязкости беленой целлюлозы. Такой результат может быть получен ужесточением условий кислородно-щелочной отбелилки (КЩО) (что вряд ли целесообразно), применением двухступенчатой КЩО, а также использованием так называемых активирующих добавок перед КЩО.

Известен высокий эффект, достигаемый при обработках целлюлозы хлором или окислами азота (способ Пренокс) [1, 2, 4, 5, 7, 8, 10]. Применение хлора нецелесообразно по соображениям экологического характера, а также потому, что в этом случае нарушается система использования фильтрата после КЩО и передача его в общую схему регенерации химикатов. Использование оксидов азота затруднено, так как не известно соединения какого типа образуются при подобных обработках и их поведение в системе регенерации химикатов. Кроме того, проведение обработок требует установки специального оборудования. Несмотря на сравнительно широкую известность этого способа, до сих пор не идет речь о его промышленном внедрении.

В последнее время предложен эффективный способ предобработки сульфатной хвойной целлюлозы пероксимоносульфатом, позволяющий существенно (на 5...6 ед.) снизить число Каппа после КЩО при сохранении вязкости [6, 9]. Недостатки этого способа — дефицит реагента, необходимость жесткой хелатной обработки, чрезвычайно высокие расходы химикатов (30...32 кг/т).

Нами разрабатывается способ повышения делигнифицирующей способности ступени КЩО проведением обработок небеленой лиственной сульфатной целлюлозы растворами диоксида серы при различных рН.

Основными факторами, которые могут влиять на эффективность обработки целлюлозы растворами диоксида серы, являются рН, температура, расход  $SO_2$ , продолжительность обработки и концентрация массы. Для установления влияния этих факторов образцы лиственной сульфатной целлюлозы с жесткостью 80 п. ед. (18,7 ед. Каппа) обрабатывали водным раствором диоксида серы с рН 1,5; 4,5; 8,0...9,0. Расход  $SO_2$  изменяли от 5 до 20 кг/т; температуру — от 40 до 120 °С; продолжительность обработки — от 20 до 60 мин. Концентрация массы при обработках составляла 6 %. Результаты обработок представлены в табл. 1—4.

Влияние рН раствора и температуры иллюстрируется данными табл. 1. Следует отметить, что при обработке целлюлозы раствором

Таблица 1

Влияние температуры обработки и рН  
на показатели небеленой лиственной  
сульфатной целлюлозы

Раствор для обработки	Температура, °С	рН фильтрата	Жесткость, п. ед.	Белна, %
Диоксид серы	40	—	69,9	45,3
	60	—	69,2	46,4
Бисульфит натрия	60	4,0	68,7	47,4
	90	2,6	68,5	46,8
	120	2,2	60,0	45,5
Моносульфит натрия	60	7,9	67,6	46,4
	90	7,6	61,6	40,8
	120	7,3	62,0	41,3

Таблица 2

Влияние температуры и расхода  $\text{SO}_2$   
на показатели небеленой лиственной сульфатной целлюлозы

Температура, °С	Расход $\text{SO}_2$ , кг/т	pH фильтрата	Поглощение $\text{SO}_2$ , кг/т	Выход, %	Жесткость, п. ед.
40	—	7,0	—	98,0	80
	10	6,6	4,0	96,0	72
	15	6,3	3,5	95,1	72
	20	6,3	4,0	95,9	72
60	10	6,5	4,5	96,0	71
	15	6,3	4,0	96,0	71
	20	6,2	7,0	96,0	69

Примечание. Условия обработки: жесткость небеленой целлюлозы 80 п. ед.; раствор бисульфита с pH 4,5; концентрация массы 6 %; продолжительность 60 мин.

Таблица 3

Влияние продолжительности  
обработки моносульфитом натрия  
и концентрации массы на показатели  
небеленой лиственной сульфатной целлюлозы

Продолжительность обработки, мин	Концентрация массы, %	pH фильтрата	Жесткость, п. ед.	Число Каппа
20	6	8,5	74,3	16,3
40	6	8,6	73,7	—
60	6	8,6	70,0	—
80	6	8,6	69,8	16,1
60	10	8,4	71,0	16,1
60	6	8,8	70,0	—
60	3	8,8	69,2	—

Примечание. Условия обработки: исходный раствор моносульфита с pH 8,2; расход 5 кг/т; температура 60 °С.

бисульфита с повышением температуры до 120 °С наблюдается заметное снижение жесткости при одновременном снижении pH.

Как следует из представленных данных, pH обработки не влияет на конечный результат. Расход диоксида серы, равный 5 кг/т, является достаточным для достижения максимального эффекта. В среднем он составлял 4 кг/т. Оптимальная температура обработки 60 °С. Изменения концентрации массы в интервале от 3 до 10 % и продолжительности обработки от 20 до 80 мин практически не сказываются на снижении жесткости целлюлозы (табл. 3). Увеличение продолжительности обработки, как и повышение температуры, обеспечивает стабильность результатов обработки.

Основным фактором, оказывающим влияние на эффективность обработки, является, по-видимому, жесткость целлюлозы, поступающей на обработку. Снижение жесткости до 60 п. ед. и более уменьшает эффективность обработки, что подтверждается значениями числа Каппа, приведенными в табл. 5.

Для оценки влияния предварительных обработок на углубление делигнификации при КЩО использовали образцы целлюлозы с жест-

Таблица 4  
Влияние температуры и расхода моносульфита натрия на показатели небеленой лиственной сульфатной целлюлозы

Температура, °С	Расход SO <sub>2</sub> , кг/т	pH фильтрата	Поглощение SO <sub>2</sub> , кг/т	Выход, %	Жесткость, п. ед.
40	20	9,10	4,1	95,7	74,6
	25	9,15	3,5	95,3	72,1
	30	9,20	4,5	96,6	69,4
60	20	9,00	4,5	96,6	70,0
	25	9,20	7,2	96,2	69,5
	30	9,30	4,3	96,0	68,8
90	10	9,10	2,0	97,4	68,0
	15	8,80	1,7	97,0	68,3
	20	8,80	9,8	95,5	69,5
	25	7,80	6,3	96,4	69,5
	30	7,40	6,1	95,8	67,7

Примечание. Условия обработки: жесткость небеленой целлюлозы 80 п. ед.; раствор моносульфита с pH 9,0; концентрация массы 6 %; продолжительность 60 мин.

Таблица 5  
Влияние жесткости небеленой лиственной сульфатной целлюлозы на ее показатели после обработки

Жесткость небеленой целлюлозы, п. ед.	Показатели целлюлозы после обработки раствором					
	диоксида серы		бисульфита натрия		моносульфита натрия	
	Жесткость, п. ед.	Вязкость, МПа·с	Жесткость, п. ед.	Вязкость, МПа·с	Жесткость, п. ед.	Вязкость, МПа·с
93,0	—	—	81,0	—	81,0	—
80,0	—	—	71,0	—	70,0	—
72,0	59,3	80,6	55,3	131,4	54,0	139,1
67,0	—	—	57,0	—	—	—
60,0	42,4	78,6	54,0	100,5	—	—
56,0	—	—	49,0	90,5	50,5	71,1

Примечания. 1. Условия обработки: концентрация массы 4 %; температура 50 °С; продолжительность 60 мин; расход диоксида серы 5 кг/т. 2. Данные трех последних строк относятся к целлюлозе, полученной модифицированной варкой в производственных условиях.

костью 67,2 и 53,0 п. ед. Образцы обрабатывали раствором бисульфита с расходом SO<sub>2</sub> 5 кг/т при температуре 60 °С и концентрации массы 4 % в течение 60 мин. КЦО проводили при температуре 95...100 °С, концентрации массы 10 %, расходе каустика 25 кг/т, давлении кислорода 0,4 МПа в течение 1 ч. Результаты представлены в табл. 6. При использовании образца большей жесткости получен дополнительный эффект ее снижения после КЦО, который соответствует уменьшению жесткости, достигнутому предварительной обработкой. Для образца с меньшей жесткостью не зафиксировано ее снижение после обработки бисульфитом. Суммарное снижение жесткости составило 24 п. ед., что соответствует ее уменьшению на одной ступени КЦО. Эти результаты подтверждают ранее сделанное заключение о неэффективности предварительной обработки целлюлозы с жесткостью менее 60 п. ед.

Таблица 6  
Влияние предварительной обработки  
и степени КЩО на жесткость  
лиственной сульфатной целлюлозы

Схема обработки	Жесткость целлюлозы, п. ед.		
	исходной	после обработки $\text{NaHSO}_3$	после КЩО
КЩО	67,2	—	43,0
$\text{NaHSO}_3$ —	67,2	60,0	38,3
КЩО	53,0	52,0	28,2
»			

Таблица 7  
Влияние предварительной обработки на расход хлора  
и показатели белевой целлюлозы

Схема отбелики	Расход хлора, кг/т	Белизна, %	Разрывная длина, км	Сопротивление излому, ч. д. п.
X—Щ—Д—Щ—Д—К	45	88,1	8,55	545
$\text{NaHSO}_3$ —X—Щ— —Д—Щ—Д—К	40	88,5	8,00	572

Образец целлюлозы с жесткостью 67,2 п. ед. после делигнифицирующих ступеней КЩО и бисульфит — КЩО отбеливали по схеме X—Щ—Д—Щ—Д—К. Результаты отбелики приведены в табл. 7. Включение в схему отбелики ступени обработки бисульфитом при сохранении белизны и прочностных показателей целлюлозы позволило снизить суммарный расход хлора на 5 кг/т, что составило около 17 % от общего расхода активного хлора на отбелику.

### Выводы

1. Проведение предварительной обработки раствором диоксида серы обеспечивает снижение жесткости лиственной сульфатной целлюлозы на 12...14 %. Оптимальные условия обработки: продолжительность 60 мин; расход диоксида серы 5 кг/т; температура при использовании водных растворов  $\text{SO}_2$  40 °С, растворов моно- и бисульфита — 60 °С.

2. Основным фактором, определяющим эффективность обработки раствором диоксида серы, является жесткость небеленой целлюлозы. Для лиственной целлюлозы оптимальная жесткость составляет 65...75 п. ед.

3. Сочетание обработок водными растворами диоксида серы и КЩО позволяет получить дополнительное снижение жесткости перед отбеликой и сократить расход хлора на 15...17 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Samuelson O. Available and future applications of nitrogen compounds during bleaching // International Symposium on Wood and Pulp Chemistry.—France, 1987.—P. 301—307. [2]. Fossum G., Lindovis B., Persson L. G. // TAPPI J.—1983.—Vol. 66, N 12.—P. 60—62. [3]. Liebergott N., van Lierop B., Skothos A. A survey of the use in bleaching pulps. Part 1 // TAPPI J.—1992.—Vol. 75, N 1.—P. 145—152. [4]. Mill scale implementation of the recycled oxygen process / M. Muguét, P. Joly, D. Lachenal, B. Bohman // TAPPI J.—1990.—Vol. 73, N 12.—P. 127—137. [5]. Nitrogen dioxide preoxidation before oxygen delignification.

A process for a future? / B. Lindqvist, A. Marklund, L. A. Lindstrom, S. Norden // *Pulp and Paper Science*.—1988.—Vol. 12, N 6.—P. 161—166. [6]. Raganskas A. J. Investigation of dimethyldioxiranes bleaching reagent for kraft pulp // *TAPPI J.*—1993.—Vol. 76, N 7.—P. 87—90. [7]. Rasmussen D., Samuelson O. Optimization of NO<sub>2</sub>-treatment of kraft pulp // *Cellulose chem. technol.*—1989.—N 23.—P. 285—286. [8]. Samuelson O., Ojted U. Treatment of kraft pulp with nitrogen dioxide before oxygen bleaching // *Cellulose chem. technol.*—1987.—N 21.—P. 129—136. [9]. Springer E. L., Mcsweeney L. D. Treatment of softwood kraft pulps with peroxymonosulfate before oxygen delignification // *TAPPI J.*—1993.—Vol. 76, N 8.—P. 194—197. [10]. Thompson N. S., Corbett H. M. Effect of nitrogen dioxide pretreatments of some properties of oxygen-bleaching kraft pulps // *Cellulose chem. technol.*—1989.—N 22.—P. 623—631.

Поступила 27 апреля 1994 г.

УДК 676.164.023.12

Г. А. ПАЗУХИНА, М. В. ТЕПЛОУХОВА, Ф. Х. ХАКИМОВА



Пазухина Галина Александровна окончила Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор кафедры целлюлозно-бумажного производства С.-Петербургской лесотехнической академии. Имеет около 150 научных трудов в области разработки экологически надежных и экономически целесообразных способов получения целлюлозы с применением органических растворителей, перекисных соединений и биологических агентов.



Теплоухова Марина Владимировна в 1986 г. окончила Пермский политехнический институт, аспирант С.-Петербургской лесотехнической академии. Область научных интересов — разработка экологически безопасного способа получения белой целлюлозы без использования серы и хлора.



Хакимова Фирдавес Харисовна родилась в 1938 г., окончила в 1965 г. Уральский лесотехнический институт, кандидат химических наук, профессор, зав. кафедрой технологии целлюлозно-бумажного производства Пермского государственного технического университета. Имеет 113 научных трудов и 10 изобретений в области теории и технологии целлюлозы.

## ДЕЛИГНИФИКАЦИЯ ОРГАНСОЛЬВЕНТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ПЕРУКСУСНОЙ КИСЛОТОЙ И ПЕРОКСИДОМ ВОДОРОДА НА РАННИХ СТАДИЯХ ОТБЕЛКИ

Изложены результаты исследований делигнификации натронной органосольвентной целлюлозы из древесины осины перуксусной кислотой и пероксидом водорода на ранних ступенях отбелки.

Investigation results of delignification of soda organosolvent aspen wood pulp by peracetic acid and peroxide of hydrogen at early stages of bleaching have been presented.

При разработке новых технологий для производства целлюлозы особое внимание уделяется решению экологических проблем в сочетании с высоким качеством получаемого продукта. С этой точки зрения несомненный интерес представляет сольволизная технология, позволяющая исключить серосодержащие токсичные выбросы в окружающую среду, получить целлюлозу с низким содержанием остаточного лигнина при сохранении высоких показателей качества, создать замкнутый цикл использования воды и органического растворителя, выделить реакционноспособный лигнин, существенно сократить расходы тепла и химикатов, снизить капитальные затраты [2, 5].

Особую озабоченность вызывает присутствие в отбельных стоках и целлюлозных продуктах полихлорированных органических соединений, токсичный характер которых представляет опасность для окружающей среды и человека. В ближайшем будущем конкурентоспособность белимой целлюлозы для различных видов бумаги как на внешнем, так и на внутреннем рынке, может быть обеспечена лишь при условии отказа от применения активного хлора, а в дальнейшем — хлорсодержащих соединений.

В этом отношении перспективным является использование для делигнификации и отбелки целлюлозы пероксидных соединений, в том числе перуксусной кислоты, которая известна как сильный окислитель. Ее свойство легко окислять лигнин в кислой среде при минимальном воздействии на углеводы находит применение в разработке способов делигнификации древесины [1, 6]. В нейтральной и слабощелочной среде перуксусная кислота служит эффективным отбеливающим реагентом, который не удаляет лигнин [3]. При добелке целлюлозы перуксусной кислотой достигаются такие же (или более высокие) показатели белизны, вязкости, степени полимеризации и содержания  $\alpha$ -целлюлозы, как при добелке гипохлоритом натрия [4]. Однако ее применение в промышленности для отбелки целлюлозы сдерживается высокой стоимостью. В последние годы, в условиях обострения экологических проблем, перуксусную кислоту вновь рассматривают как возможную альтернативу диоксиду хлора. Особый интерес представляет использование ее в сочетании с другими бесхлорными реагентами, в частности с пероксидом водорода.

Цель данной работы — исследовать возможность применения перуксусной кислоты и пероксида водорода ( $H_2O_2$ ) на ранних стадиях отбелки органосольвентной целлюлозы.

Целлюлоза была получена натронной варкой древесины осины в системе вода — ограниченно смешивающийся с водой органический растворитель и имела выход 54 %, число Каппа 13 (жесткость 75 п. ед.), степень полимеризации в растворе железовиннонатриевого комплекса 1600, белизну 46,7 %.

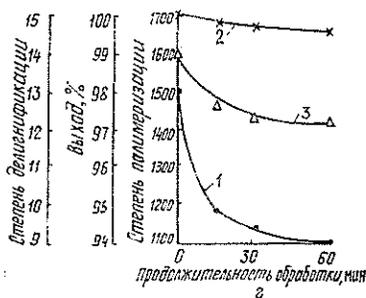
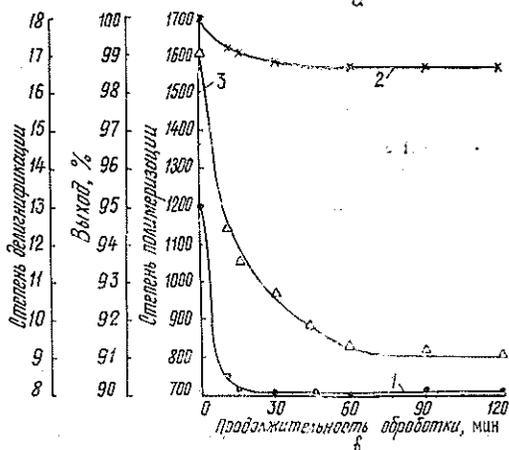
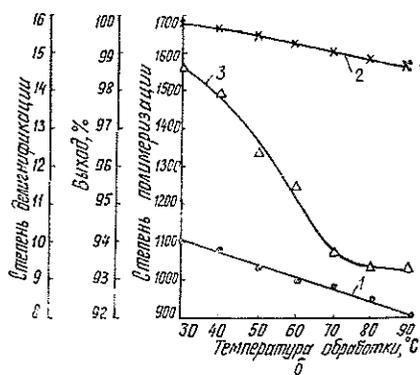
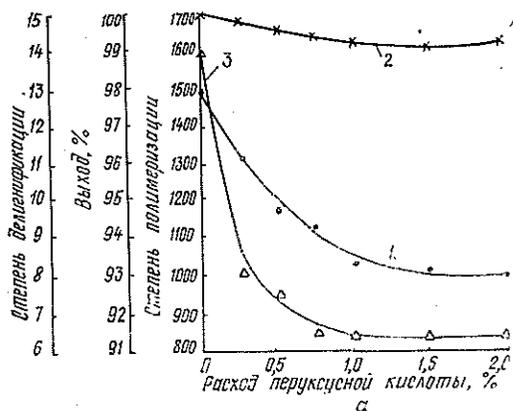
На первой стадии отбелки этой целлюлозы использовали перуксусную кислоту. Концентрация массы на всех стадиях отбелки 10 %. В про-

цессе исследований было установлено, что увеличение расхода перексусной кислоты от 0,25 до 1,00 % от массы целлюлозы при температуре 90 °С и продолжительности обработки 60 мин (см. рисунок а) заметно (на 4 единицы) снижает число Каппа и сопровождается небольшим уменьшением выхода и степени полимеризации целлюлозы. Дальнейшее увеличение расхода перексусной кислоты до 2 % практически не влияет на показатели целлюлозы.

Из рисунка б следует, что при расходе перексусной кислоты 1 %, температуре 30...40 °С и продолжительности обработки 15 мин имеет место заметная делигнификация целлюлозы. Повышение температуры интенсифицирует не только процесс делигнификации, но и деструкцию целлюлозы. При достижении температуры 70 °С отмечается значительное снижение (с 1600 до 1040) степени полимеризации целлюлозы, однако ее выход сохраняется на высоком уровне (98,6...99,0 %).

При расходе перексусной кислоты 1 % и температуре 90 °С процесс делигнификации заканчивается через 15 мин (рисунок в). Дальнейшая обработка приводит к снижению выхода и степени полимеризации целлюлозы без углубления ее делигнификации.

С целью снизить деструкцию применяли обработку целлюлозы перексусной кислотой (расход 1 %) при температуре 40 °С в течение 60 мин (рисунок г). В этих условиях была достигнута степень делигни-



Изменение степени делигнификации (1), выхода (2) и степени полимеризации (3) целлюлозы при обработке перексусной кислотой в зависимости от ее расхода (а), температуры (б), продолжительности обработки при температуре 90 (в) и 40 °С (г)

фикации, аналогичная обработке в течение 15 мин при температуре 90 °С, но при меньшем снижении степени полимеризации и выхода целлюлозы.

Таким образом, выявлены два режима обработки целлюлозы перуксусной кислотой, обеспечивающие примерно одинаковый уровень делигнификации, но по-разному сказывающиеся на степени полимеризации целлюлозы: обработка при температуре 40 °С в течение 60 мин (вариант 1) и температуре 90 °С в течение 15 мин (вариант 2).

В дальнейшем нами было исследовано влияние на показатели целлюлозы условий щелочения гидроксидом калия (КОН) после обработки перуксусной кислотой. В опытах использованы образцы целлюлозы, обработанные перуксусной кислотой по вариантам 1 и 2. Расход гидроксида калия изменяли в диапазоне 0,5...2,0 % от массы целлюлозы, температуру — 40...90 °С, продолжительность обработки — 30...60 мин. Поскольку аналогичные результаты по изменению показателей целлюлозы были получены для обоих вариантов обработки, в табл. 1 приведены только результаты щелочения после обработки по варианту 1.

Представленные в табл. 1 данные свидетельствуют о том, что применение щелочной обработки после делигнификации целлюлозы перуксусной кислотой позволяет дополнительно снизить ее жесткость на 6—7 п. ед., однако это сопровождается значительным уменьшением (до 2,0...5,9 %) выхода целлюлозы и некоторым снижением степени по-

Таблица 1  
Результаты обработки целлюлозы  
раствором гидроксида калия  
после предварительного воздействия  
перуксусной кислоты

Номер опыта	Условия обработки			Показатели целлюлозы		
	Расход КОН, % от массы целлюлозы	Температура, °С	Продолжительность, мин	Выход, % от исходной целлюлозы	Жесткость, п. ед.	Степень полимеризации
0*	—	—	—	99,5	57	1560
1	0,5	40	30	98,1	54	1510
2		90	30	97,6	53	1470
3		40	60	97,5	52	1480
4		90	60	96,8	52	1450
5	1,0	40	30	98,0	51	1500
6		60	30	97,2	50	1480
7		90	30	96,5	50	1510
8		40	60	97,2	50	1530
9		60	60	96,1	49	1460
10		90	60	95,7	49	1480
11	1,5	40	30	97,9	51	1480
12		60	30	97,2	51	1440
13		90	30	96,0	50	1460
14		40	60	97,0	50	1500
15		60	60	96,0	49	1550
16		90	60	95,0	48	1600
17	2,0	40	30	97,5	49	1540
18		90	30	95,5	47	1610
19		40	60	95,6	50	1650
20		90	60	94,1	47	1610

\* Здесь и в табл. 2 — это целлюлоза, предварительно обработанная перуксусной кислотой в течение 60 мин при температуре 40 °С.

лимеризации. Эффективными и достаточными следует считать следующие условия: расход гидроксида калия 1,0 % от массы целлюлозы, температура 60 °С, продолжительность обработки 60 мин (табл. 2).

Для улучшения результатов щелочения при обработке по варианту 1 были использованы добавки пероксида водорода в количестве от 0,25 до 2,00 % (табл. 2, опыты 22—24). С увеличением расхода пероксида водорода более чем на 1 % делигнифицирующий эффект и белизна целлюлозы практически не изменяются. Добавки пероксида водорода также приводят к значительному снижению выхода и степени полимеризации целлюлозы.

Таблица 2

Результаты обработки целлюлозы раствором гидроксида калия с добавлением пероксида водорода после предводительного воздействия перуксусной кислоты

Номер опыта	Расход реагентов, % от массы целлюлозы			Показатели целлюлозы			
	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	Трилон Б	Выход, % от исх. целлюлозы	Жесткость, п. ед.	Степень полимеризации	Белизна, %
0*	—	—	—	99,5	57	1560	56,3
21	—	—	—	96,6	47	1400	60,0
22	0,25	—	—	96,0	44	1300	66,8
23	1,00	—	—	95,5	41	1250	68,6
24	2,00	—	—	95,0	40	1210	69,5
25	1,00	3,0	0,2	96,7	38	1530	69,8
26	2,00	3,0	0,2	96,3	37	1480	71,5

В опытах 25, 26 щелочение проводили с добавками пероксида водорода и силиката натрия. Кроме того, в массу перед щелочной обработкой вводили трилон Б (опыты 25, 26). Это позволило несколько углубить делигнификацию целлюлозы (на 3 п. ед.), повысить ее белизну (соответственно на 1,2 и 2,0 %), выход (на 1,2 и 1,3 %) и степень полимеризации (почти на 300 единиц).

Таким образом, в целях интенсификации ступени щелочения после обработки целлюлозы перуксусной кислотой, сохранения на высоком уровне степени полимеризации целлюлозы и сокращения её потерь целесообразно ступень щелочения заменить отбелкой пероксидом водорода в щелочной среде при небольшом его расходе.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. А. с. 1308665 СССР, МКИ Д 21 С 3/20. Способ получения целлюлозного полуфабриката / М. А. Зильберглейт, Б. С. Симхович, В. М. Резников.— № 4004639/31-12; Заявлено 13.01.86; Опубл. 7.05.87, Бюл. № 17 // Открытия. Изобретения.— 1987.— № 17.— С. 93. [2]. Богомолов Б. Д., Грошев А. С. Делигнификация древесины органическими растворителями // Химия древесины.— 1980.— № 3.— С. 3—16. [3]. Лебедева И. А., Кречетова С. П. Отбелка древесной массы.— М.: Лесн. пром-сть, 1973.— С. 121—125. [4]. Наумова З. Н., Зарудская О. Л., Нагородский И. А. Отбелка целлюлозы надуксусной кислотой // Бум. пром-сть.— 1971.— № 3.— С. 19—20. [5]. Непенин Ю. Н., Мялицина Л. О., Жалина В. А. Варка целлюлозы с различными органическими растворителями: Обзор. информ.— М., 1984.— Вып. 8.— 40 с. [6]. Практические работы по химии древесины и целлюлозы / А. В. Оболенская, В. Л. Щеголев, Г. Л. Аким и др.— М.: Лесн. пром-сть, 1965.— С. 155—158.

Поступила 13 мая 1994 г.

УДК 676.164.023.12

Г. А. ПАЗУХИНА, М. В. ТЕПЛОУХОВА, Ф. Х. ХАКИМОВА

С.-Петербургская лесотехническая академия  
Пермский государственный технический университет

### ОТБЕЛКА ЩЕЛОЧНОЙ ОРГАНОСОЛЬВЕНТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ОСИНЫ ПЕРУКСУСНОЙ КИСЛОТОЙ И ПЕРОКСИДОМ ВОДОРОДА

Разработана четырехступенчатая схема отбелики перуксусной кислотой и пероксидом водорода, позволяющая получить продукт с белизной 82...86 %, показателем реверсии белизны 1,3...1,4 при потерях целлюлозы в процессе отбелики 5,5...6,3 % и хорошими показателями механической прочности.

A four-stage diagram of bleaching by peracetic acid and peroxide of hydrogen allowing to obtain a product with 82...86% whiteness, whiteness reversion value of 1,3...1,4 at pulp loss in the process of bleaching by 5,5...6,3% and good ratio of mechanical strength has been developed.

Жесткие требования к готовой продукции и сточным водам производства целлюлозы стимулируют разработку новых технологий получения беленой целлюлозы, исключающих применение серо- и хлорсодержащих соединений. Щелочная органосольвентная целлюлоза, подвергнутая отбелике с помощью кислородсодержащих реагентов — перуксусной кислоты и пероксида водорода — это полуфабрикат, приготовленный с помощью экологически надежной технологии.

В предыдущей статье (с. 32—36) были приведены результаты исследования влияния условий двух ступеней отбелики (перуксусной кислотой и пероксидом водорода) на показатели органосольвентной целлюлозы.

Цель данной работы — определить условия последующих ступеней отбелики органосольвентной целлюлозы перуксусной кислотой и пероксидом водорода.

Целлюлоза, полученная натронной варкой древесины осины в системе двух ограниченно смешивающихся жидкостей, имела выход 56,7 %, жесткость 75 п. ед., степень полимеризации в растворе железовиннонатриевого комплекса 1600, белизну 36 %.

На первой ступени отбелики использовали перуксусную кислоту в количестве 1 % от массы целлюлозы. После обработки перуксусной кислотой при температуре 40 °С в течение 60 мин целлюлоза имела выход 99,5 %, жесткость 57 п. ед., степень полимеризации 1560.

Ранее (с. 32—36) нами был сделан вывод о целесообразности проведения отбелики пероксидом водорода после обработки перуксусной кислотой. Расход пероксида водорода был принят равным 1 % и 2 % от массы целлюлозы, силиката натрия — 3 %, гидроксида калия — 1 %. Предварительно в массу вводили трилон Б в количестве 1 % от массы целлюлозы. Отбелику проводили при температуре 60 °С в течение 60 мин. При этих условиях в конце отбелики оставалось неизрасходованным 60 % пероксида водорода. Считается, что в конце отбелики должен оставаться избыток пероксида водорода (20...30 % от заданного ко-

личества)\*. При полном израсходовании пероксида водорода неизбежно потемнение целлюлозы из-за наличия щелочной среды. В связи с этим все последующие отбелки заканчивали при остаточном количестве пероксида водорода 20 % от начального (продолжительность 180 мин). Увеличение продолжительности отбелки позволило более эффективно использовать пероксид водорода и повысить белизну целлюлозы на 1,2 и 3,1 % (табл. 1, опыты 1 и 3), дополнительно уменьшить жесткость целлюлозы на 4 и 7 п. ед. Следует, однако, отметить, что увеличение продолжительности обработки целлюлозы пероксидом водорода сопровождается небольшим понижением выхода и степени полимеризации целлюлозы.

Таблица 1  
Результаты отбелки целлюлозы пероксидом водорода\* после предварительной обработки перуксусной кислотой

Номер опыта	Условия отбелки		Показатели целлюлозы			
	Расход $H_2O_2$ , % от массы целлюлозы	Продолжительность, мин	Выход, % от исходной целлюлозы	Жесткость, п. ед.	Степень полимеризации	Белизна, %
0**	—	—	99,5	57	1560	56,3
1	1	60	97,2	38	1530	69,8
2	1	180	96,7	34	1400	71,0
3	2	60	96,5	37	1480	71,5
4	2	180	96,3	30	1380	74,6

\* Отбелку пероксидом водорода проводили при температуре 60 °С.

\*\* Целлюлоза, предварительно обработанная перуксусной кислотой.

Как видно из табл. 1, более заметное изменение белизны и жесткости целлюлозы происходит при расходе пероксида водорода 2 % (опыты 2 и 4), что позволяет после двух ступеней отбелки получить продукт с белизной 74,6 %, т. е. полубеленый полуфабрикат.

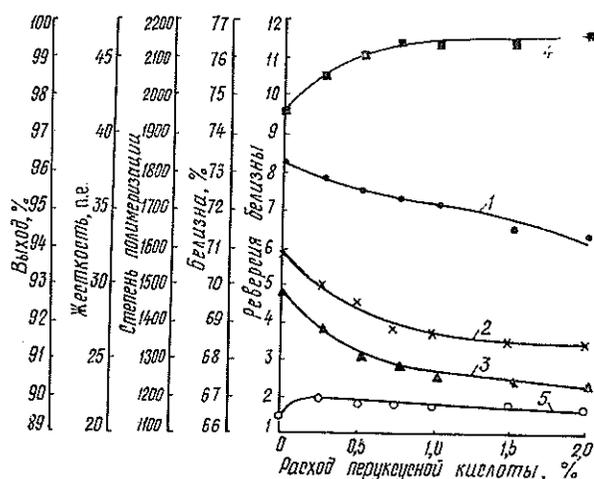
Анализ результатов эксперимента позволил сделать вывод, что на второй ступени целесообразно проводить отбелку пероксидом водорода при температуре 60 °С в течение 180 мин с расходом пероксида 2 %.

На рисунке показано влияние расхода перуксусной кислоты на третьей ступени отбелки на показатели целлюлозы (температура 40 °С, продолжительность обработки 60 мин). На данной ступени перуксусная кислота проявляет слабое делигнифицирующее действие. Увеличение расхода от 0,25 до 0,75 % сопровождается снижением жесткости на 5 п. ед., степени полимеризации на 200 единиц, выхода на 1 %, незначительным повышением белизны целлюлозы на 2 %, а также увеличением показателя реверсии белизны.

Таким образом, достаточным можно считать расход перуксусной кислоты на второй ступени отбелки 0,75 % от массы целлюлозы.

В табл. 2 приведены результаты отбелки целлюлозы по схеме перуксусная кислота — пероксид водорода — перуксусная кислота — пероксид водорода (ПК — ПВ — ПК — ПВ). При всех исследованных условиях отбелки пероксидом водорода (схемы 5—7) показатели выхода, жесткости и степени полимеризации целлюлозы находились примерно на одном уровне. Отбелка целлюлозы по схеме 5 обеспечивает невысо-

\* 2. Перминов Е. Д., Рачков Г. В. Исследование отбелки сульфатной целлюлозы с применением перекиси водорода / Сб. тр. ВНИИБ.— М.: Лесн. пром-сть, 1972.— С. 157—165.



Изменение выхода (1), жесткости (2), степени полимеризации (3), белизны (4) и реверсии белизны (5) целлюлозы в зависимости от расхода перекисной кислоты при обработке

Таблица 2

Влияние температуры отбеливания пероксидом водорода на показатели белевой целлюлозы

Номер опыта	Условия отбеливания на ступени				Показатели целлюлозы			
	I		II		Выход, % от исходной целлюлозы	Жесткость, п. е.	Степень полимеризации	Белизна, %
	Температура, °C	Продолжительность, мин	Температура, °C	Продолжительность, мин				
5	60	180	60	180	95,2	25	1300	78,0
6	60	180	80	120	95,0	25	1290	79,4
7	80	120	80	120	94,6	23	1250	82,0

Примечание. Расход пероксида водорода, силиката натрия, гидроксида калия и трилона Б соответственно составил 2,0; 3,0; 1,0 и 0,2 % от массы целлюлозы.

кий уровень белизны (78,0 %). Повышение температуры на последней ступени интенсифицирует процесс отбеливания, позволяя увеличить белизну и сократить продолжительность обработки со 180 до 120 мин (схема 6). Для дальнейшего повышения белизны в схеме 7 обе ступени отбеливания пероксидом водорода проводили при температуре 80 °C в течение 120 мин. Эта схема позволила получить белизну 82 % при сохранении на хорошем уровне степени полимеризации и выхода целлюлозы.

Ранее (с. 32—36) нами были разработаны два режима обработки целлюлозы перекисной кислотой, обеспечивающие близкий уровень делигнификации, но различно влияющие на степень полимеризации: вариант 1 (температура 40 °C, продолжительность 60 мин) обеспечивает незначительную деструкцию целлюлозы; вариант 2 (температура 90 °C, продолжительность 15 мин) приводит к более заметной деструкции целлюлозы.

Из данных, приведенных в табл. 3, следует, что при отбеливании по одинаковой схеме с равным расходом перекисной кислоты и пероксида водорода в варианте 2 получена целлюлоза более высокой белизны, но

Таблица 3

Результаты отбелки целлюлозы по схеме  
ПК — ПВ — ПК — ПВ

Показатели	Значения показателей для целлюлозы		
	исходной	прошедшей об- работку	
		Вари- ант 1	Вари- ант 2
Выход, %	100	94,6	93,2
Жесткость, п. ед.	75	23	16
Степень полимеризации	1600	1290	940
Белизна, %	36	82	86
Реверсия белизны	—	1,43	1,30
Показатель механической прочности:			
разрывная длина, м	7900	7600	7300
сопротивление излому, ч. д. п.	1280	420	320
сопротивление продавливанию, кПа	340	320	300

Примечание. Условие отбелки пероксидом водорода: продолжительность 120 мин при температуре 80 °С.

имеющая большую деструкцию, о чем свидетельствуют пониженные степень полимеризации и выход целлюлозы. Показатели механической прочности уменьшились незначительно.

Таким образом, для отбелки осинового органосольвентной целлюлозы без хлорсодержащих реагентов может быть рекомендована отбелка в четыре ступени по схеме перуксусная кислота — пероксид водорода — перуксусная кислота — пероксид водорода, которая позволяет получить белизну 82...86 % при выходе белевой целлюлозы 93,2...94,6 % и хороших показателях механической прочности, удовлетворяющих требованиям ГОСТ 28172 на марку ЛС-2 из смеси лиственных пород древесины и ГОСТ 3914 на марку Б-1 из хвойной древесины.

Поступила 10 августа 1994 г.

УДК 676.1.022

А. Г. АПУШКИНСКИЙ, Д. А. ПОНОМАРЕВ

С.-Петербургская лесотехническая академия

### СУЛЬФАТНАЯ ВАРКА ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ В ПРИСУТСТВИИ ЛЕСОХИМИЧЕСКОЙ СМОЛЫ

Установлено, что действие добавок омыленных смол пиролиза древесины и смол термического ожигания сульфатного и органосольвентного лигнинов проявляется в повышении селективности процесса делигнификации, уменьшении как доли непровара, так и жесткости полученной целлюлозы.

It has been stated that additives action of saponified wood pyrolysis resins and those of thermal fluidization of sulphate and organosolvent lignins shows itself in increasing selectivity of delignification process, decreasing both undercooked pulp and rigidity of the pulp obtained.

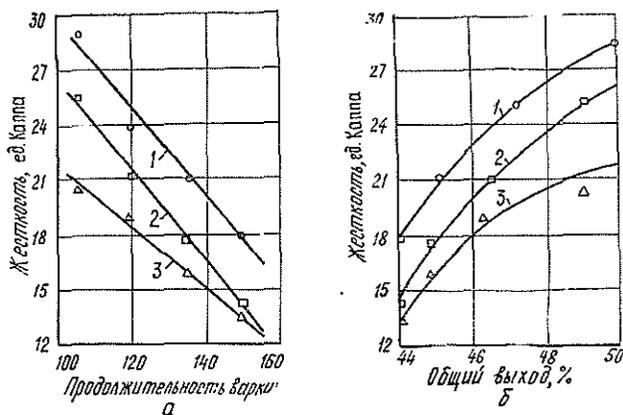
Известно, что фенолы растительного происхождения можно использовать как каталитические добавки при сульфатной варке древесины. Действие таких добавок, проявляющееся в повышении выхода целлю-

лозы, обычно связывают с ингибированием окислительной деструкции целлюлозы [6]. Известно [5], что в качестве таких фенолсодержащих катализаторов могут быть использованы смолы, образующиеся при пиролизе древесины. Применение их при сульфитной варке позволяет также эффективно решать проблемы смоляных затруднений, при этом дефицитные и дорогостоящие поверхностно-активные вещества (ПАВ), в частности хвойное талловое масло, заменяются дешевыми и доступными продуктами.

Нами предпринята попытка использовать в качестве добавки, улучшающей сульфатную варку целлюлозы, омыленную водорастворимую смолу — лесохимическую добавку (ЛХД) Ачинского лесохимического завода, являющуюся побочным продуктом пиролиза лиственной древесины. Согласно [4], в состав этой смолы входят до 50 % фенолов и их производных. Кроме того, в качестве добавок применены продукты термического ожигания сульфатного и органосольвентного лигнинов, содержащие фенолы, близкие по строению к фенолам смол пиролиза древесины.

Березовая щепка получена из шайб свежесрубленной древесины Ленинградской области. Сульфатные варки проведены в автоклавах вместимостью 250 мл на глицериновой бане. Характеристики используемого щелока: содержание активной щелочи 101 г/л; сульфидность 26 ‰; расход щелочи на варку 19 ‰ (в единицах  $\text{Na}_2\text{O}$ ). Гидромодуль 4 : 1. Подъем температуры до 170 °С — 90 мин, продолжительность стоянки при ней — 105...150 мин. Для варки использована воздушно-сухая щепка размером 20 × 30 мм, толщиной 3...4 мм. Навеску щепы (45 г в пересчете на абс. сухую) помещали в автоклав, куда добавляли 200 мл варочного раствора.

Анализ полученной целлюлозы выполнен по методикам [2], термоожигание гидролизного лигнина Ленинградского гидролизного завода и сульфатного лигнина Соломбальского ЦБК проведено нами по методике [3]. Результаты исследований, представленные в таблице и на рисунке, указывают на увеличение селективности процесса делигнификации в присутствии добавок, о чем можно судить по уменьшению как количества непровара, так и жесткости получаемой целлюлозы. Например, жесткость целлюлозы в контрольном опыте при варке в тече-



Зависимость жесткости целлюлозы от продолжительности варки (а) и выхода древесного остатка (б) без добавок омыленной водорастворимой смолы (1) и с добавками различной концентрации: 2—1; 3—2 % от абс. сухой древесины (продолжительность варки — в минутах).

## Влияние добавок на сульфатную варку березовой древесины

Продолжительность варки, мин	Добавка, % от абс. сухой древесины	Выход, % от абс. сухой древесины			Жесткость целлюлозы, ед. Каппа	
		целлюлозы	непровара	общий		
105	Контроль	46,8	3,7	50,5	29,0	
	ЛХД	47,1	2,0	49,1	25,4	
		47,6	1,4	49,0	20,5	
120	Контроль	45,0	2,1	47,1	24,5	
	ЛХД	43,4	1,2	46,6	21,2	
		46,4	—	46,4	19,0	
135	Контроль	44,4	0,7	45,1	21,1	
	ЛХД	44,3	0,4	44,7	17,8	
		44,7	—	44,7	16,0	
150	Контроль	44,1	—	44,1	18,0	
	ЛХД	44,0	—	44,0	14,4	
		44,0	—	44,0	13,5	
	Продукты термоожигения лигнина:					
	сульфатного	44,0	—	44,0	14,6	
органосольвентного	44,0	—	44,0	15,5		

Примечания. 1. В числителе приведены данные для концентрации ЛХД 1,0 %, в знаменателе — 2,0 %. 2. Концентрация сульфатного и органосольвентного лигнинов соответственно 1,5 и 2,0 %.

ние 150 мин составила 18 ед. Каппа, с добавкой 2 % ЛХД — 13,5 ед. Каппа, т. е. остаточного лигнина в этой целлюлозе примерно на 1 % меньше. При контрольной варке в течение 120 мин непровар был равен 2,1 %, при том же времени варки с добавкой ЛХД непровар отсутствовал.

Наиболее наглядно ускорение процесса делигнификации демонстрирует зависимость жесткости получаемой целлюлозы от продолжительности варки (рисунок а). Как видно из рисунка, целлюлозу жесткостью 18 ед. Каппа при сульфатной варке можно получить за 150 мин, а в тех же условиях при добавке 2 % ЛХД — за 125 мин, при добавке 1 % ЛХД — за 130...135 мин. Если проанализировать результаты варок с получением целлюлозы одинаковой жесткости, можно заметить, что использование добавки позволяет не только сократить продолжительность процесса делигнификации, но и увеличить на 1...3 % выход целлюлозы (рисунок б). Однако значительного увеличения выхода древесного остатка в зависимости от продолжительности варки, как приведено в работе [1], нами не наблюдалось.

С целью сопоставить влияние добавок на сульфатный процесс, кроме ЛХД, применены продукты термоожигения сульфатного и органосольвентного лигнинов. В этом случае также наблюдалось положительное влияние добавки на жесткость целлюлозы.

Эффект ускорения делигнификации с использованием лесохимических смол, по-видимому, связан с тем, что данные продукты, содержащие в своем составе фенольные и спиртовые группы, образуют в варочном щелоке феноляты и алкогольаты, которые являются мягкими основаниями. Их взаимодействие с простыми эфирными связями лигнина, в частности β—О—4, приводящее к переводу лигнина в раствор, происходит легче. Фенольная часть водорастворимой смолы участвует также в

окислительно-восстановительных превращениях полисахаридов, что уменьшает деструкцию последних. Проявление поверхностно-активных свойств предлагаемыми добавками может улучшать набухание клеточной стенки, делая более доступным подход реагентов для растворения лигнина.

Таким образом, показано, что использование лесохимической добавки Ашинского ЛХЗ, а также продуктов термоожигения сульфатного и гидролизного лигнинов позволяет сократить продолжительность процесса делигнификации и увеличить выход древесного остатка.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Гамидуллаев С. Н. Технология сульфатной целлюлозы из древесины березы с использованием лесохимических добавок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.—С.-Петербург, 1993.—19 с. [2]. Оболенская А. В., Ельницкая З. П., Леонovich А. А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы.—М.: Экология, 1991.—320 с. [3]. Ожижение гидролизного лигнина методом суперкритического растворения в низших алифатических спиртах. Влияние строения спирта / Ф. Тегай, Е. М. Рыжков, А. В. Мишкина и др. // Химия древесины.—1989.—№ 4.—С. 81—85. [4]. Получение воздуховолекающих добавок для бетона из сухоперегонных пироконденсатов / А. И. Киприанов, С. С. Сметанина, Е. В. Чупров, Н. Р. Колесов // Химическая и механическая переработка древесины и древесных отходов: Межвуз. сб. науч. тр.—Л.: ЛТА, 1981.—Вып. 7.—С. 11—15. [5]. Рихтер Н. Е., Леонovich А. А., Гамидуллаев С. Н. Щелочная делигнификация с использованием лесохимических продуктов пиролиза древесины: Обзор. инф.—М.: ВНИПИЭИлеспром, 1990.—40 с. [6]. Чудаков М. И. Растительные редокс-комплексы как катализаторы делигнификации древесины // Химия древесины.—1981.—№ 6.—С. 3—18.

Поступила 1 марта 1994 г.

УДК 676.163.5.

*З. А. КОРЖИЦКАЯ, Л. В. ГОЛУБЕВА, М. А. КОРЖОВА*

Коржицкая Зоя Александровна родилась в 1938 г., окончила в 1961 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института леса КарНЦ РАН. Имеет 103 печатных трудов в области исследования свойств низкокачественной древесины, коры и возможности их переработки в целлюлозно-бумажном производстве, а также влияния лесохозяйственных мероприятий на технологические свойства древесины.



Голубева Людмила Васильевна родилась в 1940 г., окончила в 1962 г. Ленинградскую лесотехническую академию, ведущий химик аналитической лаборатории Института леса КарНЦ РАН. Имеет 47 печатных трудов в области исследования свойств низкокачественной древесины, коры и возможности их переработки в целлюлозно-бумажном производстве, а также влияния экстрактивных веществ коры на процесс делигнификации.





Коржова Мария Андреевна родилась в 1945 г., окончила в 1968 г. Архангельский педагогический институт, главный химик аналитической лаборатории Института леса КарНЦ РАН. Имеет 26 печатных трудов в области исследования свойств тонкомерной древесины, коры.

## ПОЛУЧЕНИЕ СУЛЬФИТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ БЕРЕЗЫ

Показана возможность получения сульфитной целлюлозы из тонкомерной березы для массовых видов бумаги для печати.

The possibility of obtaining sulphite birch pulp for producing consumer kinds of printing of paper has been revealed.

На северо-западе России имеются значительные ресурсы лиственной древесины. Только в Карелии ежегодно не используется 700... 800 тыс. м<sup>3</sup> березы и осины от рубок главного пользования и 200... 300 тыс. м<sup>3</sup> от рубок ухода. В то же время, сульфитное производство испытывает дефицит сырья. Проблема использования древесины березы в сульфитно-целлюлозном производстве не решена до сих пор из-за возникающих смоляных затруднений. Для небеленой целлюлозы она может быть решена за счет отделения мелкого волокна, что экономически невыгодно, но возникает вопрос с его утилизацией. Для беленой целлюлозы смоляные затруднения можно устранить путем использования дорогих и дефицитных ПАВ, замены молекулярного хлора на диоксид.

Известно [1], что щелочная обработка эффективно удаляет экстрактивные вещества из сульфитной целлюлозы. Омыление и превращение части «смолы» в растворимые мыла способствует дальнейшему удалению их при промывке массы. Они являются натуральными ПАВ и помогают удалять нерастворимые «смолы» путем неравновесных процессов эмульгирования и соллобилизации. Добавка пероксида водорода на

Т а б л и ц а 1

Химический состав тонкомерной древесины березы  
(% от абс. сухой навески)

Показатели	Значения показателей для свежесрубленной древесины
Вещества, экстрагируемые спиртобензолом	2,56
Лигнин	20,20
Полисахариды по РВ	75,54
Моносахариды (в пересчете на полисахариды):	
галактоза	1,05
глюкоза	45,42
манноза	3,49
арабиноза	1,83
ксилоза	23,85
Сумма моносахаридов	75,64

стадии щелочения способствует повышению белизны целлюлозы без уменьшения ее вязкости, несколько снижая содержание смолы в целлюлозе, а также цветность и токсичность сточных вод [4]. В Канаде два завода выпускают сульфитную целлюлозу, отбеленную пероксидом водорода без хлора или хлорсодержащих до белизны 83 % ИСО [3].

Исследована возможность получения из тонкомерной древесины березы от рубок ухода сульфитной целлюлозы, с невысоким содержанием смол и жиров и белизной, достаточной для выпуска массовых видов бумаги (типа газетной), без применения хлорсодержащих реагентов.

Тонкомерная древесина березы (возраст 35 лет) заготовлена на юге Карелии. Ее характеристика представлена в табл. 1.

Полученная из этой древесины щепка была разделена на две части: одна часть была подсушена и выдержана в течение 3 месяцев (выдержанная), другая — сразу использована для варки (свежесрубленная).

Подбор оптимальных условий варок не проводили, а использовали график, применяемый на Кондопожском ЦБК, с учетом возможной переработки тонкомерной древесины березы на этом комбинате.

Варки проводили в автоклавах вместимостью 400 мл на глицириновой бане по следующему режиму: подъем температуры до 120 °С — 120 мин; пропитка при 120 °С — 70 мин; подъем температуры до 155 °С — 80 мин; продолжительность варки на конечной температуре — 20...40 мин. Модуль варки 1 : 5. Кислота на смешанном натриево-кальциевом основании содержала 1,75 % связанного SO<sub>2</sub>, 5,5...5,8 % всего SO<sub>2</sub>.

Результаты варок представлены в табл. 2. Целлюлоза после варки имела повышенные выход (56,1...56,6 %) и показатели механической прочности. Разрывная длина колебалась от 9,3 до 9,4 км, сопротивление продавливанию — от 390 до 420 кПа, раздиранию — от 530 до 785 мН. Целлюлоза из свежесрубленной древесины (варка № 8) имела белизну ниже (41,6 %) и содержание экстрагируемых спиртобензолом веществ выше (2,04 %), чем целлюлоза из выдержанной древесины (варка № 9), т. к. выдержка древесины благоприятно сказалась не только на снижении содержания смолы, но и на повышении белизны целлюлозы.

Для снижения содержания смолы, которая является лимитирующим фактором при переработке лиственной древесины, целлюлозу подвергали обработке щелочью и пероксидом водорода (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) при повышен-

Таблица 2

Характеристика небеленой целлюлозы из тонкомерной древесины березы

Показатели	Значения показателей для целлюлозы из древесины	
	свежесрубленной	выдержанной
Время варки на конечной температуре, мин	40	20
Выход, % от абс. сухой древесины	56,6	56,1
Степень делигнификации, ед. Каппа	28,2	40,3
Вещества, экстрагируемые спиртобензолом, %	2,04	1,48
Белизна, %	41,6	64,0
Механические показатели целлюлозы (степень помола 60° ШР, масса 75 г/м <sup>2</sup> ):		
а) объемная масса, г/см <sup>3</sup>	0,787	0,718
б) разрывная длина, м	9315	9390
в) удлинение, мм	2,60	2,05
г) сопротивление:		
излому, ч. д. п.	2400	1965
продавливанию, кПа	420	390
раздиранию, мН	785	530

ной температуре. Условия обработки были выбраны ранее для сульфитной целлюлозы из сосны [2]. После обработки щелочью массу отжимали, промывали водой, а затем добавляли  $H_2O_2$ , массу снова отжимали, разбавляли водой и проводили кислотку раствором  $SO_2$ .

Следует отметить, что обработка целлюлозы с расходом реагентов 1,0...1,2 % снижает содержание смолы на 29 %, но практически не повышает белизну (табл. 3). Увеличение расхода реагентов до 2 % способствует повышению белизны на 10 %, что вызвано снижением содержания лигнина почти в 2 раза. Обработка целлюлозы из выдержанной древесины (варка № 9) дала более благоприятные результаты по содержанию смолы и белизне. Целлюлоза из свежесрубленной древесины (варка № 8) имела более низкие показатели.

Механические показатели целлюлозы сохранились на довольно высоком уровне, уменьшились разрывная длина и сопротивление излому.

Таблица 3

## Характеристика целлюлозы после обработки

Показатели	Значение показателей для целлюлозы из древесины		
	свежесрубленной	выдержанной	
		Образец 1	Образец 2
Расход химикатов, %:			
NaOH	2,0	1,0	2,0
$H_2O_2$	2,0	1,2	2,0
Выход:			
% от исх. массы	94,0	95,4	91,4
% от абс. сухой древесины	53,2	53,5	51,2
Степень делигнификации, ед. Каппа	16,0	29,2	21,0
Белизна, %	50,8	65,3	74,4
Вещества, экстрагируемые спиртобензолом, %	1,57	1,05	1,02
Процент снижения содержания смолы при обработке	23,40	29,05	31,08
Механические показатели целлюлозы (степень помола 60 °ШР, масса 75 г/м <sup>2</sup> ):			
а) объемная масса, г/см <sup>3</sup>	0,746	0,717	0,735
б) разрывная длина, м	8420	9820	8870
в) удлинение, мм	2,82	2,22	2,31
г) сопротивление:			
излому, ч. д. а.	2220	1710	1530
продавливанию, кПа	435	425	430
раздиранию, мН	730	585	585

Таблица 4

## Изменение углеводного состава целлюлозы от варки № 9 в процессе обработки (% от абс. сухой навески)

Показатели	Значения показателей для целлюлозы		
	необработанной	обработанной по варианту	
		I	II
Полисахариды по РВ	95,35	97,39	98,87
Моносахариды (в пересчете на полисахариды):			
галактоза	—	—	—
глюкоза	71,60	76,24	82,41
манноза	4,05	4,17	3,98
ксилоза	18,21	16,14	11,11
Сумма моносахаридов	93,59	96,55	97,50

Определение изменения углеводного состава целлюлозы в процессе обработки (табл. 4) показало, что она способствовала растворению ксилана и довольно резкому снижению его содержания.

Преимуществом данного метода получения целлюлозы является отсутствие хлорорганических соединений в сточных водах, т. е. он является экологически более приемлемым, чем традиционная отбелка с использованием соединений хлора. Нами проведены опыты по использованию отработанных варочных растворов. Сточные воды, особенно после щелочения, содержат щелочь, смолу, лигнин. Сброс их нецелесообразен не только из-за их загрязненности, но и из-за потерь щелочи. Сточную воду после щелочения насыщали  $\text{SO}_2$ , вводили недостающую щелочь и использовали для варки древесины. Варка прошла без затруднений. Полученная целлюлоза не уступала контрольной по белизне, но содержала больше смолы. Экономия щелочи составила 35...40 %.

Таким образом, показана возможность получения из тонкомерной выдержанной древесины березы путем сульфитной варки и обессмоливания щелочью и пероксидом водорода целлюлозы, пригодной для массовых видов бумаги для печати (типа газетной), с минимальным сбросом загрязненных сточных вод и регенерацией щелочи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Иванов М. А. и др. Смолистые вещества древесины и целлюлозы.— М.: Лесн. пром-сть, 1968.— 349 с. [2]. Коржицкая З. А., Голубева Л. В., Коржова М. А. Получение небеленой сульфитной целлюлозы из древесины сосны // Лесн. журн.— 1993.— № 2—3.— С. 83—86.— (Изв. высш. учеб. заведений). [3]. Mason I. P. Sulphite mills capitalize on demand for chlorine free pulp // Pulp. a. paper J.— 1990.— N 6.— P. 27. [4]. Teodorescu G. et al. Bleaching and deresination of sulphite pulp // Pulp. a. paper Canada.— 1991.— Vol. 92, N 9.— P. 209—216.

Поступила 8 апреля 1994 г.

УДК 671.1.023.1 : 546.214

*Н. Н. КАЛИНИН, Э. И. ФЕДОРОВА, П. В. ОСИПОВ, Т. А. МЕРКУЛОВА*

Калинин Николай Николаевич родился в 1937 г., окончил в 1960 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор кафедры процессов и аппаратов С.-Петербургской лесотехнической академии. Имеет 86 научных трудов в области инженерного оформления процессов химической переработки целлюлозы.



Федорова Эльвира Ильинична родилась в 1940 г., окончила в 1963 г. Коми государственный педагогический институт, кандидат химических наук, доцент, зав. кафедрой целлюлозно-бумажного производства и общей химии Сыктывкарского филиала С.-Петербургской лесотехнической академии. Имеет 30 печатных трудов в области химии древесины.





Осипов Павел Васильевич родился в 1951 г., окончил в 1974 г. Ленинградский технологический институт ЦБП, кандидат технических наук, начальник НИЛ Сыктывкарского ЛПК. Имеет 6 печатных трудов и 8 авторских свидетельств на изобретения.



Меркулова Татьяна Александровна родилась в 1959 г., инженер НИЛ Сыктывкарского ЛПК, студентка 5-го курса Сыктывкарского филиала С.-Петербургской лесотехнической академии.

### ОЗОН — АКТИВАТОР ГИПОХЛОРИТНОЙ ОТБЕЛКИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

В связи с необходимостью исключения полностью или частично соединений хлора при отбелке целлюлозы предлагается замена первой ступени хлорирования отбелкой гипохлоритом натрия, активированного озоном.

*It has been suggested that the 1 st stage of chlorination be replaced by ozone activated sodium hypochlorite bleaching in connection with the need of completely or partially of excluding the chlorine compounds in pulp bleaching.*

Перспективные схемы отбелки целлюлозы основаны на применении реагентов, позволяющих сократить или исключить использование соединений хлора. Предпочтение отдается кислородсодержащим (озон, кислород, пероксид водорода), которые, однако, уступают хлорсодержащим реагентам в воздействии на лигнин.

Поэтому представляет интерес исследовать возможность отбелки при одновременном воздействии хлор- и кислородсодержащих реагентов. В качестве хлорсодержащего реагента нами выбран гипохлорит натрия [3] как сильный нуклеофил, способный к тому же образовывать радикалы, а в качестве кислородсодержащего — озон как наиболее перспективный [1, 2].

Отбелку лиственной сульфатной целлюлозы проводили в горизонтальном титановом реакторе с механической мешалкой и рубашкой для обогрева. Целлюлозу загружали вместе с рассчитанным количеством воды и выдерживали в течение 1 ч для равномерного прогрева массы. Затем добавляли отбельный реагент, одновременно включая перемешивание и отмечая начало процесса. Условия и режим отбелки лиственной сульфатной целлюлозы концентрацией 10 % приведены в табл. 1.

Таблица 1

Но- мер опы- та	Условия отбелки	Массовая доля, кг/г		Тем- пера- тура, °С	Про- дол- жи- тель- ность, мин
		гипо- хло- рита нат- рия	озо- на		
1	Гипохлорит добавлен дву- мя порциями с интерва- лом в 10 мин	15	—	60	120
2	Гипохлорит добавлен пол- ностью; далее 5 мин озонирования	15	1,7	60	120
3	Гипохлорит и озон пода- ны одновременно	15	1,7	60	120
4	Гипохлорит и озон пода- ны одновременно	15	1,7	70	120
5	Хлорирование	10*	—	70	60

\* В пересчете на Cl<sub>2</sub>.

Таблица 2

Но- мер опы- та	Целлюлоза			Фильтрат		
	Жест- кость, п. ед.	Белиз- на, %	Вяз- кость, сП	Цветность (оптиче- ская плот- ность при длине вол- ны λ = = 490 нм)	pH	Концен- трация хлорид- иона, г/л
0*	72,9	35,5	34,7	—	—	—
1	37,5	47,5	30,1	—	—	—
2	35,3	49,1	24,9	0,561	9,65	2,53
3	22,1	52,9	28,5	0,698	9,98	2,70
4	19,5	56,0	21,0	0,804	9,85	2,10
5	30,0	42,4	17,9	—	—	—

\* Исходная целлюлоза.

Качественные показатели отбелки лиственной сульфатной целлюлозы и результаты анализов фильтратов представлены в табл. 2.

Эксперименты показывают, что попытка интенсифицировать процесс отбелки на первой ступени с помощью порционной подачи гипохлорита не дает положительного эффекта, что вполне объяснимо. Озонирование при расходе озона 1 % от массы абс. сухой целлюлозы также не улучшило показатели целлюлозы, а вязкость даже уменьшило. Заметное повышение белизны и снижение жесткости целлюлозы наблюдаются в опытах с озонированием раствора гипохлорита. Увеличение температуры процесса снижает вязкость. Об углублении делигнификации свидетельствуют данные о цветности фильтратов отбелки, повышении содержания хлорид-ионов.

Учитывая возможность разрушения образующихся хлорорганических соединений химическими (например, озонирование фильтратов конечной стадии отбелки) или биологическими способами, можно не исключать гипохлорит из схемы отбелки. Последующая отбелка должна иметь ступень щелочения для дальнейшего удаления продуктов деструкции лигнина, а в случае совмещения ее с действием пероксида водорода можно ожидать улучшения качества целлюлозы.

Таким образом, совместное действие гипохлорита натрия и озона дает возможность исключить стадию хлорирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Дональд В., Хершмиллер Х., Симонс А. Опыт реконструкции целлюлозных и бумажных заводов в соответствии с требованиями технологии 90-х годов // Вторая междунар. научно-техн. конф. ПАП-ФОР, 93.—СПб., 1993.—С. 14—36. [2]. Озон и его использование в целлюлозно-бумажной промышленности. Сер. «Целлюлоза, бумага, картон»: Обзор. информ.—1990.—Вып. 10.—С. 28. [3]. Germgard B. U., Norstedt A., Sjodin L. The futur for blaching // Puls and Paper international.—1994.—March.—P. 53—57.

Поступила 20 июня 1994 г.

УДК 676.621

*Л. Ф. КУЛЕШОВ, А. А. НОГОВИЦЫН, В. В. МИРОНОВА*



Кулешов Леонид Федорович родился в 1929 г., окончил в 1953 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой машин и аппаратов ЦБП Архангельского государственного технического университета. Имеет 80 печатных трудов в области комплексного использования древесного сырья.



Ноговицын Александр Анатольевич родился в 1954 г., окончил в 1977 г. Архангельский лесотехнический институт, старший преподаватель кафедры машин и аппаратов ЦБП Архангельского государственного технического университета. Имеет 30 печатных трудов в области комплексного использования древесного сырья.



Миронова Валентина Васильевна родилась в 1943 г., окончила в 1966 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов ЦБП Архангельского государственного технического университета. Имеет 29 печатных трудов в области комплексного использования древесного сырья.

### **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ВАРОЧНЫХ УСТАНОВОК ЦЕЛЛЮЛОЗЫ**

Предложены системы принудительной циркуляции для установок периодической варки целлюлозы, позволяющие повысить надежность подогревателей за счет уменьшения цикличности их работы.

Forced circulation systems for digesters of cyclic pulping allowing to improve the heaters reliability by reducing their operation cyclicity have been offered.

Установки для варки целлюлозы периодического и непрерывного действия с принудительной циркуляцией варочного раствора имеют как прямой (пар вводится непосредственно в котел), так и непрямой (варочный раствор нагревается в кожухотрубчатых подогревателях) обогрев. Системы с непрямым обогревом обладают рядом преимуществ [4].

Для варочных установок периодического действия с непрямым обогревом применяют различные системы принудительной циркуляции варочного раствора. Наиболее широко используются три системы (рис. 1) [5]. Первые две находят применение при производстве сульфатной, моносульфатной, нейтрально-сульфитной и др. видов целлюлозы, когда в варочном реагенте отсутствует свободно растворимый  $\text{SO}_2$ .

При принудительной циркуляции варочный раствор отбирают из котла, по трубопроводам подают в подогреватель, откуда его снова закачивают в котел. В зависимости от системы циркуляции нагретый варочный раствор может подаваться только в нижнюю часть варочного котла (рис. 1, а) или в верхнюю и нижнюю части в равных соотношениях (рис. 1, б). В системе, изображенной на (рис. 1, в),  $2/3$  варочной жидкости поступает в верхнюю часть котла через подогреватель, а  $1/3$  — в нижнюю, минуя его. При этом температура варочной жидкости в нижней части на  $1 \dots 2$  °С ниже, чем в верхней. Это несколько компенсирует влияние повышенной концентрации  $\text{SO}_2$  в варочной жидкости благодаря большей растворимости его за счет давления столба жидкости.

Нагрев варочного раствора в подогревателе осуществляют согласно технологическому регламенту. Например, при варке сульфитной целлюлозы в котлах периодического действия в отечественной практике наиболее часто применяют температурный график с двумя стоянками: при температуре  $105 \dots 110$  °С и при конечной температуре около  $140$  °С. Во время выдержки котла в период заварки или варки варочный раствор циркулирует по обводному трубопроводу, минуя подогреватель.

Такая периодичность работы подогревателя отрицательно сказывается на его надежности. Одной из основных причин, уменьшающих межремонтный цикл работы подогревателей, является коррозия теплообменных трубок. Проведенный анализ подогревателей варочных установок АО «Архангельский ЦБК» показал, что одна из самых распространенных причин выхода из строя теплообменных трубок — точечная коррозия и, как следствие, образование продольных трещин [3]. Длина трещин на трубках варьируется от  $5 \dots 6$  мм до  $50 \dots 100$  мм, шири-

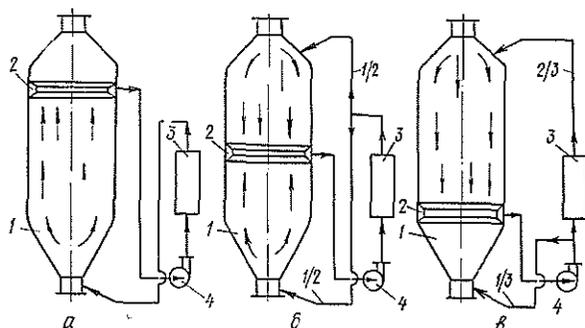


Рис. 1. Системы принудительной циркуляции варочного реагента (щелока) [5] с верхним (а), средним (б), нижним (в) заборным циркуляционным ситом: 1 — корпус котла; 2 — заборное сито; 3 — подогреватель (теплообменник) варочного реагента; 4 — циркуляционный насос

на — от 0,1 до 1,0 мм. Влияние агрессивной среды, вызывающей коррозию материала трубок, усиливается напряжениями в местах их соединения с трубными решетками. Цикличность напряжений, возникающих вследствие температурных деформаций, способствует коррозионному воздействию среды.

К подогревателям, устанавливаемым на линиях циркуляции варочного раствора, предъявляются высокие требования, такие, как стойкость к агрессивным средам, высокая надежность, т. е. обеспечение несмешиваемости нагреваемой и греющей сред, возможность очистки теплообменных поверхностей.

Наибольшее распространение получили кожухотрубчатые теплообменники с температурным компенсатором на кожухе и плавающей головкой. Нарушение плотности соединения трубок с трубной решеткой относится к причинам, затрудняющим их использование в системах циркуляции варочного раствора.

Теплообменники с плавающей головкой, имеющие большую возможность компенсации температурных удлинений трубок, при периодическом нагружении работают крайне неудовлетворительно. В результате значительной разности температур трубок разных ходов подогревателя в момент пуска варочной установки и после выгрузки котла происходит перекос трубного пучка [5]. Многократное повторение такого явления приводит к нарушению герметичности крепления трубок в трубной решетке.

Для периодической варки целлюлозы устанавливают несколько варочных котлов (как правило 5—6 и более), работающих по смещенному графику. Нами предложено установить на два варочных котла периодического действия один двухсекционный подогреватель с различными площадями поверхностей теплообмена. Схема установки показана на рис. 2 [1]. В период подъема температуры в одном из варочных котлов циркуляция варочного раствора осуществляется через большую секцию подогревателя. Поверхность теплообмена этой секции обеспечивает подъем температуры за необходимый промежуток времени, определенный графиком ведения процесса варки. В период выдержки (стоянки) при определенной температуре циркуляция варочного раствора осуществляется через секцию подогревателя с меньшей площадью поверхности нагрева. В этом случае полученная варочным раствором теплота обеспечивает компенсацию тепловых потерь в окружающую среду. Другой варочный котел работает по смещенному (относительно первого) графику. В период стоянки первого котла второй находится в стадии подъема температуры, а варочный раствор циркулирует через секцию подогревателя с большей площадью поверхности теплообмена.

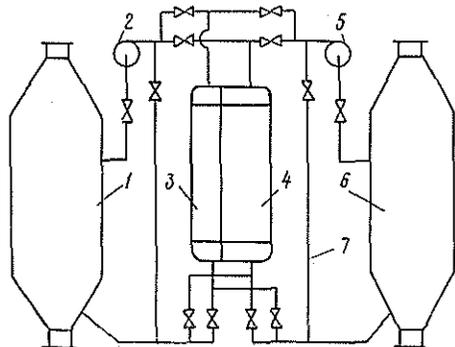


Рис. 2. Установка для получения целлюлозы [1]: 1, 6 — варочный котел; 2, 5 — циркуляционный насос; 3 — меньшая секция подогревателя; 4 — большая секция; 7 — циркуляционная труба

Использование двухсекционного подогревателя в системе принудительной циркуляции двух варочных котлов повышает стабильность работы подогревателя, его надежность.

В качестве камеры с меньшей площадью поверхности теплообмена в [2] предлагается использовать циркуляционные трубы, выполненные в виде теплообменника типа «труба в трубе». В этом случае подогрев варочного раствора в период стоянки при определенной температуре осуществляется в теплообменнике типа «труба в трубе». Основной подогреватель работает в периоды подъема температуры. Расчеты показали, что длина циркуляционных труб обеспечивает необходимую площадь поверхности теплообмена.

Таким образом, в предлагаемых схемах систем принудительной циркуляции вследствие исключения колебаний температуры в подогревателе и цикличности его работы достигнута более высокая надежность, чем в случае работы подогревателя на один варочный котел.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. А. с. 1359381 СССР, МКИ Д 21 С 7/00. Установка для получения целлюлозы / Н. И. Мирмов, А. А. Ноговицын, Г. В. Афанасьев.— № 3904204/31-12; Заявлено 4.06.85; Опубл. 15.12.87, Бюл. № 46 // Открытия. Изобретения.— 1987.— № 46.— С. 117. [2]. А. с. 1491921 СССР, МКИ Д 21 С 7/00. Установка для получения целлюлозы / А. А. Ноговицын, В. В. Миронова, Л. Ф. Кулешов.— № 4353608/29-12; Заявлено 30.12.87; Опубл. 07.07.89, Бюл. № 25 // Открытия. Изобретения.— 1989.— № 25.— С. 117. [3]. Мирмов Н. И., Кулешов Л. Ф., Александров В. М. Коррозионное растрескивание труб теплообменников // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: Межвуз. сб. науч. тр.— ЛТА, 1988.— С. 122—125. [4]. Непенин Н. Н. Технология целлюлозы / Под ред. Ю. Н. Непенина.— М.: Лесн. пром-сть, 1976.— Т. 1: Производство сульфитной целлюлозы.— 624 с. [5]. Тордуа Г. А. Машины и аппараты целлюлозного производства // Учеб. пособие для вузов.— М.: Лесн. пром-сть, 1986.— 440 с.

Поступила 26 июня 1994 г.

УДК 676.052/53

*И. Д. КУГУШЕВ, Ю. Н. ШВЕЦОВ*

Кугушев Илья Дмитриевич родился в 1914 г., окончил в 1949 г. Ленинградский политехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры машин автоматизированных систем С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет 247 печатных трудов в области сортирования, обезвоживания, прессования, реологии бумажных масс; сушки бумаги; проектирования и конструирования бумагодельных машин и машин для производства полимеров.



Швецов Юрий Николаевич родился в 1948 г., окончил в 1972 г. Ленинградский технологический институт ЦБП, кандидат технических наук, доцент кафедры машин автоматизированных систем С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет 38 печатных трудов в области обезвоживания бумажной массы, оптимизации параметров работы БКДМ.



## РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ОТСАСЫВАЮЩЕЙ ЧАСТИ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

Разработан метод оптимизации отсасывающей части бумагоделательной машины, обеспечивающий необходимую по технологическому режиму сухость, наибольший срок службы сеток и крышек отсасывающих ящиков, минимальный расход электроэнергии.

An optimization method of paper machine suction part, providing a required dryness of technological conditions, the longest service life of wires and covers of suction boxes, minimum electricity consumption, has been developed.

Для грамотного проектирования и эффективной эксплуатации современного высокопроизводительного оборудования ЦБП необходимо четкое понимание физики происходящих явлений, поскольку именно это позволяет добиться оптимальных показателей его работы.

Обязательной составляющей конструкции сеточной части БКДМ является отсасывающая. Несмотря на кратковременность нахождения бумажной массы над ней (0,1...0,3 с), значимость этой части весьма велика, так как здесь происходит формирование полотна бумаги или картона. Другая причина, побуждающая уделять внимание этому участку — его высокая энергоемкость, составляющая от 50 до 90 % приводной мощности сеточной части. Известно также влияние вакуума на качество готовой продукции, заключающееся в увеличении (или уменьшении) разносторонности, распределении мелкого волокна по сторонам листа и др., а также на срок службы сеток и крышек сухих отсасывающих ящиков (СОЯ) [1].

Проведенные нами исследования обезвоживания на отсасывающей части сеточного стола БКДМ показывают, что весьма часты случаи отклонения от требуемого значения сухости перед гауч-валом, ведущие к указанным выше негативным последствиям. Одним из показателей неэффективного использования отсасывающих ящиков является резкий рост сухости на первых ящиках и, как следствие, значительное число ящиков, на которых сухость не меняется.

Цель данной работы — на основании исследования обезвоживания как в промышленных условиях, так и на лабораторной установке определить минимальное число отсасывающих ящиков, необходимое для достижения требуемой по технологическому режиму сухости бумаги.

Согласно современному представлению о процессе обезвоживания, собственно отсасывающая часть начинается после достижения слоем массы концентрации осевшего слоя волокон (3,5...4,5 %), что, как

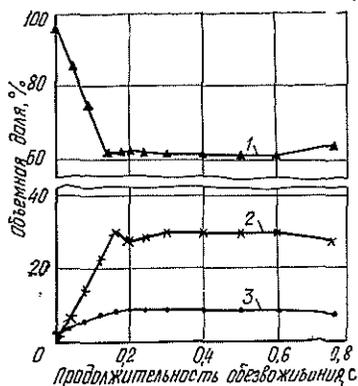


Рис. 1. Изменение в процессе обезвоживания СФА целлюлозы (масса 1 м<sup>2</sup> 120 г, степень помола 20° ШР, вакуум 8,4 кПа) объемных долей воды (1), воздуха (2), волокон (3)

правило, должно достигаться не позднее двух первых СОЯ [2]. До этого момента слой волокон представляет собой двухфазную среду вода — волокно. После начала обезвоживания осевшего слоя бумажное полотно является трехфазной средой волокно — вода — воздух, что нашло подтверждение при определении объемной доли этих составляющих, проведенном по специально разработанной методике (рис. 1).

Установлено, что под действием постоянного вакуума изменение сухости происходит в течение определенного времени, названного нами эффективным временем обезвоживания. При превышении этого времени роста сухости слоя волокон не наблюдается. Полученные результаты для офсетной бумаги хорошо согласуются с данными промышленных испытаний (табл. 1).

Т а б л и ц а 1  
Результаты определения сухости на отсасывающих ящиках

Скорость, м/с	Вакуум, кПа			Сухость, %				
	1—3 СОЯ	8—9 СОЯ	1—9 СОЯ	перед 1 СОЯ	после 3 СОЯ	после 6 СОЯ	после 7 СОЯ	после 9 СОЯ
4,28	35	59	154	1,4	3,4	14,5	—	16,8
—	22	45	134	2,0	4,0	—	14,0	16,7
4,00	19	34	93	2,5	4,7	16,0	—	16,6
4,38	9	39	89	2,1	4,2	15,0	—	18,2
4,25	17	48	156	1,9	2,8	—	16,8	17,3

Из табл. 1 видно, что основное обезвоживание происходит на первых 6—7 ящиках до сухости 14,0... 16,8 %. Обращает на себя внимание пониженная перед отсасывающими ящиками (1,4... 2,5 %) и повышенная после них (16,6... 18,2 %) сухость бумажного полотна. (По данным С. Н. Иванова [1], она должна составлять 3... 4 % до ящиков и 11... 14 % после них.) Установлено, что увеличение суммарного вакуума с 89 до 156 кПа не способствует повышению конечной сухости, т. е. суммарный вакуум завышен, а его распределение в ящиках не оптимально. Следовательно, последние ящики сухости не повышают. Однако из опыта эксплуатации известно, что наличие 1—2 резервных (стабилизирующих) отсасывающих ящиков, сухость на которых не растет, необходимо для обеспечения стабильного режима работы, так как процесс обезвоживания на сеточной части является неустановившимся ввиду колебаний свойств поступающей массы.

Разделим ящики на 3 группы: доводящие полотно до концентрации осевшего слоя  $n_1$ ; обезвоживающие  $n_2$  и стабилизирующие  $n_3$ . Тогда общее число отсасывающих ящиков

$$n = n_1 + n_2 + n_3. \tag{1}$$

На основании лабораторных экспериментов аналитически получено следующее.

Зависимость эффективного времени  $t_3$  от вакуума  $H$ :

$$\lg t_3 = a_0 + a_1 \lg H, \tag{2}$$

где  $a_0$  и  $a_1$  — эмпирические коэффициенты.

Зависимость сухости  $c$  от эффективного импульса  $I$ , который является произведением вакуума на эффективное время:

$$c_i = \frac{c_{\max}}{a + e^{b e^{-\beta I_i}}}, \tag{3}$$

где  $c_i$  — сухость после  $i$ -го ящика;  
 $c_{\max}$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $\beta$  — эмпирические коэффициенты.

Последняя зависимость имеет вид s-образной кривой.

Задавшись в первом приближении средним значением вакуума, можно определить  $t_3$  и  $s$  после отсасывающих ящиков, а также число обезвоживающих отсасывающих ящиков:

$$n_2 = t_3 / t_{я}, \quad (4)$$

где  $t_{я}$  — продолжительность нахождения полотна бумаги над одним отсасывающим ящиком.

Как уже отмечалось, для достижения сухости осевшего слоя необходимо не более двух СОЯ ( $n_1$ ), а для поддержания стабильной величины сухости требуется один, максимум два СОЯ ( $n_2$ ). Таким образом, общее число отсасывающих ящиков  $n = n_2 + (3 \dots 4)$ .

Полученные зависимости можно использовать при расчетах отсасывающих гауч-валов.

Данная методика неоднократно была проверена на действующих БКДМ и показала достаточно высокую надежность.

В итоге для каждого вида продукции можно построить графики (рис. 2), которые применимы при эксплуатации или проектировании оборудования.

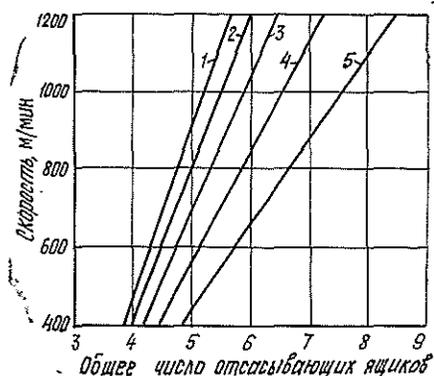


Рис. 2. Определение общего числа отсасывающих ящиков (бумага газетная): 1 — 24; 2 — 20; 3 — 16; 4 — 12; 5 — 8 кПа

Таблица 2

Сухость после отсасывающих ящиков при полном использовании эффективного времени

Вакуум, кПа	Эффективное время, с	Эффективный импульс, кПа · с	Сухость, %
8	0,0297	0,237	10,1
12	0,0228	0,273	11,6
16	0,0189	0,302	12,9
20	0,0163	0,326	14,1
24	0,0145	0,348	15,2

Необходимые данные по сухости газетной бумаги представлены в табл. 2.

Аналогичные зависимости получены нами для ряда массовых видов бумаги и картона.

### Выводы

Разработана методика определения оптимального числа отсасывающих ящиков при минимально необходимом вакууме для стабильного

режима работы и достижения требуемой сухости после отсасывающих элементов сеточной части с учетом конкретных свойств массы. Это обеспечивает минимум потребляемой мощности, износа сеток и крышек СОЯ, а также улучшает качество продукции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Иванов С. Н. Технология бумаги.— М.: Лесн. пром-сть, 1970.— 696 с. [2]. Кугушев И. Д., Слуцкий А. Е. Расчет обезвоживания в регистровой части бумагоделательных машин // Учеб. пособие.— Л.: ЛТА, 1982.— 104 с.

Поступила 17 мая 1994 г.

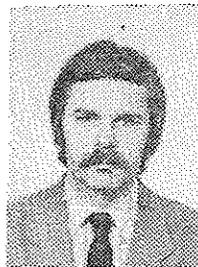
УДК 676.628.16

Ю. М. ЧЕРНОБЕРЕЖСКИЙ\*, А. Н. НИКОЛАЕВ, А. Б. ДЯГИЛЕВА

Чернобережский Юрий Митрофанович родился в 1931 г., окончил в 1955 г. Ленинградский государственный университет, доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет 180 научных трудов в области разработки физико-химических методов очистки сточных вод.



Николаев Алексей Николаевич родился в 1952 г., окончил в 1975 г. Ленинградский политехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет 54 научных труда в области очистки сточных вод ЦБП с использованием биологических и физико-химических методов.



Дягилева Алла Борисовна родилась в 1957 г., окончила в 1979 г. Ленинградский технологический институт ЦБП, кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет 11 печатных трудов в области физико-химических аспектов очистки природных и сточных вод.



\* Является руководителем данного направления.

**РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
В РАМКАХ ГНТП (ОБЗОР РАБОТ, ВЫПОЛНЕННЫХ  
В 1993 г. ПО НАПРАВЛЕНИЮ  
«КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ВОСПРОИЗВОДСТВО  
ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ»)**

Рассмотрены проблемы охраны окружающей среды, связанные с очисткой сточных вод и газопылевых выбросов, предотвращением выбросов и сбросов, а также экологическим нормированием и мониторингом.

The problems of environmental protection related to waste water and air pollutants treatment by preventing various discharges as well as by ecology normalizing and monitoring have been considered.

Очистка сточных вод. В области очистки сточных вод решались задачи глубокого удаления органических веществ, включая биологически резистентные (лигнин), токсичные (фенолы) и сверхтоксичные (хлорорганические соединения), а также сернистых соединений (сероводород, метилмеркаптан). Предложены различные методы биологической, физико-химической, химической и физической обработок, а также их совмещение и сочетание. Разработаны способы утилизации органических и органо-минеральных осадков путем их переработки на адсорбенты типа активных углей, пригодных для использования в системе очистки сточных вод и газовых выбросов.

Современная технология анаэробной биологической очистки проходит испытания на Сыктывкарском ЛПК (Институт микробиологии РАН, АО «Сыктывкарский ЛПК», УкрНИИБ). В анаэробном реакторе с гранулированным активным илом достигнута степень очистки сточных вод производства ХТММ 50...60 % по БПК<sub>5</sub>, 30...40 % — по ХПК. Образующийся биогаз содержит 70...75 % метана, обладает хорошей горючестью и воспламенением. Расчитано, что при сжигании биогаза, получаемого на 1 кг снятого ХПК сточной воды, выделяется столько же энергии, сколько при сжигании 5 л нефти.

Для повышения эффективности биологической очистки в аэротенках разработаны варианты их реконструкции в аэротенки-аэрофильтры (биотенки) путем введения загрузки с большей удельной поверхностью (СПБГТУРП). В том случае, если гидродинамический режим аэротенка близок к идеальному вытеснению, то на загрузке, размещенной в последнем коридоре (в области низкой концентрации органических веществ), образуется биопленка, биоценоз которой адаптирован к трудноокисляемым примесям. Эта система аналогична двухступенчатой биологической очистке: микроорганизмы активного ила утилизируют в основном легкоокисляемые органические вещества, а микроорганизмы биопленки — трудноокисляемые. По результатам промышленных испытаний установлено, что дополнительный эффект такой очистки по БПК<sub>5</sub>, по сравнению с обычной, составляет 25...30 %, а вынос взвешенных веществ из вторичных отстойников снижается на 20...25 %. Кроме того, в биопленке развиваются автотрофные бактерии (тиобациллы), окисляющие сероводород, что уменьшает его сброс с очищенной сточной водой и выброс в атмосферу с очистных сооружений.

К перспективным направлениям следует также отнести биоадсорбционную очистку, реализуемую путем подачи в аэротенк порошкообразного адсорбента, получаемого из избыточного активного ила или первичного осадка. Разработаны две технологии переработки осадка на адсорбенты: пиролиз в циклонном реакторе (АГТУ) и термокаталитическая обработка в каталитическом генераторе тепла (Институт ката-

лиза СО РАН). Исследования биоадсорбционной очистки в аэротенках (СПБГТУРП, АГТУ) с применением адсорбентов показали возможность снижения сброса органических веществ по БПК<sub>5</sub> и ХПК дополнительно в 1,5—2,0 раза, взвешенных веществ — в 1,5—1,7 раза. Необходимо также отметить, что при биоадсорбционной очистке эффективно удаляются фенолы и различные трудноокисляемые органические вещества, стабилизируется качество стоков, улучшаются влагоотдающие свойства осадка (смесь избыточного ила с адсорбентом). Полученные из осадков адсорбенты проявляют каталитическую активность при окислении сернистых соединений (сероводород, метилмеркаптан), увеличивают на 15...20 % производительность системы аэрации в аэротенке, способны обратимо сорбировать кислород и сероводород. В результате этого интенсифицируется очистка от сернистых соединений и практически исключается сульфатредукция в аэротенках и отстойниках, приводящая к вторичному загрязнению воды сероводородом. В биоадсорбционной системе весь избыточный ил может перерабатываться на адсорбент (рис. 1).

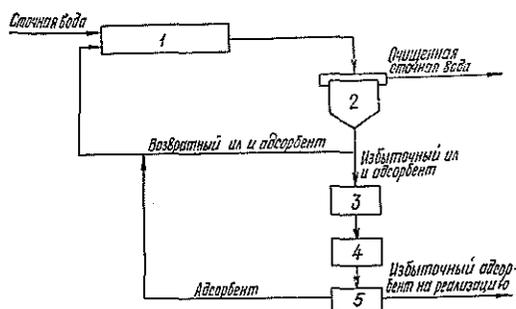


Рис. 1. Принципиальная схема биоадсорбционной очистки в аэротенке с переработкой всего избыточного ила на адсорбент: 1 — аэротенк; 2 — вторичный отстойник; 3 — блок обезвоживания; 4 — каталитический генератор теплоты; 5 — сепаратор

Переработка осадка на адсорбент открывает новые возможности для использования метода коагуляции, позволяющего удалять лигнин и обесцвечивать сточные воды. При термокаталитической обработке осадка коагуляционной очистки (шлам-лигнина) образуется порошкообразный адсорбент, содержащий легкорастворимый оксид алюминия. На этой основе разработаны методы регенерации алюминиевых коагулянтов и адсорбционно-коагуляционной очистки, при которой используется смесь регенерированного коагулянта и адсорбента, полученного из осадка (СПБГТУРП, Институт катализа СО РАН, Братский индустриальный институт).

Технология адсорбционно-коагуляционной очистки имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с коагуляционной:

1) достигается более высокий эффект очистки, осадок лучше обезвоживается;

2) решается проблема утилизации шлам-лигнина (переработка на адсорбент с утилизацией образующегося тепла);

3) сокращается в 3,5—5,0 раз расход коагулянта за счет его регенерации (степень регенерации до 80 %);

4) в системе регенерации коагулянта можно получить гидроксолоиды алюминия (рис. 2), обеспечивающие эффективную очистку сточ-

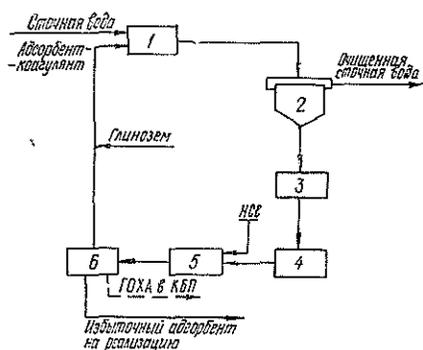


Рис. 2. Принципиальная схема адсорбционно-коагуляционной очистки с использованием в качестве коагулянта смеси глинозема и гидроксохлорида алюминия (ГОХА), образующегося в системе регенерации коагулянта: 1 — смеситель; 2 — отстойник; 3 — блок обезвоживания осадка; 4 — каталитический генератор теплоты; 5 — блок кислотной обработки; 6 — сепаратор (КБП — картонно-бумажное производство)

ных вод не только сульфатного, но и сульфитного производств (по ХПК и БПК<sub>5</sub> до 70...80 %), и позволяющие сократить потери волокна.

Адсорбционно-коагуляционную очистку можно применять как основной метод обработки стоков ЦБП, а также в сочетании с биологической и биоадсорбционной очисткой. При их последовательном осуществлении возможно повторное использование очищенных стоков в основном производстве взамен свежей воды.

Для удаления из стоков ЦБП хлорорганических соединений исследованы физические методы (ультрафиолетовое облучение); химическое окисление кислородом, пероксидом водорода и озоном; физико-химическая очистка флокулянтами и совместное применение названных методов (АО ВНИИБ, ЛТА). В результате сравнения вариантов выбраны методы флокуляции и озонирования. Среди опробованных флокулянтов наилучшие результаты получены при применении Зетак-43 и Зетак-47 (эффект изъятия хлорорганических соединений до 74 %, снижение ХПК стоков до 50 %). При испытании пилотной установки озонирования сточных вод отбельных цехов сульфитного и сульфатного производств Архангельского ЦБК показано, что при оптимальных значениях дозировок озона и pH среды эффект очистки достигает 90 %.

Для обезвреживания сернистых соединений варки и выпарки разработаны методы каталитического окисления (АО ВНИИБ, Институт катализа СО РАН). На эксплуатируемых в непрерывных режимах опытных установках каталитического окисления варочных конденсатов Соломбальского ЦБК (500 м<sup>3</sup>/ч) и выпарных конденсатов Сегежского ЦБК (30 м<sup>3</sup>/ч) показана стабильность работы катализатора в течение длительного времени и высокая эффективность очистки (90,0...99,9 % по сероводороду, 70...95 % по метилмеркаптану).

Очистка газопылевых выбросов. В проведенных исследованиях решалась проблема удаления из газовых выбросов сероводорода, метилмеркаптана, органических веществ и оксидов азота. Получили развитие методы щелочной абсорбции с каталитическим окислением сернистых соединений на границе раздела фаз газ—жидкость и в жидкой фазе, а также адсорбционно-каталитическая очистка.

При абсорбции хорошие результаты дает использование в качестве окислительного катализатора черного сульфатного щелока. По результатам исследований (СПБГТУРП) трехступенчатая схема, включающая щелочную абсорбцию на первой и второй ступенях и абсорбционно-каталитическую очистку на третьей ступени (орошающий раствор — белый щелок, содержащий 2 % черного щелока), обеспечивает эффективность очистки парогазовых выбросов от метилмеркаптана не менее чем на 99,9 %. Концентрирование катализатора на границе раздела фаз определяет высокую скорость окисления абсорбируемых газов (се-

роводород, метилмеркаптан) кислородом, что обеспечивает высокую эффективность очистки без применения дорогостоящих реагентов.

Для адсорбционно-каталитической очистки различных газовых выбросов, содержащих органические и сернистые соединения, включая метилмеркаптан, получен эффективный медно-хромовый катализатор (Институт катализа СО РАН). Испытания в промышленных условиях передвижной адсорбционно-каталитической установки, состоящей из аппаратов очистки высоко- и низкоконтрированных газов, показали возможность снижения выбросов метилмеркаптана до предельно-допустимых норм.

На основе активных углей, полученных из лигнинсодержащих отходов, синтезированы хемосорбенты для очистки выбросов от оксидов азота и паров растворителей (СПбГТУРП).

Разработан и прошел промышленные испытания новый газоочистной аппарат — поверхностный наклонный конденсатор, в котором орошающим раствором служит образующийся щелочной конденсат (СПбГТУРП). Аппарат обеспечивает эффективную очистку от сернистых соединений парогазовых выбросов растворителя плава содорегенерационных котлов (СРК), позволяет вернуть в производство уловленные химикаты и утилизировать теплоту выбросов. Конструкция аппарата защищена авторским свидетельством.

Предотвращение сбросов и выбросов. Выполнены исследования и найдены технологические решения по сокращению потерь красителей в бумажном производстве (ЦНИИБ). Установлено, что кислотные красители практически не имеют сродства к древесным волокнам, плохо удерживаются в бумажной массе и неперспективны для ЦБП. Прямые красители хорошо окрашивают целлюлозные волокна, а их потери (сброс в сток) значительно меньше и могут быть практически ликвидированы при использовании в качестве адсорбента активного силиката натрия.

Для эффективного подавления слизиобразования разработана и испытана в промышленных условиях опытно-экспериментальная установка электролитического генератора дезинфицирующих соединений (ЦНИИБ). При обработке дезинфицирующим раствором оборотных вод бумажного производства и скопа выбросов в атмосферу коррозии оборудования не отмечено.

Снижение содержания сероводорода в дымовых газах СРК обеспечит новая конструкция газоконтактного испарителя с низкой десорбцией сероводорода из черного щелока (СПбГТУРП).

Экологическое нормирование и мониторинг. При нормировании сбросов сточных вод все шире используется новый подход, основанный на комплексной оценке экологической ситуации в регионе (СПбГТУРП). Разработан программный комплекс «Гидроэконорма-2», включающий пакет прикладных программ по решению прямых задач прогноза воздействия сбросов и обратных задач, связанных с определением допустимых параметров сбрасываемых стоков и выбором методов их очистки в зависимости от заданных фоновых характеристик водоема и стандартов качества воды.

Завершение рассмотренных работ планируется в 1995—1996 гг. Их внедрение позволит существенно улучшить экологическую обстановку в регионах с развитой целлюлозно-бумажной промышленностью.

УДК 676.164.085.002.62

Е. В. НОВОЖИЛОВ, Е. Д. ГЕЛЬФАНД

Архангельский государственный технический университет



Новожилов Евгений Всеволодович родился в 1950 г., окончил в 1972 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры химии древесины, целлюлозы и гидролизных производств Архангельского государственного технического университета, лауреат премии им М. В. Ломоносова Архангельской областной комсомольской организации. Имеет свыше 100 научных трудов в области технологии целлюлозы и технологии переработки сульфитных щелоков.

### ЛОКАЛЬНАЯ ОЧИСТКА ЩЕЛОКОСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД СУЛЬФИТ-ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ПОПУТНЫМ ПОЛУЧЕНИЕМ КОРМОВЫХ ДРОЖЖЕЙ

Предложен метод локальной очистки ЩСВ с одновременным получением кормовых дрожжей, приводящий к снижению сброса загрязнений до 30...50 кг БПК<sub>5</sub>/т целлюлозы.

Method of local ACE treatment with simultaneous fodder yeast yield resulting in pollutants discharge reduction by 30...50 kg of bio-chemical oxygen consumption per metre of pulp has been offered.

На большинстве сульфит-целлюлозных заводов степень отбора щелоков находится на уровне, не превышающем 65 %. В результате этого значительная часть органических веществ щелока попадает в сточные воды. Эти щелокосодержащие сточные воды (ЩСВ) образуются на заключительном этапе промывки целлюлозы в сцехах после отбора крепкого щелока на биохимическую переработку и отбора одного или двух оборотных щелоков в баки оборотного щелока. Следует отметить, что объем ЩСВ весьма велик и по технологическим параметрам должен составлять 20...25 м<sup>3</sup>/т целлюлозы, т. е. примерно в 2—3 раза больше, чем объем крепкого щелока, отбираемого на биохимическую переработку. В настоящее время ЩСВ никак не используются.

Утилизация ЩСВ — одна из наиболее острых экологических проблем для целлюлозно-бумажных предприятий. Общая загрязненность сульфитных щелоков составляет от 200 до 580 кг БПК<sub>5</sub>/т целлюлозы\*. При степени отбора 65 % сброс БПК<sub>5</sub> со сточными водами (с учетом 10 % потерь сухих веществ щелока с волокнами целлюлозы) составляет от 50 кг/т небеленой целлюлозы для бумаги до 145 кг/т целлюлозы для химической переработки. Наиболее распространенный

\* Переработка сульфатного и сульфитного щелоков / Под ред. Б. Д. Богомолова и С. А. Сапотницкого.— М.: Лесн. пром-сть, 1989.— 360 с.

способ обезвреживания ЩСВ — биологическая очистка с помощью активного ила. Биоценоз бактерий в аэротенках обеспечивает степень очистки по БПК<sub>5</sub> примерно на 90 %. Но при этом затрачиваются значительные средства как на очистку, так и на утилизацию избыточной биомассы активного ила.

По составу ЩСВ — это сильно разбавленный водой сульфитный щелок. Массовая доля сухих веществ в них в 10—15 раз ниже, чем в щелоке, направляемом на производство спирта и дрожжей. ЩСВ содержат до 25 % сахаров, образовавшихся в процессе сульфитной варки, которые являются потенциальным, но в настоящее время совершенно не используемым для биохимической переработки, сырьем. Сведения о конкретных показателях ЩСВ в литературе нами не найдены. На предприятиях, имеющих такие сточные воды (иногда их называют кислым стоком или кислой водой), данные о их составе вообще отсутствуют или представляют результаты анализов случайных проб ЩСВ, так как эти стоки направляются прямо в канализацию без усреднения.

Данные анализа ЩСВ сильно зависят от степени промывки целлюлозы в момент отбора пробы. В производственных условиях Архангельского ЦБК, как видно из таблицы, с увеличением степени разбавления щелока водой снижаются такие показатели, как плотность, массовая доля сернистых соединений и общих РВ, возрастает рН с 2,25 у крепкого щелока до 3,25 у ЩСВ.

Следует отметить, что по мере разбавления водой в щелоке меняется соотношение между непосредственно титруемым и легкоотщепляемым SO<sub>2</sub>. Температура ЩСВ ниже, чем у крепкого щелока, и обычно близка к оптимальной для биохимических процессов. На состав ЩСВ влияет режим сульфитной варки, а так как варочный процесс ведется периодическим способом, это дополнительно расширяет интервал варьирования показателей. В практическом плане чрезвычайно важно усреднение ЩСВ для сглаживания колебаний в их составе.

Дополнительно был дважды (зимой и летом) выполнен анализ ЩСВ Сухонского ЦБЗ. Основное различие наблюдалось в температуре проб. Величина рН составляла 2,9... 3,0; массовая доля непосредственно титруемого и легкоотщепляемого SO<sub>2</sub> — соответственно 0,012... 0,013 и 0,033... 0,051 %; массовая доля общих редуцирующих веществ — 0,34... 0,43 %; показатели БПК<sub>5</sub> и ХПК — соответственно около 3000 и 10000 мг O<sub>2</sub>/л.

Нами изучена возможность локальной биологической очистки щелокосодержащих сточных вод с использованием не биоценоза активного ила, а ассоциации кормовых дрожжей.

Результаты анализов сульфитного щелока и ЩСВ Архангельского ЦБК в процессе промывки целлюлозы в сцежах

Объект исследований	Плотность при температуре 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	рН	Массовая доля SO <sub>2</sub> , %			Общие РВ, %
			непосредственно титруемого	легкоотщепляемого	суммы	
Крепкий щелок: начало отбора конец отбора	1024	2,25	0,053	0,270	0,323	3,04
	1020	2,35	0,037	0,220	0,257	2,40
Слабый щелок: начало отбора конец отбора	1010	2,45	0,033	0,130	0,163	1,30
	1005	2,60	0,032	0,080	0,112	1,14
Щелокосодержащие сточные воды (промывка в сток)	1001	3,25	0,028	0,028	0,056	0,39

Для этого необходимо, во-первых, подобрать ассоциацию дрожжеподобных грибов, способных ассимилировать органические вещества этого стока, и, во-вторых, создать оптимальные условия для их жизнедеятельности.

Подготовка ЩСВ к выращиванию должна включать следующие технологические операции: удаление целлюлозных волокон; десульфитацию; нейтрализацию; охлаждение или нагрев до температуры 30...36 °С; введение непереходимых питательных солей.

Основной из перечисленных операций является десульфитация. Удаление ингибиторов обычно проводят путем продувки паром и воздухом горячего сульфитного щелока. Но для ЩСВ с учетом их низкой температуры и большого объема нами были разработаны специфические и достаточно простые приемы подготовки к биохимической переработке. Другие стадии подготовки затруднений не вызывают и выполняются как принято в производстве.

В лабораторных условиях на установке АНКУМ-2м в непрерывном режиме проведено выращивание дрожжей на ЩСВ Архангельского ЦБК. В качестве засевных дрожжей использована производственная ассоциация АЦБК, в которой основной культурой является *Candida utilis* с примесью *Candida tropicalis*. При дебите 0,20...0,25 ч<sup>-1</sup> и начальной концентрации общих РВ в ЩСВ 0,20...0,32 % получен выход абс. сухих дрожжей 43,8...52,5 % от РВ при содержании истинного белка 43,1...51,3 %. По данным показателям биохимическая переработка ЩСВ вполне сопоставима с выращиванием дрожжей на сульфитном щелоке и сульфитно-спиртовой барде. Анализы последрожжевой бражки показали, что в процессе выращивания на ЩСВ произошло снижение БПК<sub>5</sub> на 51...54 %, а ХПК — на 19...21 %. Это свидетельствует о значительном уменьшении загрязненности бражки перед направлением ее на очистные сооружения.

Для выращивания кормовых дрожжей на ЩСВ можно использовать действующее оборудование дрожжевых цехов. Это было показано в ходе производственных испытаний на одном из сульфит-целлюлозных предприятий России. Испытания проведены по максимально упрощенной схеме в течение нескольких дней. При этом съем БПК<sub>5</sub> на одном дрожжерастильном аппарате объемом 320 м<sup>3</sup> достигал в среднем 3,6 т/сут., максимально — 5,5 т/сут. Степень очистки по БПК<sub>5</sub> при установившемся режиме работы была достаточно высокой и составляла 44...48 %. Выработка дрожжей достигала 1,4 т/сут.

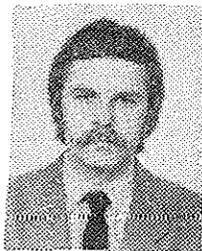
Следует отметить, что количество сахаров в ЩСВ при степени отбора щелока 65 % примерно равно их количеству в сульфитно-спиртовой барде. Наши расчеты показали, что если вовлечь в дрожжевое производство ту часть органических веществ, которые в настоящее время теряются со сточными водами вследствие неполноты отбора щелоков, то можно было бы вырабатывать 160...180 тыс. т дрожжей в год, что в 2—2,5 раза больше, чем их сейчас производится на сульфитных щелоках.

Локальная очистка ЩСВ одновременно с получением кормовых дрожжей приводит к снижению сброса загрязнений на 30...50 кг БПК<sub>5</sub>/т целлюлозы. Реализация этого направления даст немедленный экологический эффект и обеспечит выпуск рентабельной продукции — кормовых дрожжей.

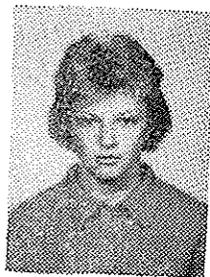
УДК 676.088 : 628.3

*А. Н. НИКОЛАЕВ, Л. Н. НИКОЛАЕВА, И. В. ГОРДЕЕВА*

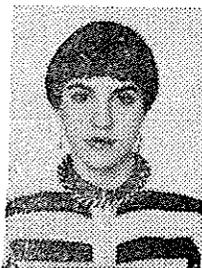
Николаев Алексей Николаевич родился в 1952 г., окончил в 1975 г. Ленинградский политехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет 54 научных труда в области очистки сточных вод ЦБП с использованием биологических и физико-химических методов.



Николаева Лия Николаевна родилась в 1969 г., окончила в 1991 г. Ленинградский технологический институт ЦБП, аспирант кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Работает в области биологической, биоадсорбционной, адсорбционно-коагуляционной очистки сточных вод ЦБП.



Гордеева И. В. родилась в 1967 г., окончила в 1990 г. Ленинградский технологический институт ЦБП, инженер кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет 2 печатных труда в области очистки сточных вод ЦБП с использованием биологических и физико-химических методов.



## БИОАДСОРБЦИОННАЯ И АДСОРБЦИОННО-КОАГУЛЯЦИОННАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ЦБП

В статье сопоставлена эффективность различных схем физико-химико-биологической очистки сточных вод ЦБП.

The efficiency of different physical, chemical and biological schemes for PPP effluents purification has been compared.

Типовые очистные сооружения предприятий ЦБП, как правило, не обеспечивают нормативов предельно допустимых концентраций при сбросах. Следствием является существенное загрязнение водоемов.

Основная часть образующихся на очистных сооружениях осадков не утилизируется, их обработка и складирование требуют больших затрат. Серьезную проблему представляют также выбросы в атмосферу сероводорода и метилмеркаптана с очистных сооружений.

Наши исследования были направлены на поиск эффективных способов очистки сточных вод ЦБП с одновременной утилизацией осадков и сокращением выбросов в атмосферу.

Предварительный анализ показал, что перспективным направлением является переработка на адсорбенты таких осадков, как скоп первичных отстойников и активный ил [2]. При этом возникает возможность применения получаемых из осадков порошкообразных адсорбентов для повышения глубины очистки стоков в системах адсорбционной, биоадсорбционной и адсорбционно-коагуляционной очистки [1, 3].

В экспериментах использовали порошкообразный адсорбент (размер частиц 4...80 мкм), полученный путем термокаталитической переработки волокнистого осадка сточных вод СП «Григишкес» на опытно-промышленной установке. Изотерма адсорбции загрязнений из стоков сульфит-целлюлозного производства этим адсорбентом показана на рис. 1. Оптимальный диапазон значений рН 5,5...7,5.

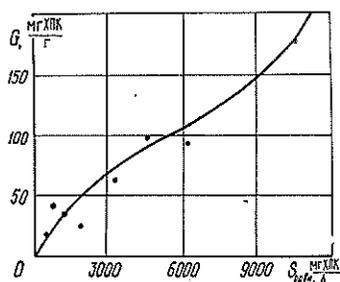


Рис. 1. Изотерма адсорбции органических веществ на адсорбентах типа активированных углей, полученных путем термокаталитической переработки осадков сточных вод ( $G$  — удельная адсорбция;  $S_{равн}$  — равновесная концентрация органических веществ в сточной воде)

Адсорбент, получаемый при термокаталитической переработке осадка, может содержать до 5...6 % водорастворимых органических примесей, которые дают вторичное загрязнение воды, что ограничивает его применение на стадии доочистки стоков после биологической обработки.

Внесение порошкообразного адсорбента в аэротенк (организация биоадсорбционной очистки) в дозах, отвечающих приросту активного ила (0,1...0,3 кг/м<sup>3</sup>), позволяет поддерживать концентрацию адсорбента в диапазоне 2...10 кг/м<sup>3</sup>, согласно соотношению

$$C_a = \frac{D_a}{\Delta x} x, \quad (1)$$

где  $C_a$  — концентрация адсорбента в аэротенке, кг/м<sup>3</sup>;

$D_a$  — доза адсорбента кг/м<sup>3</sup> сточной воды;

$\Delta x$  — прирост активного ила, кг/м<sup>3</sup> сточной воды;

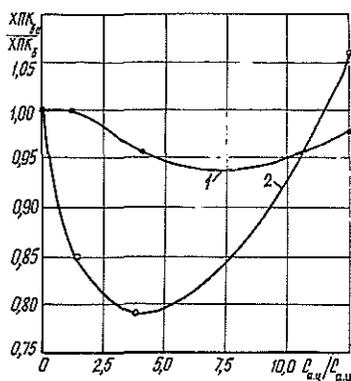
$x$  — концентрация активного ила в аэротенке, кг/м<sup>3</sup>.

Лабораторные исследования показали, что при определенных условиях добавка порошкообразного адсорбента в аэротенк существенно увеличивает эффект очистки от органических веществ, стабилизирует режим очистки, уменьшает иловый индекс и вынос взвешенных веществ из вторичного отстойника, снижает удельное сопротивление осадка фильтрации (при оптимальных режимах в десятки раз), увеличивает устойчивость активного ила к всплыванию.

Основная часть органических веществ сорбируется обратимо, что обеспечивает эффективную биорегенерацию адсорбента. Скорость и

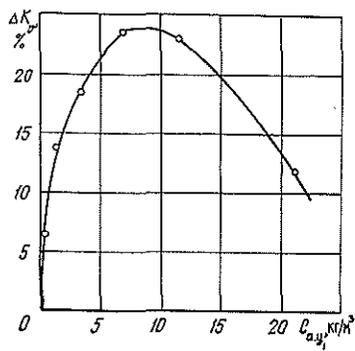
эффект очистки возрастают, когда процесс практически не лимитирован по кислороду, а нагрузка на активный ил не превышает 0,3... 0,4 кг БПК<sub>5</sub>/(кг · сут.). Увеличение эффекта очистки связано не только с протеканием биоадсорбционного процесса (адсорбция примесей с последующей биорегенерацией адсорбента), но и с уменьшением колебаний рН и концентрации органических веществ в аэротенке под действием адсорбента. Наилучшие результаты дает соотношение концентраций адсорбента и активного ила в аэротенке в диапазоне 2...5 (рис. 2). В биоадсорбционных системах наиболее эффективно удаляются хорошо сорбируемые примеси. Биоадсорбционная обработка по сравнению с биологической дает дополнительный (более 80 %) эффект очистки от фенолов.

Рис. 2. Зависимость отношения химического потребления кислорода сточных вод после биоадсорбционной ХПК<sub>б.а</sub> и биологической ХПК<sub>б</sub> очистки от соотношения концентрации активированного угля  $C_{а.у}$  и активного ила  $C_{а.и}$  при различной нагрузке на активный ил: 1 — 0,35; 2 — 0,20 кг БПК<sub>5</sub>/(кг · сут)



Оптимальный размер частиц адсорбента составляет 10...50 мкм. Частицы свыше 50...80 мкм могут оседать в аэротенке. По этой причине перед подачей в аэротенк необходима сепарация или размельчение адсорбента. Введение адсорбента в аэротенк увеличивает производительность систем по кислороду. В диапазоне концентраций адсорбента 2...10 кг/м<sup>3</sup> объемный коэффициент массопередачи кислорода  $\Delta K_v$  увеличивается приблизительно на 20 % (рис. 3). Экстремальный характер приведенной кривой, видимо, связан с воздействием двух противоположных факторов. Рост концентрации адсорбента  $C_{а.у}$ , с одной стороны, увеличивает турбулентность межфазной поверхности за счет столкновения пузырей воздуха с частицами адсорбента, что приводит

Рис. 3. Зависимость относительного увеличения объемного коэффициента массопередачи кислорода  $\Delta K_v$  от концентрации активированного угля в водной суспензии  $C_{а.у}$



к возрастанию коэффициента массопередачи кислорода, с другой — повышает вязкость раствора, что вызывает снижение коэффициента массопередачи.

Порошкообразный адсорбент, полученный из осадка, проявляет каталитические свойства при жидкофазном окислении сероводорода и метилмеркаптана, что позволяет существенно сократить их выброс в атмосферу и сброс со сточными водами.

Однако проведение биоадсорбционного процесса не решает задач очистки сточных вод от биорезистентных примесей, таких как лигнин. Значительное содержание этих примесей обуславливает низкий эффект биологической и биоадсорбционной очистки по ХПК, который для стоков сульфит-целлюлозного производства не превышает 40 %.

Коагуляционная очистка сульфитных стоков с применением глинозема не эффективна (эффект очистки не превышает 30...40 %). Необходимая степень очистки (до 80 %) достигается за счет применения оксихлоридов алюминия, регенерируемых путем обработки соляной кислотой оксидсодержащего адсорбента, полученного из осадка. В результате реализуется схема адсорбционно-коагуляционной очистки, при которой стоки обрабатываются смесью адсорбента и коагулянта, а осадок перерабатывается на адсорбент с последующей регенерацией коагулянта. Потери коагулянта можно восполнять добавками товарного глинозема, подаваемого в смеси с оксихлоридами алюминия. При степени регенерации коагулянта 75 % затраты на химикаты снижаются примерно в 3 раза.

По результатам исследований установлена доза коагулянта, обеспечивающая эффект очистки щелочесодержащих стоков по ХПК и БПК<sub>5</sub> на уровне 70 % в диапазоне значений рН 4,5...5,5:

$$D_k = A \sqrt{\text{ХПК}}, \quad (2)$$

где  $D_k$  — доза коагулянта по оксиду алюминия на 1 м<sup>3</sup> сточной воды;

$A$  — параметр, зависящий от состава стоков;

ХПК — химическое потребление кислорода стоков при отсутствии взвешенных веществ (влияние их рассмотрено ниже), г/м<sup>3</sup>.

Формула (2) справедлива при обработке стоков сульфит-целлюлозного производства гидроксидными соединениями алюминия (ГОХА) и их композицией с глиноземом в соотношении не менее 3 : 1, а также при очистке смешанного потока сульфат-сульфит-целлюлозного производства глиноземом или ГОХА.

Повышение дозы коагулянта сверх задаваемой формулой (2) позволяет дополнительно повысить эффект очистки на 5...10 %. Одновременно происходит резкое увеличение (в несколько раз) объема образующегося осадка. Концентрация осадка падает, возникают значительные проблемы с его уплотнением и обезвоживанием. Поэтому дальнейшее повышение дозы коагулянта оказывается технологически неприемлемым.

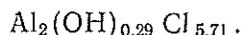
Экспериментально установлено, что параметр  $A$  имеет следующие значения:

3...4 (в среднем 3,5) — стоки сульфит-целлюлозного производства (модельные и натурные стоки Сясьского, Соликамского, Камского и Балахнинского ЦБК; ацетатный поток Светогорского ЦБК);

1,5 — общий сток ЦБК, производящего сульфитную и сульфатную целлюлозу, а также бумагу и древесноволокнистые плиты (производственные сточные воды Светогорского ЦБК);

1,0...1,5 — стоки сульфат-целлюлозного производства (модельные и натурные стоки Сегежского ЦБК; сульфатный поток Светогорского ЦБК).

Среди ГОХА наиболее эффективны соединения с низкой основностью, содержащие менее одной группы  $\text{OH}^-$  на атом алюминия. В дальнейшем принята следующая эмпирическая формула ГОХА:



Взвешенные вещества, представленные в основном (65...80 %) волокном, а также каолином, мелом и частицами коры, увеличивают необходимую для 70 %-й очистки по ХПК дозу коагулянта:

$$D_k = A \sqrt{\text{ХПК}} + \sqrt{B}, \quad (3)$$

где ХПК — химическое потребление кислорода фильтрованной пробы,  $\text{г/м}^3$ ;

$B$  — концентрация взвешенных веществ в сточной воде,  $\text{г/м}^3$ .

После отстаивания скоагулированных частиц в течение 2 ч концентрация неосевших взвешенных веществ не превышает 10  $\text{мг/л}$ . Поэтому эффект очистки по взвешенным веществам близок к 100 %. Активный ил в концентрации до 100  $\text{мг/л}$  практически не увеличивает дозу коагулянта и объем образующегося осадка (концентрация осадка возрастает). Поэтому для стоков после биологической очистки, содержащих выносимый из вторичных отстойников активный ил, формула (2) справедлива.

Использование вместо раствора коагулянта (коагуляционная очистка) суспензии адсорбента, содержащей коагулянт (адсорбционно-коагуляционная очистка) эффективно, если размер частиц адсорбента не превышает 10...20  $\text{мкм}$  (доминирующий размер 4...10  $\text{мкм}$ ). Зависимость эффекта адсорбционно-коагуляционной очистки от дозы адсорбента практически линейна при  $D_a/\text{ХПК} \leq 2$ :

$$\text{ЭО} = 70 + a \frac{D_a}{\text{ХПК}}, \quad (4)$$

где ЭО — эффект очистки (по ХПК и БПК<sub>5</sub>), %;

$a$  — параметр, зависящий от состава стока и характеристик адсорбента ( $a = 3...6$  %, в среднем  $a = 5$  %);

$D_a$  — доза адсорбента,  $\text{г/м}^3$ .

Если использовать адсорбент с размером частиц свыше 20  $\text{мкм}$ , то эффект очистки по ХПК падает. Причем, наибольшее его снижение (на 10...15 %) наблюдается в области  $D_a = (0,1...0,3)$  ХПК. При дальнейшем увеличении  $D_a$  эффект очистки возрастает с увеличением адсорбции органических веществ.

Добавки адсорбента позволяют эффективно (на 80...95 %) удалить из стоков хорошо сорбируемые вещества, в частности фенолы.

С увеличением дозы адсорбента повышается эффект очистки и поступление оксида алюминия на кислотную обработку, что приводит к возрастанию коэффициента регенерации коагулянта. При этом увеличиваются количество осадка и затраты на его обработку. Кроме того, падает концентрация кислоты в реакторе кислотной обработки адсорбента, что снижает скорость и эффективность регенерации коагулянта. В результате коэффициент регенерации коагулянта при увеличении дозы адсорбента возрастает лишь до некоторой критической величины, а затем падает. По этой причине диапазон возможных значений  $D_a$  достаточно узок и составляет для типичных условий 0,0...0,5  $\text{кг/м}^3$ .

Результаты исследований были использованы для разработки технических решений по снижению сбросов и выбросов с очистных сооружений Светогорского ЦБК. Был выполнен анализ общего и локальных потоков сточных вод, а также возможных вариантов очистки с применением адсорбционной, биоадсорбционной и адсорбционно-коагуляционной очистки. Основные из разработанных вариантов приведены ниже.

В а р и а н т 1. Локальная адсорбционно-коагуляционная очистка сточных вод производства ацетатной целлюлозы (ПАЦ) с применением композиции коагулянтов (товарный глинозем и получаемый в процессе регенерации оксихлорид алюминия) и катионного флокулянта (Сан-флок, Зетаг и др.). Сточные воды ПАЦ нейтрализуют до рН 8,5 и подают на внеплощадочные очистные сооружения (ВОС), где поддерживается рН 8,3 (по существующему положению рН 7,3).

В а р и а н т 2. Локальная адсорбционно-коагуляционная очистка щелочного стока производства сульфатной лиственной целлюлозы (САЦ-2) с применением композиции коагулянтов.

В а р и а н т 3. Адсорбционно-коагуляционная очистка части общего стока (перед биологической очисткой) композицией товарного и регенерированного глинозема (в аэротенке рН 8,3).

Сравнительная оценка вариантов использования физико-химической очистки

Номер варианта	Сброс загрязнений, % от существующего сброса						Выброс в атмосферу, % от существующего выброса		Доля осадка, % от имеющегося на очистных сооружениях	Дополнительный расход на химикаты за год*, тыс. р.	Потребность в КГТ**, шт.	Производительность КГТ по осадку, т/ч
	БПК <sub>5</sub>	ХПК	Взвешенные	Фенолы	Сероводород (СВ)	Метилмеркаптан (ММ)	СВ	ММ				
1	81,5	67,6	100	80,0	106,0	55,5	10,5	55,0	97 040	2	1,00	
2	97,5	97,6	100	98,0	96,0	94,7	90,1	94,0	8 372	1	0,12	
3	70,0	66,0	100	67,0	97,0	54,8	105,0	54,3	104 552	4	1,00	
4	70,0	66,0	100	67,0	104,0	41,0	22,0	41,0	149 857	4	1,00	
5	80,0	80,0	100	20,0	13,0	37,0	2,5	37,0	0	1	1,00	
6	80,0	80,0	100	17,0	12,5	18,5	1,6	18,0	0	1	1,00	
7	40,0	40,0	50	10,0	6,5	18,5	3,1	37,0	59 480	1	1,00	
8	40,0	40,0	50	8,5	6,3	9,25	2,1	18,0	59 480	2	1,00	

\* Расчеты произведены исходя из цен на 01.06.93 г.

\*\* КГТ — каталитический генератор теплоты.

В а р и а н т 4. То же, что и вариант 3, но в качестве коагулянта используют композицию товарного глинозема и регенерированного ГОХА.

В а р и а н т 5. Биоадсорбционная очистка общего потока производственных сточных вод, реализуемая путем подачи в аэротенки порошкообразного адсорбента, получаемого термokatалитической переработкой части первичного осадка. Благодаря стабилизирующим свойствам адсорбента, в аэротенке поддерживается рН 8,3.

В а р и а н т 6. Локальная сорбционно-окислительная очистка конденсатов варки и выпарки САЦ-2 с биорегенерацией адсорбента и биоадсорбционная очистка общего потока сточных вод.

В а р и а н т 7. Биоадсорбционная очистка общего потока сточных вод с последующей адсорбционно-коагуляционной очисткой части общего потока, возвращаемой в производство вместо свежей воды.

В а р и а н т 8. Сочетание трех очистных систем по вариантам 6 и 7. Сравнение вариантов (см. таблицу) позволяет отдать предпочтение биоадсорбционной очистке, которая существенно выигрывает по эффективности очистки стоков и сокращению выбросов (снижение платы за сброс и выброс), а также затратам на химикаты и оборудование.

Сочетание биоадсорбционной и адсорбционно-коагуляционной очистки не только сокращает общий сброс, но и позволяет вернуть часть очищенных стоков в производство вместо свежей воды. При этом в системе регенерации коагулянта можно получать ГОХА с последующим его использованием в производстве бумаги вместо глинозема для уменьшения промывов волокна на сетке бумагоделательной машины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Очистка воды адсорбционно-коагуляционным методом / И. В. Вольф, Е. И. Епифанцева, А. Д. Симонов, Ю. М. Чернобережский // Бум. пром-сть.— 1989.— № 4.— С. 30—31. [2]. Thermocatalytic and chemical treatment of lignin-aluminium sludge and utilization of the resulting adsorbent-coagulant / I. V. Wolf, Yu. M. Chernoberezhsky, E. I. Jepifantseva, A. D. Simonov // Wat. Sci. Tech.— 1991.— Vol. 24, N 3/4.— P. 357—360. [3]. The technology of combined physico-chemical and biological treatment of pulp and paper mills waste waters with conversion of sludges into adsorbent-coagulant / Yu. M. Chernoberezhsky, A. N. Nickolaev, I. V. Wolf et al. // Thesis for International environmental symposium «Pulp and paper technologies for a cleaner world», 27—29 April, 1993.— Paris: EU CE PA, 1993.— Session B, vol. 2.— P. 177—180.

Поступила 13 мая 1994 г.

УДК 676.088 : 628.35

А. Н. НИКОЛАЕВ, И. В. ГОРДЕЕВА

С.-Петербургский государственный технологический университет  
растительных полимеров

### О СНИЖЕНИИ СЕРОВОДОРОДНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СРЕДЫ ПРЕДПРИЯТИЯМИ ЦБП

Разработана методика расчета очистки сточных вод от сероводорода ( $H_2S$ ) и его выбросов; предложены эффективные схемы очистки стоков ЦБП от  $H_2S$ .

Calculation methods of hydrosulphuric acid effluents-and-emissions treatment have been developed and efficient schemes for PPP effluents purification from  $H_2S$  have been offered.

Выбросы сероводорода  $H_2S$  на предприятиях ЦБП связаны не только со стоками варочно-выпарных цехов, но и вторичным образованием его на очистных сооружениях.

Для разработки эффективных технологических решений по сокращению выбросов и сбросов сероводорода были исследованы десорбция сероводорода в аэрируемых сооружениях, его химическое, химико-каталитическое, биологическое окисление и адсорбция.

Десорбция сероводорода. Для аэрируемых сооружений уравнение десорбции сероводорода можно записать в виде

$$\frac{dC_r}{dt} = \rho_{ж} \frac{f_n}{V_n} \left( \frac{C}{m_c} - C_{ж} \right), \quad (1)$$

где  $C_r$  — концентрация сероводорода в аэрирующем воздухе, кг/м<sup>3</sup>;  
 $t$  — время, с;  
 $\rho_{ж}$  — коэффициент массоотдачи со стороны жидкой фазы, м/с;  
 $f_n/V_n$  — удельная поверхность контакта фаз воздуховода, м<sup>-1</sup>;  
 $f_n$  — средняя площадь поверхности пузыря воздуха в аппарате, м<sup>2</sup>;  
 $V_n$  — средний объем пузыря воздуха в аппарате, м<sup>3</sup>;  
 $m_c$  — константа фазового равновесия;  
 $C_{ж}$  — концентрация молекулярно-растворенного в воде сероводорода в зоне аэрации, кг/м<sup>3</sup>.

Если пренебречь влиянием гидростатического давления на концентрацию сероводорода во всплывающих пузырьках воздуха и принять, что в зоне аэрации  $C_{ж}$  постоянна, то решение уравнения (1) при начальных условиях  $t = 0$ ;  $C_r = 0$ ;  $t = \tau$ ;  $C_r = C_{г. вых}$  приводит к следующему результату:

$$C_{г. вых} = m_c C_{ж} \left( 1 - e^{-\frac{\rho_{ж} f_n / V_n}{m_c} \tau} \right), \quad (2)$$

где  $\tau$  — продолжительность пребывания пузырей воздуха в воде, с;  
 $C_{г. вых}$  — концентрация сероводорода в воздухе, выходящем в атмосферу, кг/м<sup>3</sup>.

Оценочные расчеты, выполненные по известным соотношениям [1—3], показывают, что при глубине погружения аэраторов более 3 м величиной экспоненциального члена в уравнении (2) можно пренебречь как для крупнопузырчатой, так и мелкопузырчатой аэрации. Тогда, скорость десорбции сероводорода (выброс в атмосферу)  $R_{дес}$  не зависит от массообменных характеристик системы аэрации:

$$R_{дес} = Q_B C_{г. вых} = Q_B m_c C_{ж}. \quad (3)$$

Здесь  $Q_B$  — расход аэрирующего воздуха, м<sup>3</sup>/с.

Скорость уменьшения концентрации сероводорода в сточной воде за счет его десорбции в атмосферу  $v_{дес}$ , кг/(м<sup>3</sup> · с), составит

$$v_{дес} = \frac{Q_B m_c}{V_{ж}} C_{ж}, \quad (4)$$

где  $V_{ж}$  — гидравлический объем аэрируемого сооружения, м<sup>3</sup>.

Из полученных уравнений вытекает важный для практики вывод: совершенствование систем аэрации в направлении повышения объемного коэффициента массопередачи кислорода ( $\rho_{об} = \rho_{ж} \frac{f_n}{V_n}$ ) не увеличивает выброс сероводорода в атмосферу. Напротив, увеличение  $\rho_{об}$  позволяет сократить выбросы сероводорода при снижении расхода воздуха на аэрацию. Например, при замене в аэротенках дырчатых труб на пористые аэраторы  $\rho_{об}$  возрастает в 1,6 раза. Если сохранить кислородную производительность аэротенка, то при уменьшении расхода

аэрирующего воздуха в 1,6 раза, согласно (3), можно сократить выброс сероводорода в 1,6 раза.

Концентрация молекулярно-растворенного сероводорода зависит от общего количества сероводорода в воде (в формах  $H_2S$ ,  $HS^-$ ,  $S^{2-}$ ) и величины рН:

$$C_{ж} = \frac{[H^+]^+ C_{H_2S}}{[H^+]^2 + [H^+] K_1 + K_1 K_2}, \quad (5)$$

где  $[H^+]$  — концентрация катионов водорода,  $[H^+] = \text{anti lg pH}$ ;

$C_{H_2S}$  — общая концентрация сероводорода в воде, кг/м<sup>3</sup>;

$K_1$ ,  $K_2$  — первая и вторая константы диссоциации сероводорода, при температуре 25 °С  $K_1 = 0,81 \cdot 10^{-7}$ ,  $K_2 = 0,58 \cdot 10^{-12}$ .

Как следует из уравнений (3) и (5), повышение рН стоков является эффективной мерой снижения выбросов сероводорода с очистных сооружений. Так, повышение рН с 6,5 до 8,5 (внутри допустимого диапазона для биологической очистки и сброса в водоем) уменьшает концентрацию молекулярно-растворенного сероводорода и его выброс в атмосферу в 20 раз.

Химическое окисление сероводорода. Окисление сероводорода в сточной воде является реакцией гомогенного катализа. Катализатором служат находящиеся в воде примеси: катионы металлов и органические вещества, в частности лигнин. Скорость реакции, которую учитывают по величине химического потребления кислорода (ХПК) стока, зависит от концентраций реагирующих веществ (сероводорода, молекулярного кислорода) и катализатора, а также рН и температуры.

По результатам исследований на модельных стоках сульфатно-целлюлозного производства (разбавленные черные сульфатные щелока) получено следующее кинетическое уравнение:

$$v_x = \frac{v_{\max} C_{H_2S} C_{O_2}}{(K_{H_2S} + C_{H_2S})(K_{O_2} + C_{O_2})}, \quad (6)$$

где  $v_x$  — скорость химического окисления сероводорода в сточной воде, кг/(м<sup>3</sup> · с);

$v_{\max}$  — максимальная скорость окисления сероводорода, зависящая от ХПК, рН и температуры сточной воды;

$C_{O_2}$  — концентрация растворенного кислорода, кг/м<sup>3</sup>;

$K_{H_2S}$ ,  $K_{O_2}$  — константы насыщения сероводорода и кислорода для стоков сульфатно-целлюлозного производства, соответственно равные  $8 \cdot 10^{-4}$  и  $2 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>.

В диапазоне температуры 10...35 °С максимальная скорость окисления сероводорода в стоках сульфатно-целлюлозного производства

$$v_{\max} = v_{\max}^0 n \exp \left[ 5,3 \cdot 10^3 \left( \frac{1}{291} - \frac{1}{273 + T} \right) \right], \quad (7)$$

где  $v_{\max}^0$  — максимальная скорость окисления при рН 10 и температуре 18 °С (табл. 1);

$n$  — коэффициент, учитывающий влияние рН (табл. 2);

$T$  — температура сточной воды, °С.

Химико-каталитическое окисление сероводорода. В аэротенки можно вводить порошкообразный адсорбент типа активированного угля, обладающий свойствами гетерогенного катали-

Таблица 1

ХПК, кг/м <sup>3</sup>	$v_{\max}^0$ 10 <sup>-7</sup> кг/(м <sup>3</sup> · с)	$K_0$ , 10 <sup>-2</sup> м <sup>6</sup> /(кг <sup>2</sup> · с)
0,0	0,8	4,7
0,2	2,8	5,0
0,4	5,8	5,3
0,6	8,6	6,1
0,8	13,0	7,5
1,0	16,0	10,0
1,2	18,0	12,0
1,5	19,0	13,0
2,0	20,0	14,5

Таблица 2

pH	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
$n$	0,15	0,20	0,23	0,26	0,30	0,35	0,90	1,0

затора. При использовании в качестве катализатора продукта термокаталитической переработки волокнистого осадка сточных вод для  $C_{H_2S} = 0 \dots 10$  кг/м<sup>3</sup> экспериментально получено уравнение

$$v_k = K C_{ад} C_{O_2} C_{H_2S}, \quad (8)$$

где  $v_k$  — скорость каталитического окисления сероводорода (на поверхности частиц порошкообразного адсорбента) в сточной воде, кг/(м<sup>3</sup> · с);

$K$  — константа скорости, зависящая от ХПК, pH и температуры, м<sup>6</sup>/(кг<sup>2</sup> · с),

$$K = K_0 n \exp \left[ 7 \cdot 10^3 \left( \frac{1}{291} - \frac{1}{273 + T} \right) \right]; \quad (9)$$

$K_0$  — константа, зависящая от ХПК сточной воды (см. табл. 1);

$C_{ад}$  — концентрация порошкообразного адсорбента, кг/м<sup>3</sup>.

Как видно из полученных данных (табл. 1), константа скорости гетерогенного каталитического окисления возрастает с увеличением ХПК стоков. Отсюда следует, что адсорбция органических веществ на поверхности частиц катализатора существенно увеличивает его каталитическую активность окисления сероводорода.

Общая скорость химико-каталитического окисления сероводорода  $v_{x.k}$  в сточной воде в присутствии гетерогенного катализатора

$$v_{x.k} = v_x + v_k = \left[ \frac{v_{\max}}{(K_{H_2S} + C_{H_2S})(K_{O_2} + C_{O_2})} + K C_{ад} \right] C_{O_2} C_{H_2S}. \quad (10)$$

Скорость окисления сероводорода в сточной воде возрастает с увеличением pH (см. табл. 2), достигая максимума при pH 10, когда основная часть H<sub>2</sub>S находится в форме гидросульфидов.

Биологическое окисление сероводорода. В аэротенках очистных сооружений промстоков ЦБП концентрация тиобацилл незначительна для эффективного биоокисления сероводорода. Для создания и удержания в аэротенке биоценоза специфических микроорганизмов, окисляющих сероводород, целесообразно введение в него плоскостной загрузки, располагаемой на «хвосте» аэротенка в области низких концентраций органических веществ сточной воды. Аэротенк с загрузкой, на которой формируется биопленка, получил название биотенк или аэротенк-аэрофильтр.

Такие сооружения имеют в сравнении с аэротенками ряд преимуществ: стабильность очистки; высокий эффект очистки по БПК<sub>5</sub> и специфическим примесям, трудно поддающимся биоокислению; лучшее осаждение активного ила.

Теоретический анализ и экспериментальные исследования на лабораторном биотенке, работающем в качестве второй ступени биологической очистки после аэротенков, позволили вывести уравнения для расчета скорости биоокисления сероводорода микроорганизмами биопленки:

$$v_6 = \begin{cases} AF_{уд} \frac{\Delta C_{H_2S}}{\Delta БПК_5} C_{H_2S} & \text{при } C_{H_2S} > C_{H_2S}^* \\ BF_{уд} C_{H_2S} & \text{при } C_{H_2S} \leq C_{H_2S}^* \end{cases} \quad (11)$$

где  $v_6$  — скорость биоокисления сероводорода в биотенке при очистке стоков сульфатно-целлюлозного производства, кг/(м<sup>3</sup> · с);

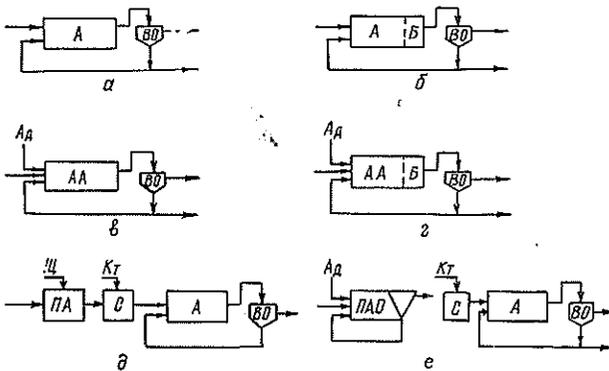
$A, B$  — коэффициенты, зависящие от рН и температуры, при температуре 18 °С и рН 7,0...8,5  $A = 5,8 \cdot 10^{-7}$  кг<sup>1/2</sup>/(м<sup>1/2</sup> · с),  $B = 5,0 \times 10^{-6}$  м/с;

$F_{уд}$  — площадь поверхности загрузки биотенка, отнесенная к 1 м<sup>3</sup> гидравлического объема, м<sup>-1</sup>;

$\Delta C_{H_2S}, \Delta БПК_5$  — соответственно количество сероводорода и органических веществ (по БПК<sub>5</sub>), потребленных микроорганизмами биопленки на 1 м<sup>3</sup> сточной воды, кг/м<sup>3</sup>;

$$C_{H_2S}^* = \left(\frac{A}{B}\right)^2 \frac{\Delta C_{H_2S}}{\Delta БПК_5} \quad (12)$$

Адсорбция сероводорода. При низких концентрациях сероводорода в сточной воде ( $C_{H_2S} < 10^{-2}$  кг/м<sup>3</sup>) и рН 8,5 экспериментально получено уравнение адсорбции на порошкообразном адсорбенте из осадка, прошедшего термokatалитическую обработку:



Принципиальные схемы очистки стоков ЦБП: а — аэротенк А (рН 8,5); б — аэротенк-биотенк Б (рН 8,5); в — аэротенк с порошкообразным адсорбентом АА — биоадсорбер (рН 8,5); г — аэротенк-биотенк с порошкообразным адсорбентом (рН 8,5) д — окисление H<sub>2</sub>S в преаэраторе ПА (рН 9,5...10,0) и аэротенке (рН 8,5); е — каталитическое окисление H<sub>2</sub>S в преаэраторе-отстойнике ПАО с высокой концентрацией порошкообразного адсорбента Ад, поддерживаемой за счет циркуляции осадка (рН 9,5...10,0 — в преаэраторе, рН 8,5 — в аэротенке)

$$\Delta C_{ад} = 0,3C_{ад}C_{H_2S}, \quad (13)$$

где  $\Delta C_{ад}$  — адсорбция сероводорода на 1 м<sup>3</sup> сточной воды, кг/м<sup>3</sup>;  
 $C_{H_2S}$  — остаточная концентрация сероводорода в сточной воде, кг/м<sup>3</sup> (практически равна равновесной при продолжительности адсорбции 30 мин).

На основе выполненных исследований разработана методика расчета очистки от сероводорода в аэротенках-биотенках, включая биоадсорбционную очистку с использованием порошкообразного адсорбента, получаемого из осадка сточных вод. Основные технологические решения, обеспечивающие сокращение выбросов сероводорода с очистных сооружений, приведены на рисунке. (ВО — вторичный отстойник; С — смеситель; Щ — раствор щелочи; Кт — раствор кислоты).

Таблица 3

Вариант очистки	Выброс H <sub>2</sub> S в атмосферу, 10 <sup>-3</sup> кг/с	Сброс H <sub>2</sub> S с очищенной водой, 10 <sup>-3</sup> кг/с	Окисление H <sub>2</sub> S в аэротенке	
			10 <sup>-3</sup> кг/с	%
Аэротенк: рН 7,0	4,000	1,250	2,250	30,0
рН 8,5	0,447	3,000	4,050	54,0
Аэротенк и биотенк-смеситель, занимающий 25 % объема аэротенка (рН 8,5)	0,375	1,250	5,875	78,3
Аэротенк и биотенк-вытеснитель, занимающий 25 % объема аэротенка (рН 8,5)	0,389	0,500	6,611	88,1
Аэротенк с использованием порошкообразного адсорбента в количестве 0,225 кг/м <sup>3</sup> сточной воды (концентрация адсорбента в аэротенке 3 кг/м <sup>3</sup> ; рН 8,5)	0,181	0,833	6,486	86,5
Аэротенк и биотенк-вытеснитель с использованием порошкообразного адсорбента в количестве 0,225 кг/м <sup>3</sup> (рН 8,5)	0,164	0,053	7,283	97,1

Примечания: 1. Параметры аэротенка: общий объем — 23040 м<sup>3</sup>; число секций — 4 шт.; число коридоров в секции — 3 шт.; размер коридора — 60 × 8 × 4 м; коэффициент регенерации — 0,25; коэффициент рециркуляции — 0,5; средняя доза ила — 3 кг/м<sup>3</sup> (в регенераторе — 6 кг/м<sup>3</sup>, в собственно аэротенке — 2 кг/м<sup>3</sup>); расход воздуха на аэрацию — 11,2 м<sup>3</sup>/с. 2. Площадь поверхности загрузки биотенка — 70 м<sup>2</sup> на 1 м<sup>3</sup> его гидравлического объема.

Результаты расчетов для типичных условий очистки стоков (расход — 0,833 м<sup>3</sup>/с; БПК<sub>5</sub> = 0,3 кг/м<sup>3</sup>; ХПК = 1,0 кг/м<sup>3</sup>; концентрация H<sub>2</sub>S — 0,009 кг/м<sup>3</sup>) от сероводорода в аэротенках приведены в табл. 3. Как видно из данных табл. 3, предлагаемые технологические решения повышают эффект окисления сероводорода в аэротенке с 30 до 90... 97 %. Увеличение рН в аэротенке с 7,0 до 8,5 эффективно снижает выбросы в атмосферу, однако сброс сероводорода возрастает более, чем в 2 раза. Реконструкция части аэротенка в биотенк обеспечивает снижение выбросов в атмосферу на 90 % с одновременным сокращением сброса. Лучшие результаты получены на биотенке-вытеснителе, который образован с помощью поперечных перегородок в коридоре аэротенка. Использование порошкообразного адсорбента позволяет сократить выбросы сероводорода на 95... 96 % в сравнении с традиционной

очисткой в аэротенке и практически решить задачу предотвращения загрязнения атмосферы на очистных сооружениях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Моделирование аэрационных сооружений для очистки сточных вод / Л. Н. Брагинский, М. А. Евилевич, В. И. Бегачев и др.—Л.: Химия, 1980.—144 с.  
[2]. Попкович Г. С., Репин Б. Н. Системы аэрации сточных вод.—М.: Стройиздат, 1986.—136 с. [3]. Рамм В. М. Абсорбция газов.—М.: Химия, 1976.—656 с.

Поступила 19 мая 1994 г.

УДК 676.1.022 : 66.074

*Л. Н. ГРИГОРЬЕВ*

С.-Петербургский государственный технологический университет  
растительных полимеров

### КРИТЕРИЙ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ СПОСОБОВ ОЧИСТКИ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРЕ

Предложен технологический критерий для сравнительной оценки способов очистки выбросов в атмосферу с использованием минимального объема информации; показана возможность его применения на примере выбора способа очистки дымовых газов содорегенерационных котлоагрегатов.

A technological criterion for comparative estimation of discharges purification methods using a minimum bulk of information is offered. A possibility of it: using on an example of choosing a method of purifying smoke gases from soda recovery furnaces has been revealed.

Известные источники выбросов целлюлозно-бумажных предприятий в атмосферу характеризуются разнообразием объемных расходов, температуры, состава, концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) и др. Во многих случаях для одного источника может быть предложено несколько способов очистки выбросов. Это обуславливает необходимость проведения разнообразных лабораторных, пилотных и др. исследований, требующих существенных затрат и времени.

В связи с этим представляется целесообразной постановка задачи, направленной на разработку критерия, позволяющего выбрать способ очистки выбросов в атмосферу от конкретного источника на первоначальной стадии решения вопроса, не прибегая к сравнительным и трудоемким экспериментам. При этом такой критерий рассматривается как дополнительный, позволяющий оценить степень совершенства того или иного способа в технологическом отношении, но не исключающий применения общепринятого показателя приведенных затрат.

Для решения задачи был использован опыт оценки совершенства энергетических процессов с помощью эксергетического КПД [3] и систем очистки природного газа по коэффициенту энергоёмкости процесса (КЭП) [6]. Анализ эксергетического и энергетического методов позволил выявить ряд ограничений, не позволяющих использовать их при оценке систем санитарной очистки выбросов в атмосферу [4].

Для этой цели представляется возможным использовать критерий  $K$ , включающий элементы эксергетического и энергетического методов. В общем виде такой критерий имеет вид, аналогичный КЭП [6], но отличающийся составляющими:

$$K = I_{\text{ф}}/I_{\text{м}}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{ф}}$  — фактические затраты на реализацию основного и вспомогательных процессов;

$I_{\text{м}}$  — минимально необходимые затраты на реализацию основного процесса.

К минимальным в соотношении (1) относятся затраты, необходимые для выполнения работы  $l_1$  по снижению концентрации целевого ЗВ от начального значения  $C_0$  до величины, определяемой нормативными требованиями для данного источника загрязнения  $C_{\text{доп}}$ :

$$l_1 = C_0 R T \ln (C_0/C_{\text{доп}}), \quad (2)$$

где  $R$  — газовая постоянная;  
 $T$  — температура.

По существу величина  $l_1$  представляет собой концентрационную эксергию [3], в которой концентрация ЗВ в атмосфере заменена  $C_{\text{доп}}$ .

К минимальным затратам следует отнести также энергию, затрачиваемую на проведение физико-химического превращения ЗВ (в газовой, жидкой или твердой фазах)  $l_2$ . Представляется целесообразным оценить эти затраты по величине потенциала Гиббса  $\Delta G_p$  с учетом фазового и химического (молекула, ион и др.) состояния ЗВ. Величина  $\Delta G_p$  также косвенно связана с реакционной эксергией, отличаясь веществом отсчета, которое в данном случае учитывает реальные особенности анализируемой технологии очистки газов.

Таким образом, для целевого ЗВ имеем

$$l_m = l_1 + l_2 = C_0 R T \ln (C_0/C_{\text{доп}}) + f_x C_0 \Delta G_p^x + f_\phi C_0 \Delta G_p^\phi, \quad (3)$$

где  $f_\phi, f_x$  — эффективность извлечения ЗВ за счет фазового и химического превращений;

$\Delta G_p^\phi, \Delta G_p^x$  — свободная энергия фазового перехода и химической реакции.

В случае использования способа очистки, предусматривающего извлечение из выбросов нескольких ЗВ, минимальные затраты для каждого ЗВ суммируются.

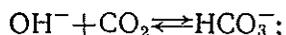
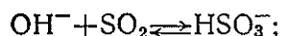
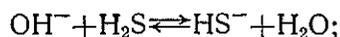
Фактические затраты энергии включают минимально необходимые для удаления из выбросов целевого ЗВ, а также минимальные затраты  $l'_m$  на улавливание сопутствующих веществ, извлекаемых (обезвреживаемых) с соответствующей эффективностью  $f'_\phi$  и  $f'_x$  одновременно с целевым ЗВ. В фактические затраты входят также затраты, обусловленные реализацией вспомогательных (например, конденсация, отстаивание и др.) стадий процесса очистки  $l_{\text{всп}}, \Delta G_{\text{всп}}$ . К фактическим относятся также и дополнительные затраты, включающие затраты на транспортировку газовых, жидких или твердых потоков, энергию сырьевых материалов и продуктов очистки и др.

Энергия сырья и продуктов очистки может быть оценена по величине свободной энергии их образования  $\Delta G'$ . Затраты энергии на транспортировку потоков определяются в сопоставимых размерностях по известным формулам [5, 6]. Энергия потоков или составляющих их компонентов, выводимых из системы очистки с целью полезного использования, исключается из фактических затрат, что обуславливает снижение величины  $K$ , стимулируя, тем самым, стремление к совершенствованию процесса в направлении максимального использования вторичных материалов.

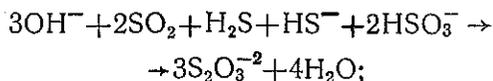
Предлагаемый критерий  $K$  был применен для сравнительной оценки способов очистки дымовых газов содорегенерационных котлоагрегатов (СРКА), имеющих производительность 200 000 м<sup>3</sup>/ч; температуру 393 К; концентрацию сероводорода, диоксида серы, диоксида углерода, диоксида азота, монооксида азота соответственно 0,50; 2,00; 143,40; 0,04; 0,15 г/м<sup>3</sup>. Температура очищенных газов 333 К.

Для рассмотрения выбраны три абсорбционных способа очистки [2]: щелочной, сульфит-сульфидный и щелочной в присутствии гомогенного катализатора дисульфогфталоцианина кобальта (абсорбционно-каталитический). Расчеты проведены с учетом химизма способа:

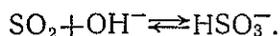
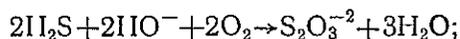
для щелочного



для сульфит-сульфидного



для абсорбционно-каталитического



Расчеты осуществлены при различных значениях эффективности очистки газов от сероводорода при условии, что принятое значение эффективности обеспечивает достижение нормативов на выброс сероводорода.

В качестве абсорбера при реализации щелочного и абсорбционно-каталитического способов принят эжекционный абсорбер Вентури; абсорбентом служил раствор каустика, удельный расход которого составлял 0,3 л/м<sup>3</sup> газа. В сульфит-сульфидном способе для поглощения диоксида серы принят эжекционный абсорбер Вентури (I ступень очистки, абсорбент — раствор каустика), а для поглощения сероводорода — насадочный абсорбер (II ступень очистки, абсорбент — раствор сульфита-бисульфита). Отработанный абсорбент при реализации всех способов возвращался в цикл производства.

Эффективность очистки газов от диоксида серы, диоксида азота, монооксида азота составляла 80, 30, 0 %. Результаты сравнительной оценки способов очистки газов приведены в таблице.

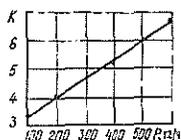
Способ очистки	Значения K при эффективности очистки от H <sub>2</sub> S (CO <sub>2</sub> )				
	0,70(0,00)	0,90(0,00)	0,90(0,05)	0,90(0,10)	0,90(0,25)
Щелочной	4,10	4,67	15,60	77,52	173,37
Сульфит-сульфидный	1,83	2,28	3,78	5,27	9,76
Абсорбционно-каталитический	6,68	6,92	8,15	11,41	21,20

Из таблицы видно, что наиболее совершенным из рассмотренных способов является сульфит-сульфидный. Для практической реализации представляет интерес и абсорбционно-каталитический способ, уровень технологичности которого может быть повышен, например, путем использования более доступных и дешевых, менее токсичных и регенерируемых (утилизируемых) катализаторов.

Данные таблицы свидетельствуют также, что сульфит-сульфидный способ наиболее чувствителен к содержанию в газах диоксида углерода.

Следует также отметить, что повышенные значения K при реализации щелочного и абсорбционно-каталитического способов очистки

во многом обусловлены применением в качестве абсорбента раствора каустика. Технически не трудно обеспечить высокую эффективность очистки газов СО<sub>2</sub> от сероводорода щелочным способом в присутствии избытка СО<sub>2</sub>. Однако при этом необходимо использовать достаточно большое количество каустика [1], что, как это видно из рисунка ( $P$  — расход каустика), приводит к существенному превышению фактических затрат относительно минимально необходимых и делает данный способ технологически несовершенным.



Влияние расхода каустика  $P$  на уровень совершенства способа очистки дымовых газов сорбентно-регенерационного котлоагрегата.

Результаты расчетов, приведенные в таблице, не противоречат известной информации, представляя ее в более объективной и количественно значимой форме.

Предлагаемый критерий позволяет выявить не только наиболее технологически удобный для конкретных условий способ очистки, но и определить основные направления его совершенствования. Он может быть использован также для сравнительной оценки газоочистного оборудования, при выборе способов и аппаратов в системах очистки сточных вод.

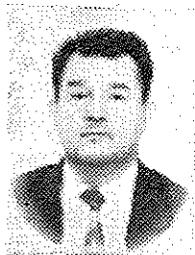
#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Анискин С. В., Яковлев В. А., Телюкин Г. В. Реконструкция установок для очистки дымовых газов // Бум. пром-сть.— 1989.— № 6.— С. 12—13. [2]. Братчиков Г. Г. Очистка газовых выбросов в целлюлозно-бумажной промышленности.— М.: Лесн. пром-сть, 1989.— 256 с. [3]. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалец К. Эксергетический метод и его приложения.— М.: Энергоатомиздат, 1988.— 288 с. [4]. Григорьев Л. Н., Молочников М. Л. Выбор способа очистки и обезвреживания выбросов в атмосферу // Технология судостроения.— 1991.— № 6.— С. 56—58. [5]. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию / Под ред. Ю. И. Дытнерского.— М.: Химия, 1983.— 272 с. [6]. Очистка газов от сернистых соединений при эксплуатации газовых месторождений / А. И. Гриценко, И. А. Галанин, Л. М. Зиновьева и др.— М.: Недра, 1985.— 270 с.

Поступила 13 декабря 1993 г.

УДК 676.013.8 : 628.5

Н. К. ДЕРМАНОВ, Г. И. ИОНСЕН



Дерманов Николай Константинович родился в 1940 г., окончил в 1965 г. Ленинградский технологический институт, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отраслевой лаборатории по очистке газопылевых выбросов ЦБП С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет 45 научных трудов, в том числе 11 изобретений, в области разработки и освоения новых технологий очистки газопылевых выбросов на основе применения гомогенных и гетерогенных катализаторов.

Ионсен Галина Ивановна родилась в 1966 г., окончила в 1989 г. Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, младший научный сотрудник С.-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров. Имеет 6 печатных трудов в области кинетики процессов массопередачи при абсорбции серосодержащих газов.



## АБСОРБЦИОННО-КАТАЛИТИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ОТ СЕРОВОДОРОДА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ СОДОРЕГЕНЕРАЦИОННЫХ КОТЛОАГРЕГАТОВ СУЛЬФАТНО-ЦЕЛЛЮЛОЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Разработан и испытан в производственных условиях способ очистки дымовых газов содорегенерационных котлоагрегатов сульфатно-целлюлозного производства, основанный на обработке дымовых газов щелочными растворами фталоцианиновых катализаторов, обеспечивающий поглощение сероводорода с эффективностью 98...99 %. Изучено влияние на эффективность процесса кинетических и технологических параметров.

There has been developed and tested in the conditions of manufacture a method of purifying flue gases from sulphate pulping soda recovery boiler-furnaces, based on flue gases treatment by alkali solutions of phthalocyanines catalysts, providing hydrogen sulphide absorbing at the efficiency of 98...99%. The of influence kinetic and technological parameters on the efficiency of the process has been studied.

Дымовые газы содорегенерационных котлоагрегатов (СРК) сульфатно-целлюлозного производства содержат в своем составе 75...80 % сероводорода от общего его количества, выделяющегося в атмосферу при сульфатном способе получения целлюлозы [10].

Имеющиеся на предприятиях установки по очистке дымовых газов СРК позволяют уменьшить выброс сероводорода лишь на 40 % [4].

Отрицательное воздействие диоксида углерода проявляется в накоплении его поглотительным раствором, что приводит к разложению основного продукта щелочной абсорбции — бисульфид натрия  $\text{NaHS}$ , сопровождающемуся образованием и выделением вторичного сероводорода.

Абсорбционно-каталитическая очистка дымовых газов от сероводорода — одно из перспективных направлений решения данной проблемы. Благодаря каталитическому окислению абсорбированного сероводорода до устойчивых соединений не происходит его выделение из раствора и обеспечиваются условия для существенного увеличения степени его поглощения из дымовых газов [9].

К достоинствам метода, в котором используют высокоактивные катализаторы, относится возможность увеличения степени поглощения сероводорода без повышения расхода содопродуктов [1, 2]. Для условий целлюлозного производства разработаны также технологии, основанные на применении в качестве окислительных катализаторов некоторых отходов основного производства [3].

Цель настоящей работы — изучить кинетику процесса абсорбционно-каталитического окисления (АКО) сероводорода и провести испытания разработанной на ее основе новой технологии очистки дымовых газов СРК в промышленных условиях.

*Методическая часть*

Изучение кинетики процесса АКО сероводорода из дымовых газов СРК проводили на лабораторном стенде с использованием абсорбера типа «термостатированный сосуд с мешалкой» [5], имеющего систему дозирования газовых компонентов дымовых газов СРК, и аналитического определения концентраций в газовом потоке сероводорода, кислорода и диоксида серы, а также состава поглотительного раствора на входе и выходе из абсорбера.

Изучение гидродинамики процесса АКО сероводорода и его эффективности проводили на сконструированной для этой цели полупроизводственной установке производительностью 1000 м<sup>3</sup>/ч дымовых газов, смонтированной на Сегежском ЦБК.

Предварительная ступень очистки дымовых газов была предназначена, главным образом, для охлаждения газов и улавливания пылевых частиц (сульфат натрия) и диоксида серы. Она включала эжекторный скруббер Вентури (диаметр горловины 0,1 м), циркуляционный бак, насос и кожухотрубный теплообменник. Основная ступень установки, предназначенная для поглощения из дымовых газов сероводорода, состояла из полого форсуночного абсорбера (диаметр 0,2 м; высота контактной зоны 4,0 м), выносного аэратора поглотительного раствора (размеры 2,0 × 1,5 × 1,8 м), насоса, резервного (соединенного через байпас) скруббера Вентури и кожухотрубного теплообменника. Транспортировку дымовых газов через установку производили при помощи высоконапорного вентилятора ВВД № 5.

Для получения сравнимых результатов физические и химические параметры газовой и жидкой фаз на лабораторной установке поддерживали идентичными с данными параметрами полупроизводственной установки на Сегежском ЦБК.

Частоту вращения турбинной мешалки в лабораторном абсорбере устанавливали так, чтобы обеспечивалось равенство коэффициентов массоотдачи в жидкой фазе при физической абсорбции  $\beta_{ж}$  в полупромышленном и лабораторном абсорберах. В соответствии с принципом Данквертса [5], результаты, полученные в лабораторном абсорбере, могут быть использованы для описания процессов, происходящих в полупромышленном абсорбере.

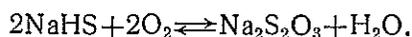
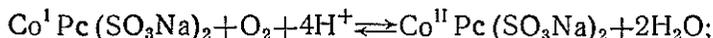
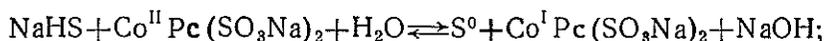
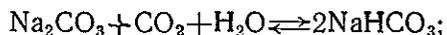
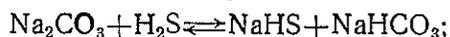
При проведении исследований в качестве окислительных катализаторов применяли дисульфоталочанин кобальта (ДСФК) и тетрасульфоталочанин кобальта (ТСФК) с удельной активностью, равной соответственно 70,4 и 130,0 моль O<sub>2</sub>/(моль катализатора · мин) [8].

Дымовые газы имели следующие концентрации компонентов: сероводород 0,1...1,0 г/м<sup>3</sup> с. г.; кислород 0...10% об.; диоксид углерода 4,0...14,0% об.; диоксид серы 0,0...0,6 г/м<sup>3</sup> с. г. В состав поглотительного раствора входили катализатор ДСФК (ТСФК) — 0,0...50,0 г/м<sup>3</sup> и сульфид натрия — 0,0...0,4 кг/м<sup>3</sup>. Температура в абсорбере 285...350 К; частота вращения турбинной мешалки в лабораторном абсорбере 400 об/мин.

*Механизм жидкофазного окисления сероводорода  
в присутствии фталоцианиновых катализаторов*

Как известно [6], каталитическая активность комплексных фталоцианиновых катализаторов с введенными в них для увеличения растворимости сульфогруппами —SO<sub>3</sub>Na при окислении соединений двухвалентной серы (сероводорода, метилмеркаптана и др.) на 1,5—2 порядка превышает активность известных неорганических и органических катализаторов.

Согласно сформировавшейся концепции [8], в щелочных растворах каталитическое действие фталоцианиновых катализаторов реализуется посредством взаимодействия его двухвалентной каталитически активной формы  $\text{Co}^{\text{II}}\text{Pc}(\text{SO}_3\text{Na})_2$  и  $\text{NaHS}$  с образованием элементарной серы и тиосульфата натрия. При этом двухвалентная форма восстанавливается до каталитически пассивной одновалентной. Взаимодействие с кислородом осуществляется по следующей схеме:



*Эффективность воздействия каталитического окисления на процесс хемосорбции сероводорода*

Как показали результаты обследований, проведенных на ряде предприятий отрасли, концентрации компонентов в дымовых газах СРК изменяются в широких пределах (часто на порядок) даже в течение одних суток. Поэтому воздействие каталитического окисления на хемосорбцию сероводорода изучали в лабораторных условиях, закрепляя на одном уровне концентрационные, технологические и температурные параметры процесса.

В табл. 1 приведены результаты исследования влияния на коэффициент массоотдачи в жидкой фазе при окислительной каталитической хемосорбции сероводорода из дымовых газов  $\beta'_{\text{ж}}$  таких кинетических параметров, как температура, концентрация гомогенного катализатора ДСФК, концентрация активной части хемосорбента, концентрация в дымовых газах СРК сероводорода и кислорода.

Как видно из табл. 1, значения  $\beta'_{\text{ж}}$  с увеличением значений параметров, за исключением температуры, пропорционально возрастают. Повышение температуры, с одной стороны, приводит к увеличению скорости жидкофазного каталитического окисления  $\text{NaHS}$  (основного продукта абсорбции), с другой стороны, в результате увеличения равновесных концентраций сероводорода над поглотительным раствором снижает эффективность его абсорбции. Поэтому существует оптимальная область температур, при которой  $\beta'_{\text{ж}}$  достигает максимума (325...340 К). Соответствующие ей значения  $\beta'_{\text{ж}}$  находятся в диапазоне  $(20 \dots 25) \cdot 10^{-3}$  м/с. Максимальное значение  $\beta'_{\text{ж}} = 38 \cdot 10^{-3}$  м/с при температуре 333 К.

Как показали результаты исследования влияния на изучаемый процесс дополнительных параметров, увеличение в дымовых газах концентраций диоксидов углерода и серы в диапазонах 5,0...15,0 % об. и 0,1...1,0 г/м<sup>3</sup> с. г. приводит к снижению  $\beta'_{\text{ж}}$  соответственно от  $35,0 \cdot 10^{-3}$  до  $2,2 \cdot 10^{-3}$  м/с и от  $35,0 \cdot 10^{-3}$  до  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м/с.

С помощью математической обработки экспериментальных данных выведено уравнение, связывающее коэффициент  $\beta'_{\text{ж}}$  с кинетическими параметрами процесса абсорбционно-каталитической очистки:

$$\begin{aligned} \beta'_{\text{ж}} = & 6,07 \cdot 10^{-2} a C_{\text{кат}}^{0,314} B_0^{0,58} C_{\text{H}_2\text{S}}^{0,24} \cdot 10^{-2,44} [\text{Na}_2\text{S}] \times \\ & \times \exp(-1,7 [\text{SO}_2]) \exp(-0,09 [\text{CO}_2]) \exp(0,016 [\text{O}_2]) \times \\ & \times (-1,08 \cdot 10^{-4} T^2 + 0,072 T - 11,965), \end{aligned}$$

Таблица 1

Средне-логарифмическая температура в абсорбере, К	Концентрация в поглотительном растворе		Концентрация в дымовых газах		Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе при абсорбции $H_2S$ $\beta_{ж} \cdot 10^3$ , м/с	Коэффициент ускорения абсорбции $H_2S$
	активной части хемосорбента, г/м <sup>3</sup>	катализатора, кг/м <sup>3</sup>	O <sub>2</sub> , % об.	H <sub>2</sub> S, г/нм <sup>3</sup> с. г.		
311,4	2,64	0,000	9,50	0,127	1,07	11,6
311,6	2,76	0,005	9,58	0,154	1,16	12,6
311,2	2,73	0,015	9,66	0,230	1,74	18,6
310,3	2,50	0,025	9,84	0,225	2,03	22,1
310,6	2,77	0,040	9,56	0,153	2,50	26,2
311,2	2,71	0,050	9,47	0,342	3,30	35,8
311,0	0,64	0,050	9,36	0,174	3,20	34,7
310,5	2,95	0,050	9,52	0,335	3,32	36,3
310,7	4,37	0,050	9,43	0,217	4,40	48,3
310,8	6,78	0,050	9,69	0,193	5,90	64,1
282,2	2,75	0,050	9,70	0,276	0,80	11,7
294,5	2,64	0,050	9,65	0,178	1,90	24,6
290,6	2,71	0,050	9,82	0,151	2,61	34,6
311,3	2,66	0,050	9,63	0,342	3,30	35,8
323,6	2,83	0,050	9,60	0,191	15,8	159,2
325,1	2,70	0,050	9,61	0,130	27,5	277,7
333,0	2,66	0,050	9,59	0,109	38,0	362,7
343,8	2,74	0,050	9,74	0,129	23,3	214,5
348,7	2,70	0,050	9,64	0,246	8,02	71,0
311,9	2,84	0,050	9,73	0,342	3,30	35,8
311,0	2,74	0,050	9,75	0,035	2,00	20,6
310,5	2,66	0,050	9,64	0,105	3,21	34,7
311,2	2,68	0,050	9,80	0,240	3,79	41,1
310,7	2,68	0,050	9,74	0,311	4,12	42,0
310,3	2,74	0,050	9,71	0,420	4,15	42,5
311,0	2,71	0,050	9,52	0,880	4,15	42,8
311,2	2,73	0,050	0,05	0,178	2,80	29,4
311,5	2,77	0,050	1,05	0,223	2,87	30,1
311,5	2,65	0,050	1,70	0,246	2,92	30,7
311,1	2,61	0,050	3,10	0,213	3,08	32,3
310,7	2,72	0,050	4,95	0,194	3,18	33,4
310,4	2,69	0,050	7,05	0,108	3,22	33,8
310,7	2,70	0,050	9,80	0,128	3,35	35,2

Примечание. Условия хемосорбции: соотношение жидкой и газовой фаз в абсорбере с мешалкой 0,0153 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>; поверхность контакта фаз  $7,85 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>; частота вращения турбинной мешалки 400 об/мин; объемная доля диоксида углерода в дымовых газах на входе в абсорбер 7,7 %.

- где  $a$  — удельная активность гомогенного окислительного катализатора, моль O<sub>2</sub>/(моль катализатора · мин);  
 $C_{кат}$  — концентрация гомогенного катализатора в поглотительном растворе, кг/м<sup>3</sup>;  
 $B_0$  — концентрация активной части хемосорбента в поглотительном растворе, г/м<sup>3</sup>;  
 $C_{H_2S}$  и [SO<sub>2</sub>] — концентрация в дымовых газах СПК сероводорода и диоксида серы, г/нм<sup>3</sup> с. г.;  
 [Na<sub>2</sub>S] — концентрация сульфида натрия в поглотительном растворе, кг/м<sup>3</sup>;

$[CO_2]$  и  $[O_2]$  — концентрация в дымовых газах СРК диоксида углерода и кислорода, % об.;

$T$  — среднелогарифмическая температура в абсорбере, К.

Уравнение справедливо для расчета процессов массопередачи при каталитической хемосорбции сероводорода из дымовых газов СРК в полых скрубберах распрыскивающего типа с использованием как фталоцианиновых, так и органических и неорганических катализаторов, информация об удельной активности которых представлена в работе [8].

Таблица 2

Расход дымовых газов в абсорбере, м <sup>3</sup> /ч	Удельное орошение абсорбера, л/м <sup>3</sup>	Концентрация сероводорода в дымовых газах, г/м <sup>3</sup> с. г.		Эффективность поглощения сероводорода в абсорбере, %	Поверхность контакта фаз в абсорбере, м <sup>2</sup>	Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе при хемосорбции сероводорода $\beta'_j \cdot 10^3$ , м/с	Коэффициент ускорения абсорбции сероводорода
		до очистки в абсорбере	после очистки в абсорбере				
256	4,0	0,245	0,006	97,5	6,74	22,7	299
513	2,0	0,275	0,058	79,0	6,56	19,2	253
513	4,0	0,344	0,032	91,0	10,73	17,9	175
513	4,0	0,344	0,019	95,5	10,68	22,0	216
513	6,0	1,207	0,066	94,5	6,57	24,2	172
769	4,0	0,256	0,022	91,1	13,47	22,2	212
513	8,0	0,156	0,002	98,5	16,00	25,0	234
890	4,5	0,179	0,021	88,3	15,96	18,8	176

Примечание. Испытания проведены при концентрации катализатора в поглотительном растворе 50 г/м<sup>3</sup> и температуре в абсорбере 320...330 К.

В табл. 2 приведены результаты промышленных испытаний процесса абсорбционно-каталитической очистки дымовых газов от сероводорода на полупроизводственной установке СРК № 5 Сегежского ЦБК. При проведении испытаний необходимую для расчета коэффициентов массоотдачи в жидкой фазе при хемосорбции сероводорода поверхность контакта фаз определяли химическим методом на основе измерения параметров абсорбции диоксида углерода щелочными растворами и водой (гидродинамические параметры идентичны) [7].

Как видно из табл. 2, при проведении испытаний в производственных условиях значения  $\beta'_j$  составляют  $(18...25) \cdot 10^{-3}$  м/с и удовлетворительно согласуются с результатами, которые получены на лабораторном абсорбере, и при оптимальной температуре 320...330 К равны  $(16...27) \cdot 10^{-3}$  м/с.

### Выводы

Разработана и испытана в производственных условиях новая технология очистки дымовых газов СРК сульфатно-целлюлозного производства, основанная на обработке дымовых газов щелочными растворами фталоцианиновых катализаторов и обеспечивающая при концентрации катализатора в растворе 40...50 г/м<sup>3</sup> и температуре в абсорбере 320...330 К поглощение сероводорода с эффективностью 98...99 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. А. с. 927876 СССР, МКИ Д 21 С 11/06. Способ регенерации химикатов из дымовых газов сульфатно-целлюлозного производства / Н. К. Дерманов, А. И. Торф,

А. В. Наумов, Н. Н. Кундо, М. Г. Швабский, В. С. Соболев (СССР).— № 2973133/29-12; Заявлено 06.08.80; Оpubл. 15.05.82, Бюл. № 18 // Открытия. Изобретения.— 1982.— № 18.— С. 137. [2]. А. с. 1146346 СССР, МКИ Д 21 С 11/06. Способ регенерации химикатов из дымовых газов сульфатного производства целлюлозы // Н. К. Дерманов, А. В. Наумов, М. Г. Швабский, И. Ш. Левит, Б. В. Прохоров, А. М. Буренин (СССР).— № 3711464/29-12; Заявлено 22.03.84; Оpubл. 23.03.85, Бюл. № 11 // Открытия. Изобретения.— 1985.— № 11.— С. 80. [3]. А. с. 1678937 СССР, МКИ Д 21 С 11/06. Способ регенерации химикатов из дымовых газов сульфатно-целлюлозного производства / Н. К. Дерманов, С. П. Пасечник, Н. И. Легина, И. Ю. Пятых, В. Е. Манохина (СССР).— № 4760324/12; Заявлено 20.11.89; Оpubл. 23.09.91, Бюл. № 35 // Открытия. Изобретения.— 1989.— № 35.— С. 106. [4]. Братчиков Г. Г. Очистка газовых выбросов в целлюлозно-бумажной промышленности.— М.: Лесн. пром-сть, 1989.— 256 с. [5]. Данквертс П. В. Абсорбция газов жидкостями // Теор. основы хим. технологии.— 1987.— Т. 1, № 1.— С. 31—46. [6]. Дерманов Н. К. Исследование процессов абсорбции и каталитического окисления соединений сульфидной серы при очистке низкоконтрированных выбросов сульфатно-целлюлозного производства: Дис. ... канд. техн. наук.— Л.: ЛТИ ЦБП, 1978.— 175 с. [7]. Кишиневский М. X., Корниенко Т. С., Попа Т. М. Исследование массообмена в системах газ—жидкость при наличии химической реакции // Теор. основы хим. технологии.— 1970.— Т. IV, № 5.— С. 671—678. [8]. Кундо Н. Н. Каталитические способы очистки сернистых выбросов и получения серы: Дис. ... докт. хим. наук.— Новосибирск: ИК АН СССР, 1991.— 380 с. [9]. Очистка дымовых газов содорегенерационных котлоагрегатов сульфатно-целлюлозного производства от сероводорода и метилмеркаптана / Н. К. Дерманов, С. П. Алентьев, Г. И. Ионсен и др. // Охрана окружающей среды от загрязнения промышленными выбросами ЦБП: Межвуз. сб. науч. тр. / СПбТУРП—С.-П., 1993.— С. 144—147. [10]. Ситтиг М. Защита окружающей среды в целлюлозно-бумажной промышленности / Пер. с англ. Б. М. Гуткина.— М.: Лесн. пром-сть, 1981.— 280 с.

Поступила 25 мая 1994 г.

УДК 676.16.022.13

Ю. С. ИВАНОВ, Л. О. ИОФФЕ, Ш. Ф. ДВОСКИН, А. Б. БРОДЕРЗОН

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт бумаги»

### КИСЛОРОДНО-ЩЕЛОЧНАЯ ЦЕЛЛЮЛОЗА, ПОЛУЧЕННАЯ В ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ

Предложен новый варочный процесс получения целлюлозы, имеющей свойства, близкие к сульфатной.

A new pulping process for cellulose yield with the properties similar to those of the sulphatc one has been offered.

В середине 70-х годов кислородную варку рассматривали как альтернативу сульфатному процессу [1]. Развиваемая в те годы технология включала три ступени: натронная варка, размол полупроваренной щепы, кислородная делигнификация полученных волокон. В связи с многоступенчатостью, а также из-за снижения прочности целлюлозы по сравнению с сульфатной [3], этот способ не нашел промышленного использования.

Применение пульсационной техники для делигнификации древесины кислородом позволило отказаться от разделения древесного материала на волокна [8]. В результате проведения исследований в лабораторных и ползаводских условиях [9] были разработаны два варианта варочного процесса: кислородно-щелочной I (варка щепы без предварительной обработки) и кислородно-щелочной II (варка щепы с предварительной щелочной обработкой при повышенной температуре) [5].

Цель настоящей работы — сопоставить свойства образцов кислородно-щелочной и сульфатной целлюлозы, полученных из различных пород древесины.

## Экспериментальная часть

Кислородно-щелочные варки проводили в автоклавной пульсационной установке по методике, описанной в [2]. Кислородно-щелочную делигнификацию осуществляли по следующему режиму: температура 140...150 °С; рН 7,5; давление 1,5 МПа.

Сульфатную варку проводили в автоклавах из нержавеющей стали, помещенных в глицериновую баню. Температура варки 170 °С; продолжительность 90 мин; расход щелочи 25 %; сульфидность для варки лиственной древесины 15, хвойной — 17 %  $\text{Na}_2\text{O}$  от массы абс. сухой щепы. Для отбелки лиственной целлюлозы использовали схему Д-П-Д-П, хвойной — Х/Д-Щ<sub>0</sub>-Д-Щ-Д.

Целлюлозу и отливки анализировали по принятым в Российской Федерации стандартам.

## Обсуждение результатов

В табл. 1 представлены основные показатели образцов кислородной и сульфатной целлюлозы, полученных из древесины березы и осины. Кислородно-щелочная целлюлоза I отличается высокой белизной и большим, по сравнению с сульфатной, выходом. Повышение выхода для березовой целлюлозы составляет 7,9 %, для осиновой — 4,6...10,3 %.

Таблица 1

Свойства небеленой кислородно-щелочной и сульфатной целлюлозы из лиственной древесины

Номер образца	Породы древесины	Целлюлоза	Выход, %	Число Каппа	Белизна, %	Вязкость, мПа · с
1	Осина	Сульфатная	54,1	12,0	34,6	73,3
2	»	Кислородно-щелочная:				
		I	58,7	10,0	66,0	33,1
3	»	I	64,4	17,0	61,5	36,6
4	»	II	58,4	12,5	59,0	58,5
5	»	II	60,5	18,9	58,0	62,0
6	Береза	Сульфатная	48,0	15,2	32,3	62,5
7	»	Кислородно-щелочная:				
		I	55,9	19,0	57,7	35,3
8	»	II	50,5	15,4	51,7	43,3

Кислородно-щелочная целлюлоза II имеет незначительное (4,3 % для осиновой и 2,5 % для березовой древесины) увеличение выхода, если сравнивать с сульфатной. Белизна этой целлюлозы высокая, но несколько ниже, чем у кислородно-щелочной I.

На рис. 1 в виде диаграммы представлены прочностные свойства отливок березовой целлюлозы со степенью помола 60 °ШР. Сульфатная и кислородно-щелочная целлюлоза II очень близки по всем показателям. Кислородно-щелочная целлюлоза I при высокой прочности на разрыв заметно уступает им по прочности на излом и раздирание.

Динамика изменения свойств отливок в зависимости от продолжительности размола изучена на образцах целлюлозы из осины (образцы 1, 3, 4 в табл. 1). Из рис. 2, а следует, что среди трех исследованных образцов легче всего размальывается кислородно-щелочная целлюлоза I. На ее размол до одинаковой степени помола требуется в 2 раза меньше времени, чем для сульфатной целлюлозы. Продолжительность размола кислородно-щелочной целлюлозы II в 1,4 раза больше, чем кислородно-щелочной I. Из представленной на рис. 2, б зависимости видно,

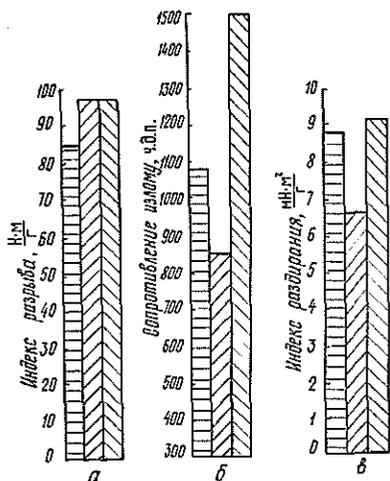


Рис. 1. Прочностные свойства березовой целлюлозы (степень помола 60 °ШР, масса 75 г/см<sup>2</sup>): а — индекс разрыва; б — сопротивление излому; в — индекс раздирающая; 1 — сульфатная целлюлоза; 2 — кислородно-щелочная I; 3 — кислородно-щелочная II

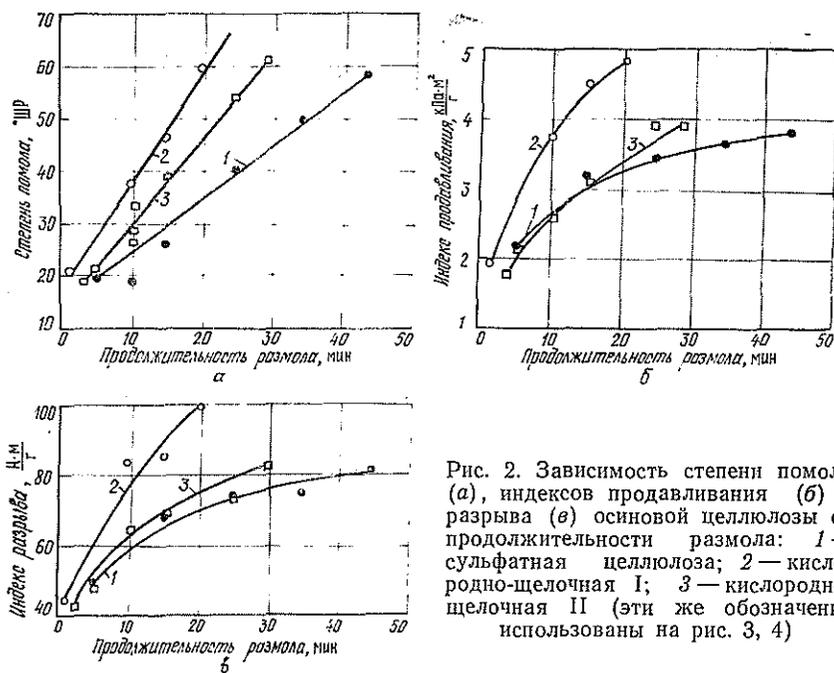


Рис. 2. Зависимость степени помола (а), индексов продавливания (б) и разрыва (в) осиновой целлюлозы от продолжительности размола: 1 — сульфатная целлюлоза; 2 — кислородно-щелочная I; 3 — кислородно-щелочная II (эти же обозначения использованы на рис. 3, 4)

что прочность на продавливание растет быстрее у кислородно-щелочной целлюлозы I и достигает большей величины по сравнению с двумя другими образцами. Такая же закономерность обнаружена и при измерении прочности этих образцов на разрыв (рис. 2, в). Кислородно-щелочная целлюлоза II и сульфатная целлюлоза оказались очень близки между собой по прочности на разрыв и продавливание.

На рис. 3, а дана зависимость прочности осиновой целлюлозы на раздираение от индекса разрыва. В изученном интервале кислородно-щелочная целлюлоза I имеет заметно меньшую прочность на раздира-

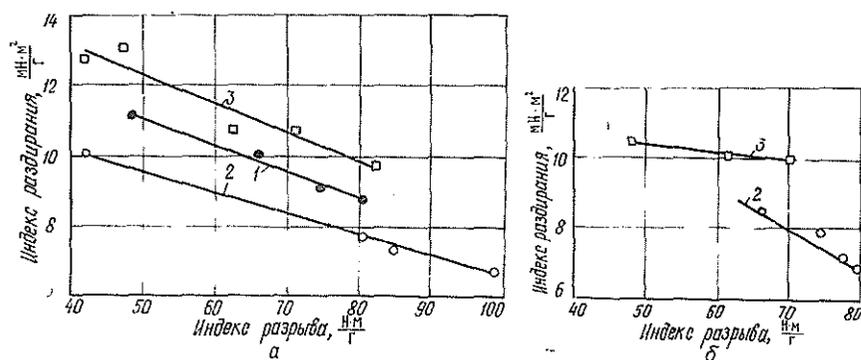


Рис. 3. Зависимость индекса раздиранья от индекса разрыва основной небеленой (а) и беленой (б) целлюлозы

Таблица 2

Свойства образцов беленой основной целлюлозы

Целлюлоза	Белизна, %	Индекс			Сопротивление излому, ч. д. п.
		разрыва, $\frac{H \cdot m}{г}$	продавливания, $\frac{кПа \cdot м^2}{г}$	раздиранья, $\frac{мН \cdot м^2}{г}$	
Сульфатная	88,5	68,4	3,0	9,8	810
Кислородно-щелочная:					
I	86,8	80,0	4,9	6,9	650
II	86,8	69,7	3,9	10,0	695
III	87,3	79,2	4,0	9,3	830

ние, чем сульфатная и кислородно-щелочная II, которая среди трех сравниваемых образцов обладает наибольшей прочностью.

В табл. 2 представлены показатели образцов 1, 3, 4 целлюлозы из осины после отбелки.

Образцы беленой целлюлозы из осины обнаруживают те же особенности, что и соответствующие небеленые. Кислородно-щелочная целлюлоза I имеет хорошие показатели статической прочности и невысокий показатель сопротивления раздиранью, характеризующий динамическую прочность. Сульфатная целлюлоза и кислородно-щелочная II близки между собой и превосходят по прочности на раздиранье кислородно-щелочную I, уступая ей в прочности на продавливание и разрыв.

На рис. 3, б представлена характеристика прочности образцов беленой кислородно-щелочной целлюлозы в координатах разрыв — раздиранье. Из графиков следует, что большое преимущество в прочности на раздиранье у кислородно-щелочной II сохраняется и после отбелки.

Хвойные породы древесины делигнифицируются всеми способами труднее, чем лиственные. Многие варочные процессы, пригодные для переработки лиственных пород древесины, дают из хвойных целлюлозу недостаточно высокого качества.

Из данных, представленных в табл. 3, видно, что и при варке хвойной древесины кислородно-щелочной способ по сравнению с сульфатным обеспечивает увеличение выхода целлюлозы. Повышение выхода кислородно-щелочной целлюлозы II составляет 1,5...1,8 %, кислородно-щелочной I — 7,2 %. При равных значениях чисел Каппа белизна кислородно-щелочной целлюлозы I выше, чем у сульфатной и кислородно-щелочной II соответственно на 19 и 8...10 %.

Таблица 3

## Свойства небеленой хвойной целлюлозы

Порода древесины	Целлюлоза	Выход, %	Число Каппа	Белизна, %	Вязкость, мПа·с
Ель	Сульфатная	46,8	25,8	27,1	73,2
»	Кислородно-щелочная:				
»	I	54,0	25,3	46,0	20,7
»	II	48,5	25,7	35,7	26,2
Сосна	Сульфатная	44,6	26,2	25,8	25,0
»	Кислородно-щелочная II	46,1	22,1	36,0	70,6

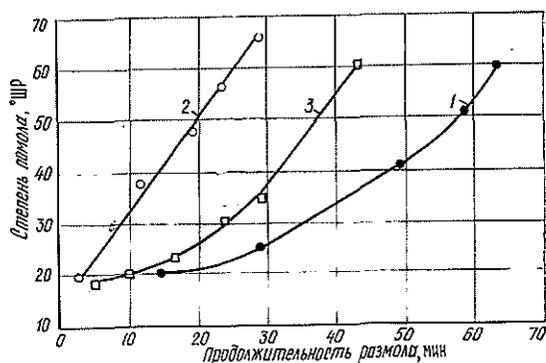


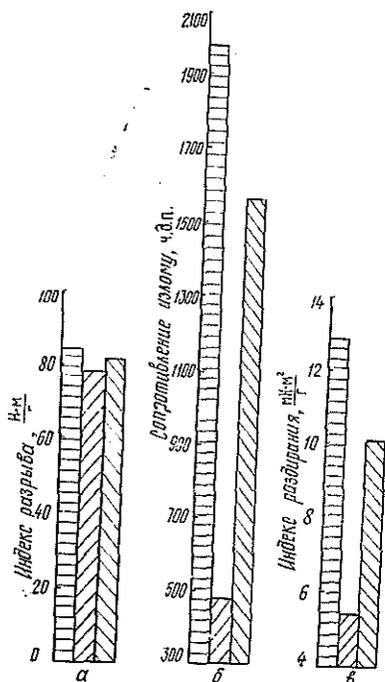
Рис. 4. Зависимость степени помола еловой целлюлозы от продолжительности размола

На рис. 4 представлены кривые, характеризующие способность еловой целлюлозы к размолу. Среди исследованных образцов хвойная кислородно-щелочная целлюлоза I, как и лиственная этого же способа варки, размалывается с наибольшей скоростью. Однако по прочности она значительно уступает сульфатной целлюлозе и кислородно-щелочной II (рис. 5). Кислородно-щелочная целлюлоза II из ели близка по прочности на разрыв к сульфатной, но имеет несколько меньшую прочность на раздираание.

Как установлено экспериментально, в процессе отбеливания прочностные показатели хвойной кислородно-щелочной целлюлозы II улучшаются. При незначительном изменении сопротивления раздираанию показатели сопротивления излому, продавливанию и разрыву возрастают соответственно на 33, 30 и 9 %. Увеличение прочности хвойной кислородно-щелочной целлюлозы в процессе отбеливания отмечалось и ранее [10].

Причины различия свойств кислородно-щелочной и сульфатной целлюлозы до сих пор недостаточно ясны. В частности, ими могут быть следующие: 1) наличие исходной рыхлости структуры волокон вследствие механической обработки щепы (размола) перед делигнификацией кислородом [1]; 2) тенденция паракристаллических целлюлозных фибрилл к образованию при кислородной варке аморфных зон, обуславливающих продольную усадку, что вызывает расщепление волокон в тангенциальном направлении на концентрические слои [1]; 3) повышенная гидрофильность волокон кислородной целлюлозы за счет содержащихся в остаточном лигнине карбоксильных групп [6].

Рис. 5. Прочностные свойства еловой целлюлозы (степень помола 60° ШР, масса 75 г/см<sup>2</sup>; обозначения приведены на рис. 1)



Выше отмечалось, что особенностью технологии варки целлюлозы в пульсационном аппарате является отсутствие какого-либо механического воздействия на щепу при разделении ее на волокна. Поэтому первое положение вряд ли возможно. Однако два следующих положения могут иметь место. Определение содержания карбоксильных групп, выполненное для многих образцов сульфатной и кислородно-щелочной целлюлозы из различных пород древесины, показало, что сульфатная целлюлоза, кислородно-щелочные I и II содержат карбоксильных групп соответственно 50...70, 120...180 и 50...90 ммоль/кг. Однако, хотя содержание карбоксильных групп у данных образцов и различно, это трудно связывать напрямую с различием свойств целлюлозы. Так, в работе [1] показано, что после отбелки в кислородно-щелочной целлюлозе содержание карбоксиллов в 2 раза меньше, чем в беленой сульфатной целлюлозе. Такое значительное изменение содержания карбоксиллов, однако, практически не повлияет на скорость размола: кислородно-щелочная целлюлоза и в беленом виде размалывается быстрее сульфатной. Это вносит элемент сомнения в гипотезу [6], что содержание карбоксиллов определяет скорость размола целлюлозы.

Возможно, что различия в свойствах целлюлозы обусловлены механизмом разрушения углеводов в процессе ее выделения из растительного сырья. При щелочной варке известны несколько типов деструкции углеводов [11]: 1) отщепление концевых звеньев, содержащих редуцирующую группу; 2) расщепление углеводов цепей вследствие воздействия высокой температуры, щелочи и окислителей; 3) растворение полисахаридных молекул, имеющих достаточно низкую степень полимеризации.

В сульфатном процессе основным является первый тип, который приводит к значительным потерям выхода целлюлозы. Однако длина полисахаридных молекул остается достаточно высокой. При кислородно-

щелочной варке вследствие окисления концевых редуцирующих групп до альдоновокислых, которые относительно стабильны в щелочной среде, первый тип деструкции не получает существенного развития. Однако окисление вызывает разрыв полисахаридных цепей. Не каждое расщепление углеводной цепи приводит к снижению выхода, но способствует снижению вязкости [7]. Этот эффект в большей степени проявляется при кислородно-щелочной варке хвойной древесины, и в меньшей степени — при кислородно-щелочной делигнификации лиственной древесины, которая содержит меньше лигнина, чем хвойная. Снижение длины углеводных молекул вызывает увеличение в готовом продукте доли низкомолекулярных фракций, что обуславливает наличие дефектов в структуре волокна [1]. Более высокая прочность кислородно-щелочной целлюлозы II хорошо объяснима с этих позиций. За счет предварительной щелочной обработки из древесной ткани частично удаляются такие компоненты, как лигнин и гемицеллюлозы. Это значительно улучшает условия диффузии реагентов при кислородно-щелочной делигнификации [4]. Кроме того, сама кислородно-щелочная варка проводится в более мягких условиях за счет снижения температуры и расхода щелочи (часть щелочи использована на предварительную обработку). Эти факторы, а также снижение концентрации растворенных веществ, способствуют улучшению селективности делигнификации для получения целлюлозы с более высокой вязкостью (см. табл. 1, 2).

В работе [12] показано, что прочность на раздирание бумажного листа с хорошо развитыми межволоконными силами связи определяется прочностью на разрыв индивидуальных волокон, которая, в свою очередь, зависит от средней длины углеводных молекул и, следовательно, от вязкости. Полученные нами экспериментальные данные показывают, что уровень развития межволоконных сил связи в кислородно-щелочной целлюлозе, особенно в целлюлозе I, достаточно высок. На это косвенно указывает прочность отливок на продавливание и разрыв, которая равна или выше прочности сульфатной целлюлозы. Следовательно, причиной различия прочности на раздирание этих видов целлюлозы может быть более низкая прочность на разрыв индивидуальных волокон кислородно-щелочной целлюлозы I из-за большей деструкции ее молекул при варке.

### *Заключение*

Использование кислородно-щелочной делигнификации древесины в пульсационном аппарате позволяет отказаться от стадии размола полуварочной щепы и реализовать два варианта кислородно-щелочного варочного процесса.

В первом варианте воздействию кислорода и щелочи подвергается исходная древесная щепа, что дает возможность получить из лиственных пород древесины целлюлозу с очень высоким выходом и белизной. Обладая высокой прочностью на разрыв и продавливание, эта целлюлоза имеет более низкое сопротивление раздиранию, чем сульфатная.

Второй вариант кислородно-щелочной варки, основанный на использовании предварительной щелочной обработки щепы при повышенной температуре, также позволяет получать целлюлозу из лиственных и хвойных пород древесины с выходом, превышающим выход сульфатной целлюлозы. Целлюлоза из лиственной древесины не уступает по прочности сульфатной, из хвойной — несколько слабее сульфатной по прочности на раздирание. Прочностные показатели хвойной кислородно-щелочной целлюлозы могут быть улучшены в процессе отбелки.

Таким образом, кислородно-щелочной варочный процесс дает целлюлозу из лиственных пород идентичную, а из хвойных пород — близкую

по свойствам к сульфатной целлюлозе. Экологичность кислородно-щелочной варки и возможность оптимизации варочного процесса создают хорошие перспективы для ее использования в промышленности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Abson D., Stockmann E. V. Fundamental properties of soda-oxygen and kraft pulps // *Tappi*. — 1979.— Vol. 62, N 2.— P. 69—72. [2]. Broderson A. B. et al. Modernized laboratory installation for oxygen-alkali wood delignification. Revolution or evolution. The Environmental Future of the Pulp and Paper Industry // *The world pulp and paper Environmental Conference, Leningrad, 16—17 April 1991.*— 12 p. [3]. Chang H. M. et al. Some sheet properties of soda-oxygen pulps // *Tappi*.— 1976.— Vol. 59, N 7.— P. 72—75. [4]. Huang M. I. et al. Diffusion of dissolved oxygen in liquid-saturated Douglas fir sapwood // *Wood Science and Technology.*— 1977.— N 11.— P. 225—236. [5]. Ivanov Yu. S. et al. Oxygen-alkali pulping of wood chips // *Cellulosics: Pulp, fibre and environmental aspects.*— New-York—London—Toronto: Ellis, Horwood, 1993.— P. 25—29. [6]. Marton R., Leopold B. Oxygen-alkali pulping of conifers // *Appita.*— 1973.— Vol. 27, N 2.— P. 112—118. [7]. Minor A. G., Sanyer I. Oxygen pulping of shortleaf pine with sodium carbonate // *Tappi.*— 1975.— Vol. 58, N 3.— P. 116—119. [8]. Outlook of oxygen utilization at pulp cooking / Yu. S. Ivanov, L. O. Ioffe, Yu. P. Vorobiev et al. // *Paperi ja puu.*— 1991.— N 10.— P. 940—945. [9]. Pulp process is sulfur-, chlorine-free / L. O. Ioffe, Yu. S. Ivanov, Yu. P. Vorobiev et al. // *Pulp and Paper International.*— 1989, December.— P. 50—52. [10]. Rothenberg S., Robinson D. H., Johnsonbaugh D. K. Bleaching of oxygen pulps with ozone // *Tappi.*— 1975. Vol. 58, N 8.— P. 182—185. [11]. Rydholm S. Pulping processes.— New York—London—Sydney: Interscience, 1962.— P. 1269. [12]. Seth R. S., Page D. H. Fiber properties and tearing resistance // *Int. pap. phys. conference.*— Quebec, 1987.— Vol. 1.— P. 9—16.

Поступила 12 августа 1994 г.

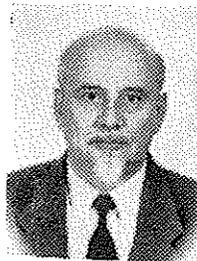
УДК 676.017

А. К. ВЕРЕТНОВ, А. В. БЫВШЕВ, И. М. КОЛЬЦОВА

Веретнов Анатолий Константинович родился в 1942 г., кандидат технических наук, старший научный сотрудник проблемной лаборатории Сибирского технологического института. Имеет 31 печатную работу в области физико-химической механики диспергирования волокнистых материалов, техники и технологии размола.



Бывшей Анатолий Викторович родился в 1933 г., окончил в 1958 г. Красноярский лесотехнический институт, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой целлюлозно-бумажного производства Сибирского технологического института, заслуженный изобретатель Российской Федерации. Имеет 115 научных трудов в области механических видов воздействия на различные материалы, создания механизмов воздействия при производстве полуфабрикатов сверхвысокого выхода с использованием пульсации.





Кольцова Ирина Михайловна родилась в 1940 г., окончила в 1963 г. Сибирский технологический институт, научный сотрудник проблемной лаборатории на кафедре целлюлозно-бумажного производства Сибирского технологического института. Имеет 12 печатных работ в области физики и химии целлюлозы.

## СТРОЕНИЕ ВОЛОКНИСТОЙ СТРУКТУРЫ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Выявлено четыре периода в формировании волокнистой структуры: первый — бесструктурный, когда волокна свободно взвешены в жидкости; второй — связанный с образованием пространственного каркаса и приобретением системой свойств бингамовского пластика; третий — переходный от однородной структуры к неоднородной, комкообразной; четвертый — с четко выраженной флокулярной структурой.

Four periods of fibrous structure formation have been revealed: first - structureless when fibres are freely suspended in liquid; second - related to forming a spacial shell acquiring a system of Bingham plastic properties; third - transferable from homogeneous structure to heterogeneous, clumpy; forth - with particularly pronounced floccular structure.

Основные процессы бумажного производства связаны с перемещениями водно-волокнистых суспензий с широким диапазоном концентраций, начиная от минимальных, близких к нулю, до предельных, когда система теряет свою текучесть. Водные суспензии целлюлозы можно отнести к вязкопластичным бингамовским жидкостям [1, 2], отличающимся структурной вязкостью и предельным напряжением сдвига [3, 5]. Кроме этого, суспензии обладают такими свойствами реологически нестационарных жидкостей, как тиксотропия и реопексия [2, 7].

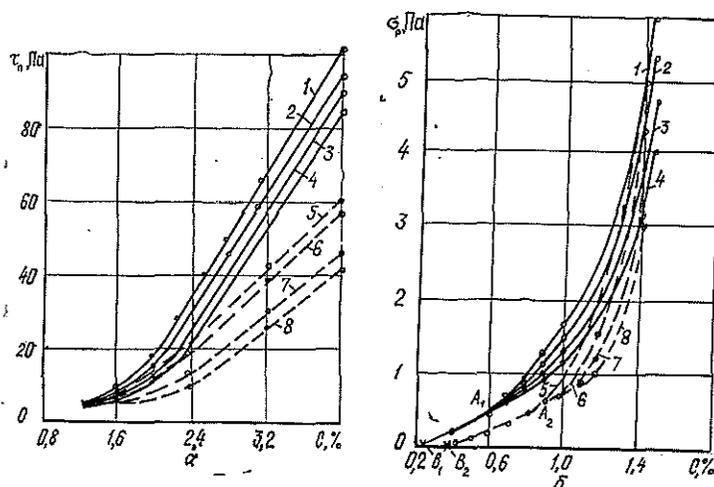
Реологические характеристики волокнистых суспензий следует учитывать и использовать при разработке техники перемешивания, размола, очистки и отлива бумажной массы. Бингамовский характер текучести волокнистых суспензий объясняется тем, что начиная с некоторой концентрации образуется пространственная внутренняя структура, состоящая из отдельных волокон и упруго сопротивляющаяся внешним усилиям до тех пор, пока напряжение сдвига не достигает некоторого предельного значения. Если напряжение превышает предельное, то структура претерпевает разрушение, а система приобретает текучесть, которая в отличие от ньютоновских жидкостей характеризуется величиной структурной или пластической вязкости. Из реологического уравнения бингамовской жидкости

$$\tau = \eta \dot{\gamma} - \tau_n, \quad (1)$$

где  $\tau$  — напряжение сдвига;  
 $\eta$  — пластическая вязкость;  
 $\dot{\gamma}$  — градиент скорости;  
 $\tau_n$  — предельное напряжение сдвига,

следует, что измеряя предельное напряжение сдвига, можно оценить прочность волокнистого каркаса целлюлозной суспензии и характер взаимодействия между волокнами.

Для определения предельного напряжения сдвига суспензий беленой сульфатной целлюлозы из древесины лиственницы и березы был использован ротационный вискозиметр «Реотест РV», снабженный гребенчатым ротором, обеспечивающим сцепление волокнистой массы с измерительной поверхностью. Целлюлозу размалывали в лабораторном ролле до 20; 40; 60 и 80 °ШР. Методика работы с ротационным вискозиметром позволяет проводить реологические измерения предельных напряжений сдвига целлюлозных суспензий с концентрациями от 1,0 до 4,5 %. Результаты измерений представлены на рисунке а.



Предельное напряжение сдвига (а) и напряжение разрыва (б) волокнистых суспензий сульфатной беленой целлюлозы ХБ-3 из древесины лиственницы (1—4) и ЛБ-0 из древесины березы (5—8) при различной степени помола: 1—21 °ШР; 2—42; 3—69; 4—81; 5—22; 6—36; 7—64; 8—78 °ШР

Полученные зависимости предельного напряжения сдвига от концентрации суспензии  $C$  (рисунок а) типичны для бингамовских жидкостей [6, 7]. Они линейны и начинают искривляться только вблизи оси концентраций. Значения предельного напряжения сдвига лиственничной целлюлозы примерно в два раза больше лиственничной, поскольку длинные толстостенные волокна лиственничной целлюлозы образуют более прочный каркас по сравнению с коротковолокнистой лиственничной целлюлозой. При увеличении степени помола происходит укорочение волокон, прочность каркаса целлюлозной суспензии снижается. Вследствие снижения концентрации происходит сближение графиков зависимости  $\tau_n = f(C)$ . При экстраполяции они должны пересечься на оси концентраций в точке, где  $\tau_n = 0$ . Эта точка соответствует критической концентрации  $C_k$ , начиная с которой в волокнистой суспензии образуется устойчивый внутренний пространственный каркас, способный упруго сопротивляться внешним напряжениям, не превышающим по величине  $\tau_n$ . При более низких концентрациях волокна остаются свободно взвешенными в воде. Низкая чувствительность ротационного вискозиметра при  $C < 1$  % не позволяет определить величину критической концентрации. Для оценки прочности суспензий при низких концентрациях был использован гидравлический динамометр, конструкция которого разработана ВНПОбумпромом совместно с Калининским политехническим институтом [4]. Динамометр позволяет определять напряжение разрыва  $\sigma_p$  структуры суспензий целлюлозы в диапазоне концентраций от 0,2 до 1,4 %.

На рисунке *б* приведены зависимости напряжения разрыва волокнистой структуры суспензии от концентрации. Как и для предельного напряжения сдвига (см. рисунок *а*), при снижении концентрации происходит сближение графиков зависимости  $\sigma_p = f(C)$ . Для листовничной ( $C = 0,6\%$ ) и лиственной ( $C = 0,9\%$ ) целлюлозы линии сходятся в точке *А* и сливаются в одну прямую, которая пересекает ось концентраций в точке *В*, где напряжение разрыва волокнистого каркаса равняется нулю. Положение точки *В* и соответствующее ей значение  $C_k$  не зависит от степени помола, а определяется видом целлюлозы; для листовничной  $C_k = 0,21\%$ , для лиственной  $C_k = 0,36\%$ .

Таким образом, в ходе зависимостей прочности структуры от концентрации целлюлозной суспензии наблюдается два линейных участка: один существует при низких концентрациях от точки *В* до точки *А* (рисунок *б*), другой начинается вслед за переходным криволинейным участком при концентрациях более  $2,0 \dots 2,5\%$  (см. рисунок *а*). Наличие линейных участков, по-видимому, зависит от характера связи волокон между собой в сетке каркаса. Если на первом участке, при низких концентрациях, эта связь осуществляется через прослойки воды, то на втором участке, когда большое количество волокон в единице объема приводит к упругому их сжатию, связь реализуется через прямые контакты между волокнами. На переходном участке действуют оба механизма связи. При увеличении степени помола, когда возрастает гибкость волокон и снижается их упругость, переходный участок смещается в сторону высоких концентраций.

Из полученных данных следует, что при малых концентрациях (участок *ОА* на рисунке *б*) волокна суспензии свободны и находятся во взвешенном состоянии. Они не могут образовывать пространственный структурный каркас, который появляется, начиная с  $C_k$ . На участке *ВА* каркас довольно разряженный, волокна в нем слабо связаны между собой через прослойки воды. Эта структура достаточно однородна и легко разрушается внешними гидродинамическими нагрузками. По мере роста концентрации от точки *А* в структуре появляются упруго сжатые волокна. На этом криволинейном переходном участке однородная структура суспензии начинает разделяться на отдельные комкообразные элементы — флокены. Этот процесс завершается при переходе ко второму линейному участку. Дальнейший рост концентрации приводит только к уплотнению флоконов, увеличению трения между ними при движении суспензии. Суспензия теряет свою текучесть, когда упругое сжатие волокон в структуре сделает силы межфлокулярного взаимодействия равными силам внутрифлокулярных связей.

Полученные результаты позволяют проследить изменение прочностных показателей водно-волокнистых суспензий целлюлозы в широком диапазоне концентраций и приводят к выводу, что в текучем состоянии системы целлюлоза — вода можно выделить четыре периода. Первый — при концентрации ниже критической ( $C < C_k$ ), когда волокна взвешены в жидкости и не образуют устойчивого каркаса. Их взаимодействие в потоке слабо сказывается на вязкости суспензии, оценить которую можно уравнением [3]

$$\mu_c = \mu_{ж}(1 + a\varphi), \quad (2)$$

где  $\mu_{ж}$  — вязкость жидкости;  
 $a$  — коэффициент, зависящий от формы частиц;  
 $\varphi$  — объемная концентрация.

Второй период (участок *ВА* на рисунке *б*) связан с образованием устойчивого волокнистого каркаса с относительно слабыми связями между волокнами. Структура суспензий здесь однородна и легко де-

формируется при движении. Начиная с этого периода система приобретает свойства бингамовского пластика, подвижность ее описывается уравнением (1). При дальнейшем увеличении концентрации происходит постепенное сжатие волокнистого каркаса, изменение связей между волокнами, в структуре суспензии появляются флокены. Переход от однородной структуры к флокулярной охватывает третий переходный период (криволинейный участок на рисунке *а, б*). И последний, четвертый период (линейный участок на рисунке *б*), характеризуется ярко выраженной флокулярной комкообразной структурой, которую невозможно разрушить при течении суспензий. Концентрации, при которых происходит переход от одного периода к другому, зависят от вида и размеров волокон, а также от их гибкости и пластичности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Веретнов А. К., Бывшев А. В. Термоструктурные изменения целлюлозных волокон и их влияние на реологические свойства суспензий целлюлозы // Лесн. журн.—1973.— № 5.— С. 109—114.— (Изв. высш. учеб. заведений). [2]. Веретнов А. К., Добровольский Д. С. К вопросу о вязкости целлюлозных суспензий // Химия и химическая технология древесины.— Красноярск, 1973.— Вып. 1.— С. 127—133. [3]. Гатчек Э. Вязкость жидкостей.— М.; Л.: ОНТИ, 1935.— 312 с. [4]. Костюкевич В. И., Рябинович В. И., Никифоров В. А. Способ и устройство для измерения механической прочности водных дисперсий волокон // Целлюлоза, бумага, картон: Науч.-техн. реф. сб. / ВНИИПИЭИлеспром.— 1981.— Вып. 2.— С. 13—14. [5]. Рейнер М. Реология.— М.: Наука, 1965.— 287 с. [6]. Сосновский Р. И. Условия образования пространственной сетки в волокнистых суспензиях // Сб. тр. ВНИИБа.— Л., 1967.— Вып. 52.— С. 117. [7]. Уилкинсон У. А. Ньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемешивание, теплообмен.— М.: Мир, 1964.— 338 с.

Поступила 13 мая 1994 г.

УДК 547.458.81 : 621.386

В. В. ПЕТРОВА

Петрова Валентина Васильевна родилась в 1938 г., окончила в 1962 г. Петрозаводский государственный университет, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твердого тела ПГУ. Имеет свыше 120 печатных трудов в области структуры и дефектов твердых тел и их физических свойств.



## СТРУКТУРА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ПОЗДНЕЙ И РАННЕЙ ДРЕВЕСИНЫ ЕЛИ ПО ДАННЫМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКЦИИ НА БОЛЬШИХ И КРАЙНЕ МАЛЫХ УГЛАХ

Методами дифракции рентгеновских лучей, модифицированными для изучаемых объектов, получены новые сведения о структуре древесной целлюлозы и ее изменениях после технологических переработок.

Some new information on wood pulp structure and its changes after technological processing has been obtained by methods of X-ray diffraction modified for the objects under study.

Изучение структурного состояния природной древесной целлюлозы является сложной задачей, так как классические методы рентгеновской кристаллографии непосредственно применять нельзя. В этом случае

требуются особые методики, специально модифицированные для изучения структуры аморфно-кристаллических материалов с различным соотношением аморфной и кристаллической компонент.

Одна из основных задач рентгеновской кристаллографии — определение типа решетки Браве и нахождение ее параметров. Для древесной целлюлозы эта проблема относится к числу труднорешаемых, так как высокое содержание аморфных компонент вызывает интенсивное диффузное рассеяние, на фоне которого разрешаются лишь наиболее интенсивные отражения. Поэтому при малом числе рефлексов постановка задачи о симметрии и размерах элементарной ячейки древесной целлюлозы является некорректной. Кроме того, для получения полной информации о структурном состоянии природной целлюлозы необходимо фиксировать рассеяние при крайне малых углах, которое содержит информацию о микропористости изучаемых препаратов.

Известные способы [7, 8] определения физических параметров структуры древесной целлюлозы основаны на приготовлении торцевого и радиального срезов и их раздельном рентгенографировании в геометрии на отражение. Наличие двух срезов позволяет иметь свободную рентгенограмму с необходимым для определения структурного состояния целлюлозы в древесине числом рефлексов. Однако при рентгенографировании торцевого и радиального срезов облучаемые объемы принадлежат двум различным участкам дерева, неидентичным по структуре, так как они содержат неодинаковое количество ранней и поздней древесины. Поэтому получение сводной рентгенограммы неоправданно и приводит к заведомо некорректным результатам.

Чтобы избежать этих недостатков, был разработан способ [1], состоящий в том, что исследования выполняют только на тангенциальных срезах,готавливаемых отдельно из ранней и поздней древесины. Толщина среза определяется шириной соответствующей зоны годичного кольца, а площадь вырезаемой пластинки зависит от условий рентгенографирования. Тем самым обеспечивается возможность раздельного исследования ранней и поздней древесины. Дифрактограммы получают в геометрии на прохождение. Тангенциальные срезы рентгенографируют в двух положениях, отличающихся друг от друга поворотом на  $90^\circ$  так, что в одном случае волокна располагаются параллельно оси гониометра, в другом — перпендикулярно. При этом вид дифракционной картины претерпевает существенные изменения. В случае, когда ось волокна параллельна оси гониометра, наблюдается обычная картина рассеяния, аналогичная дифракционной при съемке на отражение — присутствуют рефлексы 101,  $10\bar{1}$ , 002, 040 (последнее отражение очень слабое); после поворота на  $90^\circ$  на рентгенограмме отсутствуют три первых отражения, рефлекс 040 становится интенсивным и появляются другие отражения типа 0k0, а также 133, 252 и др.

Предложенные приемы рентгенографирования позволяют получить на сводной рентгенограмме до 12—15 отражений, что вполне достаточно для изучения кристаллографии как нативной, так и модифицированной целлюлозы. Данный способ обеспечивает несравненно более корректную информацию, так как физические характеристики относятся к одному и тому же облучаемому объему, для которого параметры надмолекулярной структуры являются индивидуальными. Кроме того, при необходимости можно получить дифрактограммы в геометрии на отражение, не изменяя при этом положение образца в держателе. Этот способ можно использовать для изучения структурных неоднородностей образца при помощи сканирования облучаемого объема.

Нами он был применен для изучения изменений состояния структуры ранней и поздней древесины быстрорастущей ели после натронной и сульфатной варок.

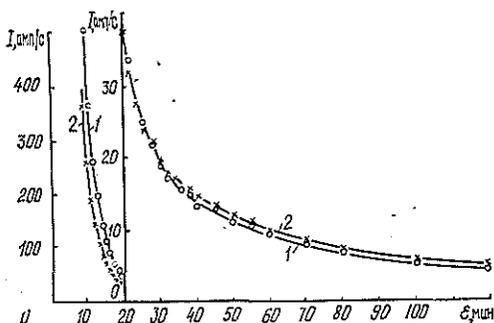
Исследуемые образцы представляли собой тангенциальные срезы ствола на высоте 1,3 м, вырезанные отдельно из годичных колец ранней и поздней древесины. Всего для экспериментов было приготовлено 12 образцов, из которых 5 представляли позднюю древесину, 7 — раннюю.

Рентгенографирование образцов осуществляли в геометриях на прохождение и отражение с соблюдением требований используемого способа [1]. Для каждого среза было получено четыре дифрактограммы. Рассчитанные из дифрактограмм структурные характеристики статистически обрабатывали на ЭВМ при помощи модифицированного пакета прикладных программ.

Дифракционные картины для области больших углов рассеяния получены при помощи установки ДРОН-2.0, источником рентгеновского излучения служила трубка БСВ-27 с медным анодом. Режим работы трубки:  $V = 26$  кВ,  $I = 15$  мА. В качестве кристалла-монокроматора использовали пиролитический графит. Информацию выводили на диаграммную ленту или на перфоленту с последующей обработкой на ЭВМ. Интервал углов дифракции  $2\theta$  составлял  $6 \dots 100^\circ$ . Постоянство интенсивности первичного пучка контролировали измерением интенсивности рассеяния плавленным кварцем под углом  $2\theta = 90^\circ$ .

Из экспериментальных рентгенограмм определяли угловые положения рефлексов в шкале  $2\theta$ , их полуширину  $l$ ; рассчитывали индекс кристалличности  $K$ , размеры областей когерентного рассеяния  $L$  в продольном при съемке на отражение (040) и поперечном (002) направлениях по формуле Дебая — Шеррера [4, 5], а также три линейных параметра элементарной ячейки ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) и один угловой (угол моноклинного искажения  $\beta$ ).

Зависимости интенсивностей малоуглового рассеяния для тангенциальных срезов поздней (1) и ранней (2) древесины ели



Малоугловые рентгенограммы получены на установке КРМ-1 в  $\text{Cu-K}_\alpha$ -излучении, источником рентгеновского излучения являлась трубка БСВ-29 с линейным фокусом размерами  $0,4 \times 10$  мм<sup>2</sup>. Режим работы трубки:  $V = 42$  кВ,  $I = 30$  мА. При ширине входной щели 50 мкм и расстоянии образец — детектор 270 мм разрешение установки в шкале межплоскостных расстояний составляло 600 Å. Рассеяние фиксировали в интервале углов от  $9'$  до  $4 \dots 6^\circ$ . Для нахождения размеров микропор угловые распределения интенсивностей определяли при различных ориентировках плоскости среза относительно первичного пучка. Расчеты размеров пор выполняли по методу Гинье [4]. Определение объемных концентраций пор осуществляли методом инварианта [6] по максимальным интенсивностям малоуглового рассеяния (МУР), когда в облучаемый объем попадало наибольшее число пор.

Характеристики структурного состояния определены как для целлюлозы природного состояния, так и после натронной и сульфатной ва-

рок. Натронную варку проводили при температуре 170 °С в течение 1 ч 40 мин; сульфатную — при 140 °С в течение 1 ч 10 мин. После варок образцы тщательно промывали дистиллированной водой и подвергали промывке в спирте и эфире для устранения влияния остаточных эффектов обработки на физические характеристики структуры целлюлозы.

Структурные характеристики поздней (числитель) и ранней (знаменатель) древесины ели

Параметры	Значения параметров		
	Исходное состояние	После натронной варки	После сульфатной варки
$2\theta_{002}$ , град	22,30/22,30	22,45/22,45	22,40/22,40
$l_{002}$ , град	3,2/3,3	2,4/2,4	2,6/2,8
$L_{002}$ , Å	26,4/25,6	35,3/35,3	32,6/30,2
$K$	0,57/0,57	0,64/0,74	0,67/0,69
$2\theta_{040}$ , град	34,7/34,6	34,5/34,6	34,7/34,65
$l_{040}$ , град	1,1/1,2	1,1/1,1	1,1/1,2
$L_{040}$ , Å	79,1/72,5	79,0/79,1	79,1/72,5
$a$ , Å	8,15/8,13	8,19/8,21	8,15/8,17
$b$ , Å	10,37/10,35	10,37/10,40	10,36/10,36
$c$ , Å	7,95/7,97	7,96/7,94	7,95/7,96
$\beta$ , град	86,8/85,6	84,9/85,9	84,7/84,9

Примечание.  $\Delta a = \pm 0,06$  Å;  $\Delta b = \pm 0,01$  Å;  $\Delta c = \pm 0,02$  Å;  $\Delta \beta = \pm 1,2$  град.

Параметры структуры, определенные из большеугловых дифрактограмм, приведены в таблице. Из данных таблицы следует, что кристаллическая составляющая целлюлозы ранней и поздней древесины ели в нативном состоянии незначительно различается по размерам областей когерентного рассеяния и параметрам элементарной ячейки. В сравнении с хлопковой целлюлозой [9] эти различия существенны: элементарная ячейка древесной целлюлозы, являясь моноклинной, отличается от хлопковой целлюлозы параметром  $c$  (сравнить значения 7,87 Å [9] и 7,95...7,97 Å, полученные нами) и углом  $\beta$  (83,5 по [2] и 86,8...85,6 град). Эти различия можно объяснить лишь индивидуальными особенностями изучаемых объектов, которые определяют место целлюлозы древесины ели в структурной организации среди других видов целлюлозы растительного происхождения.

После натронной и сульфатной варок наблюдаются существенные изменения в структуре древесной целлюлозы. Уменьшение ширины рефлекса (002) на 18...25 % обусловлено увеличением размеров областей когерентного рассеяния в поперечном направлении в 1,2—1,4 раза. Степень моноклинного искажения элементарной ячейки уменьшается, по размерам и форме приближаясь к ячейке хлопковой целлюлозы, хотя различия в параметрах  $c$  и  $\beta$  все же сохраняются. Очень показательным является увеличение степени кристалличности: в нативном состоянии целлюлоза ранней и поздней древесины имела один и тот же индекс кристалличности  $K = 0,57$ ; после натронной и сульфатной варок кристалличность целлюлозы ранней древесины характеризуется индексами 0,74 и 0,69, поздней — 0,64 и 0,67. Таким образом, оба способа воздействия оказались эффективными с точки зрения упорядоченности структуры, так как по кристалличности целлюлоза приближается к хлопковой. Однако следует подчеркнуть, что речь не идет о степени совершен-

ства структуры кристаллической составляющей целлюлозы. Для древесной целлюлозы она существенно ниже [3]. Большой индекс кристалличности зафиксирован для целлюлозы ранней древесины. Это можно объяснить, если привлечь результаты, полученные методом МУР рентгеновских лучей. На рисунке приведены характерные участки малоугловых рентгенограмм для срезов поздней и ранней древесины ели. Более высокая интенсивность МУР для ранней древесины объясняется большей концентрацией микропор. Интерпретация угловых распределений МУР показала, что для ранней древесины определяющий вклад в наблюдаемую картину рассеяния дают поры следующих сечений:  $(190 \pm 8)$ ;  $(85 \pm 10)$ ;  $(15 \pm 2)$  Å. Для поздней древесины размеры пор выявленных фракций меньше:  $(175 \pm 6)$ ;  $(70 \pm 4)$ ;  $(13 \pm 2)$  Å. Суммарная концентрация пор для ранней и поздней древесины соответственно равна  $(1,5 \pm 0,2)$  и  $(0,8 \pm 0,1)$  %. Концентрация крупных пор в целлюлозе ранней древесины выше примерно в 1,3 раза, а мелких — примерно в 2 раза, чем в поздней. Так как реакционная способность препаратов определяется их пористой структурой, то становится понятным несколько иное поведение целлюлозы ранней древесины в ходе технологических обработок.

Фундаментальные исследования структуры целлюлозы различного происхождения важны не только с точки зрения новых знаний об особенностях строения этого уникального природного полимера с широким спектром использования, но и разработки простых и надежных способов контроля за изменением его структуры при получении продуктов переработки с нужными физико-химическими свойствами. Выполненные исследования показали, что из определяемых структурных параметров самым чувствительным к применяемым способам переработки древесины ели оказался индекс кристалличности. Поэтому в дальнейшем необходимо выбрать наиболее надежный и простой метод расчета индекса кристалличности, который в сочетании с разработанным способом рентгенографирования [1] обеспечит экспресс-анализ качества целлюлозы и контроль его изменения в ходе переработок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. А. с. 1778651 СССР, МКИ 01 23/20. Способ определения физических параметров надмолекулярной структуры древесных целлюлоз / И. С. Гелес, В. В. Петрова, М. В. Мелех (СССР).— № 1033; Заявлено 29.12.90; Оpubл. 30.11.92, Бюл. № 44 // Открытия. Изобретения.— 1992.— № 44.— С. 118. [2]. Гинье А. Рентгенография кристаллов.— М.: Физматгиз, 1961.— 604 с. [3]. Иоелович М. Я., Тупурейне А. Д., Веверис Г. П. Изучение кристаллической структуры целлюлозы в растительных материалах // Химия древесины.— 1989.— № 5.— С. 91—95. [4]. Китайгородский А. И. Рентгеноструктурный анализ мелкокристаллических и аморфных тел.— М.: Физматгиз, 1956.— 589 с. [5]. Петрова В. В., Мелех М. В. Исследование структурного состояния целлюлозы ранней и поздней древесины сосны и ели методами рентгенографии // Лесн. журн.— 1993.— № 2—3.— С. 116—122.— (Изв. высш. учеб. заведений). [6]. Петрова В. В. Микропористость анодных оксидных пленок алюминия.— Петрозаводск: Изд-во ПГУ, 1992.— 94 с. [7]. Целлюлоза и ее производные / Под. ред. Н. Байкзла, Л. Сегала.— М.: Мир, 1974.— 499 с. [8]. Шашилов А. А. Метод текстурно-фазового анализа целлюлозы: Дис. ... канд. техн. наук.— Л.: ЛТИ ЦБП, 1991.— 16 с. [9]. Wellard H. J.— Variation in the lattice spacing of cellulose // L. Polymer. Sci.— 1954.— Vol. 13.— P. 471.

Поступила 8 апреля 1994 г.

УДК 547.458.81

А. А. ЛЕОНОВИЧ, Л. О. ИОФФЕ



Леонович Адольф Ануфриевич родился в 1937 г., окончил в 1960 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химии древесины С.-Петербургской лесотехнической академии. Имеет более 250 печатных трудов в области химии древесины, модифицирования древесинного вещества фосфорсодержащими соединениями, технологии древесноплитных материалов пониженной горючести, реакционной способности полисахаридов, физических состояний высокомолекулярных компонентов древесины.



Иоффе Лазарь Ошеревич окончил в 1957 г. Ленинградский технологический институт ЦБП, кандидат технических наук, зав. отделом новых методов делигнификации Всероссийского научно-исследовательского института бумаги, создатель непрерывно действующей пульсационной варочной установки, не имеющей зарубежных аналогов. Имеет около 200 печатных трудов и авторских свидетельств в области производства сульфитной целлюлозы, регенерации химикатов, создания экологически чистого производства кислородно-щелочной целлюлозы.

## ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕКЛОВАНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ПРИ ЕЕ ИНКЛЮДИРОВАНИИ

Термомеханическим анализом установлено, что при неполном инклюдировании сульфатной лиственной целлюлозы температура стеклования возрастает примерно на 15 °С вследствие возникновения новой прерывистой системы водородных связей и пространственной структуры в аморфной части целлюлозы.

It has been stated by thermomechanical analysis that during incomplete including of sulphate hardwood cellulose the vitrification temperature increases by approximately 15% due to appearance of a new interrupted system of hydrogen ties and spatial structure in amorphous part of the cellulose.

Физическое (релаксационное) состояние целлюлозы имеет большое значение в процессе ее переработки, включающей нагревание и механические воздействия при получении бумаги, картона, плитных материалов и др. [1, 5]. Основной температурный переход определяют как температуру стеклования  $T_g$ . Для появления сегментальной подвижности при нагревании требуется преодоление энергии межмолекулярного взаимодействия и наличие свободного объема в расположении молекул аморфных участков целлюлозы, на который может влиять состояние ка-

пиллярно-пористой структуры. Последняя в технической целлюлозе существенно зависит от режима сушки, особенно чувствительны к ней многочисленные тончайшие капилляры и микропоры [3]. Одним из методов сохранения пористой структуры клеточной стенки волокон целлюлозы при сушке является ее инклюдирование сменой органических растворителей понижающейся полярности.

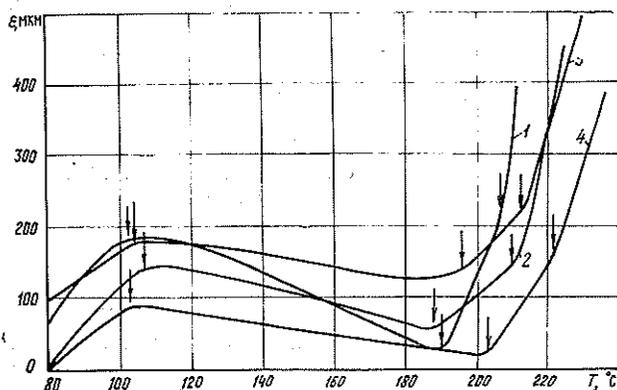
Если взаимосвязь между свободным объемом и пористостью существует, то можно ожидать снижения  $T_g$  инклюдированной целлюлозы. Вместе с тем, инклюдирование, по-видимому, влияет на межмолекулярное взаимодействие в целлюлозе. В общем случае изменение  $T_g$  может оказаться неоднозначным. В литературе подобного подхода к этому вопросу не обнаружено, что и обусловило проведение данного исследования.

Для эксперимента использовали влажную (не подвергнутую сушке) небеленую сульфатную листовую целлюлозу, полученную на Светогорском ЦБК в аппарате Камюр и дополнительно отсортированную от сучков и костры. Это позволяет одновременно проследить за влиянием инклюдирования на температурный переход  $T_g$  гемичеселлюлоз, имеющих в такой целлюлозе. Целлюлоза содержала 2,60 % лигнина, 22,70 % пентозанов и 0,98 % веществ, экстрагируемых диэтиловым эфиром, имела вязкость 65 мПа · с в 1 %-м медноаммиачном растворе.

Одну часть исходной целлюлозы сушили на воздухе при комнатной температуре (образец 1), три других сушили так же, но после инклюдирования 100 %-м ацетоном (образец 2), 96 %-м этанолом (образец 3) и 96 %-м этанолом, а затем ацетоном (образец 4). Диэлектрическая проницаемость среды  $\epsilon$  для воды, этанола и ацетона равна соответственно 78,3; 26,4 и 20,7 мкм. Целлюлозу сухостью 23 % заливали соответствующим органическим растворителем и отжимали. Эту операцию повторяли 3 раза. Содержание сухих веществ в образцах 1, 2, 3 и 4 перед анализом составляло 6,5; 6,3; 6,5 и 6,4 %.

Термомеханический анализ предварительно запрессованных без нагревания образцов проводили на динамометрических весах Каргина со скоростью нагревания 1 град/мин при постоянной нагрузке 10 кПа в интервале температур  $T$  от 20 до 240 °C [4]. Образцы измельчали вручную и использовали фракцию после отделения мелкого волокна.

На рисунке приведены ТМ-кривые исследованных образцов целлюлозы. Для всех образцов обнаружены три температурных перехода.



ТМ-кривые образцов (см. таблицу) инклюдированной целлюлозы ( $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды;  $T$  — температура)

Первый переход  $T_{п1}$  регистрируется при температуре 100 °С и может быть связан с изменением конформации пиранозного цикла при испарении остатков воды и органического растворителя [2]. Последнее обуславливает на ТМ-кривых реализацию остаточных напряжений и частичное восстановление высоты образцов. По достижении второго перехода  $T_{п2}$  ход кривых обнаруживает медленное размягчение образца и рост деформации сжатия. Это можно отнести к структурным изменениям гемицеллюлозных полисахаридов вследствие небольшой величины этого эффекта (мала доля гемицеллюлоз) и медленного его развития (сдерживающее влияние целлюлозы).

При достижении третьего перехода  $T_{п3}$  наблюдается основной участок сжатия (деформации), который относится к структурным изменениям в целлюлозе и интерпретируется как  $T_c$ . Значения экспериментально найденных температурных переходов (°С) в исследованных образцах исходной и инклюдированной целлюлозы сведены в таблицу.

Но- мер образ- ца	$T_{п1}$	$T_{п2}$	$T_{п3}$
1	103 ± 3	189 ± 2	206 ± 2
2	106 ± 4	188 ± 2	210 ± 1
3	103 ± 3	195 ± 2	212 ± 2
4	102 ± 2	202 ± 2	220 ± 1

Оказалось, что  $T_{п1}$  (в пределах точности анализа) не обнаруживает зависимости от предыстории обработки образца. Основной температурный переход  $T_{п3} = T_c$  для целлюлозы после неполного инклюдирования не только не снижается, а, наоборот, возрастает. При использовании ацетона за счет его более низкой полярности он не может достаточно полно заместить воду в целлюлозе. Этанол полнее вытесняет воду из целлюлозы, но его эффективность в сохранении пористости как более полярного вещества ниже, чем ацетона. В варианте последовательного вытеснения воды этанолом и ацетоном (что обеспечивает сохранение пористости в большей степени) регистрируется максимальное из найденных значений  $T_c$ . Аналогичная тенденция наблюдается и для гемицеллюлозных полисахаридов, когда более эффективное инклюдирование приводит к значительному повышению  $T_{п2}$ .

Размягчение целлюлозы при достижении  $T_c$  является кооперативным процессом. В условиях термомеханического анализа присутствие остатков воды, органических растворителей и гемицеллюлоз оказывает влияние на значения температурных переходов. Однако массовая доля гемицеллюлоз для изучаемых образцов одинакова, что позволяет рассматривать рост  $T_c$  в ряду образцов 1—4 как следствие инклюдирования. Для объяснения этого можно исходить из допущения, что испарение остатков воды и органических растворителей в процессе сушки образцов на воздухе и в условиях снятия ТМ-кривых способствует развитию межмолекулярного взаимодействия в аморфной части целлюлозы мозаично и в большей степени, чем при испарении чистой воды.

Можно предположить, что при сушке неравномерно окруженные водой и органическими растворителями фрагменты макромолекул полисахаридов притягиваются друг к другу на локальных участках со стороны удаляемой воды с большей энергией, чем с противоположной стороны, где звенья макромолекул соприкасаются с органическим растворителем (из-за меньшей его полярности), и с большей энергией, чем в случае равномерного распределения воды в отсутствие этанола и ацетона. В целом это приводит к возникновению новой прерывистой си-

стемы водородных связей и пространственной структуры в аморфной части целлюлозы. Для создания в ней при термомеханическом анализе условий сегментальной подвижности требуется повышенная энергия теплового движения. Это и проявляется в росте значений  $T_g$  с увеличением полноты инклюдирования целлюлозы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Аким Э. Л. Обработка бумаги (Основы химии и технология обработки и переработки бумаги и картона).— М.: Лесн. пром-сть, 1979.— 232 с. [2]. Зеленец Ю. В., Глазков В. И. Релаксационные процессы в целлюлозе и ее производных // Высокомолекулярные соединения.— 1972.— Т. 14 А, № 1.— С. 16—21. [3]. Кленкова Н. И. Структура и реакционная способность целлюлозы.— Л.: Наука, 1976.— 367 с. [4]. Леонович А. А. Изучение свойств древесных волокон при нагревании // Лесн. журн.— 1972.— № 5.— С. 143—147.— (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Леонович А. А. Теория и практика изготовления огнезащищенных древесных плит.— Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978.— 176 с.

Поступила 21 июля 1994 г.

УДК 630\*864

## П. П. ТИРАНОВ

Тиранов Петр Прокопьевич родился в 1942 г., окончил в 1965 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИИ химии и химической технологии древесины Архангельского государственного технического университета. Имеет 54 печатных труда в области химии и технологии древесины, целлюлозы и бумаги.

УЛУЧШЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПАСТЫ СУЛЬФАТНОГО ЛИГНИНА

Показана возможность и практическая целесообразность использования технических лигносульфонатов (ЛСТ) в качестве разжижителя пасты сульфатного лигнина и получения из нее высококонцентрированной текучей суспензии, имеющей низкие показатели предельного динамического напряжения сдвига и пластической вязкости.

A possibility and practical advantage of using technical lignosulphonates as a sulphate lignin paste thinner and preparing from it a fluid suspension having low indicators of ultimate dynamic shearing stress and plastic viscosity has been revealed.

Непрерывная технология производства сульфатного лигнина серно-кислотным способом, осуществленная на Соломбальском ЦБК [1, 5], предусматривает выпуск готового продукта в виде пасты и порошка. Конечной стадией получения пасты является промывка лигнина и отжим его от избытка воды, осуществляемые на ленточном вакуум-фильтре. При работе в оптимальных условиях фильтр может обеспечивать отжим лигнина до влажности 50...60 %. Такой лигнин представляет собой практически нетекучий, липкий, пастообразный продукт, который неудобен как для транспортировки и использования потребителем, так и для последующей сушки до порошкообразного состояния. На практике при получении порошка используют следующий прием.

Пасту лигнина, поступающую с фильтра, при перемешивании разбавляют горячей водой до влажности не менее 70 %. В результате при перемешивании образуется текучая суспензия лигнина, которую насосом подают в распылительную сушилку. Однако такой прием связан с повышенными энергозатратами на высушивание разбавленной пасты и не применим при транспортировке пасты лигнина, так как при этом, во-первых, перевозится дополнительное количество воды и, во-вторых, при отсутствии перемешивания происходит расслаивание суспензии лигнина с образованием плотного нетекучего осадка, что затрудняет выгрузку ее из больших емкостей, например из цистерн.

Целью наших исследований является улучшение реологических свойств пасты лигнина и получение из нее высококонцентрированных суспензий лигнина, сохраняющих текучесть не только в динамических (при перемешивании), но и в статических (при отсутствии перемешивания) условиях. Для этого изучена возможность эффективного повышения текучести пасты лигнина путем введения в нее разжижающей добавки. В качестве такой добавки выбраны технические лигносульфонаты (ЛСТ), которые уже находят применение в других отраслях в качестве разжижителя и пластификатора различных труднотекучих смесей [2, 4].

Проведены исследования реологических свойств высококонцентрированных (40...55 %) растворов ЛСТ и паст сульфатного лигнина с добавками ЛСТ. В качестве исходных взяты ЛСТ Архангельского ЦБК и паста сульфатного лигнина, выработанная на Соломбальском ЦБК. С их использованием приготовлены рабочие смеси пасты лигнина с различным количеством добавок ЛСТ. Добавки ЛСТ вводили в пасту при перемешивании и температуре 80 °С. Конечное содержание сухого

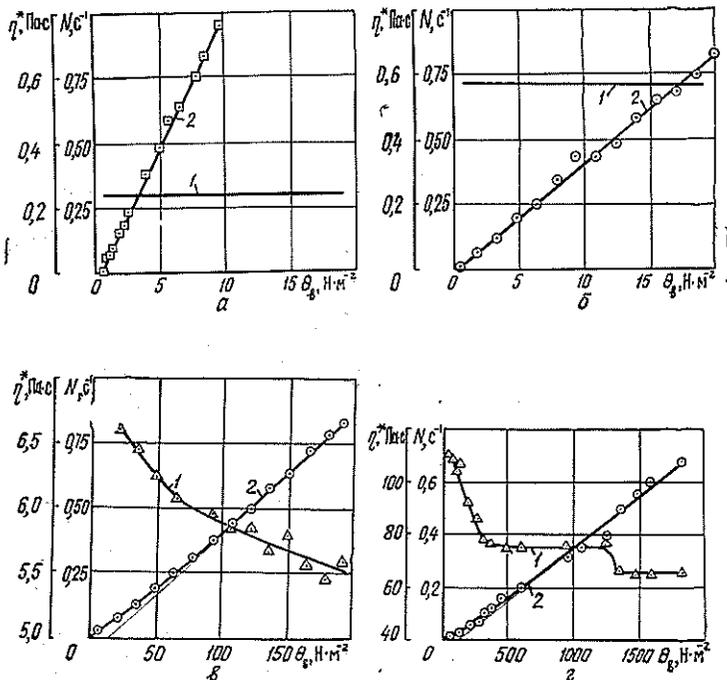


Рис. 1. Зависимости вязкости от динамического напряжения сдвига (1) и кривые течения (2) растворов ЛСТ различной концентрации: а — 40; б — 45; в — 50; з — 55 %

остатка в рабочих смесях корректировали путем добавления воды. На ротационном вискозиметре Воларовича типа РВ-8 при комнатной температуре снимали кривые течения — зависимости скорости вращения внутреннего цилиндра прибора  $N$  от напряжения сдвига  $\Theta$  и по ним определяли реологические показатели рабочих растворов ЛСТ и паст лигнина.

Реологические показатели растворов ЛСТ различной концентрации

Массовая доля сухого остатка в растворе ЛСТ, %	$\Theta_v$ , $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$	$\eta'$ , Па · с
0	0,6	...
40	0,6	0,24
45	0,6	0,57
50	13,0	5,23
55	120,0	59,30

По характеру кривых течения, приведенных на рис. 1, и данным таблицы установлено, что ЛСТ концентрацией 45 % и ниже ведут себя как ньютоновские жидкости. Их вязкость практически постоянная величина и не зависит от напряжения сдвига. Однако при концентрации 50 % и выше ЛСТ приобретают свойства неньютоновских жидкостей, что указывает на образование структурированной системы. Для них вычисленная по уравнению Ньютона вязкость (в данном случае это чисто условная величина, называемая эффективной вязкостью  $\eta^*$ ) не является постоянной и зависит от напряжения сдвига, приложенного к системе. По мере возрастания напряжения сдвига все в большей степени начинают происходить процессы разрушения структуры. При этом эффективная вязкость уменьшается и в некоторой точке может достигать постоянного минимального значения — предельной вязкости  $\eta_\infty$ , отвечающей течению жидкости с возможно более полным разрушением структуры. Предельная вязкость характеризует вязкость неньютоновских жидкостей при быстром протекании через трубы, перемешивании и в других случаях.

Общего аналитического уравнения кривых течения неньютоновских жидкостей нет. Из уравнений для частных случаев наибольшее распространение получило уравнение Бингама [3]:

$$\eta' = K \frac{\Theta - \Theta_v}{N},$$

где  $\eta'$  — пластическая вязкость, Па · с;

$K$  — константа;

$\Theta_v$  — предельное (критическое) динамическое напряжение сдвига (или предел текучести по Бингаму),  $\text{Н} \cdot \text{м}^{-2}$ ;

$N$  — скорость сдвига,  $\text{с}^{-1}$ .

Данное уравнение относительно хорошо описывает реологические свойства системы. Путем экстраполяции прямолинейных участков кривых течения до пересечения с осью абсцисс получены значения  $\Theta_v$ , а по котангенсу угла наклона определены значения  $\eta'$  для рабочих растворов ЛСТ и паст лигнина.

Приведенные в таблице значения  $\Theta_v$  для воды (холостой опыт) и для ЛСТ концентрацией 40 и 45 % малы и равны между собой ( $0,6 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$ ). Это свидетельствует о том, что данное напряжение сдвига

обусловлено наличием сопротивления вращающихся частей прибора, а не структурообразованием. Напротив, растворы ЛСТ с концентрацией 50 и 55 % имеют высокие значения  $\Theta_v$  (13 и 120 Н · м<sup>-2</sup>), что свидетельствует об образовании структурированных систем, прочность которых резко увеличивается по мере повышения концентрации ЛСТ. Одновременно резко возрастает и пластическая вязкость растворов.

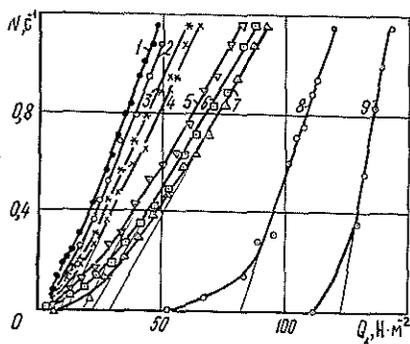


Рис. 2. Кривые течения 40 %-й пасты сульфатного лигнина при различном количестве введенной в нее добавки ЛСТ: 1—10; 2—7; 3—6; 4—5; 5—4; 6—3; 7—2; 8—1; 9—0,75 %

На рис. 2 приведены кривые течения 40 %-й суспензии сульфатного лигнина при разном количестве введенной в нее добавки ЛСТ, из которого видно, что даже для наиболее разбавленной из исследованных суспензий характерно образование структурированной системы. Прочность такой системы во многом зависит как от концентрации суспензии, так и от количества введенной в нее добавки ЛСТ.

По мере увеличения количества ЛСТ кривые течения суспензии лигнина смещаются в область более низких напряжений сдвига. Подобная закономерность, но при расположении кривых течения в области более высоких напряжений сдвига, характерна и для суспензий концентрации 45, 50 и 55 %. Кривые течения этих суспензий лигнина для сокращения здесь не приведены, но вычисленные по ним реологические показатели  $\Theta_v$  и  $\eta'$  использованы при построении графических зависимостей, представленных на рис. 3.

При увеличении доли ЛСТ до 5...10 % наблюдается резкое снижение предела текучести по Бингаму и одновременное увеличение пластической вязкости. Дальнейшее повышение доли ЛСТ практически не изменяет  $\Theta_v$ ,  $\eta'$  снижается. Максимальные значения пластической вязкости для суспензий лигнина концентрацией 40, 45, 50 и 55 % наблюдаются при добавке соответственно 2,5; 5; 10 и 20 % ЛСТ (рис. 3, б).

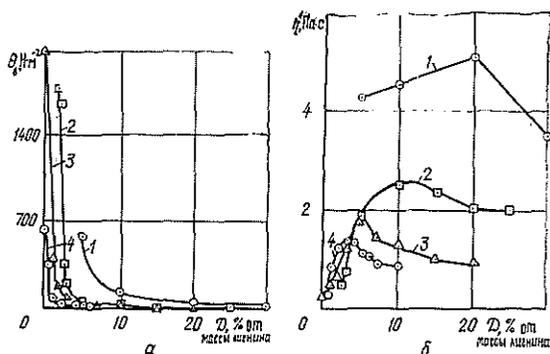


Рис. 3. Зависимости динамического напряжения сдвига (а) и пластической вязкости (б) пасты сульфатного лигнина от количества введенной добавки ЛСТ (D) при различной концентрации пасты: 1—55; 2—50; 3—45; 4—40 %

Добавку ЛСТ предпочтительно вводить в нагретую пасту лигнина. При этом достигается более высокий эффект ее разжижения. Так, например, для 50 %-й пасты с добавкой ЛСТ в количестве 5 % получены следующие реологические показатели: при комнатной температуре —  $\Theta_v = 198 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$  и  $\eta' = 3,7 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ; при температуре  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  —  $\Theta_v = 29,5 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$  и  $\eta' = 1,9 \text{ Па} \cdot \text{с}$ .

Анализ вышеприведенных результатов исследований показывает, что для разжижения пасты лигнина, получаемой в производственных условиях в нагретом состоянии и имеющей влажность 50...60 % (концентрация 40...50 %), оптимальной является добавка ЛСТ в количестве 2...5 % от массы сухого лигнина. При этом паста лигнина приобретает повышенную текучесть и имеет следующие реологические показатели:  $\Theta_v = 10...30 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-2}$  и  $\eta' = 1,2...1,9 \text{ Па} \cdot \text{с}$ . При выдерживании в неподвижном состоянии она, в отличие от пасты, разбавленной для разжижения водой, не расслаивается с образованием плотного нетекучего осадка, а сохраняет свою первоначальную гомогенность и текучесть. Такую пасту легко транспортировать по трубопроводам или в железнодорожных цистернах, что существенно упрощает условия работы с ней, снижает стоимость ее перевозок и обеспечивает высокую однородность пасты по качественным показателям. Поскольку во многих направлениях одинаково успешно могут быть использованы как технические лигносульфонаты, так и сульфатный лигнин, то введение в последний добавки ЛСТ не окажет отрицательного влияния на эффективность использования лигнина, но позволит улучшить реологические свойства пасты и получить из нее высококонцентрированные суспензии лигнина.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Переработка сульфатного и сульфитного щелоков: Учебник для вузов / Б. Д. Богомолов, С. А. Сапотницкий, О. М. Соколов и др.—М.: Лесн. пром-сть, 1989.—360 с. [2]. Пластифицирующая добавка в бетон ЛСТ-П / О. М. Соколов, Г. А. Евсеев, А. Б. Сергеев и др. // Бетон и железобетон.—1986.—№ 6—С. 11—12. [3]. Практикум по коллоидной химии и электронной микроскопии / Под ред. С. С. Воюцкого, Р. М. Панич.—М., 1974.—224 с. [4]. Разжижитель цементно-сырьевого шлама ЛСТ-МШ1 / О. М. Соколов, П. П. Тиранов, Б. Д. Богомолов и др. // Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. семинара «Расширение использования технических лигносульфонатов в народном хозяйстве».—М., 1987.—С. 15—16. [5]. Тиранов П. П. Технические лигнины, их получение и использование // Целлюлоза, бумага и картон: Обзор. информ.—М.: ВНИПИЭИлеспром, 1992.—Вып. 5.—60 с.

Поступила 23 марта 1994 г.

УДК 547.992.3

**К. Г. БОГОЛИЦЫН, Н. В. РЯБЕВА,**

Архангельский государственный технический университет

**Н. Н. ВОЛКОВА, И. ВАДСЕ**

Термохимический центр университета г. Лунда (Швеция)

Боголицын Константин Григорьевич родился в 1949 г., окончил в 1971 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой физической и коллоидной химии Архангельского государственного технического университета. Имеет более 200 научных трудов в области разработки физико-химических основ процессов переработки древесины.





Рябева Наталья Викторовна родилась в 1969 г., окончила в 1991 г. Архангельский лесотехнический институт, стажер-исследователь кафедры физической и коллоидной химии Архангельского государственного технического университета. Область научных интересов — термодинамика поведения нативных лигнинов в растворителях различной химической природы.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНФОРМАЦИОННЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ДИОКСАНЛИГНИНА В ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРИТЕЛЯХ

Методами ультрацентрифугирования, вискозиметрии и калориметрии исследовано в органических растворителях изменение конформационных характеристик диоксанлигнина сосны как малоизмененного природного полимера.

Change in conformation dioxanlignin characteristics of pine as a little changed natural polymer in organic solvents has been investigated by methods of ultracentrifuging, viscometry and calorimetry.

Современные способы переработки лигносодержащего сырья предусматривают вовлечение в технологический цикл широкого спектра растворителей. Характер взаимодействия растворителей с лигнином определяется электронодонорно-акцепторными свойствами компонентов системы и проявляется прежде всего в изменении механизмов процессов растворения природного полимера (адсорбция, набухание, ассоциация, сольватация и др.). Величинами, характеризующими данные превращения, являются гидродинамические и термодинамические параметры. Экспериментальное их определение для лигнинов различной функциональной и химической природы позволит создать строгую физико-химическую модель строения растворов.

В настоящей работе методами ультрацентрифугирования, вискозиметрии и калориметрии исследованы конформационные характеристики диоксанлигнина (ДЛ) сосны как малоизмененного природного полимера в различных органических растворителях.

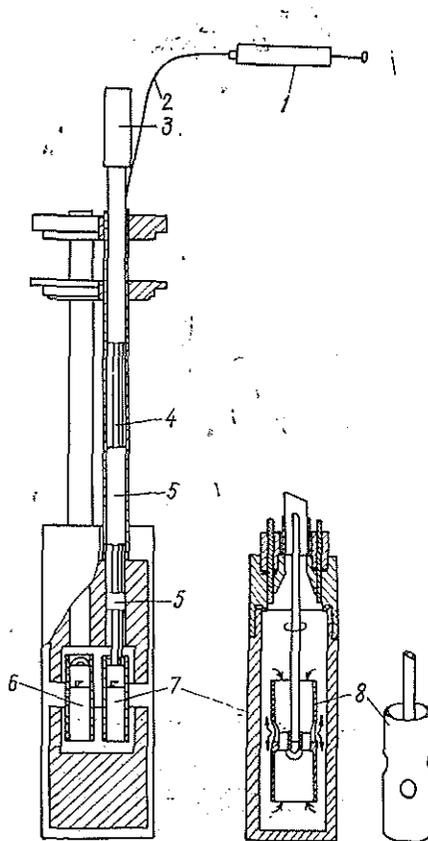
Т а б л и ц а 1

Показатели	Значения показателей для препаратов лигнина			
	Лигнин Бьеркмана		Диоксанлигнин	
	№ 1	№ 2	сосны	березы
Массовая доля функциональных групп, %:				
метоксильных	14,73	14,90	14,80	16,33
общих гидроксильных	—	13,87	10,90	—
фенольных гидроксильных	—	2,65	—	—
общих кислых	—	2,95	3,05	3,39
карбоксильных	—	0,57	1,05	2,14
карбонильных	—	2,24	5,87	6,98
Средневесовая молекулярная масса $\bar{M}_w \cdot 10^{-3}$	38,00	8,80	27,60	5,50
Энтальпия разведения в системе лигнин — ДМСО				
— $\Delta H_{\text{разв}}^{\infty}$ , кДж/моль	10,83	1,72	8,56	0,81

Диоксанлигнин выделен из древесины сосны по методу Пеппера [3, 4]. Содержание функциональных групп приведено в табл. 1.

Растворы готовили путем внесения определенной навески предварительно высушенного в вакуум-сушильном шкафу (температура  $(60,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$ ; продолжительность 1 ч) препарата ДЛ в диметилсульфоксид (ДМСО) ( $t_{\text{кип}} = 189^\circ\text{C}$ ; плотность  $d^{20} = 1101 \text{ кг/м}^3$ ); диметилформамид (ДМФА) ( $t_{\text{кип}} = 153^\circ\text{C}$ ;  $d^{20} = 948 \text{ кг/м}^3$ ); пиридин (П) ( $t_{\text{кип}} = 115,6^\circ\text{C}$ ;  $d^{20} = 982 \text{ кг/м}^3$ ) и диоксан (Д) ( $t_{\text{кип}} = 101,1^\circ\text{C}$ ;  $d^{20} = 1040 \text{ кг/м}^3$ ). Систему полимер—растворитель выдерживали при температуре  $(22,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$  и периодическом перемешивании до полной гомогенизации в течение 24 ч. Молекулярные массы ДЛ (концентрация растворов  $0,2 \dots 0,5 \text{ г/100 г}$  растворителя) определяли методом неустановившегося равновесия [8] на ультрацентрифуге МОМ 3170<sub>в</sub>. Частота вращения ротора  $(20 \dots 45) \cdot 10^3 \text{ об/мин}$ . Вязкость растворов ДЛ (концентрация  $0,6 \dots 1,8 \text{ г/100 г}$  растворителя) измеряли вискозиметром типа Уббелюде (диаметр капилляра  $0,54 \text{ мм}$ ) при температуре  $(20 \pm 0,1)^\circ\text{C}$  [7]. Для термохимических исследований использовали 4-канальную микрокалориметрическую систему [15], каждый канал которой представляет собой двойной теплопроводящий калориметр. Для регистрации теплового потока служили 24 полупроводниковых термопары. Растворитель ДМСО в количестве  $2,7 \text{ мл}$  помещали в реакционную ячейку (рабочий объем  $3,0 \text{ мл}$ ). Раствор ДЛ в ДМСО вводили при непрерывном перемешивании с помощью шприца Гамильтона (рис. 1). Продолжительность и объем инъекций регистрировали с помощью микропроцессора, который также использовали для интегрирования кривых титрования.

Рис. 1. Калориметрический сосуд:  
1 — шприц Гамильтона; 2 — инъекционная трубка; 3 — двигатель мешалки; 4 — стальная трубка; 5 — держатель; 6 — вспомогательная ячейка; 7 — реакционная ячейка; 8 — турбинная мешалка



В выборе модели раствора полимера в физикохимии исходят из установления типа конформации, в которой находятся макромолекулы [9]. Для природных полифункциональных полимеров, каковыми является лигнин, тип конформации определяется характером функциональных групп, молекулярной массой и гибкостью макромолекул [2, 5, 6, 11, 12, 13].

Одним из самых надежных методов определения молекулярных масс является метод ультрацентрифугирования. Однако полидисперсность лигнинов приводит к особому явлению: средние молекулярные массы  $\bar{M}_w$  заметным образом зависят от частоты вращения ротора ультрацентрифуги. В сильном центробежном поле  $\bar{M}_w$  меньше, чем в слабом. На дне кюветы всегда присутствует слой геля, образованный тяжелыми частицами, толщина которого увеличивается при возрастании частоты вращения ротора. Накопление в виде геля высокомолекулярной части лигнина вызывает снижение  $\bar{M}_w$  фракции, остающейся в растворе и дающей седиментационную диаграмму. Чтобы избежать ошибки, обусловленной данным явлением, было предложено определять молекулярные массы при нескольких частотах вращения  $g$  и концентрациях  $c$  и проводить экстраполяцию зависимости  $1/\bar{M}_w = f(c)$  до нулевой концентрации. Затем экстраполяцией зависимости  $(1/\bar{M}_w)_{c=0} = f(g)$  получали значение  $(1/\bar{M}_w)_{c=0; g=0}$  [1].

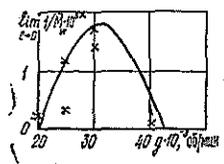


Рис. 2. Зависимость  $\lim_{c \rightarrow 0} 1/\bar{M}_w$  от частоты вращения ротора  $g$

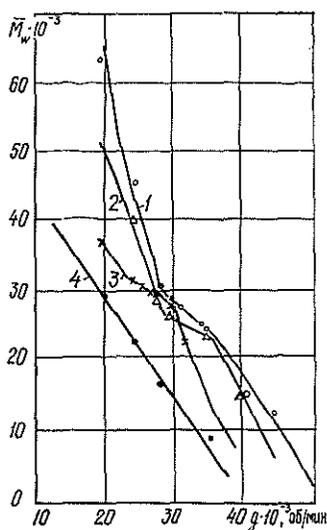


Рис. 3. Зависимость молекулярной массы от частоты вращения ротора при разных концентрациях лигнина: 1—0,22; 2—0,28; 3—0,34; 4—0,54 г/100 г ДМСО

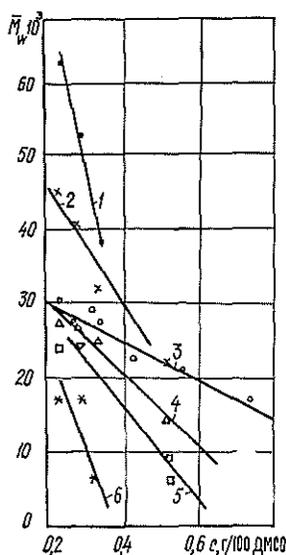
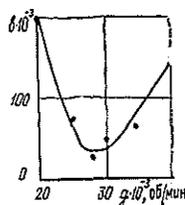


Рис. 4. Зависимость молекулярных масс от концентрации  $c$  при разных частотах вращения ротора,  $g \cdot 10^3$ : 1—20; 2—25; 3—28; 4—30; 5—35; 6—40 об/мин

Однако применение данного экспериментального подхода при исследовании свойств растворов ДЛ в ДМСО выявило ряд существенных особенностей. Так, линейный характер зависимости  $\lim_{c \rightarrow 0} (1/\bar{M}_w) = f(g)$  не обнаружен (рис. 2). Градиент функциональной зависимости  $\bar{M}_w = f(g)$  (рис. 3) возрастал с уменьшением концентрации раствора. В диапазоне частот  $(28 \dots 35) \cdot 10^3$  об/мин наблюдалась область практической независимости значений  $\bar{M}_w$  от частоты вращения ротора, которая отсутствовала при больших концентрациях анализируемого раствора лигнина и увеличивалась с его уменьшением. Зависимость  $\bar{M}_w = f(c)$  при разных частотах вращения имеет линейный характер. Угловой коэффициент прямых проходит через минимум при  $(28 \dots 30) \cdot 10^3$  об/мин (рис. 4, 5).

Рис. 5. Зависимость углового коэффициента  $b$  прямых  $\bar{M}_w = f(c)$  от частоты вращения ротора



Причиной аномального характера выявленных закономерностей служат процессы агрегации в системе полимер — растворитель, приводящие к появлению образований различной степени устойчивости, размеров и молекулярных масс. В разбавленных растворах макромолекулы лигнина находятся в конформации рыхлого макромолекулярного клубка, легко деструктируемого при увеличении частоты вращения ротора ультрацентрифуги с появлением в растворе агрегатов меньших размеров и молекулярных масс. При частоте  $(28 \dots 30) \cdot 10^3$  об/мин, данные конформеры находятся в близком к седиментационному равновесию состоянии. Увеличение частоты вращения ротора приводит к нарушению динамического равновесия, быстрой седиментации частиц и накоплению их на дне кюветы в виде геля. По мере увеличения концентрации лигнина в растворе данная картина несколько меняется. По-видимому, с ростом концентрации раствора происходит уплотнение макромолекулярных клубков, увеличение количества центров агрегации макромолекулы и полидисперсности системы.

Следовательно, за оптимальные условия проведения эксперимента необходимо принять концентрацию раствора  $0,30 \dots 0,35$  г/100 г растворителя и частоту вращения ротора  $(28 \dots 30) \cdot 10^3$  об/мин.

В практике исследований конформационных превращений лигнина метод калориметрии не нашел широкого применения [10, 12, 14]. Это связано как с ограниченными возможностями используемой аппаратурной базы, так и со значительными расхождениями в значениях интегральных теплот растворения  $\Delta\bar{H}_m$ , приводимых в различных исследованиях. По-нашему мнению, причина кроется в использовании относительно концентрированных растворов лигнина (10...30 г/100 г растворителя) и нахождении искомой величины  $\Delta\bar{H}_m$  экстраполяцией на нулевое значение концентрации, что связано со значительными погрешностями.

Применение микрокалориметрической системы, разработанной профессором Ингемаром Вадсё в Термохимическом центре университета г. Лунда (Швеция), позволило нам избежать данных затруднений [15].

Анализ экспериментальных кривых и значений теплот разведения для систем диоксанлигнин — ДМСО и лиственной сульфатный лигнин\* — ДМСО (рис. 5) выявил ряд особенностей в поведении исследуемых полимеров. Так, для ДЛ отмечается экзотермический эффект, который уменьшается с увеличением концентрации раствора в реакционной ячейке и описывается зависимостью следующего вида:

$$-\Delta H_{\text{разв}} = a - bc_{\text{дл}}, \quad (1)$$

где  $c_{\text{дл}}$  — концентрация раствора лигнина в калориметрической ячейке, г лигнина/100 г растворителя.

Для разбавленных растворов системы сульфатный лигнин — ДМСО (первые две инъекции) обнаружен эндотермический эффект, который по мере возрастания концентрации лигнина переходит в экзотермический.

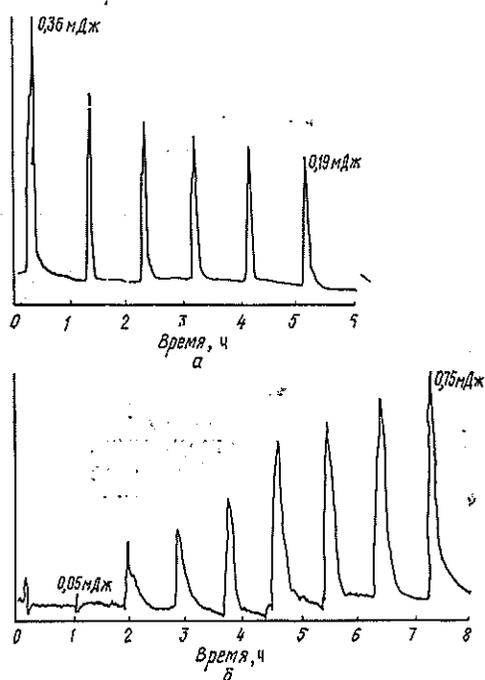


Рис. 6. Калориметрические кривые для систем диоксанлигнин — ДМСО (а) и сульфатный лигнин — ДМСО (б)

Как следует из физикохимии полимеров [9], отрицательное значение теплот растворения ароматических высокомолекулярных углеводов связано с изменением (сжатием) свободных объемов конформеров. По-видимому, в силу особенностей функциональной и надмолекулярной природы технического лигнина имеет место первоначальное увеличение объема макромолекулярных клубков полимера за счет перехода внутрь сферы молекул растворителя (эндотермический эффект). Последующая агрегация протекает с разрушением рыхлой надмолекулярной структуры и образованием более устойчивых структур (экзотермический эффект). Для малоизмененных нативных лигнинов (ДЛ) процессы агрегации связаны со значительными энергиями взаимодействия полимера с растворителем и образованием устойчивых ассоциатов.

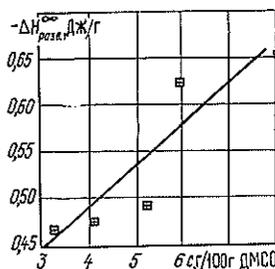
\* Состав лигнина (%): метоксильные группы — 16,600; общие кислые — 6,115; карбонильные — 2,669; карбоксильные — 2,684 ( $\overline{M}_{\text{w}} = 10\,300$ ).

Исходя из теории Мак Милана — Маера пределом зависимости  $\Delta H_{\text{разв}} = f(c_{\text{дл}})$  считают мольную энтальпию лигнина  $\Delta H_{\text{разв}}^{\infty}$ :

$$\Delta H_{\text{разв}}^{\infty} = \bar{H}^{\infty} - \bar{H}_{\text{исх}}, \quad (2)$$

где  $\bar{H}^{\infty}$  и  $\bar{H}_{\text{исх}}$  — соответственно парциальная мольная энтальпия диоксанлигнина при бесконечном разведении и заданной исходной концентрации раствора.

Рис. 7. Зависимость энтальпии разведения диоксанлигнина в ДМСО от концентрации исследуемого раствора ( $-\Delta H_{\text{разв}}^{\infty} = 0,311 + 0,044 c$ ;  $\delta = 0,91$ )



Различие конформационных состояний лигнина в растворах различной концентрации проявляется в изменении величины параметра  $-\Delta H_{\text{разв}}^{\infty}$  (рис. 7). При этом экзотермический эффект растворения ароматических высокомолекулярных углеводородов должен возрастать с увеличением молекулярной массы полимера [9]. Анализ экспериментальных данных методом микрокалориметрии и ультрацентрифугирования позволил нам впервые установить линейный характер функциональной зависимости  $-\Delta H_{\text{разв}}^{\infty} = f(\bar{M}_w)$  для ряда малоизмененных препаратов лигнина в ДМСО (табл. 1):

$$-\Delta H_{\text{разв}}^{\infty} = -0,94 + 3,21 \cdot 10^{-4} \bar{M}_w, \quad (\delta = 0,94), \quad (3)$$

где  $\delta$  — коэффициент корреляции.

Значения  $\bar{M}_w$ , полученные по предлагаемой нами методике (в оптимальных условиях), являются характеристиками устойчивых образований в данном растворителе, а не истинными характеристиками исходного препарата лигнина. Для определения истинных значений  $\bar{M}_w$  данного образца и оценки процессов сольватации необходимо принять во внимание влияние полиэлектролитного эффекта на структуру раствора. С этой целью нами были определены значения  $\bar{M}_w$  для ДЛ в ДМФА, пиридине и диоксане (оптимальные условия). Зависимость  $\bar{M}_w = f(\epsilon)$  ( $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость растворителя) описывается уравнением

$$|\bar{M}_w = 17200 + 200\epsilon, \quad (\delta = 0,90). \quad (4)$$

Экстраполяция  $\bar{M}_w$  на нулевое значение  $\epsilon$  позволяет определить истинное значение  $\bar{M}_w$  анализируемого препарата, а градиент ее — реакционную способность лигнина. Результаты расчета конформационных (табл. 2) и термодинамических (табл. 3) характеристик подтверждают положение об усилении сольватационных эффектов по мере увеличения полярности растворителей.

Так, при увеличении  $\epsilon$  растворителя степень свернутости макромолекулярного клубка лигнина уменьшается при практически неизменных значениях гидродинамического радиуса и среднеквадратичного расстояния между концами цепи полимера. Данный факт может быть

Таблица 2

Показатели	Значения показателей для растворителей			
	ДМСО	ДМФА	П	Д
Диэлектрическая проницаемость растворителя $\epsilon$	49,00	36,70	12,30	2,21
Характеристическая вязкость раствора $\eta \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /кг	6,00 ± 0,04	8,20 ± 0,03	7,40 ± 0,03	11,10 ± 0,03
Конформационные характеристики лигнина:				
молекулярная масса $\bar{M}_w \cdot 10^{-3}$	27,60	24,50	25,00	14,50
гидродинамический радиус макромолекул $r \cdot 10^9$ , м	2,97 ± 0,06	3,17 ± 0,07	3,08 ± 0,07	2,94 ± 0,05
среднеквадратичное расстояние между концами цепи $(\bar{r}^2)^{1/2} \cdot 10^9$ , м	9,10 ± 0,04	9,70 ± 0,05	9,44 ± 0,05	9,01 ± 0,03
степень свернутости $N^{1/2} \cdot 10^{19}$	3,00 ± 0,01	3,84 ± 0,02	3,56 ± 0,02	5,60 ± 0,02

связан с увеличением сольватной оболочки при сохранении типа конформации макромолекул в исследуемых растворителях.

Второй вириальный коэффициент  $B_2$  определен как тангенс угла наклона прямой  $1/\bar{M}_w = f(c)$ . Параметр Флори — Хаггинса  $\chi_1$  рассчитан по уравнению

$$B_2 = \frac{d_1}{M_1 d_2^2} \left( \frac{1}{2} - \chi_1 \right), \quad (5)$$

где  $d_1, d_2$  — соответственно плотности растворителя и полимера;  
 $M_1$  — молекулярная масса растворителя.

Свободная энергия растворения  $\Delta G$  рассчитана по формуле

$$\Delta G = R T \ln a_1, \quad (6)$$

где  $R$  — газовая постоянная;  
 $T$  — температура;  
 $a_1$  — активность.

Логарифм  $a_1$

$$\ln a_1 = \ln \varphi_1 + (1 - v_1/v_2) \varphi_2 + \chi_1 \varphi_2^2, \quad (7)$$

где  $\varphi_1, \varphi_2$  — объемные доли растворителя и полимера;  
 $v_1, v_2$  — парциальные объемы растворителя и полимера.

Термодинамические характеристики взаимодействия ДЛ с растворителями (таб. 3) свидетельствуют о резком увеличении полиэлектролитных эффектов в среде с диэлектрической проницаемостью больше

Таблица 3

Показатели	Значения показателей для растворителей			
	ДМСО	ДМФА	П	Д
Второй вириальный коэффициент $B_2 \cdot 10^{-4}$	54,1	4,6	0,0	0,0
Параметр Флори — Хаггинса $\chi_1$	-0,1489	0,4401	0,5073	0,5069
Свободная энергия растворения $\Delta G$	-0,816	-0,760	-0,466	-0,430

20 и образовании устойчивых сольватов. Наиболее сильное взаимодействие между лигнином и растворителем наблюдается в растворах ДМСО. Пиридин и диоксин близки к идеальному растворителю для данного лигнина. Эффекты сольватации в них ничтожны. Значения молекулярных масс, полученные в данных растворителях, близки к истинным характеристикам исследуемого образца.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Горинг Д. А. И. Полимерные свойства лигнинов и их производных // Лигнины / Под ред. К. В. Сарканена; Пер. с англ.— М.: Лесн. пром-сть, 1975.— 632 с. [2]. Гравитис А. Я., Столдере И. А. Строение лигнина как полимера. 1. Конформационные свойства макромолекул лигнина // Химия древесины.— 1971.— № 2.— С. 10—17. [3]. Грушников О. П., Елкин В. В. Достижения и проблемы химии лигнина.— М.: Наука, 1973.— 296 с. [4]. Закис Г. Ф., Можейко Л. Н., Тельшева Г. М. Методы определения функциональных групп лигнина.— Рига: Зинатне, 1975.— 176 с. [5]. Карманов А. П., Давыдов В. Д., Богомоллов Б. Д. Свойства разбавленных растворов и структурные особенности некоторых препаратов лигнина // Химия древесины.— 1981.— № 4.— С. 50—57. [6]. Оценка термодинамической гибкости макромолекул лигнина / А. П. Карманов, В. А. Демин, В. Д. Давыдов и др. // Химия древесины.— 1989.— № 3.— С. 28—32. [7]. Рафиков С. Р., Павлова С. А., Твердохлебова И. И. Методы определения молекулярных весов и полидисперсности высокомолекулярных соединений.— М.: Изд-во АН СССР, 1963.— 335 с. [8]. Соколов О. М., Богомоллов Б. Д. Определение молекулярных весов сульфатных и натронных лигнинов методом неустановившегося равновесия на ультрацентрифуге // Лесн. журн.— 1967.— № 5.— С. 140—144.— (Изв. высш. учеб. заведений). [9]. Тагер А. А. Физикохимия полимеров.— М.: Химия, 1978.— 544 с. [10]. Энтальпии взаимодействия лигнина с органическими растворителями / Г. М. Тельшева, В. Г. Цветков, Г. Н. Лебедева, Е. П. Коновалова // Химия древесины.— 1987.— № 2.— С. 81—83. [11]. Якобсон Ю. К. Конформационный анализ типичных фрагментов структуры лигнина: Автореф. дис. ... канд. хим. наук.— Рига, 1986.— 23 с. [12]. Brown W. Solution properties of lignin. Thermodynamic properties and molecular weight determinations // Journal of Applied Polymer Science.— 1967.— Vol. 11.— P. 2381—2396. [13]. Goring D. A. I. The physical chemistry of lignin // Pure Appl. Chem.— 1962.— N 1/2.— P. 223—235. [14]. Shigenatsu M., Mortia M., Sakata I. Flory polymer-polymer interaction parameter between hemucellulose and lignin from hardwood // Macromol. Chem.— 1992.— 193.— P. 133—142. [15]. Suurkuusk I., Wad'sö I. Multichannel microcalorimetry system // Chemica Scripta.— 1982.— Vol. 20.— P. 155—163.

Поступила 13 мая 1994 г.

УДК 634.0867.2

А. И. КИПРИАНОВ, Д. А. ПОНОМАРЕВ, Е. А. ДЕМЧЕНКО

С.-Петербургская лесотехническая академия

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА ДРЕВЕСИНЫ

Приведена схема переработки древесного пиролизата, получаемого при сухой перегонке древесины, а также обобщены производственные и экспериментальные данные использования жидких продуктов пиролиза древесины в различных областях народного хозяйства.

A scheme of wood pyrolysate processing obtained by dry wood distillation is given as well as industrial and experimental data of wood pyrolysis fluid products utilization in different economic areas is summarized.

Основным товарным продуктом термической переработки древесины является древесный уголь. Из древесины березы можно получить 30...35 % древесного угля, при этом до 25 % от массы древесины составляют неконденсирующиеся газы, а остальное — жидкие продукты пиролиза (так называемая кислая вода и древесные смолы). Таким образом около половины органической массы древесины переходит в жидкий конденсат, в котором идентифицировано свыше 200 различных ин-

дивидуальных соединений, относящихся к различным классам органических веществ. Большинство из них находятся в незначительных количествах и выделение их, кроме уксусной кислоты, при промышленной переработке нецелесообразно. В то же время древесные смолы можно рассматривать как фенолсодержащее сырье, доступное для промышленного использования. При пиролизе получают до 2 % суммарных фенолов от массы древесины, а из каменноугольной смолы — лишь 0,7 % от массы угля. При общем объеме пиролиза древесины на отечественных предприятиях 700 тыс. пл. м<sup>3</sup> в год образуется свыше 250 тыс. т жидких продуктов, подлежащих дальнейшей переработке.

В настоящее время на отечественных предприятиях действуют различные технологические схемы переработки жидких продуктов (конденсатов). Основными являются уксусная кислота и в незначительной степени древесные смолы [11]. Если сбыт уксусной кислоты определяется устойчивым спросом пищевой промышленности, то квалифицированная переработка древесных смол в полном объеме еще не достигнута. Более того, с повышением цен на энергоносители, наблюдается тенденция к использованию органической части конденсатов в качестве топлива несмотря на ее низкую теплотворную способность ( $\approx 3000$  кДж) [11]. Вместе с тем, изменение цен на продукты основного органического синтеза делает возможным применение в различных отраслях промышленности продуктов, полученных на основе лесохимических фенолов — сравнительно дешевого и доступного сырья. Поэтому представляется целесообразным обобщить в настоящей статье имеющийся опыт переработки древесных смол и указать на перспективные разработки, которые могут быть внедрены без существенных капитальных затрат (рис. 1).

На примере одного из лесохимических заводов рассмотрим принципиальную схему переработки жидких продуктов (рис. 2). Суммарный конденсат, образующийся при пиролизе древесины, в результате отстаивания разделяется на отстойную смолу и надсмольную воду (жижку). Отстойная смола представляет собой сложную смесь, основную массу которой составляют фенолы (20...38 %), фенолокислоты (20...30 %), карбоновые кислоты (2...6 %) и нейтральные вещества (до 30 %). Состав отстойной смолы мало зависит от способа переработки древесины, но сильно — от породного состава сырья. Выход отстойной смолы при пиролизе лиственной древесины составляет 6,0...8,6 % от абс. сухого сырья. Традиционно отстойная смола без какой-либо обработки применяется в качестве консерванта древесины, а также мягчителя при производстве резины. Уваренную отстойную

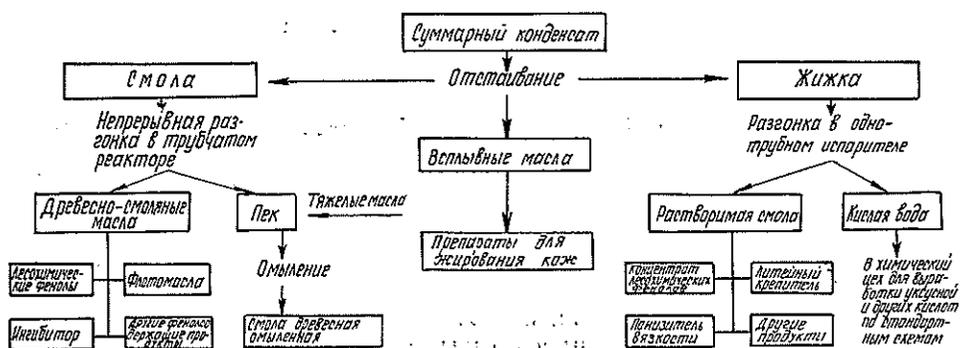
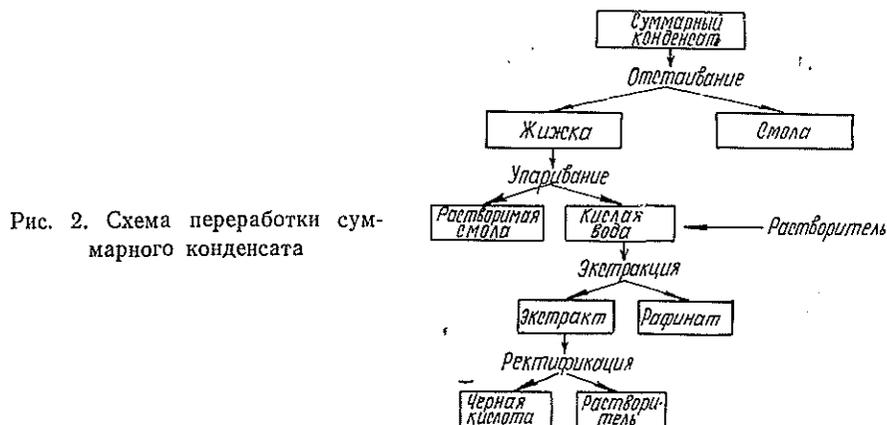


Рис. 1. Схема переработки жидких продуктов пиролиза



смолу лиственных пород после омыления используют в строительстве как воздухововлекающую добавку в бетонные смеси и крепитель формовочных смесей в литейной промышленности. Получающаяся при этом прочность смесей на раздавливание, равная 10...15 атм, является достаточной для среднего литья. Основная масса производимой отстойной древесной смолы объединяется и подвергается фракционной разгонке с выделением креозотовой фракции (температура кипения  $T_{\text{кип}} = 180 \dots 240 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и древесносмоляного ингибитора ( $T_{\text{кип}} = 240 \dots 310 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Указанные фракции содержат не менее 60 % фенолов и могут служить ценными фенолсодержащими продуктами. Креозотовую фракцию можно применять для смягчения кож. Известны разработки по получению из нее ценных индивидуальных продуктов — гваякола и креозота, используемых в фармацевтической промышленности [8].

Наши исследования [4] показали, что наличие метоксильной и, особенно, гидроксильной групп в орто-положении замещенных фенолов существенно повышает устойчивость образующихся из них феноксильных радикалов и, как результат, эффективность этих фенолов к ингибированию различных радикальных реакций. Повышенной термодинамической устойчивостью рассматриваемых феноксильных радикалов объясняется тормозящее влияние на радикальные реакции древесносмоляного ингибитора, который содержит пирокатехин, гваякол и другие ортозамещенные фенолы. Применение ингибитора для стабилизации моторных топлив (0,065...0,150 % по весу) основано на торможении процессов окисления, которые протекают при соприкосновении топлива с воздухом, в результате чего происходит осмоление крекинг-бензина.

Использование ингибитора в качестве «стоппера» — прерывателя радикальной полимеризации мономеров в производстве синтетического каучука, позволяет регулировать степень полимеризации каучука.

Древесная отстойная смола, перегнанная в интервале температур 180...300  $^\circ\text{C}$ , может служить в качестве флотореагента, в частности, при обогащении сульфидных руд цветных металлов [3].

В зависимости от способов выделения уксусной кислоты из жидких продуктов пиролиза получают фенолсодержащие смолы, незначительно отличающиеся по составу и свойствам. По одной из существующих технологических схем (Моломский ЛХЗ) дистиллят после упаривания жижки направляют на получение уксусной кислоты, а кубовый остаток (растворимая смола) — на переработку. По другой схеме жижку экстрагируют, затем растворитель и уксусную кислоту отгоняют. В этом случае кубовый остаток называют экстракционной смолой. К фенолсо-

держашему сырью можно отнести так называемый чернокислотный остаток, образующийся при ректификации уксусной кислоты-сырца.

Растворимая смола отличается от отстойной по элементному составу более высоким содержанием кислорода (38 против 18 %). По групповому составу растворимая смола состоит из углеводов, преимущественно в виде ангидрогексоз (25...30 %), лактонов оксикислот (30 %), летучих кислот (до 15 %) и фенолов (15...20 %). Методом газо-жидкостной хроматографии (ГЖХ) установлен групповой состав водорастворимой и эфирорастворимой частей смолы. Основным компонентом первой части является левоглюкозан (1, 6-ангидро- $\beta$ -D-глюкопираноза), количество которого достигает 30...35 %. Значительная часть этой фракции приходится на оксикислоты и их лактоны [10]. Во второй части этой смолы были определены фенолы (46 %), нейтральные вещества (33 %) и кислоты. Среди фенолов основными по данным работы [4] являются пирокатехин (22 % от всех фенолов), диметилловые эфиры пирогаллола (17 %), этилгваякол (12 %), изовэгнол (3 %), метилгваякол (1,5 %).

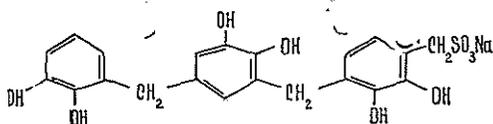
Образующиеся при выделении уксусной кислоты фенолсодержащие смолы далее подвергаются химической переработке, простейшая из которых омыление состоит в обработке смол водными растворами гидроксида натрия и кальция. По химическому составу омыленная смола представляет собой смесь различных фенолов и алкилфенолов в виде фенолятов натрия и кальция (25...30 %), натриевых и кальциевых солей карбоновых кислот (до 40 %), левоглюкозана (20...25 %) и др. ангидридосахаридов [5]. Полученная таким способом поверхностно-активная лесохимическая добавка (ЛХД) относится к полифункциональным композициям и имеет широкий диапазон использования в строительной, керамической и химической промышленности, а также в целлюлозно-бумажном производстве.

При исследовании влияния ЛХД на сульфатную варку целлюлозы было установлено, что она проявляет себя как ингибитор деструкции углеводного комплекса и катализатор щелочной делигнификации [7]. Благодаря моющим и диспергирующим свойствам ЛХД способна не только увеличивать растворение экстрактивных веществ древесины в процессе варки, что приводит к снижению непровара, увеличению выхода целлюлозы, снижению ее жесткости и смолистости, но и диспергировать нерастворимые в воде неомыляемые вещества, предотвращая их высаживание на поверхности волокна целлюлозы и оборудования [2].

Значительное содержание в нерастворимой смоле многоатомных фенолов (пирокатехин, пирогаллол и их гомологи) позволяет рассматривать ее как основное сырье для производства понизителей вязкости минеральных суспензий. Это предположение основано на гипотезе о механизме действия понизителей вязкости суспензий, согласно которой лучшими будут те соединения, которые содержат структурные единицы орто-замещенных фенолов. На основании этой гипотезы был разработан способ и предложена технология получения поверхностно-активной добавки для бетонных, цементных и гипсовых смесей [1]. Эта легко растворимая добавка вводится в бетонную смесь с водой затворения. Границы оптимальной дозировки добавки для гидротехнических сооружений 0,1...0,2 %, для песчаных бетонов — 0,15...0,30 % от массы цемента (в пересчете на сухое вещество добавки). Введенная добавка улучшает вязкость бетонной смеси, уменьшает ее расслаиваемость, что обеспечивает возможность перевозки бетонной смеси на значительные расстояния (20...40 км), увеличивает водонепроницаемость и морозостойкость. Эта добавка была применена при строительстве гидротехнических сооружений в сложных гидрологических и климатических

условиях (Чебоксарская и Саяно-Шушенская ГЭС, водозащитная дамба в Финском заливе) [5].

На основе фенольной фракции растворимой смолы на одном из лесохимических заводов внедрена технология производства поверхностно-активной добавки ПФЛХ (понижитель фенольный лесохимический) [9]. Способ ее производства заключается в том, что фенольный концентрат, выделенный из растворимой смолы, конденсируется с формальдегидом в кислой среде. Образовавшийся новолак после промывки горячей водой растворяют в щелочи и подвергают действию сульфита натрия. Полученный продукт является сульфометилированным трехкольчатым новолаком на основе пирокатехина и его гомологов и имеет следующее строение:



Упаренная до 15 %-й влажности или высушенная до порошкообразного состояния добавка ПФЛХ используется при бурении нефтяных и газовых скважин, для снижения вязкости глинистых промысловых жидкостей и регулирования их свойств. Она была применена в качестве суперпластификатора для бетонных смесей на строительстве Кенгумской ГЭС. Поверхностно-активные свойства ПФЛХ позволяют регулировать реологические свойства глинистых суспензий различного типа, что дает возможность использовать ее в производстве фарфоровых и фаянсовых масс.

Кубовый остаток, получаемый после отгонки уксусной кислоты из кислой воды, можно рассматривать как фенольный экстракт, содержащий до 50...60 % фенолов и 6...8 % летучих кислот. Этот экстракт может быть использован как сырье для изготовления синтетических дубителей. Синтез дубителей по методу Д. В. Тищенко и К. П. Уварова [9] сводится к следующим основным стадиям: взаимодействие фенольного экстракта и формальдегида в щелочной среде с образованием фенолоспиртов, синтез новолаков конденсацией фенолоспиртов с исходным фенольным экстрактом в щелочной среде, сульфометилирование полученного новолака путем его обработки формальдегидом и сульфитом натрия. Заключительная стадия состоит в выделении дубителя из раствора путем подкисления полученной соли синтана сильной минеральной кислотой, последующей нейтрализацией кислого синтана аммиаком и сушкой до влажности 10 %.

Таким образом, на ряде примеров показана возможность широкого и квалифицированного применения в народном хозяйстве жидких продуктов пиролиза древесины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. А. с. 1024435 СССР. Способ получения пластифицирующей добавки для бетонной смеси / С. С. Сметанина, Е. В. Чупров, А. И. Киприанов // Изобретение в СССР и за рубежом.— 1983.— № 23. [2]. Использование сульфатного щелока в качестве поверхностно-активной добавки в бетоны / Е. В. Чупров, С. С. Сметанина, А. И. Киприанов и др. // Химическая переработка древесины: Межвуз. сб. науч. тр.— Л.: ЛТА, 1982.— С. 76—80. [3]. Козлов В. Н., Смоленский В. Б. Флотореагенты-вспеннители из древесной смолы // Прикладная химия.— 1958.— № 5.— С. 24—28. [4]. Косюкова Л. В. Газохроматографический анализ фенолов смол пиролиза древесины: Дис. ... канд. хим. наук.— Горький, 1970.— 160 с. [5]. Поверхностно-активные вещества из древесных пирогенных смол / С. С. Сметанина, Е. В. Чупров, Д. А. Пономарев, А. И. Киприанов // Химия и химическая технология древесины: Межвуз. сб. науч. тр.— Л.: ЛТА, 1985.— 120 с. [6]. Пономарев Д. А. и др. Энтальпии

образования окси- и метоксизамещенных радикалов // *Органическая химия*.—Т. 27, вып. 10.—С. 2181—2183. [7]. Рихтер Н. Е., Гамидуллаев С. Н., Кокорина М. Н. Использование пиролизных смол для модификации сульфатной варки лиственной древесины: Материалы междунар. науч.-техн. конф. «РАРFOR-93», окт. 1993 г.—С.-Пб.—С. 21—23. [8]. Сумароков В. П. Химия и технология переработки древесных смол.—М.; Л.: Гослесбумиздат, 1953.—235 с. [9]. Уваров Н. П., Гордон Л. В. Древесные смолы.—М.: Гослесбумиздат, 1962.—284 с. [10]. Химический состав растворимой смолы Моломского ЛХЗ / М. Н. Широкова, С. П. Костина, Н. Р. Колосова и др. // *Химическая переработка древесины: Межвуз. сб. науч. тр.*—Л.: ЛТА, 1982.—С. 74—76. [11]. Чащин А. М. и др. *Справочник лесохимика*.—М.: Лесн. пром-сть, 1974.—374 с.

Поступила 8 декабря 1993 г.

УДК 630\*866

С. Н. ВАСИЛЬЕВ, М. Ю. ТРОСКИНА, В. И. РОЩИН, В. И. ЯГОДИН



Васильев Сергей Николаевич родился в 1963 г., окончил в 1986 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры технологии лесохимических производств и биологически активных веществ С.-Петербургской ЛТА. Сфера научных интересов — изучение химического состава экстрактивных веществ основных лесобразующих пород России; установление связи структура — свойство выделяемых соединений; поиск путей извлечения этих соединений методами химической технологии и создания на их базе препаратов, обладающих уникальными свойствами.

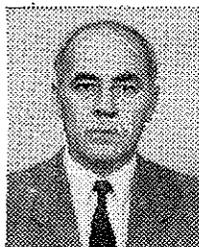


Троскина Марина Юрьевна родилась в 1971 г., окончила в 1993 г. С.-Петербургскую лесотехническую академию, аспирант кафедры лесохимических производств и биологически активных веществ С.-Пб ЛТА. Имеет 1 печатную работу. В сферу научных интересов входит изучение процессов извлечения и разделения экстрактивных веществ древесной зелени хвойных пород.



Рощин Виктор Иванович родился в 1945 г., окончил в 1972 г. Ленинградскую лесотехническую академию, кандидат химических наук, доцент кафедры технологии лесохимических производств и биологически активных веществ С.-Пб ЛТА. Имеет более 130 печатных трудов в области изучения состава соединений экстрактивных веществ биомассы дерева и их биологической активности; теории и технологии получения продуктов на основе экстрактивных веществ.

Ягодин Владимир Иванович родился в 1944 г., окончил в 1966 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесохимических производств и биологически активных веществ, проректор по научной работе С.-Пб ЛТА, почетный профессор Нанкинского лесного университета (КНР). Имеет 109 печатных трудов и 9 изобретений в области технологии древесной зелени, комплексной химической переработки древесины.



## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРАГИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ДРЕВЕСНОЙ ЗЕЛЕНИ

Проведен анализ экстракции биологически активных веществ из древесной зелени с учетом основных факторов, влияющих на процесс, и построена математическая модель извлечения экстрактивных веществ.

The extraction analysis of Bioactive Substances from the wood greenery with account to the main factors the process has been made as well as a mathematical model of isolating extractives has been built.

Современная методология исследования массообмена в системе твердое тело — жидкость состоит в том, что пространственно-временное распределение соответствующей субстанции рассматривается только в области, занятой твердым телом. Условия переноса жидкости, находящейся в контакте с ним, учитываются заданием соответствующих граничных условий [1].

Уравнение, которое в наиболее общем виде определяет процесс перераспределения концентрации  $C$  внутри твердого тела, когда скоростью взаимного перемещения фаз можно пренебречь, является следствием закона Фика:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = D \nabla^2 C, \quad (1)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии экстрагируемого вещества в твердом теле, который имеет смысл суммарной массопроводности капиллярно-пористого тела [4].

Левая часть уравнения отражает нестационарность процесса, правая — распределение вещества в твердом теле в результате молекулярной диффузии.

Формулировка математической задачи будет завершена, если в дополнение к дифференциальному уравнению диффузии (1) будут указаны начальные условия

$$C(x, 0) = C_0, \quad (2)$$

т. е. экстрактивные вещества внутри частицы в начальный момент времени распределены равномерно, а также граничное условие — закон взаимодействия между поверхностью твердого тела и экстрагентом:

$$-D \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_n = K (C_n - C_{\bar{c}}), \quad (3)$$

где  $K$  — коэффициент массоотдачи;  
 $C_n$ ,  $C_{\bar{c}}$  — концентрация растворенного вещества на поверхности твердого тела и во внешней среде.

В простейших случаях динамические коэффициенты считаются постоянными, и для простейших геометрических моделей твердых тел решения уравнений известны [1, 4]. Однако трудности, заключающиеся в сложности строения реальной частицы и неопределенности распределения извлекаемых веществ по ее объему, не позволяют с помощью современной теории экстракции получить обобщенное кинетическое уравнение этого процесса. Упрощение исходных дифференциальных уравнений приводит к искажению модели действительного механизма явления, которое трудно учесть. Поэтому решение может иметь низкую практическую ценность. Это относится и к системе измельченное растительное сырье — экстрагент, что накладывает ограничения на применение данного метода при математическом описании процесса экстрагирования биологически активных веществ (БАВ) из древесной зелени [6]. Поэтому наиболее приемлемым представляется решение поставленной задачи через критериальные уравнения [5].

Решение дифференциального уравнения массопередачи, согласно теории подобия, приводит к первообразной функции в критериальной форме [4]:

$$F(\text{Nu}, \text{Pr}_d, \text{Fo}_d, \text{Re}) = 0, \quad (4)$$

где  $\text{Nu}$  — критерий Нуссельта;  
 $\text{Fo}_d, \text{Pr}_d$  — диффузионные критерии Фурье и Прандтля;  
 $\text{Re}$  — критерий Рейнольдса.

Как определяющие могут также рассматриваться критерии, характеризующие кратность обмена растворителя, влияние силы тяжести, распределения вещества между фазами, степень экстрагирования, критерий подобия концентрации и симплекс геометрического подобия.

Применительно к конкретным условиям, когда гидродинамический режим существенно не влияет на процесс экстракции, эта зависимость может иметь и иной, более простой вид.

Как было показано в работах [3, 7] увеличение скорости движения экстрагента ( $\text{Re} = 154 \dots 15400$ ) не является средством интенсификации процесса.

Влияние силы тяжести, которое необходимо учесть для характеристики экстракции по дефлегмационно-оросительному способу, может быть определено путем ввода в уравнение, описывающее процесс, критерия Галилея [6]:

$$\text{Ga} = \frac{gR^3}{\gamma^2}, \quad (5)$$

где  $g$  — сила тяжести,  $\text{м/с}^2$ ;  
 $R$  — эффективный размер частицы,  $\text{м}$ ;  
 $\gamma$  — кинематическая вязкость экстракта,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Подставляя в это уравнение значения эффективного размера частицы измельченной древесной зелени  $R = 1,5 \cdot 10^{-4}$   $\text{м}$  [2] и кинематической вязкости экстрагентов, получаем следующие значения критерия Галилея:

гидрофильный растворитель (изопропанол)

$$\text{Ga} = \frac{9,8 (1,5 \cdot 10^{-4})^3}{0,29^2} = 3,93 \cdot 10^{-10};$$

гидрофобный растворитель (бензин)

$$\text{Ga} = \frac{9,8 (1,5 \cdot 10^{-4})^3}{1,82^2} = 9,95 \cdot 10^{-12}.$$

Сила тяжести в данном случае не оказывает существенного влияния на процесс экстракции, так как критерий  $\text{Ga}$  имеет пренебрежимо

малую величину в связи с малым эффективным размером частицы измельченной древесной зелени.

Таким образом, учитывая, что при извлечении вещества из твердого тела определяющим является диффузионный критерий Био  $Bi_d$ , в то время как критерий  $Nu$  относится к массообмену в пограничном слое, для случая экстрагирования БАВ из древесной зелени можно ограничиться уравнением

$$F(Fo_d, Bi_d, \beta) = 0 \tag{6}$$

или в развернутом виде

$$E = \frac{C_p - C_{\tau}}{C_0 - C_{II}} = \alpha \left( \frac{Dt}{R^2} \right)^c \left( \frac{KR}{D} \right)^b \beta^d, \tag{7}$$

где  $E$  — симплекс концентраций;  
 $C_{\tau}, C_{II}, C_0, C_p$  — соответственно концентрация БАВ в экстракте в момент времени  $\tau$ , в экстракте в начальный момент времени, в частице в начальный момент времени, равновесная;

$$Fo_d = \frac{Dt}{R^2};$$

$$Bi_d = \frac{KR}{D};$$

$\beta$  — параметрическая переменная — отношение массы твердого тела к массе жидкости,  $\beta = \pm \frac{C_p - C_{II}}{C_0 - C_p}$  (знак минус принимают для противотока);

$\alpha, b, c, d$  — постоянные.

В полученном критериальном уравнении не учтена влажность исходного сырья, так как она в древесной зелени практически постоянна в течение годового цикла. Предварительная сушка древесной зелени на практике не применяется из-за разрушения значительного количества БАВ [3].

Эксперименты проводили на лабораторных установках, моделирующих реакторы резонансно-пульсационного и дефлегмационно-оросительного типов и снабженных устройствами, позволяющими отбирать экстракт в любой момент времени [2]. Процесс осуществляли гидрофильным (изопропанол) и гидрофобным (гексан) растворителями в течение 2 ч при заданном модуле, отбирая пробы экстрактов и определяя в них содержание биологически активных веществ. Изменение концентраций биологически активных веществ внутри и вне частиц древесной зелени, а также эффективные коэффициенты диффузии и массоотдачи, рассчитанные на основании полученных результатов, приведены в следующей статье (с. 126—131). Обработка экспериментальных данных с помощью

Экстрагент	$\alpha$	$b$	$c$	$d$
Резонансно-пульсационный способ				
Изопропанол, %:				
100	0,027	-3,7	10,1	-3,3
80	0,029	-4,4	15,9	-3,2
60	0,033	-5,8	83,6	-3,1
Гексан	0,058	-8,1	5,7	-2,6
Дефлегмационно-оросительный способ				
Изопропанол, %:				
100	0,021	-3,1	11,0	-1,5
80	0,022	-3,8	14,7	-1,4
60	0,024	-4,4	20,7	-1,4
Гексан	0,053	-2,8	2,4	-1,1

стандартных программ позволила получить коэффициенты и показатели степеней критериальных уравнений (6) и (7), значения которых приведены в таблице.

Как следует из данных таблицы, наибольшее влияние на выход БАВ оказывает величина коэффициента внутренней диффузии  $D$  и эффективный радиус частиц сырья  $R$ .

Коэффициент множественной корреляции, характеризующий взаимосвязь величин, входящих в уравнение (7), колеблется от 0,82 до 0,99. Средняя ошибка определения симплекса концентраций не превышает 0,05. Из этого следует, что расчет относительной концентрации БАВ в экстрагируемой древесной зелени может быть выполнен по уравнению (7) и данным таблицы с достаточной для практических целей точностью.

Итак, процесс извлечения БАВ из древесной зелени наиболее приемлемо описывается критериальным уравнением (7).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Аксельруд Г. А., Лысянский В. М. Экстрагирование: система твердое тело — жидкость.— М.: Химия, 1974.— 255 с. [2]. Извлечение экстрактивных веществ древесной зелени при резонансных колебательных воздействиях / С. Н. Васильев, В. И. Рошин, М. Ю. Алябьева и др. // Лесн. журн.— 1993.— № 2—3.— С. 176—179.— (Изв. высш. учеб. заведений). [3]. Малютин Л. А. Изучение механизма экстракции БАВ из древесной зелени: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Л., 1978.— 20 с. [4]. Романков П. Г., Курочкина М. И. Экстрагирование из твердых материалов.— М.: Химия, 1983.— 257 с. [5]. Славянский А. К., Медников Ф. Т. Технология лесохимических производств.— М.: Лесн. пром-сть, 1970.— 392 с. [6]. Сластников И. И., Выродов В. А. Математическое описание процесса экстракции смолистых веществ из сосновой щепы // Гидролиз. и лесохим. пром-сть, 1979.— № 7.— С. 4—5. [7]. Ягодин В. И., Медников Ф. А., Смирнова Е. И. Лабораторные исследования по извлечению экстрактивных веществ // Использование биологически активных веществ дерева.— Рига: Зинатне, 1973.— С. 20—24.

Поступила 16 июня 1994 г.

УДК 630\*866

*С. Н. ВАСИЛЬЕВ, В. И. РОШИН, В. И. ЯГОДИН, М. Ю. ТРОСКИНА*

С.-Петербургская лесотехническая академия

*Е. Г. АКСЕНОВА, Р. Ш. АБИЕВ*

С.-Петербургский государственный технологический университет  
растительных полимеров

### ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ДРЕВЕСНОЙ ЗЕЛЕНИ

Изложены результаты исследования закономерностей изменения концентрации биологически активных веществ внутри и вне частицы древесной зелени, а также «мгновенных» кинетических коэффициентов в процессе экстракции ее растворителями различной природы.

The analysis results of bioactive substances concentration change regularities inside and outside a wood green particle as well as those of "instant" kinetic coefficients in the process of its extraction by solvents of different nature have been presented.

Экстрагирование биологически активных веществ (БАВ) из древесной зелени (ДЗ) с учетом сложной капиллярно-пористой структуры исходного сырья можно рассматривать как сумму нескольких стадий (пропитка ДЗ, растворение БАВ, диффузия БАВ через мембраны кле-

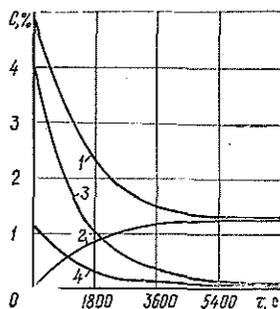
ток, капилляры и ламинарную пленку на поверхности ДЗ), последовательно накладывающихся друг на друга и зависящих от целого ряда факторов и условий [1, 3—6]. Однако основным процессом, от которого зависит скорость перехода БАВ и ДЗ в экстракт, достаточно турбулизированный и находящийся вне частицы, можно считать диффузию в массе сырья, заполненной раствором БАВ.

Кинетика процесса в этом случае будет определяться сопротивлением в клетках и капиллярах, которое зависит от степени доступности БАВ, т. е. от анатомического строения экстрагируемого материала, степени измельчения и свойств экстрагента (при прочих равных условиях). Это объясняется тем, что твердый остов сырья, препятствуя возникновению конвективных потоков, одновременно уменьшает подвижность жидкости в капиллярах и скорость переноса вещества. Кроме того, наличие твердой фазы делает экстрагируемые вещества кинетически неравноценными по месту нахождения в частице. В результате по мере извлечения их из более доступных капилляров и увеличения доли трудноэкстрагируемых компонентов резко возрастает внутреннее сопротивление процессу. При этом скорость экстракции веществ из твердых пористых материалов уменьшается значительно быстрее, чем падает разность средних концентраций экстрагируемого вещества внутри и вне частицы [3].

Полученные нами ранее [4] данные позволяют построить суммарные кинетические кривые для гидрофильного (изопропанол) и гидрофобного (гексан) экстрагентов при резонансно-пульсационном (РПС) и дефлегмационно-оросительном (ДОС) способах экстрагирования (рис. 1, 2). При этом концентрацию БАВ для РПС экстракции определяли в растворе, окружающем частицы древесной зелени. Она изменялась до некоторого равновесного значения. В случае ДОС концентрацию экстрактивных веществ находили в экстрагенте, проходящем сквозь слой измельченного сырья. Ее величина по мере извлечения БАВ уменьшалась и стремилась к нулю в конце процесса экстракции. Концентрацию в растворе определяли в процентах по весу сухого остатка, а в частице — как отношение массы веществ, не перешедших в экстракт, к объему экстрагента, заполняющего поры ДЗ.

В исследованиях использовали измельченную еловую ДЗ (влажность 50 %) с удельной площадью поверхности  $2100 \text{ м}^2/\text{кг}$  [8]. Рассчитанный из удельной площади поверхности характеристический размер частицы  $R = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ . Используемое при расчетах значение объема, поглощаемого исходной ДЗ растворителя, для гексана равнялось 150...160 % от абс. сухой ДЗ, для изопропанола — 300...310 %. При этом эта величина принимала несколько большие (в сравнении с ДОС) значения при РПС. Продолжительность пропитки сырья составляла 10...15 мин и несколько снижалась при использовании РПС.

Рис. 1. Зависимость концентрации БАВ  $C$  внутри (1, 2) и вне (3, 4) частицы ДЗ влажностью 50 % от продолжительности  $\tau$  экстрагирования гексаном для РПС при температуре 65 °С (1, 3) и ДОС (2, 4)



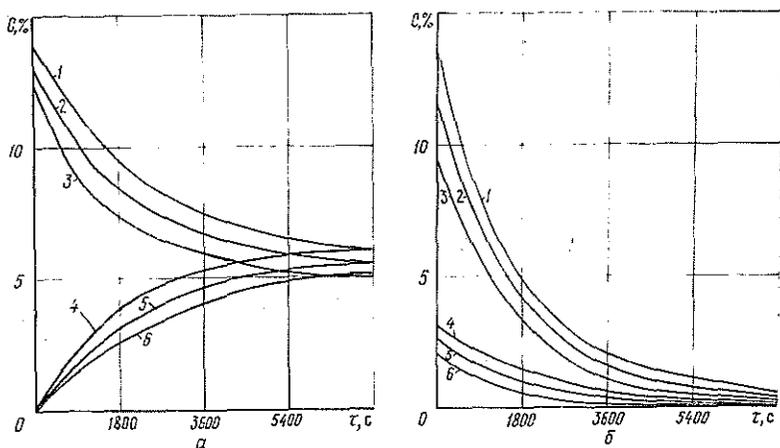


Рис. 2. Зависимость концентрации БАВ внутри (1, 3) и вне (4—6) частицы ДЗ влажностью 50 % от продолжительности экстрагирования при концентрации изопропанола 100 (3, 6), 80 (2, 5) и 60 % (1, 4) для РПС с  $t = 75 \dots 78^\circ \text{C}$  (а) и ДОС (б)

По имеющимся [2] совместным решениям уравнений материального баланса для массообмена и поля концентраций, описывающих распределение целевого компонента в объеме частицы и связывающих средние концентрации БАВ в экстракте и твердом теле, а также уравнению потоков вещества, подводимого к частице и отводимого от нее в окружающую среду, рассчитаны «мгновенные» кинетические коэффициенты процесса экстракции БАВ из ДЗ.

Для этого, считая обобщенное время стремящимся к бесконечности (при значениях критерия Фурье  $Fo_d > 0,1$ ), экспериментальные данные представляли в виде зависимости от времени [1]:

$$\lg \frac{C_p - C_{\bar{z}}}{C_0 - C_{\text{II}}} = \lg B_1 - 0,434\mu_1^2 \frac{D\tau}{R^2}, \quad (1)$$

где  $C_p$  — равновесная концентрация БАВ в растворителе, рассчитанная исходя из суммарного содержания экстрактивных веществ и жидкостного модуля;

$C_{\text{II}}$  — начальная концентрация БАВ в экстракте;

$C_0$  — начальная концентрация БАВ в ДЗ;

$C_{\bar{z}}$  — усредненная концентрация БАВ в экстракте в момент времени  $\tau$ ;

$B_1$  — коэффициент, зависящий от формы частиц;

$\mu_1$  — корень характеристического (зависящего от формы частиц) уравнения,  $\frac{J_\nu(\mu_1)}{J_{\nu+1}(\mu_1)} = \frac{\mu_1}{Bi}$ ;

$J_\nu, J_{\nu+1}$  — функции Бесселя;

$Bi$  — диффузионный критерий Био,  $Bi = \frac{KR}{D}$ ;

$K$  — эффективный коэффициент массоотдачи в жидкости;

$R$  — эффективный размер частицы;

$D$  — эффективный коэффициент диффузии, являющийся интегральной характеристикой внутридиффузионной стадии процесса;

$Fo_d$  — диффузионный критерий Фурье,  $Fo_d = \frac{D\tau}{R^2}$ .

В случае ДЭС экстракции значения кинетических коэффициентов определяли на основании упрощенной зависимости  $\lg \frac{C_{\bar{z}}}{C_0}$ , полученной при решении уравнения для процесса в слое [1].

Эффективный коэффициент диффузии рассчитывали, принимая форму измельченной ДЗ за неограниченную пластину [7], на основании соотношения

$$D = \frac{R^2 \operatorname{tg} \alpha}{\frac{2\beta}{B_1} - \beta(1 + \beta)}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — угол наклона линии, изображающей функцию  $\lg \frac{C_p - C_{\bar{z}}}{C_0 - C_{\bar{z}}}$ ;

$\beta$  — величина, определяющая соотношение масс твердой и жидкой фаз,  $\beta = \pm \frac{C_p - C_n}{C_0 - C_p}$  (отрицательное значение принимается для ДЭС).

Эффективный коэффициент массоотдачи для неограниченной пластины рассчитывали по формуле

$$K = \frac{Bi D}{R} = \frac{D}{R \left( \frac{1 + \beta}{\mu_1^2} - \frac{1}{3} \right)}. \quad (3)$$

Полученные значения «мгновенных» кинетических коэффициентов приведены на рис. 3, 4.

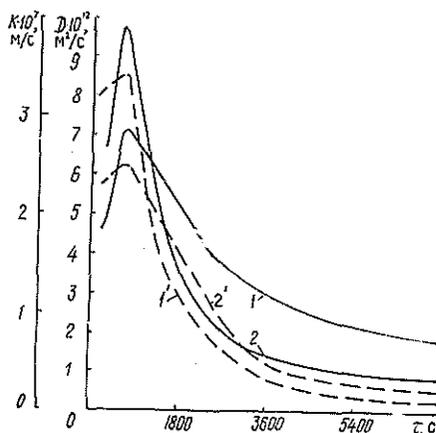


Рис. 3. Изменение «мгновенных» коэффициентов диффузии  $D$  (1, 1') и массоотдачи  $K$  (2, 2') при экстрагировании гексаном для ДЭС (1, 2') и РПС (1', 2)

Как следует из зависимостей, представленных на рис. 3, 4, в первые 10...15 мин процесса происходит возрастание кинетических коэффициентов, что по современным представлениям связано со стадией пропитки, при которой направление движения жидкости противоположно направлению диффузионного потока [1]. Одновременно происходит смыв БАВ из разрушенных клеток на поверхности ДЗ, величина которой при пропитке возрастает до некоторого максимального значения. В случае РПС эта величина должна быть большей вследствие подвижного состояния всех частиц сырья и, следовательно, отсутствия зон слеживаемости. Об этом, в частности, свидетельствует и большее значение коэффициента массоотдачи.

Обращает на себя внимание, что положение максимума на кривых  $D = f(\tau)$  и  $K = f(\tau)$  не зависит от типа применяемого экстрагента. Од-

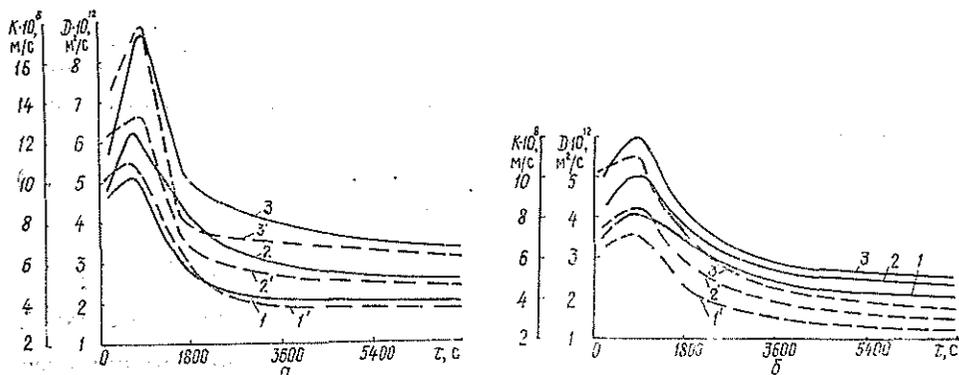


Рис. 4. Изменение «мгновенных» коэффициентов диффузии  $D$  (1—3) и массоотдачи  $K$  (1'—3') при экстрагировании изопропанолом с концентрацией 100 (3, 3'), 80 (2, 2') и 60 % (1, 1') для РПС (а) и ДОС (б)

нако при использовании РПС для извлечения БАВ величина коэффициентов в точке максимума несколько больше и убывает быстрее, принимая при регулярном режиме меньшее (в сравнении с ДОС) значение. Это согласуется с результатами, приведенными в [4], и связано с ускорением пропитки ДЗ экстрагентами, а также с быстреешим падением концентрации БАВ за счет подвижности жидкой фазы в крупных капиллярах частицы. Вследствие этого при достижении регулярного режима основная масса легкоизвлекаемых соединений оказывается уже выделенной из сырья, и суммарное значение динамических коэффициентов определяется их величинами для трудноэкстрагируемых соединений.

Значения эффективных коэффициентов диффузии во всех случаях увеличиваются с повышением температуры процесса и понижением концентрации изопропанола (гидрофильный экстрагент). Последнее можно объяснить большей набухаемостью сырья в разбавленном спирте, а также изменением диэлектрической постоянной экстрагента.

В случае применения гидрофобного растворителя (гексан) значения «мгновенных» динамических коэффициентов изменяются в ходе процесса на порядок. Для изопропанола эта величина в зависимости от способа экстрагирования и концентрации экстрагента составляет 3—5 раз, что определяется различием механизмов экстрагирования гидрофобным и гидрофильным растворителями [4]. Величина критерия  $Vi$  для всех исследованных процессов принимает значения от 5 до 10, при этом в ходе процесса выявлена тенденция к его снижению. Однако определенный в условиях эксперимента критерий  $Vi$  не может быть использован для оценки роли внешнелдфузионного переноса в процессе, протекающем в промышленном аппарате. Для реальных промышленных условий  $Vi$  находят по коэффициентам массоотдачи, отвечающим этим условиям [1].

### Выводы

1. В течение процесса экстрагирования численные значения «мгновенных» кинетических коэффициентов могут изменяться в 3—10 раз, достигая максимума через 900...1000 с после начала экстракции (что соответствует завершению процесса пропитки), а затем происходит снижение его до постоянного уровня (регулярный режим).

2. Численные значения коэффициентов и характер их изменения зависят от природы применяемого экстрагента и способа экстракции.

3. Наибольшие значения для обоих коэффициентов ( $D = 8,6 \times 10^{-12}$ ;  $K = 1,75 \cdot 10^{-7}$ ) достигнуты при использовании гидрофильного растворителя — изопропанола и РПС экстракции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Аксельруд Г. А., Лысянский В. М. Экстрагирование — система твердое тело — жидкость. — М.: Химия, 1974. — 255 с. [2]. Белоглазов И. Н. Твердофазные экстракторы (инженерные методы расчета). — Л.: Химия, 1985. — 239 с. [3]. Бердин А. К., Выродов В. А. Определение динамических коэффициентов процесса экстрагирования бензином смолистых веществ из просмоленной древесины // Гидролиз. и лесохим. пром-сть. — 1987. — № 3. — С. 21—23. [4]. Извлечение экстрактивных веществ древесной зелени при резонансных колебательных воздействиях / Е. Г. Аксенова, Р. Ш. Абиев, Г. М. Островский и др. // Лесн. журн. — 1993. — № 2—3. — С. 176—179. — (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Пономарев В. Д. Экстрагирование лекарственного сырья. — М.: Медицина, 1976. — 190 с. [6]. Романков П. Г., Курочкина М. И. Экстрагирование из твердых материалов. — М.: Химия, 1983. — 257 с. [7]. Седых В. В. Извлечение экстрактивных веществ из древесной зелени сосны: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Л., 1981. — 20 с. [8]. Ягодин В. И., Антонов В. И. Методика определения удельной поверхности древесной зелени // Методические основы изучения древесной зелени. — Рига: Зинатне, 1982. — С. 42—45.

Поступила 17 мая 1994 г.

УДК 630\*866

С. Н. ВАСИЛЬЕВ, М. В. БАРЧУКОВА, В. И. ЯГОДИН, М. Ю. ТРОСКИНА

С.-Петербургская лесотехническая академия

### ВЛИЯНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СЫРЬЯ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ ДРЕВЕСНОЙ ЗЕЛЕНИ

Установлено влияние степени измельчения растительного материала на характер извлечения биологически активных веществ.

The effect of plant material disintegration degree on the extracting character of bioactive substances.

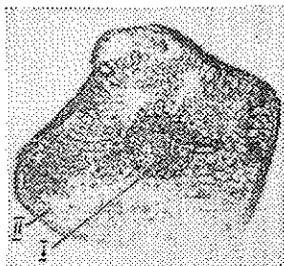
Эффективность процесса экстракции в значительной степени зависит от строения пористого тела, так как именно в нем сосредоточено основное сопротивление диффузии извлекаемого вещества. Внутренняя структура определяет скорость и глубину проникновения растворителя внутрь частиц, а также интенсивность диффузионных потоков.

При подготовке к экстрагированию исходному сырью по возможности придается структура, необходимая для быстреего извлечения из него экстрактивных веществ. Она определяется не только степенью, но и способом измельчения. Сырье приобретает три характеристики: размер частиц, поверхность частиц и количество разрушенных клеток.

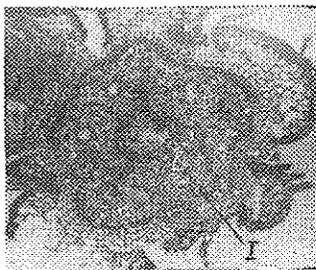
При большей измельченности сырья увеличивается его вымываемость, так как возрастает количество разрушенных клеток и в экстрагенте в течение первого периода экстракции появляется относительно большее количество вещества. Разность концентраций внутри и вне частицы соответственно уменьшается. Однако зависимость между увеличением степени измельчения и возрастанием выхода экстрактивных веществ не всегда однозначна. Для каждого вида сырья и условий протекания процесса существует определенный оптимальный размер частиц, при котором суммарное внутреннее и внешнее диффузионное сопро-

тивление является минимальным. Для дефлегмационно-оросительного способа экстракции установлен предел измельчения древесной зелени, переход за который ухудшает эффективность экстракции [8]. Для частиц размером менее 1 мм коэффициент измельчения уменьшается за счет слеживания.

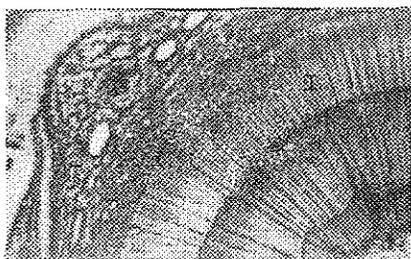
Состав древесной зелени, неоднороден, так как сырье (хвоя, разновозрастные ветки), из которого ее получают, содержит разное количество живых клеток. Соотношение в исходном сырье живых и мертвых клеток (трахеиды древесины) хорошо видно на рис. 1.



а



б



в

Рис. 1. Исходное сырье: а — хвоя ели; б — однолетний стембель; в — трехлетняя ветка (I — древесина, мертвые клетки; II — эпидерма)

Биологически активные вещества экстрагируются из живых клеток древесной зелени — паренхимных клеток ассимиляционной ткани хвои, первичной коры и сердцевинных клеток луба, эпидермы хвои и паренхимных клеток сердцевинных лучей древесины (рис. 1). Каждая из этих тканей специфична как по структуре, так и по обменным реакциям, протекающим в ней. Поскольку биологически активные вещества (углеводы, липиды, белки) — это продукты метаболизма, то очевидно, что химический состав веществ, относящийся к каждому из этих классов, разнообразен, лабилен и зависит от времени года, погодных условий и условий местопрорастания. Кроме того, в состав экстрагируемых веществ входят и продукты гидролиза структурных компонентов клеток, к которым относятся белки, фосфолипиды протопласта клеток, полисахариды, кутин, воск, суберин и лигнин клеточных оболочек [10].

При проведении исследования стояла задача изучить зависимость степени извлечения классов биологически активных веществ, которые могут быть определены с помощью стандартных методик микроскопического анализа, от характеристик измельченности сырья, а также влияния этого фактора при разных способах экстрагирования.

При постановке эксперимента использованы четыре средние фракции древесной зелени. Их характеристики и размеры основных компо-

Показатели	Значения показателей для фракций			
	1	2	3	4
Размер фракции, мм	2,00...1,00	1,00...0,50	0,50...0,25	> 0,25
Процент разрушенных клеток	30...35	40...45	60...65	75...80
Удельная площадь поверхности, м <sup>2</sup> /кг	1800	2000	2250	2400
Размеры основных компонентов:				
площадь, мм <sup>2</sup> :				
а) мезофилл	0,033	0,180	0,307	0,022
б) эпидерма	4,456	3,470	0,967	0,070
в) древесина	2,996	1,046	0,336	0,048
длина × ширина, мкм:				
а) мезофилл	168 × 197	421 × 427	508 × 610	193 × 116
б) эпидерма	335 × 13 300	1 072 × 3 236	390 × 2 484	145 × 540
в) древесина	1 382 × 2 168	882 × 1 187	105 × 3 195	68 × 716

нентов измельченной древесной зелени (мезофилл, эпидерма, древесина) представлены в таблице [2, 11].

Изучение фракций измельченной древесной зелени после механической обработки позволило не только установить размеры частиц, но и определить состояние материала перед экстракцией. После механического дробления в переработанной массе можно выделить четыре типа тканей, частично сохраняющих структуру клеток: эпидерма, снятая со всей или почти всей поверхности хвоя; эпидерма с участками ассимиляционной ткани, представленная менее длинными частицами; небольшие частицы древесины, включающие паренхимные клетки ассимиляционной ткани. Все остальные структуры древесной зелени при любой степени измельчения полностью утрачиваются, биологически активные вещества переходят в пространство между частицами, оставшимися после механической обработки.

Характер измельчения древесной зелени в четырех фракциях различен. Наибольшая однородность достигнута во фракции 4, в которой даже наиболее прочная ткань — эпидерма разрублена на небольшие частицы (рис. 2).

Во фракциях 1 и 3 получены частицы, сохранившие, по-видимому, малоразрушенные клетки, хотя они сдавлены, скручены и уплотнены. Частицы фракции 2 имеют малоповрежденные клетки (рис. 3).

В крупных частях фракции 1 (рис. 4) остаются отдельные клетки



Рис. 2. Фракция 4: 1 — эпидерма с устьицами, заполненными липидами после экстракции; 2 — пустые клетки ассимиляционной ткани; 3 — трахены древесины

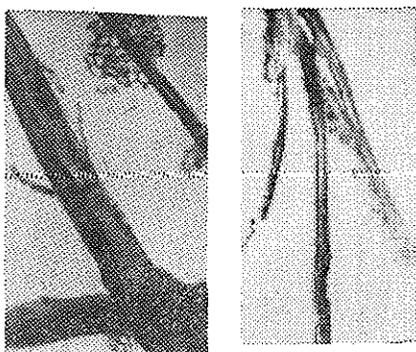


Рис. 3. Фракция 2: а — эпидерма; б — частица древесины

а

а

б

ассимиляционной ткани (около 25 %), в которых сохраняются хлоропласты бледно-зеленого цвета.

Поскольку одной из задач было исследовать влияние степени измельчения сырья на эффективность разных способов экстракции (дефлегмационно-оросительный и резонансно-пульсационный методы) при использовании гидрофильного (изопропанол) и гидрофобного (гексан) растворителей [4, 9], представляло интерес выявить места локализации метаболитов, находящихся в клетках древесной зелени как до соответствующей переработки, так и после нее [5, 7, 9].

Известно, что основными метаболитами хвойных растений являются липиды, содержание которых увеличивается в период покоя растений, частично накапливаясь в пластидной системе клеток и включаясь в их структуры. В конце вегетационного периода усиливается синтез глико- и фосфолипидов, нуклеиновых кислот, повышается содержание белка. В состав экстрактивных веществ входят также углеводы, содержание которых возрастает в течение вегетационного периода и резко снижается в период покоя. Углеводы в хвое и побегах представлены моно- и дисахаридами, неидентифицированными сахарами и небольшим количеством крахмала в виде характерных крупных зерен. Метаболизм углеводов в хвое чрезвычайно сложен, накопление крахмала кратковременно, хотя и происходит несколько раз в течение суток [1, 6].

Для анализа содержания нерастворимых и малорастворимых углеводов и жироподобных веществ в древесной зелени был выбран гистохимический метод, который позволяет с помощью реактивов, воздействующих на срезы или небольшие части растительного материала, провести реакции с веществами в местах их локализации. Результаты реакций выявляются при микроскопировании препаратов. В работе использованы стандартные методики [1].

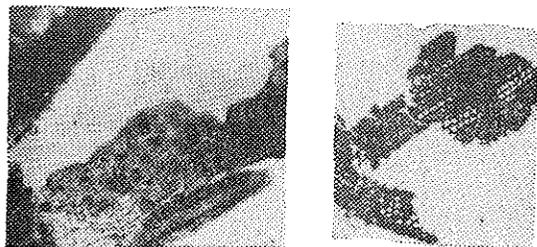


Рис. 4. Фракция 1: а — частица хвой — эпидерма клетки ассимиляционной ткани; б — трахеиды древесины многолетнего побега

а

б

Крахмал не был обнаружен ни в одной из фракций древесной зелени после механической обработки. Продукты его гидролиза (декстрины) выявлены в паренхимных клетках ассимиляционной ткани фракций 1—3. Степень гидролиза крахмала в разных частицах, судя по цвету продукта реакции, различна и возрастает по мере увеличения степени измельчения, что легко объясняется повышением скорости ферментативных реакций в клетках с большей нарушенностью структуры, изменением температурного, водного и газового режимов клеток.

После экстракционной переработки древесной зелени декстрины не обнаружены ни в одной из фракций при использовании как гидрофильного, так и гидрофобного растворителей.

Метод, выбранный для выявления липидов, позволяет определять «видимые свободные липиды», которые накапливаются в клетках в виде крупных капель жирных кислот или агрегатов нейтральных липидов (индикатор Нильский голубой) и суммарное содержание жироподобных соединений (Судан III и Судан черный).

Живые клетки растений содержат и «скрытые липиды», которые участвуют в построении их основных структур и находятся в тонкодисперсном состоянии, поэтому выявить их с помощью световой микроскопии не удается.

Исследование разных фракций древесной зелени после механической обработки показало, что жироподобные соединения сохраняются в клетках внутри малоразрушенных частиц, в оболочках клеток эпидермы хвой и в замыкающих клетках устьиц. Как известно, вторая структура содержит значительное количество кутина, а третья — воск [3].

После экстрагирования жироподобные вещества остаются в замыкающих клетках устьиц во всех фракциях. При экстрагировании гидрофобным растворителем эти соединения обнаруживаются и в отдельных клетках внутри неразрушенных частиц, что особенно характерно для фракции 1.

### Выводы

1. Гистохимический анализ древесной зелени показал, что во фракции 4 биологически активные вещества полностью выделяются в пространство между частицами, полученными механической обработкой сырья. В клетках ассимиляционной ткани и эпидермы хвой остальных фракций сохраняются частично декстрины и жироподобные вещества.

2. Наиболее устойчивы к разным способам обработки (включая экстракцию) замыкающие клетки устьиц, в которых жироподобные вещества, представленные главным образом восками, сохраняются во всех фракциях (число устьиц в эпидерме варьируется от 50 до 100 на  $1 \text{ мм}^2$ ).

3. Увеличение выхода экстрактивных веществ при использовании гидрофильного растворителя определяется возможностью проникновения его в неразрушенные клетки, находящиеся внутри частиц измельченной древесной зелени. В случае применения резонансно-пульсационного метода экстракции увеличение выхода экстрактивных веществ может быть объяснено также отсутствием участков слеживания, особенно при высокой степени измельчения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Барчукова М. В. Режим метаболитов сосны в связи с условиями произрастания // Проблемы физиологии и биохимии древесных растений.— Красноярск: СТИ, 1974.— С. 44. [2]. Дерума В. Я. Основные принципы отбора и подготовки образцов древесной зелени для изучения ее химического состава // Изучение химического состава древесной зелени (методические основы).— Рига: Зинатне, 1982.— 185 с. [3]. Дженсен У. Ботаническая гистохимия.— М.: Мир, 1965.— 295 с.

[4]. Извлечение экстрактивных веществ древесной зелени при резонансных колебательных воздействиях / Е. Г. Аксенова, Р. Ш. Абиев, Г. М. Островский и др. // Лесн. журн.— 1993.— № 2—3.— С. 176—179.— (Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Кащенко А. А., Томчук Р. И., Подыниглазов А. А. Влияние измельчения древесной зелени на выход и качество эфирных масел // Лесохимия и подсочка: Реф. информ.— 1972.— № 7.— С. 7. [6]. Новицкая Ю. Е. и др. Обмен веществ и ультраструктура хвой ели и сосны в зависимости от сезона года // Проблемы физиологии и биохимии древесных растений.— Красноярск: СТИ, 1974.— С. 48—50. [7]. Подыниглазов А. А. Исследование процесса измельчения пихтовой технической зелени при комплексной ее переработке: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Свердловск, 1975.— 24 с. [8]. Продникс А. П., Дрожжин Ю. Д. Получение лесохимических продуктов при комплексной переработке древесной зелени сосны и ели.— М., 1974.— 36 с. [9]. Селянина Л. И. Исследование и интенсификация извлечения смолистых веществ пневого осмола: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Архангельск, 1976.— 16 с. [10]. Эсау К. Анатомия растений.— М.: Мир, 1969.— 127 с. [11]. Ягодин В. И., Антонов В. И. Методика определения удельной поверхности измельченной древесной зелени // Изучение химического состава древесной зелени (методические основы).— Рига: Зинатне, 1982.— 185 с.

Поступила 27 апреля 1994 г.

## ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 674.093.26 : 658.012.011.54/56

О. В. ИВАНОВ, Ю. Н. СТРИЖЕВ, В. С. СОЛОВЬЕВ

С.-Петербургский государственный университет технологии и дизайна

**К ВОПРОСУ  
ОБ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ**

Рассмотрена методика оценки эффективности систем автоматизированного управления технологическими объектами с учетом их неупорядоченности и уровня автоматизации. На конкретном примере показана реализация этой методики, а также определение экономически целесообразных граничных значений показателя уровня автоматизации.

Evaluation methods of automated management systems of technological objects with reference to their unsystematic state and level of automation have been considered. These methods implementation is illustrated by a concrete example as well as the determination of economically reasonable boundary values of automation level index is given.

При автоматизации технологического объекта управления (ТОУ) проектировщик сталкивается с его различными состояниями, характеризующимися неупорядоченностью [1]. Последняя зависит от ряда случайных факторов, в том числе задержек в подаче сырья, полуфабрикатов, перерывов в энергоснабжении, выхода из строя элементов, узлов, блоков, средств механизации и т. д., т. е. неупорядоченность обладает свойством неопределенности. В теории информации мера неопределенности характеризуется энтропией Шеннона

$$H = - \sum_{i=1}^n B_i \ln B_i,$$

где  $B_i$  — неупорядоченность  $i$ -го станка, механизма, схемы управления ТОУ.

Очевидно, что чем сложнее ТОУ, тем более справедливо это выражение. При низкой организации производства неупорядоченность ТОУ в процессе эксплуатации возрастает.

Одним из возможных направлений ее снижения является автоматизация объекта. В этом случае выражение для оценки эффективности ТОУ, оснащенного системой автоматизированного управления, имеет следующий вид [1]:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\max} [1_i^a - f(B)],$$

где  $\mathcal{E}$  — эффективность частично автоматизированного технологического комплекса (АТК);

$\mathcal{E}_{\max}$  — эффективность полностью автоматизированного, «идеально» работающего технологического комплекса, включающего ТОУ и САУ при сохранении производственных мощностей, оборудования и технологии неизменными.

Таким образом, неупорядоченность АТК можно трактовать как меру отклонения его состояния от идеального, обеспечивающего предель-

но возможную эффективность. Последняя подразумевает рост производительности, повышение качества или объема выпускаемой продукции, экономию энергетических и сырьевых ресурсов и т. д. Поэтому для удобства в дальнейшем воспользуемся безразмерной величиной эффективности и назовем ее показателем эффективности АТК  $U$ , которую находим по формуле

$$U = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_{\max}} = 1 - f(B). \quad (1)$$

Рассматривая значение  $f(B)$  в приложении к экономическим показателям [1], получаем

$$U = 1 - B_0 e^{-\frac{K}{K_0}}, \quad (2)$$

где  $K$  — капитальные вложения в разрабатываемую систему автоматизированного управления (САУ);

$K_0$  — затраты на управление неавтоматизированного ТОУ с неупорядоченностью  $B_0$ .

Используя выражения (1) и (2), можно получить зависимость  $\mathcal{E}(K)$ , позволяющую оценить эффективность создаваемой САУ и АТК при различных капитальных вложениях.

Так как неупорядоченность ТОУ снижается за счет его автоматизации и при определенных условиях может быть сведена к минимуму, т. е. эффективность АТК достигает максимального значения, то показатель уровня автоматизации ТОУ  $Y_a$  с экономической точки зрения можно представить в следующем виде:

$$Y_a = \frac{\mathcal{E}_a}{\mathcal{E}_{a \max}} = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_0}{\mathcal{E}_{\max} - \mathcal{E}_0}, \quad (3)$$

где  $\mathcal{E}_0$  — эффективность неавтоматизированного ТОУ;  
 $\mathcal{E}_a, \mathcal{E}_{a \max}$  — эффективность системы САУ частично и полностью автоматизированного технологического комплекса.

Из выражений (1), (2) следует

$$U = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_{\max}} = 1 - B_0 e^{-\frac{K}{K_0}} \Rightarrow \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\max} \left( 1 - B_0 e^{-\frac{K}{K_0}} \right).$$

При  $K = 0$  получаем

$$\frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}_{\max}} = 1 - B_0 \Rightarrow \mathcal{E}_0 = \mathcal{E}_{\max} (1 - B_0),$$

откуда

$$B_0 = 1 - \frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}_{\max}}. \quad (4)$$

Тогда

$$\frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_0}{\mathcal{E}_{\max} - \mathcal{E}_0} = \frac{\mathcal{E}_{\max} B_0 \left( 1 - e^{-\frac{K}{K_0}} \right)}{\mathcal{E}_{\max} B_0} = 1 - e^{-\frac{K}{K_0}},$$

т. е. выражение (3) принимает вид

$$Y_a = 1 - e^{-\frac{K}{K_0}}, \quad (5)$$

откуда следует, что показатель уровня автоматизации ТОУ изменяется по экспоненциальному закону. Это вполне согласуется как с теорией, так и с логикой, что рассматриваемый технико-экономический показатель даже теоретически не может быть равен единице, но асимптотически стремится к ней.

Отсюда следует [2], что существует оптимальное значение показателя уровня автоматизации ТОУ  $Y_a^{\text{опт}}$ , которое определяет верхнее

экономически целесообразное граничное значение  $Y_a^B$  и должно соответствовать нормативному коэффициенту эффективности капитальных вложений на проектирование, изготовление и внедрение САУ  $E_n^a$ :

$$Y_a^B = Y_a^{\text{опт}} \sim E_p = \text{tg } \nu^{\text{опт}} = \frac{d(\vartheta^{\text{опт}} - \vartheta_0)}{dK} = \frac{\vartheta_{\text{max}} - \vartheta_0}{K_0} e^{-\frac{K_{\text{опт}}}{K_0}}. \quad (6)$$

Здесь  $\nu^{\text{опт}}$  — оптимальное значение угла наклона зависимости  $\vartheta(K)$  к оси абсцисс;

$K_{\text{опт}}$  — оптимальное значение капитальных вложений на проектирование, изготовление и внедрение САУ.

Принято, что

$$E_p \geq E_n^a, \quad (7)$$

где  $E_p$  — расчетный коэффициент эффективности.

Для практического использования предлагаемого метода оценки эффективности автоматизации ТОУ необходимо рассчитать условно-постоянные величины  $\vartheta_{\text{max}}$ ,  $B_0$ ,  $K_0$ . Чем меньше коэффициент использования режимного фонда времени работы технологического оборудования, входящего в ТОУ [3], тем больше численное значение неупорядоченности последнего и, соответственно, вероятность повышения эффективности ТОУ за счет автоматизации. Поэтому в качестве одного из вариантов расчета  $\vartheta_{\text{max}}$  можно принять выражение

$$\vartheta_{\text{max}} = \frac{\vartheta_0}{K_{\text{исп}}},$$

где  $K_{\text{исп}}$  — коэффициент использования режимного фонда времени работы всего технологического оборудования, входящего в ТОУ.

Величины  $K_0$  и  $B_0$  рассчитывают по формулам соответственно (2) и (4).

Рассмотрим использование данного подхода для оценки эффективности автоматизации технологической линии лущение — рубка — укладка шпона.

Технологический объект управления включает подающие конвейеры, центrovочно-загрузочное устройство, лущильный станок, конвейеры для шпона и ножницы с укладчиком шпона. Удельная эффективность его без автоматизации составляет  $\vartheta_0 = 6,4$  р./м<sup>3</sup>, а с учетом САУ  $\vartheta = 6,72$  р./м<sup>3</sup>. Под эффективностью понимают балансовую прибыль, получаемую в результате функционирования рассматриваемого объекта. Удельные капитальные вложения на проектирование, изготовление и внедрение САУ планируются в объеме  $K = 1,14$  р./м<sup>3</sup>. Коэффициент использования режимного фонда времени  $K_{\text{исп}}$  равен 0,92.

Для построения зависимостей  $\vartheta_a(K)$  и  $Y_a(K)$  предварительно рассчитывают условно-постоянные величины  $\vartheta_{\text{max}}$ ,  $B_0$  и  $K_0$ :

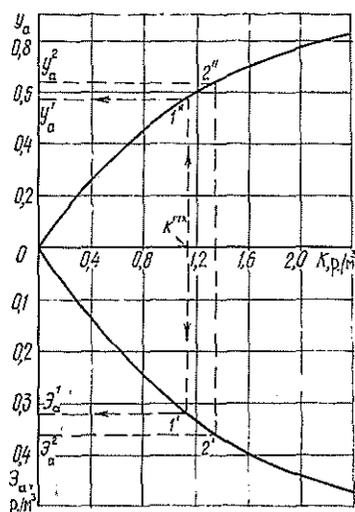
$$\vartheta_{\text{max}} = \frac{6,4}{0,92} = 6,96 \text{ р./м}^3$$

при  $\vartheta = \vartheta_0$ ,  $K = 0$ , следовательно,

$$B_0 = 1 - \frac{\vartheta_0}{\vartheta_{\text{max}}} = 0,08,$$

тогда

$$K_0 = - \frac{K}{\ln \frac{1-U}{B_0}} = - \frac{1,14}{\ln \frac{1-0,966}{0,08}} = 1,33 \text{ р./м}^3.$$



Затем, используя выражения (1), (2) и (4), получают искомые функции  $\mathcal{E}_a(K)$  и  $Y_a(K)$ , приведенные на рисунке. Значения  $\mathcal{E}_a^1 = 0,32$  р./м<sup>3</sup> и  $Y_a^1 = 0,576$  соответствуют исходным данным примера. Эффективность капитальных вложений подтверждается и значением расчетного коэффициента  $E_p = 0,179$ , который больше нормативного  $E_n^a = 0,15$ , т. е. выполняется необходимое условие (7). Величину  $E_p$  рассчитывают по формуле (6).

Максимальное, экономически целесообразное значение показателя уровня автоматизации ТОО для исходных данных  $\mathcal{E}_0, \mathcal{E}, K$  и  $K_{исп}$  при  $E_n^a = 0,15$  составляет  $Y_a^r = Y_a^s = 0,64$ . Этот вывод касается лишь производства сырого лущеного шпона. Минимальное значение уровня автоматизации  $Y_a^m = 0,36$ , что в силу симметрии кривой экономической эффективности, полностью описываемой логистической функцией [2], соответствует  $Y_a^b = 1 - Y_a^m = 0,64$ . Следовательно, экономически целесообразные значения показателя уровня автоматизации ТОО для рассматриваемого случая лежат в пределах

$$Y_a^b = 0,64 \geq Y_a \geq Y_a^m = 0,36.$$

Таким образом, используя полученные зависимости  $Y_a(K)$  и  $\mathcal{E}_a(K)$ , можно определить необходимые показатели для оценки эффективности автоматизации ТОО. Например, задаваясь уровнем автоматизации  $Y_a = 0,4$ , находим необходимые удельные капитальные вложения  $K = 0,68$  р./м<sup>3</sup> и эффективность, получаемую в результате автоматизации ТОО  $\mathcal{E}_a = 0,23$  р./м<sup>3</sup>.

#### Выводы

Предлагаемая методика позволяет ввести в оценку эффективности автоматизации ТОО фактор неупорядоченности и с его учетом определить экономически целесообразные границы уровня автоматизации при заданном значении коэффициента эффективности инвестиций и заданных постоянных внешних факторах. Функциональные зависимости, полученные в результате расчета, представляют разработчику возможность выбрать необходимый (компромиссный) вариант автоматизации ТОО.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Бройдо Н. Ф. Экономическая эффективность при проектировании промышленных систем автоматизации.— Л.: Стройиздат, 1969.— 126 с. [2]. Рахманов М. К. Некоторые теоретические аспекты эффективности автоматизированных систем управления // Статистика и электронно-вычислительная техника в экономике.— 1971.— № 4.— С. 146—171. [3]. Справочник экономиста деревообрабатывающей промышленности / Б. И. Павлов, С. И. Мугандин, Е. К. Алтухова и др.; Под общ. ред. Б. И. Павлова.— 3-е изд., перераб.— М.: Лесн. пром-сть, 1988.— 400 с.

Поступила 30 декабря 1994 г.

УДК 630\*652

*М. М. КУДРЯШОВ*

Архангельское управление лесами

### **ЦЕНА ЛЕСНЫХ РЕСУРСОВ В УСЛОВИЯХ ЭКОНОМИЧЕСКОГО КРИЗИСА**

Обсуждена методика установления научно обоснованной платы за лесные ресурсы в рыночных условиях. Рассмотрены два варианта нормативов экономической оценки лесов Архангельской области.

Methods of fixing scientifically-grounded payment for forest resources under market conditions have been discussed. The two variants of economic forest valuation norms of Arkhangelsk region are considered.

Лесохозяйственное производство требует значительных капитальных и текущих затрат на воспроизводство использованных ресурсов, охрану леса и т. д. Длительный процесс выращивания древесины, отсутствие видимого эффекта от затрат очень часто определяют политику капиталовложений. К сожалению, и в бывшей плановой экономике, и в теперешней рыночной финансирование затрат на лесное хозяйство России осуществляется по «остаточному принципу».

При подготовке проекта «Основ лесного законодательства Российской Федерации» специалисты Рослесхоза делали робкие попытки определить истинную плату за лесные ресурсы и внести изменения в систему финансирования лесного хозяйства. Однако, столкнувшись с догмами законодательства (в частности о налогах, в соответствии с которым платежи за лесные ресурсы также приравнивались к налогам и в обязательном порядке направлялись в местный бюджет), разработчики законопроекта о лесах отступились от начальной идеи.

Не помогла и твердая позиция ученых лесоводов Н. А. Моисеева, А. П. Петрова, Н. П. Чупрова и др., многих специалистов лесного хозяйства, убежденных в том, что и лесные ресурсы имеют рыночную стоимость.

В результате в «Основах лесного законодательства» появился раздел «Плата за пользование лесным фондом», в котором непосредственно платежам за лесные ресурсы (лесные подати, арендная плата) отводится крайне скромная роль, но зато дается новое понятие «отчисления на воспроизводство, охрану и защиту лесов». В статье 67 четко зафиксировано, что все лесопользователи производят отчисления на воспроизводство, охрану и защиту лесов в процентах от стоимости (цены) заготовленной древесины, как реализованной, переработанной, так и израсходованной на собственные нужды. В случае реализации древесины за иностранную валюту отчисления на воспроизводство, охрану и защиту лесов производятся в валюте.

Таким образом, структура платежей за 1 м<sup>3</sup> древесины имеет вид: попенная плата + рента + налог на добавленную стоимость + земельный налог + отчисления на воспроизводство, охрану и защиту лесов.

Что же мы получили на практике? Есть ли сегодня в России платежи на лесные ресурсы или существуют одни налоги, которые подменили собой суть стоимости лесных ресурсов? В соответствии с Законом о налогах к ним, кроме земельного, относятся попенная плата (лесные подати), рента, отчисления на воспроизводство.

Вот почему не только размер (сначала 20, а теперь 5 %) отчислений от реализации заготовленной древесины (по Указу Президента), но и внутреннее содержание (опять налог!) вызвали неприятие у лесопользователей и многих специалистов лесного хозяйства, да и в органах власти тоже. Создалась ситуация, когда про платежи за лесные ресурсы как бы временно забыли: дескать, это дело местных органов власти, пусть решают. Но как решать, не обладая методикой оценки лесных ресурсов? Разве что до ее разработки могут быть проиндексированы лесные таксы, но и этим всерьез и оперативно в стране никто не занимается.

<sup>1</sup> Цена 1 м<sup>3</sup> древесины на корню в 1992 г. составляла 58 р., с 14 мая 1993 г. увеличена в 1,7 раза. За весь 1994 г. средняя плата была равна 730 р.

Попытки руководства Архангельского управления лесами решить проблему индексации такс на областном уровне практически ни к чему, кроме моральных издержек, не привели.

Основная причина кроется в сущности двойного платежа за один и тот же вид и объем ресурса. Отчисления на воспроизводство, охрану и защиту лесов, установленные правительством в размере 5 % от реализации продукции без учета условий месторасположения пользователя и условий лесозаготовки, направляются в федеральный бюджет; лесные подати с сопутствующими налогами, утверждаемые местными органами власти, — в местный бюджет. Необходим переход от налогов за лесные ресурсы к единой обоснованной плате за пользование ими.

Неразбериха с платежами, продолжавшаяся в течение 1993 и 1994 гг., в конечном итоге привела к полному провалу отчислений в федеральный и значительному недобору платежей в местные бюджеты.

Предвидя эту ситуацию, Архангельское управление лесами в начале 1993 г. заключило договор с Архангельским институтом леса и лесохимии по теме «Нормативы для экономической оценки лесных ресурсов и лесных земель Архангельской области».

Элементами задания были:

условия лесопользования Архангельской области;  
уровень ведения лесного хозяйства в 1992 г. (год начала эксперимента по финансированию лесного хозяйства из средств лесного дохода);

отсутствие всяких ограничений, прямо или косвенно влияющих на объективность расчетов.

Практически такие же условия ставились и еще перед одной группой разработчиков. Задание отличалось лишь тем, что уровень ведения лесного хозяйства был предусмотрен по базе 1993 г. и цены на круглые лесоматериалы были использованы не из отчетных данных лесопользователей области, а биржевые, сложившиеся на момент расчетов.

Выполнение поставленной задачи было сопряжено не только с новизной самой проблемы, но и многими чисто техническими трудностями, одна из которых — сбор экономической информации о затратах на заготовку древесины, ценах реализации продукции и т. д. Органы статистики не обладали отдельной информацией, а предприятия, со ссыл-

кой на коммерческую тайну, очень неохотно ее предоставляли или порой давали в явно искаженном виде.

Тем не менее ученые преодолели эти затруднения и к концу 1993 г. представили не только методики, но и нормативы — таблицы для практической оценки лесосырьевых ресурсов. Так, разработанная под руководством Н. П. Чупрова методика и программа позволяет оценить:

древесину по главному пользованию в целях установления арендной платы, а также размера ущерба при переводе покрытых лесом площадей в иные угодья;

древесину в неспелых насаждениях;

древесину по промежуточному пользованию;

землю в целях установления арендной платы за нее и др.

Нормативы по оценке разработаны на рентной основе для условий рыночной экономики.

В расчетах использована система натуральных и стоимостных нормативов, позволяющих учесть и дифференцировать лесоводственно-таксационные особенности насаждений, лесорастительные и производственно-экономические условия. Оценка выполнена для всего диапазона условий в пределах Архангельской области.

Наличие программы расчетов на ЭВМ и записи на магнитных носителях таксационной характеристики выделов при необходимости позволяют выполнить оценку для каждого выдела, лесничества, лесхоза.

Для базисных условий показатели приведены в виде относительных коэффициентов к средней рыночной цене круглых лесоматериалов, что упрощает оценку в условиях постоянного изменения рыночных цен, исключает необходимость периодически вносить предложения органам власти об индексации цен древесины на корню. В то же время разработаны нормативы поправок к оценке, позволяющие учесть значительное изменение цены, себестоимости и их соотношения.

Данная методика обсуждена на семинарских занятиях специалистов лесного хозяйства с привлечением финансовых, налоговых служб, а также работников комитета промышленности администрации области и лесопользователей. Сделана сравнительная оценка платежей за древесину на корню в 12 леспромхозах области по выписанным на 1993 г. лесорубочным билетам.

Новая методика оценки лесных ресурсов направлена на повышение равномерности пользования, способствует более полному освоению непроизводительных древостоев и учитывает возможную рентабельность производства.

Постановлением главы администрации области методика введена в действие с апреля 1994 г. В нем предусмотрена возможность льгот, скидок с платежей, если при введении новых нормативов финансовое положение предприятия значительно ухудшится по не зависящим от него причинам. В соответствии с Основами лесного законодательства внесено предложение о частичном изменении традиционно применяемой формы платежей за лесные ресурсы. Наряду с денежными предусматриваются расчеты готовой продукцией и в виде услуг. Вся работа по совершенствованию форм расчетов и платежей проводится в рамках эксперимента по финансированию лесного хозяйства области.

Нормативы экономической оценки лесов крайне необходимы как один из главных элементов договора об аренде лесов. Кроме того, из-за отсутствия реальной цены на лесные ресурсы практически теряют силу меры воздействия за допущенные лесонарушения.

К сожалению, администрация области под давлением лесопользователей с августа 1994 г. приостановила оценку древесины по главному и промежуточному пользованию. Экономически такой шаг обоснован не был.

Наши настойчивые предложения базируются не только на желании изыскать средства для воспроизводства лесов и ведения лесного хозяйства области на современном уровне. Введение рыночных цен на лесные ресурсы позволит подвести новую экономическую основу и под развитие отраслевой науки, укрепление учебно-производственной базы учебных заведений. Поэтому вопрос о ценообразовании должен быть обязательно увязан с новым механизмом финансирования лесного хозяйства. Как известно, Правительство РФ в марте 1995 г. представило в Госдуму изменения к Основам лесного законодательства. В новом законопроекте существенно меняются источники финансирования лесного хозяйства. Специалисты очень надеются, что важнейшая проблема отрасли найдет положительное решение.

Поступила 20 марта 1994 г.

УДК 684.5 : 658.512.2

Т. В. АВРАМЕНКО

Белорусский государственный технологический университет

### НОМЕНКЛАТУРА ПРОДУКЦИИ МЕБЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ РЫНОЧНОЙ ЭКОНОМИКИ

Рассмотрены вопросы формирования номенклатуры продукции. Применены экономико-математические методы, оптимизирующие решение задачи. Модели проиллюстрированы на конкретных данных.

The problems of products nomenclature formation have been considered. Economics-and-mathematical methods optimizing the problem solution have been applied. The models are illustrated by specific data.

Максимизация прибыли — основная цель производителей, работающих в условиях рынка. При непостоянстве спроса и предложения, меняющихся ценах на получаемое сырье и продукцию экономическим службам предприятий приходится менять номенклатуру изделий для достижения наибольшей прибыли, т. е. решать многовариантные задачи. В нашей статье изложен вариант экономико-математического моделирования применительно к мебельному производству.

Располагая определенным набором основных материалов и полуфабрикатов, предприятие должно определить номенклатуру изделий, которая обеспечит ему максимальную прибыль. В решении этой задачи главную роль играют два фактора: нормы расхода полуфабрикатов и прибыль в расчете на изделие или единицу сырья. Изделие может быть высоко rentabelно, но иметь большие нормы расхода полуфабрикатов при заданных сырьевых ресурсах, что ограничивает его количество. Может быть и обратное положение. В мебельном производстве изделия достаточно сложны. Материальные затраты выражаются стоимостью ряда материалов и полуфабрикатов. Соответственно модифицируется целевая функция, известная в экономической литературе как критерий комплексного использования древесного сырья [1—3]:

$$\sum_j P_j x_j \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $P_j$  — прибыль от реализации  $j$ -го изделия в расчете на 1 р. стоимости ресурсов;

$x_j$  — число изделий вида  $j$ .

Имеются следующие ограничения по ресурсам:

$$\sum_j x_j b_{ij} \leq A_i; \quad (2)$$

$$x_j \geq 0, \quad (3)$$

где  $A_i$  — объем  $i$ -го ресурса;  
 $b_{ij}$  — норма расхода  $i$ -го ресурса на единицу  $j$ -й продукции.

Ограничение (2) означает, что расход полуфабрикатов не должен превышать их ресурсов.

Задача решается с помощью матрицы специфической структуры. Образец матрицы, построенной по данным мебельного производства ПО Гомельдрев, представлен в табл. 1. В ней отражены все виды применяемых полуфабрикатов. Нормы расхода ресурсов имеют комплексный характер и не могут быть выражены в натуральном измерении. Поэтому удельную прибыль как показатель целевой функции (1) следует рассчитывать на 1 р. расходуемых ресурсов, а не на 1 м<sup>3</sup>, как обычно рекомендуется в литературе [1—3].

Нормы расхода полуфабрикатов, находящиеся на одной строке матрицы, свидетельствуют, что по данному ресурсу конкурирует соответствующее количество изделий. Как видим из табл. 1, почти по всем

Таблица 1

Полуфабрикат	Объем ресурсов, м <sup>3</sup>	Продукция					
		Комплект «Ипуть М2Д3»		Гарнитур «Весна-201»	Стол обеденный Т-6000	Кровать	
		3-предметный	4-предметный			Б-4561	Б-4561-01

Норма расхода полуфабрикатов, м<sup>3</sup>/изделие

Пиломатериалы необрезные: хвойные толщиной, мм:							
32	100	—	—	0,00018	—	0,0271	0,00271
25	1 000	—	—	—	0,02437	—	—
твердолиственные толщиной, мм:							
32	900	—	—	—	0,0279	—	—
25	1 500	0,00137	0,00165	0,00326	0,00128	0,00004	0,00004
мягколиственные толщиной, мм:							
32	2 500	0,00687	0,00741	0,04566	—	—	—
25	800	0,00054	0,00687	0,00125	—	—	—
50	400	—	—	0,00752	—	—	—
Плита древесностружечная толщиной, мм:							
15	10 000	0,3737	0,5072	—	—	0,03742	0,040
32	300	—	—	0,0279	—	—	—
16	200	—	—	—	0,02973	—	—
3,2	1 800	0,0207	0,0271	—	—	0,0115	0,0129
Фанера клееная сорта:							
В/ВВ 4 мм	350	0,00134	0,00134	—	—	—	—
ВВ/С 8 мм	180	—	—	0,0035	—	—	—
Шпон:							
строганный дубовый	3 500	0,00544	0,0696	0,0637	0,0101	0,0008	0,0008
лученый	600	0,00381	0,00381	0,00415	—	—	—

Удельная прибыль, р./р.

— | — | 1,14 | 1,04 | 4,88 | 0,68 | 0,48 | 0,47

видам ресурсов имеется конкуренция изделий. Отдельно взятое значение удельной прибыли — еще не достаточный аргумент в пользу того или иного изделия. Другой важный фактор — норма расхода ресурса. Естественно, значение удельной прибыли непосредственно связано с уровнем себестоимости и цены изделия. А последняя определяется рыночным спросом и предложением.

Используя целевую функцию (1), на ЭВМ можно сформировать номенклатуру продукции, обеспечивающую максимальный объем прибыли. В табл. 2 представлены фактическая и оптимальная номенклатура изделий мебельного производства ПО Гомельдрев и Молодечненской мебельной фабрики.

Таблица 2

Вид продукции	Вариант номенклатуры		
	фактиче- ская	оптимальная	
		коммерче- ская	с ограниче- ниями

ПО Гомельдрев:  
Номенклатура продукции

Комплект «Ипуть М2ДЗ»:			
3-предметный	14 500	22 900	16 114
4-предметный	28 800	—	5 000
Гарнитур «Весна-201»	12 340	10 753	10 753
Стол обеденный Т-6000, шт.	5 432	6 727	6 727
Кровать Б-4561, шт.	12 846	1 963	1 990
Кровать Б-4561-01, шт.	12 810	34 224	34 195

## Прибыль, тыс. р.

—	76 210	100 180	97 645
---	--------	---------	--------

Молодечненская фабрика:  
Номенклатура продукции

Шкаф с антресолюю, шт.:			
Б-4757-09 3-дверный	2 600	—	2 100
Б-4757-10 2-дверный	2 430	—	2 000
Б-4757-03 2-дверный	5 425	—	2 400
Б-4757-04 1-дверный	2 805	—	1 300
Стол-тумба, шт.:			
Б-3559	22 306	—	18 000
Б-3559-01	600	—	600
Секретер, шт.	270	—	250
Набор мебели «Валюшка»	312	—	200
Тумба прикроватная Б-5704, шт.	11 302	110 920	29 284
Кровать 2210-19, шт.	310	—	350
Стол журнальный Б-5438-01, шт.	1 250	25 914	1 268
Тумба под обувь ГМ-1000, шт.	510	2 648	2 648

## Прибыль, тыс. р.

—	39 210	103 272	49 321
---	--------	---------	--------

Как видим, максимальной прибыли позволяет достигнуть коммерческий оптимальный вариант номенклатуры продукции. В мебельном производстве ПО Гомельдрев он содержит лишь одну свободную позицию, т. е. комплект «Ипуть» 4-предметный выпускать производству невыгодно и ресурсы распределены в пользу других изделий. Для Молодечненской фабрики свободных позиций уже девять, а наиболее конкурентоспособных изделий — три.

Сложившиеся на момент рассматриваемых оптимизационных расчетов цены делают невыгодным или менее выгодным выпуск ряда наименований мебели. Однако в интересах населения необходимо поддер-

живать имеющийся ассортимент мебели, а может быть, и расширять его. Учесть интересы сторон — производителей и общества — призван государственный заказ, содержащий необходимый минимум номенклатуры и ассортимента. Чтобы гарантировать включение в номенклатуру изделий, вошедших в госзаказ, хотя и не выгодных для производителей, в модель (1) — (3) вводится система ограничений [3].

$$B' \leq x_j \leq B^o, \quad j \in J, \quad (4)$$

где  $B'^{(0)}$  — минимально (максимально) необходимый выпуск  $j$ -й продукции;

$J$  — множество видов продукции, по которым устанавливается нижняя (верхняя) граница объема выпуска.

В приведенном в табл. 2 оптимальном варианте с ограничениями обеспечено наличие требуемых мебельных изделий. На эту продукцию накладывались так называемые ограничения сверху. Конъюнктура рынка динамична, поэтому подобные расчеты требуется производить достаточно оперативно, широко используя компьютерную технику. Соответственно предприятие должно внедрять гибкую технологию, позволяющую варьировать номенклатуру продукции применительно к меняющимся спросу и предложению.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Гейзлер П. С. Методические вопросы решения на ЭВМ задач комплексного использования древесного сырья // Лесн. журн.—1986.— № 1.— С. 99—104.— (Изв. высш. учеб. заведений). [2]. Петров А. П., Гейзлер П. С. Модель оптимизации комплексного использования сырья в лесоперерабатывающей промышленности // Экономические и математические методы.—1976.— № 6.— С. 1189—1195. [3]. Формирование номенклатуры продукции в условиях рыночной экономики / Б. Н. Желиба, П. С. Гейзлер, Т. В. Авраменко, Е. Е. Сергеев // Деревообаб. пром-сть.—1991.— № 3.— С. 15—17.

Поступила 7 февраля 1994 г.

УДК 630\*892 : 658.286

Ю. А. ШУТОВА, А. И. СТАРШИНОВ

Шутова Юлия Александровна родилась в 1971 г., окончила в 1993 г. С.-Петербургский государственный университет. Аспирант кафедры моделирования экономических систем С.-Петербургского государственного университета.



Старшинов Анатолий Иванович родился в 1932 г., окончил в 1956 г. Московское высшее техническое училище им. Баумана, в 1962 г. Ленинградский государственный университет, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры прикладной математики — процессов управления С.-Петербургского государственного университета. Имеет более 40 печатных трудов в области математической статистики и теории массового обслуживания.



## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ТРАНСПОРТИРОВКИ В УСЛОВИЯХ СТОХАСТИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Построена модель процесса транспортировки древесной зелени как многофазовая система массового обслуживания с неограниченной очередью. За критерий оптимальности принят минимум функционала затрат на транспортировку, найдено оптимальное число каналов обслуживания для каждой фазы процесса.

The model of transportation process of woody green as a multi-phase system of mass service with unlimited line has been developed. Minimum of functional costs of transportation is taken as optimum criterion. The optimal number of service channels for each phase of the process has been determined.

Проблема транспортировки скоропортящейся продукции в лесной промышленности может показаться неактуальной. Но она все же возникает, например в процессе переработки древесной зелени (ДЗ), качество которой снижается до нуля за несколько суток.

Одним из наиболее важных критериев, сдерживающих увеличение производительности, а следовательно, и рентабельности цехов по производству витаминной муки, являются сырьевые ресурсы. Другой ограничивающий фактор — конкуренция с производством традиционных кормовых добавок, например травяной муки. Сравнение основных показателей качества этих видов муки [6, табл. 4.1] свидетельствует, что по содержанию каротина и сырого протеина витаминная мука из ДЗ значительно уступает травяной, хотя цены на первую выше [6, табл. 4.2]. Поэтому необходимо изыскивать пути снижения себестоимости витаминной муки, поскольку резервы для повышения ее качества почти исчерпаны.

Процесс доставки ДЗ с места ее произрастания до перерабатывающих предприятий можно разбить на этапы. Приведем некоторые из них: отделение зелени от свежесрубленных деревьев;  
сбор со всего участка вырубki;  
доставка на место предварительного измельчения;  
собственно изготовление древесной муки.

В зависимости от количества транспортных средств, погрузочно-разгрузочных устройств и других агрегатов, участвующих в процессе транспортировки, возникают очереди, пребывание в которых приводит к росту потерь собранной ДЗ из-за ухудшения ее качества. С другой стороны, увеличение числа агрегатов может вызвать повышение себестоимости витаминной муки вследствие потерь, связанных с простоем транспортных средств и оборудования (именуемых далее каналами обслуживания). Таким образом, возникает задача оптимального выбора числа обслуживающих агрегатов.

Для оптимизации транспортной задачи можно было бы применить методы линейного программирования, что возможно лишь в случае регулярных потоков продукции (когда потоки предсказуемы, т. е. величина потока известна и постоянна во всем интересующем нас интервале; время появления потока в канале и числа требований, поступающих в канал, также известны и постоянны).

Но нельзя забывать, что на процесс транспортировки влияет много случайных факторов, именно поэтому мы имеем дело с нерегулярными потоками, подразумевая под этим, что время поступления продукции на обслуживание неопределенно и непредсказуемо, как и число требований, поступающих на обслуживание. Ввиду случайности и нерегулярности природы таких потоков, для решения поставленной задачи мы применили методы теории вероятностей (ТВ) и теории массового обслуживания (ТМО).

Воспользуемся терминологией ТМО. Транспортируемые количества продукции являются заявками, транспортные средства и другие агрегаты процесса — каналами обслуживания, заявки однородны.

Простейший поток однородных событий имеет широкое распространение. Многие реально наблюдаемые потоки статистически не отличимы от простейшего. Данный факт, обнаруженный вначале как эмпирический, подтвержден рядом математических моделей, в которых при довольно общих условиях доказывалось, что поток близок к простейшему [3].

Интервал времени между двумя соседними заявками простейшего потока имеет показательное распределение:

$$f(t) = a e^{-at}, \quad t > 0, \quad (1)$$

где  $a$  — параметр потока, равный числу заявок в единицу времени.

Пусть все каналы обслуживания одинаковы и время обслуживания любого канала показательное:

$$g(t) = b e^{-bt}, \quad t > 0, \quad (2)$$

где  $b$  — величина, обратная среднему времени обслуживания.

При распределении (2) предложенная задача допускает простое решение, которое с удовлетворительной для практики точностью описывает ход интересующего нас процесса.

Весь процесс транспортировки рассматривается как многофазовая система массового обслуживания (СМО). При этом выходящий поток каждой предыдущей фазы будет входящим для каждой последующей [4, с. 52]. Параметры фаз независимы, поэтому процесс оптимизации проводится для отдельных фаз, каждая из которых рассматривается как одно- или многоканальная СМО с неограниченной очередью. Фаза обслуживания здесь состоит из одной последовательной погрузки продукции, ее обработки или перевозки и следующей за ней выгрузки.

Критерием оптимальности синтеза СМО является функционал, подчитывающий прибыль.

Для решения задачи максимизации прибыли решаем задачу минимизации затрат на транспортировку с учетом ухудшения со временем качества продукции (от сбора до переработки), а также на эксплуатацию оборудования и его простой.

Для фазы  $j$  мы получили функционал затрат  $c_j$ :

$$c_j = c_{sj} t_j a_j T + [c_{wj} (n_j - k_j) + c_{rj} k_j] T, \quad (3)$$

$c_{sj}$ ,  $c_{wj}$ ,  $c_{rj}$  — потери, связанные соответственно с пребыванием заявки в системе (т. е. ухудшением качества продукции), с простоем канала обслуживания и его эксплуатацией;

$t_j$  — среднее время пребывания заявки в системе;

$a_j$  — среднее число заявок в единицу времени;

$T$  — рассматриваемый период времени;

$n_j$  — число каналов обслуживания на фазе  $j$ ;

$k_j$  — среднее число занятых обслуживанием каналов.

Входной поток заявок в СМО является интенсивностью сбора продукции (ДЗ), измеряемой числом единиц массы в единицу времени.

Далее функционал (3) преобразуем с помощью известных формул ТМО [1, 2]:

$$c_j = \left\{ c_{sj} \left[ \frac{x_j p_j^{n_j} n_j! (1 - x_j)}{\sum_{s=0}^{n_j} p_j^s / s! + \frac{p_j^{n_j}}{n_j! (1 - x_j)}} + p_j \right] + c_{wj} (n_j - k_j) + c_{rj} k_j \right\} T, \quad (4)$$

где  $x_j = p_j/n_j$ ;  $p_j = a_j/b_j$ .

Для решения данной задачи необходимо выполнить условие

$$p_j < n_j, \quad (5)$$

иначе будем иметь дело с неограниченно возрастающим числом заявок в очереди.

Итак, получен искомый функционал (4), минимизируя который, можно оптимизировать процесс транспортировки скоропортящейся продукции. Метод минимизации функционала (4) прост и состоит в последовательном переборе (при помощи разработанной авторами программы) значений числа каналов обслуживания при условии (5), а также использовании вполне очевидного ограничения наших реальных возможностей (например, при имеющихся в данный момент в распоряжении 10 единицах транспорта мы не можем назначить на работу 11 единиц).

Разработанная авторами программа позволяет находить также такие важные характеристики эффективности работы СМО, как среднее число заявок в очереди, среднее число занятых обслуживанием каналов в зависимости от изменения параметров процесса.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории вероятностей.— М.: Радио и связь, 1983.— 416 с. [2]. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания.— М.: Наука, 1979.— 431 с. [3]. Ивченко Г. И., Каштанов В. А., Коваленко И. Н. Теория массового обслуживания.— М.: Высш. шк., 1982.— 215 с. [4]. Скитович В. П. Элементы теории массового обслуживания.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1976.— 96 с. [5]. Ягодин В. И. Основы химии и технологии переработки древесной зелени.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1984.

Поступила 12 апреля 1994 г.

## МЕТОДИКА И ПРАКТИКА ПРЕПОДАВАНИЯ

УДК 69 (07.07)

*О. М. СОКОЛОВ, В. И. РАКОВСКИЙ*

Соколов Олег Михайлович родился в 1936 г., окончил в 1960 г. Ленинградский технологический институт ЦБП, доктор химических наук, профессор, академик РИА, ректор Архангельского государственного технического университета, заведующий кафедрой химии древесины университета. Имеет 167 печатных трудов в области исследования процессов сульфатной варки, изучения свойств и применения технических лигнинов.



Раковский Виктор Иванович родился в 1952 г., окончил в 1974 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительного производства Архангельского государственного технического университета. Имеет более 60 печатных трудов в области экономики и технологии строительства, а также фундаментастроения.

**НОВАЯ ПРОФЕССИЯ  
ДЛЯ РОССИЙСКОГО РЫНКА НЕДВИЖИМОСТИ**

Строительный факультет Архангельского государственного технического университета в 1994 г. начал подготовку студентов по специализации «Оценка недвижимости и инвестиционных проектов». В перечне вузовских специальностей такой специализации пока нет.

Профессия оценщика — одна из ключевых в рыночной экономике развитых стран. Объективная независимая экспертиза необходима при проведении многих операций: акционирование компаний, перераспределение долей в фирме, получение кредита под залог, заключение договора страхования или купли-продажи, инвестирование в производство и др.

Мировая практика подготовки специалистов по оценке недвижимости отличается разнообразием. Наибольшее распространение получила послевузовская специализация, основанная на базовом высшем архитектурно-строительном образовании. Квалифицированных оценщиков готовят в университетских центрах на факультетах соответствующего профиля. После окончания университета им необходимо отработать не менее двух лет в качестве помощника оценщика и сдать квалификационный экзамен для получения сертификата. Подобная система существует в США, Великобритании, Германии, странах Восточной Европы.

В России оценщиков готовят, главным образом, на семинарах, проводимых Российским обществом оценщиков (РОО). Такую подготовку уже прошли несколько преподавателей строительного факультета нашего университета.

Сейчас предпринимаются попытки организовать подготовку оценщиков в государственном техническом и архитектурно-строительном университетах г. С.-Петербурга и Московской финансовой академии. В числе первых в России приступает к обучению новой профессии и Архангельский государственный технический университет. На начальном этапе нам активно помогают специалисты Норвежского отделения ФИАБСИ (Международная федерация оценщиков и брокеров по продажам недвижимости). Это сотрудничество началось два года назад с проведения совместного семинара, а в 1994 г. наш университет стал академическим членом ФИАБСИ.

Что представляет собой профессия оценщика недвижимости? Прежде всего — это высококлассный специалист, сочетающий знания юриспруденции, экономики и архитектурно-строительного дела.

Процесс оценки недвижимости заключается в выработке экспертом объективного мнения о рыночной стоимости имущества. При этом важно, чтобы покупатель и продавец получили полную информацию для принятия решений и ни для одной из сторон эта сделка не была бы вынужденной. Часто цена, установленная в ходе сделки, отличается от оценочной. Причин для этого несколько: особые мотивы сторон, умение их представителей вести переговоры, условия конкретной сделки. Например, при страховании предприятия, его ликвидации или банкротстве приходится проводить специальную оценку. При этом очень важно установить объем прав собственника недвижимости. Поэтому специалист-оценщик должен обладать знаниями в области права.

В мировой практике оценки недвижимости давно выработаны стандартные процедуры, позволяющие с достаточной степенью достоверности делать предположения об истинной рыночной стоимости. Один из методов основан на изучении возможностей инвестора в приобретении недвижимости и исходит из того, что покупатель не заплатит за объект больше, чем обойдется бы ему покупка соответствующего участка под застройку и возведение аналогичного здания. Этот метод предполагает тщательное ознакомление оценщика с проектной документацией, сметами. Кроме того, он должен хорошо разбираться в конструктивных особенностях зданий, уметь проводить строительно-техническую экспертизу объектов и определять величину их износа. В условиях недостаточно развитого рынка недвижимости во многих случаях этот метод будет основным для принятия решения. Следовательно, наиболее целесообразно осуществлять подготовку оценщиков на базе архитектурно-строительного образования.

При оценке недвижимости, приносящей доход, и инвестиционных проектов оценщик прежде всего должен определить потоки доходов и расходов, а затем пересчитать чистый доход в текущую стоимость методом капитализации или дисконтирования. Решение этих задач требует хорошего знания экономики, основ финансового анализа и бухгалтерского учета.

Строительным факультетом АГТУ составлен учебный план специализации «Оценка недвижимости и инвестиционных проектов» в рамках специальности 2903 «Промышленное и гражданское строительство». Он предполагает изучение специальных дисциплин уже на первом курсе: введение в специальность; принципы и стандарты оценки недвижимости. Учебный план включает статистику, бухгалтерский учет, основы финансового менеджмента, рынок ценных бумаг, оценку инвестиционных проектов, строительно-техническую, санитарно-гигиеническую и эко-

логическую экспертизу объектов, экспертизу правового положения объектов недвижимости и др. Предусматривается чтение отдельных дисциплин норвежскими специалистами, а также стажировка студентов АГТУ в оценочных фирмах Норвегии.

В последующие годы факультет предполагает приступить к выпуску брокеров, управляющих недвижимостью и других специалистов. Одновременно университет планирует получить аккредитацию в качестве учебного центра РОО. В результате этого после сдачи специального экзамена выпускники получают сертификат РОО Госкомимущества Российской Федерации — основной документ, позволяющий осуществлять оценочную деятельность на территории России.

УДК 42=20 (07.07)

*Л. А. КОРЕЛЬСКАЯ*

Корельская Лилия Алексеевна родилась в 1944 г., окончила в 1966 г. Смоленский государственный педагогический институт; в 1980 г. 2-годичные Высшие педагогические курсы по подготовке высококвалифицированных преподавателей для вузов при ЛГУ; стажер Оксфордской Саммер Скул 1991 г., доцент кафедры иностранных языков Архангельского государственного технического университета. Имеет 5 печатных работ по лесотехнической тематике для обучения английскому языку для специальных целей.



## **ЯЗЫК КАК СРЕДСТВО МЕЖКУЛЬТУРНОГО ОБЩЕНИЯ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ**

В той непростой ситуации, в которой находится наша страна, со всеми ее проблемами и трудностями, все больше и больше людей начинают понимать, что гарантом осуществления социально-экономических реформ и демократических преобразований должно быть постоянное внимание к проблемам духовного, культурного обогащения общества, а значит, и отдельно взятого человека. Возникает необходимость выделения культурного компонента в содержании обучения вообще и иностранному языку в частности.

Содержание обучения иностранным языкам (ИЯ) продолжает оставаться сегодня одной из актуальных проблем методической науки. При этом выдвигается задача повышения гуманистического содержания обучения, стимулирования обучающихся к участию в межкультурной коммуникации, а затем и самостоятельного совершенствования в получаемой специальности.

Еще очень труден путь и способ «обработки сырьевого материала для получения ценного конечного продукта» (выражаясь языком метафор). В «сырьевом материале» можно узнать нашего неподготовленного абитуриента — будущего студента, а в «конечном ценном продукте» — будущего специалиста.

К счастью, начинается процесс раннего массового внедрения ИЯ, в ходе которого могут и должны быть заложены прочные основы, необходимые обучающимся для участия в непосредственном и опосредованном диалоге культур. Для этого необходимо постепенное ознакомление через изучаемый язык с историей и современной жизнью страны, язык которой изучается, ее традициями и культурой (естественно, параллельно с аналогичными аспектами родной страны).

Лингвострановедение здесь понимается как культуроведение, ориентированное на задачи и потребности изучения ИЯ. Но в отличие от культуроведческих дисциплин оно имеет филологическую природу, действует через язык и обязательно в процессе его изучения. Лингвострановедение не отражает всего комплекса знаний, навыков и умений, связанных с «иноязычной культурой», под которой понимают знания о всех областях жизни страны изучаемого языка, и развитие языковых, речевых и прочих способностей, развитие умения общаться в разных жизненных ситуациях, формирование мотивации к дальнейшему овладению языком, определенные знания, представления о системе конкретного языка, обогащение родного языка.

В содержании обучения важно выделить культурный компонент, который включает знание национальных реалий, важнейших исторических событий и личностей, крупных деятелей литературы и искусства, науки и техники и т. п. Будем надеяться, что с созданием новых стандартов сузится и постепенно исчезнет разрыв в преемственности и непрерывности содержания культурного компонента, состоящего из знаний, навыков и умений.

В плане межкультурного общения можно выделить целый ряд ролевых групп: на языке представителей одной культуры; на языке представителей разных культур; на третьем общем языке; через посредника-переводчика; в регистре разговорной речи; на языке для специальных целей (наука, техника и пр.).

В данной статье остановимся на последней группе.

Развитие научных знаний привлекло внимание разных специалистов к вопросам языка науки. Все большая дифференциация научных исследований явилась причиной дробления языков, используемых как средство общения, причем каждый из них совершенствовался по мере развития соответствующей научной дисциплины. В то же время взаимодействие наук привело к возникновению многочисленных новых понятий и терминов, часто находящихся на границе смежных областей.

Если сопоставить различные формы функционирования языка и использующие его многообразные сферы человеческой деятельности, то становится ясно, что почти все эти сферы общения могут быть предметом научно обоснованного обучения.

Для того чтобы успешно участвовать в той или иной работе, необходимо усвоить известную систему понятий, при помощи которых специалисты общаются между собой. Таким образом, в реальной языковой практике мы постоянно сталкиваемся с языком как объектом познания. Причем избирается (сознательно или бессознательно) именно та разновидность языка, которая в данный момент времени, в данном коллективе необходима для общения людей.

В отличие от индивидуальной творческой речи научное общение между специалистами, в процессе которого происходит обмен информацией, представляет собой сознательно упорядоченное использование языка. Ему можно противопоставить язык «в естественных ситуациях» общения, когда говорящий не стремится точно определить разновидность языка, которой он пользуется.

При передаче информации (что является основой научного общения) внимание направлено прежде всего на максимальную четкость и точность выражения мысли, что достигается только в процессе активного воздействия на язык в целях его оптимизации. Те или иные произведения речи (устной или письменной) являются определенными образцами, эталонами или оптимальными моделями данной разновидности языка, реализующими коммуникативную функцию, — метаязыка. Эта форма общения может быть эффективной только при условии, что и говорящий, и слушающий владеют этим метаязыком. Здесь важна

внутренняя сторона научных общений, сами мысли и понятия, которые составляют его содержание.

Проблема передачи информации значительно усложняется, когда специалисты, представляющие ту или иную область знания, пользуются в процессе общения разными национальными языками (языками разных стран, культур). При этом возникает необходимость адекватной транспозиции терминологических единиц из одной системы специальной лексики в другую.

Однако даже тогда, когда в качестве основного средства международного (межкультурного) общения используется один язык (например английский), положение остается чрезвычайно сложным. Возникает вопрос, какую же разновидность этого языка следует использовать в сфере данной коммуникации?

Растущие потребности международного научного общения, порождаемые все большей дифференциацией научных и специальных знаний, обусловили необходимое и вполне естественное признание понятия «язык для специальных целей» (LSP). Английский язык для специальных целей (ESP) имеет цель, которая сама является специальной, т. е. считается особой в каждом конкретном случае в зависимости от профессиональной ориентации. Это не означает создание особого языка, отличающегося от языка других специальностей. Основным языком лишь испытывает изменения при отборе языковых средств, используемых при моделировании языка для специальных целей.

Обратимся к примеру выбора средства общения между специалистами лесной отрасли двух культур. Для успешного проведения курса обучения за рубежом предварительно были направлены два переводчика, чтобы совместно с иностранными преподавателями согласовать материал уроков, разработать сценарий действий по обучению запланированной группы. Был отобран учебный материал, оговорены термины, т. е. выбрана разновидность языка для специальных целей.

При практической реализации курса идеальным является следование плану действий. Какие, однако, могут возникать отклонения?

Иностранный специалист не стремится использовать при объяснении правильную, ожидаемую модель речи. Например, вместо употребления термина или названия детали машины, он говорит: «Это предназначено для работы вот так...», сопровождая свою речь показом, жестом и пр.

Переводчик-филолог, для которого основным средством в процессе научного общения является слово, не получив нужной информационной единицы, затрудняется передать правильно смоделированную желаемую или ожидаемую информацию или спонтанно передает упрощенную, усеченную модель.

В группе находится «интерпретатор» полученной модели, преобразующий ее в специальный язык для данной ситуации.

Происходит групповое общение, смешение регистров языков, иностранного и родного, для выяснения истины, что бывает благоприятно лишь при нормальном психологическом и культурном уровне группы.

Таким образом, только нормативное употребление языка для специальных целей удовлетворяет наиболее ясному и понятному выражению мысли. Функция, лежащая в основе выбранного регистра языка, реализуется тогда, когда не нарушаются «условности» данного вида речевой деятельности.

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

УДК 630\*524.3 : 630\*231

Ф. В. АГЛИУЛЛИН

Марийский политехнический институт

**ПРОДУКТИВНОСТЬ СОСНОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ,  
СФОРМИРОВАВШИХСЯ В ПРОЦЕССЕ ПОСТЕПЕННЫХ РУБОК**

Проанализировано состояние лесовозобновления на концентрированных вырубках. Показано, что сосновые древостой, сформировавшиеся в результате постепенных рубок, на 12...43 % продуктивнее модальных.

Reforestation conditions at the concentrated felling areas have been analysed. It has been revealed that pine stands formed as a result of gradual cuttings are 12...43% more productive than modal ones.

История лесоведения и лесозаготовок в XX в. свидетельствует о существовании различных способов рубок: выборочных, постепенных, сплошных. С внедрением механизации на лесосечных работах возникли и так называемые концентрированные сплошные рубки на площадях более 50 га. Многочисленные исследования ученых показали, что в большинстве типов леса на этих рубках происходит смена коренных хвойных типов леса на производные — лиственные [3, 4, 7]. Так, в Центральном районе России мягколиственными породами возобновилось 55,7, в Волго-Вятском — 76,4, на Урале — 39,3 % рубок. В целом в европейской части Российской Федерации с момента применения концентрированных сплошных рубок площадь мягколиственных пород увеличилась более чем на 1,7 млн га [8].

В конце 50-х — начале 60-х гг. исследователи и производственники искивали возможности предотвращения нежелательной смены пород, разрабатывали различные технологии рубок, позволяющих сохранить подрост и молодняк хозяйственно ценных пород. Установлено, что при сплошных рубках наибольшая сохранность подроста (до 80 %) обеспечивается при разработке лесосек методом узких лент, предложенным Татарской ЛОС ВНИИЛМ и примененным впервые на предприятиях Удмуртии [9]. Выявлено, что основными факторами, влияющими на выживаемость хвойного подроста после освобождения из-под материнского полога, являются тип леса, полнота древостоя и его возраст, климатические и почвенные условия.

Одним из средств сохранения защитных свойств леса, своевременного использования спелой древесины и ускорения лесовосстановления при минимальных затратах являются постепенные и выборочные рубки, которые успешно выдерживали испытание временем. Отдельные участки еловых и сосновых древостоев, восстановившихся без смены пород, благодаря применению в 1900—1930 гг. постепенных рубок в Среднем Поволжье, сохранились и в настоящее время [1, 2, 5, 6 и др.].

На обследованных нами объектах постепенные рубки были проведены в три приема в сосняках 110-летнего возраста с полнотой 0,6...0,7. Тип леса сосняк липовый, С<sub>2</sub>. Первый прием выполнен в 1898—

1900 г. с выборкой около 30 % деревьев и рыхлением почвы сохой бороздами через 1 м; второй в 1906—1907 г. с рубкой половины оставшихся деревьев; третий, заключительный, в 1911 г. В рубку отбирали деревья I, V и частично IV классов роста по Крафту, оставляли для дорацивания здоровые и неповрежденные деревья II, III и частично IV классов. Обрубку сучьев и разделку хлыстов на сортименты производили на месте валки деревьев, трелевку и вывозку осуществляли гужевым транспортом. В настоящее время здесь сформировались высокополнотные сосновые древостои I класса бонитета без затрат на производство лесных культур.

Местоположение	Площадь, га	Возраст, лет	H ср, м	D ср, см	Число стволов на 1 га	Запас, м <sup>3</sup> /га
Сосняки, сформировавшиеся посредством постепенных рубок						
Ульяновская область, Кузоватовский лесхоз, Кузоватовское лесничество	7,2	80	27,0	30,4	486	437
	4,8	80	27,8	32,2	379	384
	5,0	80	27,3	31,1	390	365
	4,0	80	25,9	27,7	530	422
Мордовия, Березниковский лесхоз, Николаевское лесничество	34,0	85	27,8	29,4	544	434
	30,0	85	25,0	29,1	698	482
	21,0	85	24,3	29,2	586	463
Модальные древостои						
—	—	80	24,3	28,6	439	305

Большой теоретический и практический интерес представляют вопросы продуктивности спелых древостоев, сформировавшихся после постепенных рубок. В семи обследованных нами объектах таксационные показатели таких сосняков оказались несколько выше, а запас древостоя на 12...43 % больше, чем у модальных сосняков I класса бонитета (см. таблицу).

Таким образом, можно утверждать о формировании нового поколения сосны, продуктивность которого выше, чем у модальных древостоев.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Аглиуллин Ф. В., Леонтьев Н. С. Постепенные рубки в сосняках Среднего Поволжья // Лесн. хоз-во.—1969.—№ 5.—С. 81—83. [2]. Дитякин Ф. Т. Постепенные рубки в сосновых лесах Среднего Поволжья // Лесн. хоз-во.—1939.—№ 6.—С. 9—15. [3]. Малочка Т. И. Естественное возобновление леса в зоне смешанных лесов // Лесн. хоз-во.—1968.—№ 12.—С. 21—23. [4]. Мгебров Г. Г. Возобновление леса на концентрированных вырубках и сосновых борах Марийской АССР // Сб. тр. по лесн. хоз-ву / ТатЛЮС.—Казань, 1957.—Вып. 13.—С. 49—122. [5]. Морохин Д. И. Рубки главного пользования в сосновых насаждениях Среднего Поволжья // Лесн. хоз-во.—1940.—№ 4.—С. 11—17; № 5.—С. 15, 23. [6]. Мурзов А. И. Некоторые результаты первого приема постепенных рубок в листовенно-еловых и сосновых насаждениях // Сб. тр. по лесн. хоз-ву / ТатЛЮС.—Казань, 1967.—Вып. 18.—С. 29—54. [7]. Напалков Н. В. Возобновление еловых концентрированных вырубков в Удмуртской АССР: Сб. тр. по лесн. хоз-ву / ТатЛЮС.—Казань, 1958.—Вып. 14.—С. 51—94. [8]. Письменный Н. Р. О будущем хвойных лесов России // Лесн. хоз-во.—1979.—№ 1.—С. 54—58. [9]. Тимофеев Г. П. Сохранение подроста ели и пихты на площадях концентрированных вырубков // Лесн. хоз-во.—1961.—№ 12.—С. 39—42.

УДК 528.8.044.1 : 630\*522

А. И. ЖИРОВ, А. К. МОНАХОВ, М. А. ШУБИНА

Российский государственный педагогический университет им А. И. Герцена



Жиров Андрей Иванович родился в 1961 г., окончил в 1983 г. Ленинградский государственный педагогический институт им. А. И. Герцена, кандидат географических наук, н. о. доцента кафедры физической географии и геологии Российского государственного педагогического университета им. А. И. Герцена. Имеет 32 печатные работы в области геоэкологии, оценки ресурсно-экологического потенциала таежных территорий, геотопологии.

### О КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ ВЫСОТОЙ ДУБОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ И ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ РЛ-ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассмотрены вопросы методики дешифрирования радиолокационных снимков в целях определения таксационных характеристик древостоев. Предложена формула, отражающая положительную коррелятивную связь между средней высотой древостоя и оптической плотностью фототона. Даны рекомендации по наиболее рациональному использованию радиолокационных снимков при тематическом картографировании лесов.

Problems of radiolocation pictures identification for determining the estimate tree stands characteristics have been considered. The estimator reflecting positive correlation link between the average stand height and optical density photo-tone is presented. Recommendations on the most rational use of radiolocation displays on subject forest cartography are given.

Как показывают исследования, на аэроснимках, полученных радиолокационными станциями бокового обзора (РЛСБО), отображаются некоторые особенности строения лесных массивов [1, 2]. Влияние высоты древостоев на формирование РЛ-изображения лесных массивов исследовали на территории Воронежской области. Участок расположен на сложной лессовидными карбонатными суглинками полого-волнистой равнине с плоскими водоразделами, расчлененными оврагами и балками. Леса в основном дубовые на черноземах и серых лесных почвах тяжелого механического состава.

Дубняки снытьево-осоковые развиты на плоских вершинах и склонах водоразделов. Состав 5...9 Д, 1...4 Яс, 1 Кл, класс бонитета II—III, высота древостоя 18...28 м, диаметр 20...32 см, полнота 0,6...0,8, почвы серые лесные и черноземы деградированные.

Дубняки снытьевые занимают нижние части склонов водоразделов и днища балок с наиболее благоприятными условиями увлажнения. Состав 7...9 Д, 1...3 Яс, класс бонитета I, высота 24...36 м, диаметр 24...36 см, полнота 0,7...0,9, почвы темно-серые лесные.

Дубняки осоково-злаковые приурочены к более бедным и сухим условиям местообитания (склоны южных экспозиций, верховья балок). Состав 5...10 Д, 2—3 Яс, 2 Кл, класс бонитета III—IV, высота 16...22 м, диаметр 20...24 см, полнота 0,6...0,7, почвы серые и светло-серые лесные.

Для всех дубняков характерен развитый подлесок и подрост в количестве 0,5...1,5 тыс. шт./га. В подлеске лещина, клен татарский, бересклет, дуб, ясень.

В качестве плановой основы использовали аэроснимки масштаба, близкого к 1 : 100 000, полученные РЛСБО в сантиметровом диапазоне волн с горизонтальной поляризацией сигнала и разрешением на местности около 30 м.

Таксационные характеристики древостоя определяли на 22 пробных площадях с крутизной склона до 2...4°. В дальнейшем негативные РЛ-изображения соответствующих лесных выделов были обработаны на ЭВМ ЕС-1045. Фрагменты негативов с оптическими клиньями на прозрачной основе вводили в память машины с помощью оптического устройства «Фотомейши», обеспечивающего оцифровку плотности негатива в диапазоне 0—2D по 256 градациям. Размер пиксела 0,1 × 0,1 мм [2].

После фотометрической коррекции фрагментов по оптическим клиньям и коррекции геометрических искажений РЛ-снимков были получены статистические характеристики цифровых массивов, соответствующих лесным выделам с определенным тоном и текстурой изображения.

При сравнении средних высот древостоя  $H$  на пробных площадях и оптических плотностей РЛ-изображения  $D$  была установлена положительная коррелятивная связь, которая может быть выражена формулой  $H = H_0 + 47D$ , где  $H_0 = 8$  м.

Зависимость РЛ-изображения от высоты древостоя проявляется также при визуальном дешифрировании позитивных контактных отпечатков, на которых тон дубняков снытьевых — светло-серый, снытьево-осоковых — серый, осоково-злаковых — темновато-серый.

Вследствие искажений плотности РЛ-изображения под влиянием рельефа корреляция между  $H$  и  $D$  имеет место при крутизне склона не более 5°.

Полученные данные позволяют использовать РЛ-снимки в качестве дополнительного материала при тематическом картографировании лесов [3] в условиях равнинной местности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Котюх А. А., Монахов А. К. Радиолокационная интерпретация растительности района средней тайги // География и природные ресурсы.— 1989.— № 3.— С. 130—134. [2]. Монахов А. К., Шубина М. А. Зависимость радиолокационного изображения лесов от их строения // Лесн. хоз-во.— 1989.— № 46.— С. 41—42. [3]. Столяров Д. П., Желудов А. В., Минаев В. Н. Дистанционные методы в народном хозяйстве // Лесоустройство, таксация и аэрометоды.— Л., 1985.— С. 88—92.

УДК 630\*232.311

А. И. БАРАБИН, А. А. ЕЛИСЕЕВ



Барабин Александр Иванович родился в 1939 г., окончил в 1966 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой лесных культур и механизации лесохозяйственных работ Архангельского государственного технического университета. Имеет более 85 печатных работ в области лесосеменного мониторинга древесных пород на Европейском Севере России.



Елисеев Анатолий Аркадьевич родился в 1974 г., студент лесохозяйственного факультета Архангельского государственного технического университета. Научные интересы — селекция и семеноводство хвойных древесных пород.

### НОВЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ И ФАКТИЧЕСКИХ УРОЖАЕВ СЕМЯН ЛИСТВЕННОЙ

Дана оценка числа шишек лиственницы фотографированием кроны обезлиственных деревьев. Подсчитан урожай по секторам и полусекторам.

Estimation of the larch cones number by photographing the crowns of defoliated trees has been given. The harvest has been calculated on sectors and semi-sectors.

Четкое планирование семенного хозяйства невозможно без точной оценки плодоношения древесных пород. В настоящее же время, несмотря на существующие методы учета урожая (семеномеры и учетные площадки, сплошной сбор шишек и плодов, учетные ветви, модельные деревья, глазомерно-статистический и др.), производство не имеет надежных и простых способов определения фактической массы семян на единице площади. Чтобы подойти к частичному решению этой проблемы для лиственницы, у которой нет четко выраженных годовичных мутовок, нами предпринята попытка найти в кроне дерева небольшие по площади сектора, осмотр которых был бы достаточен для точного расчета обилия семеношения. Изучено распределение шишек, сохранивших-

ся в кронах 12 одиночно стоящих обезлиственных деревьев в зеленых посадках Архангельска. Высота деревьев 3,1...7,6 м, диаметр на высоте груди 6,5...20,4 см, диаметр нижней части кроны 2,7...6,7 м, высота штамба 0,3...1,3 м.

В марте-апреле 1994 г. кроны деревьев были сфотографированы. Работу проводили в солнечные дни с 12 до 16 ч, солнце находилось за спиной фотографа. Наибольший угол обзора кроны 60°. В первой половине дня крону фотографировали по прямой ЮВ — СЗ, во второй ЮЗ — СВ. Проявленную пленку вставляли в диапроектор и получали изображение на экране, расположенном в 2,5 м от прибора. Крону измеряли от вершины до нижних ветвей и делили на 10 равных частей (секторов), которые ограничивали горизонтальными нитками. Подсчитывали шишки на правой и левой половине кроны, в каждом из 10 секторов и 20 полусекторах. Всего учтено 15 352 шишки.

Распределение урожая по левой и правой частям кроны практически одинаково (51 и 49 %).

Кривая распределения по секторам нормальная и не зависит от диаметра и протяженности кроны. На очень молодых деревьях (диаметр до 8 см и протяженность кроны до 3 м) в верхнем (первом) и нижнем (десятом) секторах шишек не было. Процент урожая в каждом полусекторе от общего для сектора тоже примерно одинаков (53,9 и 46,1). Общий урожай в кроне дерева можно определить исходя из наличия шишек только на определенной площади нижней части кроны (см. таблицу).

Сектор кроны	Процент урожая		
	Полный сектор	Левый полусектор	Правый полусектор
8	13,0	6,9	6,1
9	5,8	3,3	2,5
10	1,5	0,8	0,7
8, 9	18,8	10,2	8,6
9, 10	7,3	4,1	3,2
8, 9, 10	20,3	11,0	9,3

Из таблицы следует, что процент урожая, приходящийся на 10-й сектор, равен 1,5 %; 9-й — 5,8 %; 8-й — 13,0 %. Расхождение расчетного урожая по 8- и 9-му левым полусекторам (принят за 10 %) с фактическим в кроне дает превышение всего 11,3 %. Такая точность пока вполне достаточна для практики. Урожай можно учитывать с использованием лестницы-стремянки, так как максимальная высота 8-го и 9-го секторов колеблется от 1,4 до 3,5 м.

Таким образом, установлены «индикаторные» сектора в кроне лиственницы, по которым можно определять общий урожай шишек. Это значительно облегчит работы по прогнозированию семенной продуктивности данной породы.

УДК 630\*362.7-843

А. Н. ТОРИЦЫН, В. Н. ЯКОВЛЕВ

С.-Петербургская лесотехническая академия  
Архангельский государственный технический университет

### ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПИЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

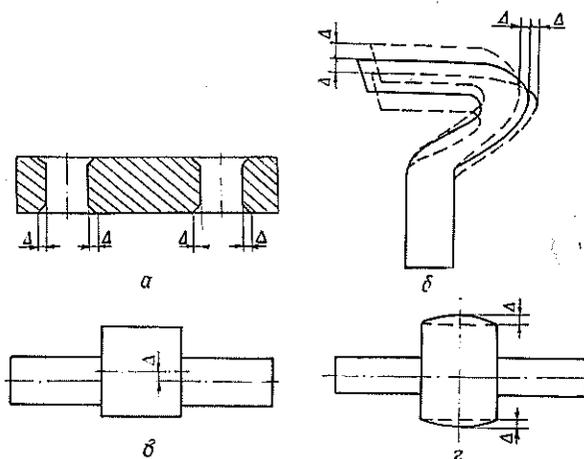
Рассмотрены дефекты, встречающиеся при изготовлении пильных цепей, и их влияние на процесс пиления.

The faults found in making chain saws and their influence on cutting process have been considered.

Пильные цепи являются наиболее массовым режущим инструментом, применяемым на лесозаготовительных предприятиях. Одним из основных резервов улучшения эксплуатационных свойств и продления срока службы пильных цепей является повышение их качества, в частности на стадии изготовления.

Детали пильной цепи получают штамповкой: звенья — из ленты хромоникелемолибденовой стали 7ХНМ, оси — из проволоки высококачественной хромистой стали 15ХА.

К дефектам изготавливаемых деталей относятся: высадка кромок отверстий звеньев цепи (рис. а), неравномерный отгиб режущей кромки Г-образного зубца (рис. б), несоблюдение соосности шеек и буртика оси (рис. в) и бочкообразность буртика оси (рис. г). Рассмотрим эти дефекты.



Дефекты деталей пильной цепи, получаемые в процессе изготовления на стадии штамповки

Высадка кромок отверстия в нижних частях звена объясняется тем, что пуассон, пробивая отверстие в заготовке, на границе выхода из нее вырывает по окружности металл. Вследствие уширения кромок отверстий звеньев цепи соединительных, направляющих и Г-образных зубцов уменьшается площадь контакта звеньев с осями, передающими тяговое усилие в цепи, увеличиваются удельные нагрузки, что ведет к интенсивному износу осей в месте контакта и появлению зазоров в шарнирном соединении.

Неравномерность отгиба кромки Г-образного зубца является причиной разновысотности зубцов. Такие зубцы в процессе пиления снимают различную по толщине и ширине стружку, что вызывает их разное нагружение. Так, при отклонении режущей кромки зубца по высоте на 0,2 мм относительно среднего ее положения толщина снимаемой стружки и нагрузка на соседние зубцы различаются на 25 %. Отклонение вертикального участка режущей кромки приводит к увеличению боковой составляющей силы сопротивления резанию, которая стремится развернуть зубец, а вместе с ним и блок цепи, в поперечной плоскости к пропилу. В результате возрастает ширина пропила, снижается устойчивость цепи и наблюдается интенсивный износ шарнира блока цепи.

При несоблюдении соосности шеек и буртика оси в собранной цепи могут иметь место участки с отклонениями по высоте горизонтальных режущих кромок и по шагу цепи. Первый недостаток вызывает неодинаковую загруженность зубцов, второй — неравномерное зацепление звездочек с цепью, дополнительные ударные нагрузки на шарнирные соединения и, как следствие, преждевременный износ этого участка цепи в процессе эксплуатации.

Бочкообразность буртика оси также является причиной износа шарнирного соединения. В начальный период работы цепи тяговое усилие передается через небольшие контактные площадки буртика оси с отверстием направляющего звена. Под действием больших удельных нагрузок происходит смятие сопряженных поверхностей оси и отверстия со стороны приложения нагрузки и их интенсивный износ. При этом увеличивается площадь контакта оси и звена. С другой стороны, противоположной приложению нагрузки, в шарнирном соединении появляется зазор, вызывающий увеличение внутреннего шага цепи, т. е. расстояния между осями направляющего звена. Цепь удлиняется. Зазор в шарнире в сочетании с другими дефектами изготовления позволяет поворачиваться блоку цепи относительно продольной оси пропила, при этом снижается устойчивость цепи.

Рассмотренные дефекты являются причиной преждевременного износа шарнирного соединения, ведут к потере продольной и поперечной устойчивости пильной цепи в пропиле, уширению кромки пропила и дополнительным затратам энергии при пилении.

УДК 621.935

*Т. С. ИСУПОВА*

Архангельский государственный технический университет

## **К ВОПРОСУ О РАЗНОТОЛЩИННОСТИ ПОЛОТЕН ЛЕНТОЧНЫХ ПИЛ**

Предпринята попытка исследовать характер изменения толщины полотна пилы с использованием дифференциального прибора для определения оптических искажений листового стекла.

An attempt of investigation into varying character of the saw blade strength has been made by using a differentiating device for detecting optical deflections of sheet glass.

При постоянном росте цен на древесину вопросы рационального использования сырья приобретают все большее значение. Увеличение ширины пропила на 1 мм приводит к снижению выхода пиломатериалов и технологической щепы соответственно на 1,3 и 1,5 %, а также к увеличению объема опилок на 2,8 % [2]. В этой связи применением более тонких ленточных пил относится к прогрессивным направлениям в лесопилении и деревообработке. Основными факторами, сдерживающими использование ленточнопильного оборудования, являются недостаточно высокая точность распиловки по толщине и обрывы инструмента.

На долговечность инструмента большое влияние оказывают переменные напряжения, возникающие в полотне пилы при работе станка. Точность распиловки по толщине во многом определяется напряженным состоянием рабочего участка инструмента в данный момент времени. Формирование напряженного состояния полотна пилы зависит от многих факторов, среди которых и толщина пилы.

Для ленточных пил шириной 85...175 мм, согласно ГОСТ 2283—79, установлен допуск по толщине, равный —0,09 мм. При проведении поискового эксперимента нами исследовано 10 образцов, взятых из стандартных рулонов пильного полотна, поставленного на деревообрабатывающие предприятия г. Архангельска ТОО «Сталь» (бывший Горьковский опытно-промышленный металлургический завод). Образцы представляли собой прямоугольные отрезки полотна длиной 1 м, толщиной 1,0 и 1,2 мм.

Цель эксперимента — определить характер изменения толщины полотна пилы в пределах допуска. Исследования проведены с помощью дифференциального прибора для определения оптических искажений листового стекла, описание которого приведено в работе [1]. Поскольку прибор не позволяет проверить полотно по всей ширине одновременно, то на каждом образце исследовали четыре «дорожки», расстояние между которыми составляло 20 мм. Схема расположения «дорожек» представлена на рис. 1.

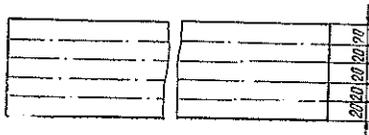


Рис. 1. Схема исследования образца

Результаты этих опытов показали, что изменение толщины полотна (в пределах допуска) имеет переменный характер. Кроме того, на полотне, не подвергнутом насечке зубчатой кромки, заточке, сварке и т. д., имеются царапины, глубина которых соизмерима с величиной допуска. Ориентация этих механических повреждений носит случайный характер. Пример осциллограммы представлен на рис. 2.



Рис. 2. Осциллограмма определения характера изменения толщины полотна пилы

Конечно, полученных данных недостаточно, чтобы делать обобщающее заключение, но если учесть, что образцы брали из различных рулонов, поставленных в различное время, то некоторые выводы сделать можно.

1. Оборудование для прокатки стальной ленты требует технической проверки.

2. Операции подготовки полотна ленточной пилы (сварка, вальцевание, формирование режущей части зуба и т. д.) должны выполняться с максимальной тщательностью, т. к. изменение толщины ленты оказывает неблагоприятное влияние на ее напряженно-деформированное состояние.

3. Поскольку изменение толщины полотна ленточной пилы в определенной степени является возбудителем колебаний системы механизма резания станка, необходима периодическая проверка состояния механизма натяжения.

Для получения более надежной информации и исключения влияния случайных факторов на результаты измерений эксперименты необходимо продолжить.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Дифференциальный прибор для определения оптических искажений листового стекла / М. Н. Медведев, Б. Д. Егоров, М. А. Зейзин, В. Н. Лобанов // Стекло и керамика.— 1980.— № 7.— С. 7. [2]. Прокофьев Г. Ф. Интенсификация пиления древесины рамными и ленточными пилами.— М.: Лесн. пром-сть, 1990.— 232 с.

УДК 539.37/38:691.11

Л. Г. ШАПОВАЛОВА, Ю. А. ВАРФОЛОМЕЕВ,  
Б. В. ЛАБУДИН, А. В. ВЕШНЯКОВ

ЦНИИМОД

Архангельский государственный технический университет

### ДЕФОРМАЦИИ ВЫСОКИХ ДЕРЕВЯННЫХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ВЛАЖНОСТИ

Экспериментально определены коэффициенты разбухания (усушки) старой древесины, эксплуатирующейся в памятниках деревянного зодчества 85...350 лет, получены зависимости этих коэффициентов от длительности эксплуатации древесины. Установлено, что наибольшая величина деформаций наблюдается при одностороннем намокании сруба.

There have been experimentally determined the swelling (shrinking) factors of the old wood being used for 85.. 350 years in the monuments of wooden architecture as well as the dependences of these factors on the duration of wood exploitation. It has been stated that the largest strain value is found in wooden framework's getting wet from one side.

Эксплуатация высоких деревянных башнеобразных сооружений в переменных температурно-влажностных условиях способствует возникновению обратимых сезонных и кратковременных деформаций, приводящих к отклонению оси таких строений от вертикали. Эти деформации вызваны неравномерной усушкой или разбуханием древесины. При одновременном использовании в объекте старой и новой древесины величина влажностных деформаций может увеличиваться.

Цель настоящего исследования — определить деформации высоких рубленых сооружений при совместной работе старой и новой древесины, эксплуатирующихся в переменных температурно-влажностных условиях.

Решение поставленной задачи проведено в два этапа. На первом определяли физико-механические свойства длительно работающей древесины, в частности показатели разбухания (усушки). На втором этапе рассчитывали деформацию сруба конкретного сооружения с учетом экспериментальных значений этих показателей.

Для определения коэффициентов разбухания старой древесины были проведены исследования образцов, отобранных из памятников деревянного зодчества северных районов Архангельской области (срок эксплуатации объектов 85...350 лет). Испытано 9 партий по 10...18 образцов в каждой из них в соответствии с ГОСТ 16483.35—80\* и ГОСТ 16483.36—80\*. Образцы имели форму прямоугольной призмы сечением  $20 \times 20$  мм и длиной вдоль волокон 30 мм. Линейные размеры и объем образца определяли в абсолютно сухом состоянии и при влажности, равной или выше предела насыщения клеточных стенок древесины. Образцы вымачивали три недели в дистиллированной воде.

Для сопоставления результатов эксперимента между собой и со стандартными данными полученные коэффициенты разбухания приведены к стандартной плотности 505 кг/м<sup>3</sup>, что соответствует плотности сосны Кольского полуострова и наиболее близко к среднему значению плотности исследуемой древесины 506 кг/м<sup>3</sup>.

Полученные результаты показывают, что при разбухании наблюдается медленное, но устойчивое повышение коэффициентов объемного разбухания  $K_V$  и разбухания в радиальном направлении  $K_r$ . Коэффициент разбухания в тангенциальном направлении  $K_t$  аппроксимируется прямой, параллельной оси абсцисс. Экспериментальные зависимости для  $K_r$  и  $K_t$ ,  $K_V$ , % , имеют вид

$$\begin{aligned} K_r &= 0,134248 + 0,000113T; \\ K_t &= 0,309561; \\ K_V &= 0,490014 + 0,000076T, \end{aligned} \quad (1)$$

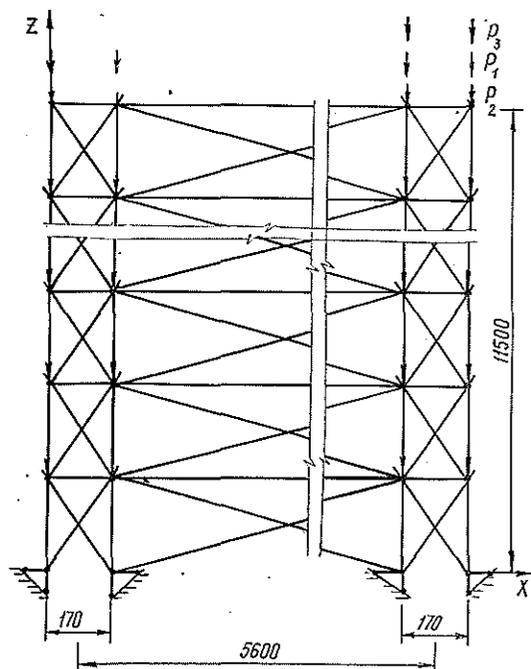
где  $T$  — продолжительность эксплуатации, лет.

Усредненные значения коэффициентов  $K_r$ ,  $K_t$  и  $K_V$  соответственно составляют 0,155; 0,310 и 0,504 % на 1 % изменения влажности, что больше стандартных значений (0,150; 0,270 и 0,440 %) на 3,6; 14,5 и 14,6 %.

Коэффициенты вариации показателей разбухания рассматриваемых выборок для каждого из направлений значительно меньше допускаемых стандартами и при указанной длительности эксплуатации остаются практически постоянными. Среднее значение коэффициента вариации для разбухания в радиальном  $v_r$  и тангенциальном  $v_t$  направлениях, а также для объемного разбухания  $v_V$  составляет соответственно 9,3; 5,5 и 5,4 % при допускаемых 28; 28 и 16 %. Это свидетельствует о малой изменчивости показателей разбухания в рассматриваемый период эксплуатации.

Деформация высоких башнеобразных сооружений рассмотрена на примере колокольни из с. Кушерека Онежского района (Архангельский музей деревянного зодчества). Колокольня представляет собой сруб, перекрытый шатровой кровлей. Высота колокольни до основания креста 24,5 м, высота сруба до основания площадки звона 11,5 м, размеры сруба в плане  $5,6 \times 5,6$  м. Сруб насчитывает 46 венцов, диаметр бревна в среднем 0,3 м.

За расчетную схему (см. рисунок) принято вертикальное сечение сруба шириной 1 м, приведенное в виде плоской стержневой двухветвевой фермы. Бревна во врубке имеют некоторую свободу угловых и вер-



Расчетная схема сруба

тикальных линейных перемещений, поэтому стержни в расчетной схеме соединены шарнирно. Влияние противоположных стен сруба учитывается введением горизонтальных и косых ригелей в каждом ярусе фермы. Каждое бревно сруба приведено к прямоугольнику размером  $0,17 \times 0,25$  м ( $0,17$  м — ширина площадки опирания бревна;  $0,25$  м — высота бревна). Расчетная длина стержней соответственно составляет  $0,17$  и  $0,25$  м. Для сохранения геометрической неизменяемости конструкции в каждой ветви введены раскосы.

В данном исследовании принято, что на сруб действует только постоянная нагрузка от конструкций. Нагрузка от вышележащих конструкций (кровля, ярус звона) приложена в виде сосредоточенных сил  $P_1 = 0,73$  т в верхних узлах фермы. Собственный вес сруба представлен сосредоточенными силами  $P_2 = 0,018$  т в верхних узлах каждого бревна, нагрузка от снега  $P_3 = 0,25$  т приложена в верхних узлах фермы.

В приведенном расчете учтено, что для разных стержней схемы их упругие характеристики различны и зависят от влажности. Расчетные упругие характеристики древесины при стандартной влажности приняты по справочнику\* (табл. 4.7/4), а при влажности  $W$ , отличной от стандартной, пересчитаны по известной формуле

$$E_W = E_{12} (1 - \alpha (W - 12)), \quad (2)$$

где  $\alpha$  — поправочный коэффициент ( $\alpha_r = 0,033$ ,  $\alpha_z = 0,039$ ).

При эксплуатации деревянных конструкций изменение влажности наружного воздуха приводит к усушке и разбуханию древесины. Степень разбухания (усушки) древесины в каждом из направлений ха-

\* Боровиков А. М., Уголев Б. Н. Справочник по древесине.— М.; Лесн. пром-сть, 1989.— 293 с.

рактируется коэффициентом разбухания (усушки)  $K$ , который показывает изменение линейных размеров (в процентах) при изменении влажности на 1 %:

$$K = \frac{\alpha_W}{\Delta W} = \frac{\Delta l}{l \Delta W}. \quad (3)$$

При этом коэффициенты разбухания для свежей и старой древесины различны. Таким образом, каждому стержню расчетной схемы в зависимости от его направления в каждом из вариантов расчета придается свои значения  $\Delta W$ ,  $E$  и  $K$ .

Напряженно-деформированное состояние конструкции рассчитано на ЭВМ. Плоская задача теории упругости решена методом конечных элементов. За неизвестные перемещения узлов приняты два взаимно перпендикулярных смещения  $x$  и  $z$ , параллельных соответственно осям  $X$  и  $Z$ . Нагрузку в виде сосредоточенных сил прикладывали в узлах.

Результаты расчета деформированного состояния сруба при различных условиях эксплуатации приведены в таблице.

Под воздействием только постоянных нагрузок  $P_1$  и  $P_2$  (схема 1) происходит осадка сруба на 1,6 мм.

При действии на сруб дополнительной снеговой нагрузки  $P_3$  максимальной интенсивности с одной стороны сруба (схема 2) соответствующая ветвь осядет под снеговой нагрузкой на 0,52 мм.

Далее в таблице рассмотрены различные варианты изменения влажностных условий эксплуатации. Предположим, что сруб выполнен полностью из новой древесины и произошло его двухстороннее увлажнение, т. е. влажность древесины внутри сруба составляет 12 %, а снаружи — 30 % (схема 3). В расчет введены значения показателей разбухания новой древесины. В этом случае произойдет равномерное разбухание сруба на 113 мм, при этом наружные верхние точки сруба переместятся вверх на 119 мм.

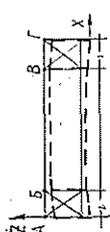
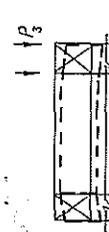
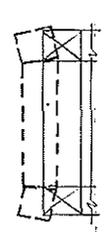
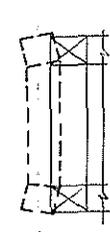
При двухстороннем увлажнении сруба, выполненного полностью из старой древесины (схема 4), произойдет равномерное разбухание соответственно на 121 и 128 мм (несколько больше, чем в схеме 3).

Определим деформации сруба для случая, когда одна ветвь выполнена полностью из новой древесины, а другая — из старой. Увлажнение сруба принято двухсторонним (схема 5). В этом случае вертикальные перемещения ветвей будут аналогичны схемам 3, 4: левая ветвь получит перемещение вверх на 113 мм, правая — на 121 мм. Однако здесь произойдет сдвиг верхнего яруса фермы по горизонтали примерно на 10 мм в сторону ветви из новой древесины, т. е. в сторону меньших показателей разбухания.

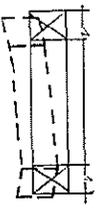
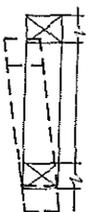
Рассмотрим деформации сруба при его одностороннем увлажнении. Предположим, что сруб выполнен полностью из новой древесины (схема 6). В этом случае произойдет разбухание ветви, испытывающей увлажнение, на 113 мм вверх, а крайней наружной точки этой ветви — на 123 мм. Так как другая ветвь и ригели не увлажняются, происходит сдвиг верхнего венца сруба по горизонтали на 126 мм и образуется общий существенный изгиб сруба.

Предположим, что сруб из старой древесины имеет одностороннее увлажнение (схема 7). Картина деформаций здесь будет аналогична предыдущей, но перемещения верхнего венца будут иметь еще большую величину — по горизонтали на 134 мм и по вертикали на 121 и 133 мм соответственно.

Таким образом, показатели разбухания старой и новой древесины существенно различаются. Изменение линейных размеров и объема длительно эксплуатируемой древесины при увлажнении или высыхании

Но- мер схе- мы мм	Параметры, вводимые в программу	Распреде- ление влажности по срубу, %	Схема деформации верхнего венца сруба	Пересечения точек, мм											
				А		Б		В		Г					
				x	z	x	z	x	z	x	z				
1	$E, P_1, P_2$	12/12/12		-0,01	-1,63	0,00	-1,61	0,00	-1,61	0,01	-1,61	0,01	-1,63		
2	$E, P_1, P_2, P_3$	12/12/12		-0,01	-1,63	0,00	-1,61	0,00	-1,61	0,01	-1,61	0,01	-2,15		
3	$E, P_1, P_2, K^{пов}$	30/12/30		-2,23	119,34	0,81	112,90	-0,81	112,90	2,23	119,34	2,23	119,34		
4	$E, P_1, P_2, K^{ст}$	30/12/30		-2,51	128,08	0,91	120,89	-0,81	120,89	2,51	128,08	2,51	128,08		

Продолжение таблицы

Но- мер схе- мы	Параметры, вводимые в программу	Распреде- ление влажностн по срубам, %	Схема деформации верхнего венца сруба	Перемещения точек, мм														
				А		Б		В		Г								
				x	z	x	z	x	z	x	z							
5	$E, P_1, P_2,$ $K_{\text{нов}} / K_{\text{ст}}$	30/12/30		-11,52	118,94	-8,47	112,77	-10,20	121,02	-6,77	128,48	-134,31	-2,28	-134,31	-0,42	-135,23	-131,80	132,79
6	$E, P_1, P_2, K_{\text{нов}}$	12/12/30		-125,17	-2,00	-125,17	-0,42	-125,99	113,49	-122,94	123,65	-134,31	-2,28	-134,31	-0,42	-135,23	-131,80	132,79
7	$E, P_1, P_2, K_{\text{ст}}$	12/12/30		-134,31	-2,28	-134,31	-0,42	-135,23	121,61	-131,80	132,79	-134,31	-2,28	-134,31	-0,42	-135,23	-131,80	132,79

происходит в основном за счет увеличения разбухания (усушки) в тангенциальном направлении.

При изменении температурно-влажностных условий эксплуатации выявлены существенные деформации высоких срубных сооружений. Величина этих деформаций в случае использования старой или новой древесины различна. При одновременном использовании старой и новой древесины происходит неравномерная деформация сруба, что ведет к существенному отклонению оси сооружения от вертикали. Наибольшая величина деформаций наблюдается при одностороннем увлажнении.

Деформации деревянных конструкций приводят к периодическому возникновению значительных по величине дополнительных внутренних напряжений, опасному перенапряжению отдельных элементов (бревен), что может привести к образованию радиальных трещин по их длине, обмятию врубок, ослаблению соединений, выкалыванию древесины во врубках и выпусках. Эти трещины способствуют накоплению осадков, что, в свою очередь, ведет к образованию новых трещин и, в конечном итоге, существенно снижает срок эксплуатации сооружения.

В рассмотренном объекте несколько лет назад были выполнены мероприятия конструктивного характера, которые позволили снизить риск возникновения неблагоприятных воздействий, а выполненные нами расчеты подтвердили необходимость и целесообразность усиления конструкций.

УДК 536.244.45

*Э. Н. САБУРОВ, Т. Г. ЗАГОСКИНА*



Сабуров Эдуард Николаевич родился в 1939 г., окончил в 1961 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники, проректор по научной работе Архангельского государственного технического университета, член-корреспондент Российской и Международной инженерных академий. Имеет 263 печатных труда в области аэродинамики и конвективного теплообмена в сильно закрученных потоках, их использования для интенсификации процессов теплообмена в аппаратах различного технологического назначения.



Загоскина Татьяна Григорьевна родилась в 1946 г., окончила в 1970 г. Архангельский лесотехнический институт, учебный мастер кафедры теплотехники Архангельского государственного технического университета. Имеет 16 печатных работ и изобретений.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТОКА В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ОБЛАСТИ ЦИКЛОННЫХ КАМЕР**

Приведены результаты численного решения задачи о движении газа в периферийной зоне рабочего объема циклонных камер; результаты решения сопоставлены с опытными данными.

Results of numeric solving a problem of gas flow in the peripheral zone of the operating space of cyclone chambers have been presented. Those results are compared with the empirical data.

Циклонные камеры находят успешное применение в качестве сушильных устройств в целлюлозно-бумажной, гидролизной и деревообрабатывающей промышленности [6]. Это определяется высокой интенсивностью протекания процессов теплообмена в их рабочем объеме и возможностью организовать процесс сушки одновременно с сепарацией высушенного продукта.

Целью настоящего исследования явилось изучение гидродинамики потока у боковой поверхности циклонной камеры, которая в конечном счете определяет условия конвективного теплообмена и эффективность работы сушильного устройства.

Исследование выполнено на двух циклонных камерах с внутренним диаметром рабочего объема  $D_k = 201$  мм. Поверхность рабочего объема камер технически гладкостенная.

Корпус первой камеры имел закручиватель длиной 135 мм и цилиндрическую часть, состоящую из плотно соединяющихся друг с другом колец шириной 80 мм, благодаря которым безразмерную (относительную) длину рабочего объема  $\bar{L}_k = L_k/D_k$  изменяли от 0,75 до 2,94. Ввод газа в рабочий объем осуществляли с двух диаметрально противоположных сторон тангенциальными шлицами. Установкой специальных вкладышей варьировали их относительную высоту  $\bar{h}_{вх} = h_{вх}/D_k$  от  $2,49 \cdot 10^{-2}$  до  $9,95 \cdot 10^{-2}$  и суммарную площадь входа  $\bar{f}_{вх} = 4 f_{вх}/\pi D$  от  $1,42 \cdot 10^{-2}$  до  $8,52 \cdot 10^{-2}$ . Поверхность вкладышей тщательно подгоняли так, чтобы она совпала с профилем внутренней поверхности рабочего объема. Условия входа изменяли таким образом, чтобы сохранялось неизменным расстояние от ближайшего торца камеры до оси шлица или входящей в камеру струи.

Вторую камеру использовали главным образом для проведения опытов по изучению распределения поверхностного трения. Она имеет закручиватель длиной 85 мм. Проходное сечение шлицев  $40 \times 40$  мм<sup>2</sup>. Параметры  $\bar{f}_{вх}$  и  $\bar{h}_{вх}$  также варьировали вкладышами соответственно в диапазонах  $(2,02 \dots 10,14) \cdot 10^{-2}$  и  $(3,98 \dots 19,90) \cdot 10^{-2}$ .

Ввод газа в рабочий объем камер осуществляли с двух диаметрально противоположных сторон в одной поперечной плоскости, вывод — через соосное с рабочим объемом выходное отверстие, относительный диаметр которого  $\bar{d}_{вых} = d_{вых}/D_k$  изменяли перестановкой диафрагм от 0,3 до 0,6.

Скорости и давления в рабочем объеме моделей определяли цилиндрическими зондами с диаметром насадка 2,6 мм. Для исследования скорости потока в пограничном слое использовали специальные трехканальные микротрубки. Прямоугольное приемное отверстие центрального канала трубки имело наружные и внутренние размеры соответственно по высоте и ширине 0,39 и 1,30; 0,20 и 1,23 мм. Боковые каналы скошены под углом 60°. Форма державки микротрубок обеспечивала совпадение осей вращения насадка и центрального отверстия, профиль хоботка трубок, выполненный по специальному шаблону — плотное прилегание приемной части (носика) к поверхности рабочего объема. Крепление зонда имело электрическую изоляцию от общей массы установки. Отсчет радиального расстояния центра отверстия трубки от стенки производили с момента размыкания контакта (носик трубки — поверхность рабочего объема) электрической цепи, который фиксировался прибором ТЛ-4, включенным на максимальную чувствительность.

В качестве вторичного прибора для исследования скоростей потока в пограничном слое применяли микроанометр компенсационный с микрометрическим винтом типа МКВ-250. Исследование распределения температур производили микротермопарой, в качестве вторичного прибора при этом использовали потенциометр Р-363-1.

Перемещение зондов осуществляли координатниками, точность определения угла вектора полной скорости по отношению к горизонтали составляла  $0,5^\circ$ , точность перемещения в радиальном направлении —  $0,025$  мм.

Относительная погрешность измерения расхода воздуха дроссельными приборами  $\pm 1,94$  %. Дроссельные приборы предварительно тарировали методом определения расхода по полю скоростей, снятому трубкой полного напора. Расхождение в величинах расходов, определенных двумя способами, не превышало  $0,5 \dots 1,5$  %. Относительные погрешности в определении скоростей и давлений потока в основном диапазоне их значений и средних температур с учетом относительных ошибок в определении тарировочных коэффициентов цилиндрических зондов соответственно не более  $\pm 4,6$  и  $\pm 6,0$  %.

Измерение поверхностного трения на боковой поверхности камер осуществляли по методу Престона [3]. В работе использовали трубки Пито с наружным диаметром  $0,812$  мм и отношением внутреннего диаметра к наружному, близким  $0,6$ . Трубки Пито изготовляли из медицинских инъекционных игл и тщательно отбирали с помощью микроскопа МБС-2 при 8-кратном увеличении. При изготовлении трубок уделяли особое внимание постоянству толщины стенки и наличию заусениц у приемного отверстия, соблюдению отношения внутреннего диаметра к наружному, перпендикулярности плоскости сечения отверстия к оси трубки. С помощью шаблонов трубкам придавали форму, обеспечивающую плотное их прилегание к поверхности камеры. Длина носика трубки Пито  $20$  мм. На расстоянии  $15$  мм от ее приемного отверстия сверлили дренажное отверстие диаметром  $0,5$  мм для отбора статического давления. Число трубок на поверхности рабочего объема камеры принимали из соображений надежности получаемых распределений напряжения поверхностного трения. В качестве прибора, регистрирующего разность полного давления, которое фиксируется поверхностной трубкой Пито, и статического давления, использовали микроанометр типа МКВ-250.

Результаты экспериментального исследования позволяют выявить общие закономерности циклонного потока в периферийной области рабочего объема циклонных камер.

Периферийная зона течения ограничена с одной стороны осесимметричным ядром потока, с другой — боковой поверхностью камеры. Следуя [6], схему течения газов в этой зоне можно представить в виде своеобразного турбулентного струйного потока, ограниченного спутным осесимметричным вращающимся ядром с неизменными по длине радиусом  $r_0$  и скоростью на границе  $v_0$ . В общем случае распространение потока происходит по винтообразной траектории под влиянием продольного и поперечного градиентов давления.

Вошедшая в камеру струя, совершив примерно пол-оборота в плоскости ввода до кромки диаметрально противоположного шлица, отклоняется от нее и распространяется далее по направлению к торцу камеры с постоянным углом закручивания. Осевая асимметрия потока, весьма существенная во входном сечении, исчезает практически сразу же ниже его на основном участке течения, для которого угол закручивания сохраняет постоянное значение, примерно равное  $18^\circ$ .

Как и для обычной пристеночной струи, для рассматриваемого закрученного струйного потока можно выделить начальный (или входной)

и основной участки. Однако в отличие от обычного представления о начальном участке, который характеризуется наличием ядра постоянной скорости, равной скорости истечения струи из сопла, величина начального (или входного) участка в данном случае определяется расстоянием, на котором происходит перестройка распределения скорости от приобретенного в плоском канале до типичного для периферийной зоны циклонной камеры рассматриваемой геометрии.

В исследованном диапазоне геометрических характеристик камеры длина входного участка  $x_{вх}$  (рис. 1), как было установлено в опытах, в общем случае зависит от соотношения скоростей  $v_0/v_{вх} = m_0$  ( $v_{вх}$  — средняя скорость потока в шлицах), являющегося аналогом параметра спутности (параметр спутности ядра циклонного потока). Течение на входном участке отличается большой сложностью. Распределение скорости на выходе из шлица зависит от характера течения как внутри, так и вне его. Причем распределение скорости потока в шлице значительно зависит от изменения по радиусу рабочего объема статического давления и общей схемы движения вращающихся в нем газов. Выходящая из шлицев, имеющих профилированную поверхность рабочего объема срез, деформированная струя взаимодействует с одной стороны с твердой стенкой камеры, с другой — с уже вращающимся в камере потоком, который имеет отличные величину и направление скорости.

В зависимости от геометрии камеры, в первую очередь от значения  $\overline{F}_{вх}$ , на выходе из шлица может иметь место как расширение, так и сужение струи. Учитывая сложность течения на входном участке, а также его сравнительно небольшую протяженность, в работе он характеризуется лишь эмпирическими уравнениями для расчета параметров течения в его конечном сечении. Основное внимание в статье уделено следующему за ним основному участку.

Для анализа течения координату  $x$  (начало координат совместим со срезом входного шлица) направим вдоль поверхности камеры,  $y$  — нормально к ней (рис. 1). Течение в струйном потоке разделим на два слоя: пристеночный пограничный (толщина  $\delta$ ) и струйный ( $\delta_0$ ).

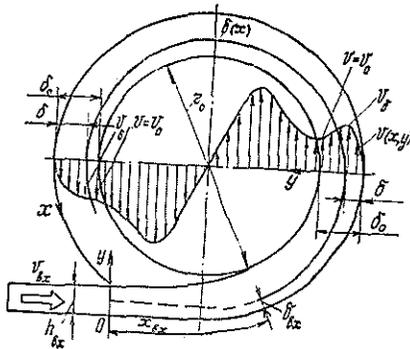


Рис. 1. Схема движения потока в периферийной области циклонной камеры

Уравнения плоского турбулентного пограничного слоя несжимаемого газа на криволинейной вогнутой поверхности с постоянным радиусом продольной кривизны  $R$  [10] запишем в виде

$$\rho v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( 1 - \frac{y}{R} \right) v_x \right] = - \frac{\partial P_c}{\partial x} + \left( 1 - \frac{y}{R} \right) \frac{\partial \tau}{\partial y} - \frac{2\tau}{R}; \quad (1)$$

$$\frac{\rho v_x^2}{R \left( 1 - \frac{y}{R} \right)} = \frac{\partial P_c}{\partial y}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( 1 - \frac{y}{R} \right) v_y \right] = 0, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность потока;  
 $v_x, v_y$  — продольная и поперечная составляющие полной скорости потока;  
 $P_c$  — статическое давление;  
 $\tau$  — напряжение трения.

Опыты показали, что поперечная составляющая скорости намного меньше продольной, т. е.  $v_y \ll v_x$ . Это обстоятельство учтено при формулировке граничных условий задачи:

$$\left. \begin{aligned} y=0; \quad v_x = v_y = 0; \quad \tau = \tau_w; \\ y=\delta; \quad v_x = v_\delta; \quad \tau = 0; \\ y=\delta_0; \quad v_x = v_0; \quad \tau = 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\tau_w$  — напряжение трения на боковой поверхности камеры.

Радиус продольной кривизны поверхности или нулевой линии тока может быть рассчитан по общеизвестной формуле кривизны винтовой линии.

Уравнение (1) преобразуем с помощью (2), (3) и затем проинтегрируем по  $y$  от 0 до  $\delta$  и  $\delta_0$ . В результате интегрирования (с учетом граничных условий) и приведения к безразмерному виду (в качестве масштабных величин приняты  $r_0$  и  $v_0$ ), а также дополнительной оценки порядка членов получим два интегральных соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} + \frac{2}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} - \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right) d\bar{y} - \\ - \frac{1}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} d\bar{y} + \frac{\bar{\delta}}{R} \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}_0} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} + \\ + \frac{\bar{\delta}}{R} \frac{2}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}_0} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} - \frac{\bar{\delta}}{R - \bar{\delta}} \frac{d\bar{\delta}}{dx} = - \frac{c_f}{2}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} + \frac{2}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} + \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}_0} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} + \\ + \frac{2}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}_0} \left( \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} \right)^2 d\bar{y} - \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta} \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} d\bar{y} - \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta^2} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} d\bar{y} - \\ - \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta} \frac{d}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} d\bar{y} - \frac{\bar{v}_0}{\bar{v}_\delta} \frac{d\bar{v}_\delta}{dx} \int_0^{\bar{\delta}} \frac{\bar{v}}{\bar{v}_\delta} d\bar{y} = - \frac{c_f}{2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $c_f = 2\tau_w/\rho v_0^2$  — коэффициент сопротивления трения.

При обтекании плоской поверхности малой кривизны ( $R \rightarrow \infty$ ) потенциальным потоком ( $v_\delta = v_0$ ) уравнения (5), (6) переходят в общеизвестные интегральные соотношения [10]. Система уравнений (5), (6) не является замкнутой, поскольку содержит пять неизвестных величин:  $\bar{\delta}$ ,  $\bar{\delta}_0$ ,  $v_\delta$ ,  $v_0$  и  $\tau_w$ .

Напряжение поверхностного трения можно определить по полученным опытными данным. На рис. 2 они представлены в виде зависимости коэффициента сопротивления трения  $c_f$  от числа Рейнольдса  $Re_\delta = v_\delta \delta / \nu$ .

Установлено, что следует различать два вида зависимостей  $c_f(Re_\delta)$ :

для камер с относительно небольшой  $\bar{f}_{вх} = (1,42 \dots 4,26) \cdot 10^{-2}$  и  $m_0 < 1$

$$c_f = 0,011 Re_\delta^{-2/15} \bar{f}_{вх}^{-0,0176}; \quad (7)$$

$$c_f = 0,0182 Re_\delta^{-2/15} m_0^{-0,304}; \quad (8)$$

для камер с  $\bar{f}_{вх} > 4,26 \cdot 10^{-2}$  и  $m_0 > 1$

$$c_f = 0,0018 Re_\delta^{-2/15} \bar{f}_{вх}^{-0,84}; \quad (9)$$

$$c_f = 0,021 Re_\delta^{-2/15} m_0^{-1,91}. \quad (10)$$

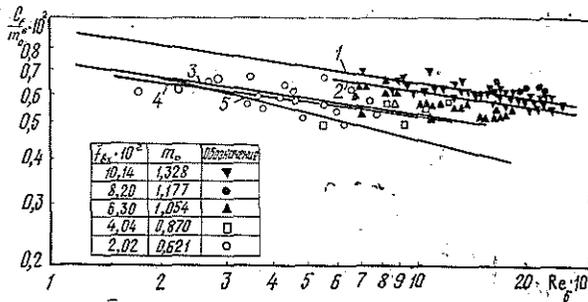


Рис. 2. Зависимости коэффициента сопротивления трения от числа  $Re_\delta$ , полученные на основании результатов работ [8] (1); [7] (3); [2] (5) и формул (10) — кривая 2 и (8) — кривая 4

Отклонение опытных точек от обобщающих кривых не превышает  $\pm 12\%$ . Формулы (7) — (10) справедливы при  $Re_\delta = (2,6 \dots 13,0) \cdot 10^3$ .

На рис. 2 приведено сопоставление формул (8) и (10) с опытными данными авторов, известными уравнениями для пластины и трубы [2], пластины при ее струйном обтекании [8] и циклонной камеры с периферийным выводом газов [7].

Постоянные для определенных условий  $\delta_0 = R_k - r_0$  и  $v_0$  могут быть определены по рекомендациям [4, 5].

В области пристенного пограничного слоя опытные распределения продольной компоненты скорости потока (фактически, как отмечалось выше, полной скорости) хорошо обобщаются степенной зависимостью (рис. 3, а)

$$\bar{v} = \frac{v}{v_\delta} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^n = \bar{y}^n, \quad (11)$$

а в струйной части пристенного пограничного слоя (рис. 3, б) — формулой Абрамовича — Шлихтинга [8]:

$$\bar{w} = \frac{v - v_0}{v_\delta - v_0} = \left[1 - \left(\frac{y - \delta}{\delta_0 - \delta}\right)^{3/2}\right]^2 = (1 - \bar{\eta}^{3/2})^2. \quad (12)$$

При этом интегральные соотношения (5), (6) после подстановки (8) — (12) и выполнения интегрирования представлены в виде двух дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\bar{\delta}}{dx} \left[ \frac{1}{2n+1} - \frac{1}{n+1} - \frac{\bar{\delta}}{R} \left( 0,316 + 0,269 \frac{\bar{v}_0}{v_\delta} + 0,416 \left(\frac{\bar{v}_0}{v_\delta}\right)^2 \right) \right] -$$

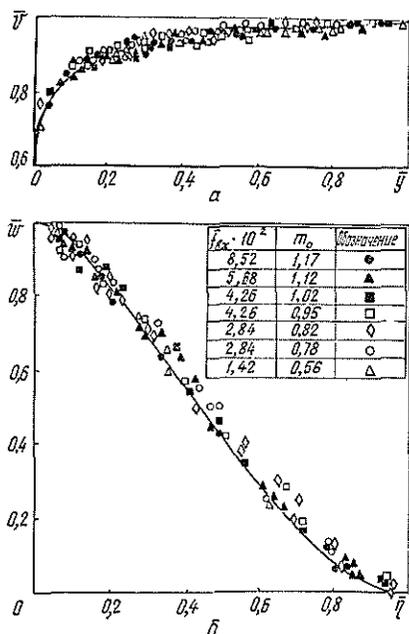


Рис. 3 Аппроксимация опытного распределения скорости с помощью степенной зависимости (а) и формулы Абрамовича — Шлихтинга [8] (б)

$$\begin{aligned}
 & - \frac{\bar{\delta}}{R - \bar{\delta}} \Big] + \frac{1}{\bar{v}_0} \frac{d\bar{v}_0}{dx} \left[ \bar{\delta} \left( \frac{2}{2n+1} - \frac{1}{n+1} \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{\bar{\delta}}{R} (\bar{\delta} - \bar{\delta}_0) \left( 0,632 + 0,269 \frac{\bar{v}_0}{v_0} \right) \right] = - \frac{c_f}{2}; \tag{13}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{d\bar{\delta}}{dx} \left[ \frac{1}{2n+1} - \frac{1}{n+1} \frac{\bar{v}_0}{v_0} - 0,316 + 0,181 \frac{\bar{v}_0}{v_0} + 0,134 \left( \frac{\bar{v}_0}{v_0} \right)^2 \right] + \\
 & + \frac{1}{\bar{v}_0} \frac{d\bar{v}_0}{dx} \left[ \frac{2}{2n+1} \bar{\delta} - \frac{\bar{\delta}}{n+1} \frac{\bar{v}_0}{v_0} + (\bar{\delta}_0 - \bar{\delta}) \times \right. \\
 & \left. \times \left( 0,632 - 0,181 \frac{\bar{v}_0}{v_0} \right) \right] = - \frac{c_f}{2}. \tag{14}
 \end{aligned}$$

Большая часть опытных профилей  $\bar{v}$ , относящихся к основному (расчетному) участку, имеет  $n$ , близкие к 1/14. Именно это значение взято в качестве расчетного. (В дальнейшем, вероятно, целесообразно попытаться установить зависимость  $n(x)$ .)

Некоторые результаты численного решения уравнений (13), (14) в диапазоне варьирования  $\bar{R}$ ,  $Re_0$ ,  $m_0$ , близких к опытным, приведены в табл. 1—3.

Они показывают, что с увеличением числа  $Re_0$  толщина пристенного пограничного слоя  $\bar{\delta}$  убывает, скорость на границе  $\bar{v}_0$  возрастает. Но влияние  $Re_0$  на эти величины незначительно. Увеличение радиуса кривизны поверхности приводит к возрастанию  $\bar{\delta}$  и  $\bar{v}_0$ . Характер влияния  $m_0$  на  $\bar{\delta}$  и  $\bar{v}_0$  является обратно пропорциональным.

По результатам численного решения уравнений получены формулы для расчета толщины пристенного пограничного слоя и скорости на его границе:

Таблица 1

Значения  $\bar{\delta}$  и  $\bar{v}_0$  при различных  $\bar{R}$  и  $x$  ( $Re_0 = 15 \cdot 10^3$ ,  $m_0 = 0,4$ )

$\bar{R}$	$x$									
	6	8	10	12	14	16	20	22	24	26
1,2	0,0821	0,0955	0,1066	0,1161	0,1241	0,1311	0,1370	0,1418	0,1457	0,1484
	1,4430	1,3701	1,3059	1,2476	1,1937	1,1430	1,0947	1,0482	1,0027	0,9576
1,4	0,0968	0,1142	0,1288	0,1416	0,1529	0,1630	0,1723	0,1807	0,1884	0,1955
	1,5139	1,4659	1,4231	1,3838	1,3473	1,3129	1,2804	1,2493	1,2194	1,1907
1,6	0,1070	0,1268	0,1437	0,1585	0,1717	0,1837	0,1947	0,2048	0,2141	0,2229
	1,5452	1,5086	1,4756	1,4452	1,4167	1,3898	1,3643	1,3398	1,3163	1,2936
2,0	0,1224	0,1460	0,1663	0,1841	0,2001	0,2147	0,2282	0,2407	0,2523	0,2633
	1,5748	1,5494	1,5262	1,5047	1,4844	1,4652	1,4468	1,4291	1,4121	1,3956

Примечание. Здесь и далее, в табл. 2, 3, в числителе  $\bar{\delta}$ , в знаменателе  $\bar{v}_0$ .

Таблица 2

Значения  $\bar{\delta}$  и  $\bar{v}_0$  при различных  $Re_0$  и  $x$  ( $\bar{R} = 1,6$ ,  $m_0 = 1,1$ )

$Re_0 \times 10^3$	$x$										
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
5	0,0987	0,1180	0,1341	0,1479	0,1600	0,1707	0,1804	0,1892	0,1971	0,2044	0,2111
	1,0772	1,0604	1,0441	1,0282	1,0128	0,9976	0,9827	0,9680	0,9535	0,9392	0,9249
15	0,0916	0,1098	0,1250	0,1381	0,1497	0,1600	0,1694	0,1779	0,1857	0,1929	0,1995
	1,0793	1,0646	1,0504	1,0365	1,0230	1,0097	0,9966	0,9838	0,9711	0,9585	0,9461
25	0,0884	0,1061	0,1209	0,1337	0,1450	0,1552	0,1644	0,1728	0,1805	0,1876	0,1942
	1,0801	1,0664	1,0530	1,0400	1,0273	1,0148	1,0025	0,9904	0,9785	0,9667	0,9550
35	0,0864	0,1037	0,1183	0,1309	0,1420	0,1520	0,1611	0,1694	0,1771	0,1841	0,1907
	1,0807	1,0675	1,0547	1,0422	1,0300	1,0180	1,0062	0,9946	0,9831	0,9718	0,9605

при  $m_0 < 1$ 

$$\bar{\delta} = 0,0483 m_0^{-0,142} \bar{R}^{0,185} x^{-k_1} Re_0^{-0,053}; \quad (15)$$

$$\bar{v}_0 = 1,3921 \beta m_0^{-0,306} \bar{R}^{-0,327} x^{-k_2} Re_0^{0,0164}; \quad (16)$$

при  $m_0 > 1$ 

$$\bar{\delta} = 0,0611 m_0^{-0,731} \bar{R}^{0,17} x^{-k_3} Re_0^{-0,0565}; \quad (17)$$

$$\bar{v}_0 = 1,4432 \beta m_0^{-0,172} \bar{R}^{-0,424} x^{-k_4} Re_0^{0,0107}; \quad (18)$$

где  $k_1 = 0,845 - 0,432/\bar{R}$ ; $k_2 = 0,155 - 0,428/\bar{R}$ ;

Таблица 3

Значения  $\bar{\delta}$  и  $\bar{v}_\delta$  при различных  $m_0$  и  $x$  ( $Re_0 = 15 \cdot 10^3$ ,  $\bar{R} = 1,4$ )

$m_0$	$\bar{x}$										
	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
0,2	$\frac{0,1080}{1,9003}$	$\frac{0,1266}{1,8262}$	$\frac{0,1425}{1,7611}$	$\frac{0,1564}{1,7025}$	$\frac{0,1689}{1,6488}$	$\frac{0,1802}{1,5990}$	$\frac{0,1906}{1,5523}$	$\frac{0,2001}{1,5083}$	$\frac{0,2089}{1,4666}$	$\frac{0,2171}{1,4268}$	$\frac{0,2247}{1,3887}$
0,4	$\frac{0,0968}{1,5139}$	$\frac{0,1142}{1,4659}$	$\frac{0,1288}{1,4231}$	$\frac{0,1416}{1,3838}$	$\frac{0,1529}{1,3473}$	$\frac{0,1630}{1,3129}$	$\frac{0,1723}{1,2804}$	$\frac{0,1807}{1,2493}$	$\frac{0,1884}{1,2194}$	$\frac{0,1955}{1,1907}$	$\frac{0,2020}{1,1628}$
0,8	$\frac{0,0860}{1,1991}$	$\frac{0,1027}{1,1704}$	$\frac{0,1166}{1,1439}$	$\frac{0,1284}{1,1189}$	$\frac{0,1388}{1,0950}$	$\frac{0,1479}{1,0722}$	$\frac{0,1561}{1,0500}$	$\frac{0,1635}{1,0284}$	$\frac{0,1702}{1,0074}$	$\frac{0,1762}{0,9868}$	$\frac{0,1816}{0,9664}$
1,0	$\frac{0,0910}{1,1064}$	$\frac{0,1082}{1,0800}$	$\frac{0,1222}{1,0550}$	$\frac{0,1340}{1,0312}$	$\frac{0,1443}{1,0080}$	$\frac{0,1532}{0,9855}$	$\frac{0,1611}{0,9635}$	$\frac{0,1680}{0,9418}$	$\frac{0,1742}{0,9204}$	$\frac{0,1795}{0,8990}$	$\frac{0,1841}{0,8778}$
1,1	$\frac{0,0850}{1,0734}$	$\frac{0,1007}{1,0525}$	$\frac{0,1137}{1,0324}$	$\frac{0,1248}{1,0130}$	$\frac{0,1344}{0,9941}$	$\frac{0,1429}{0,9756}$	$\frac{0,1505}{0,9574}$	$\frac{0,1572}{0,9395}$	$\frac{0,1632}{0,9217}$	$\frac{0,1686}{0,9041}$	$\frac{0,1733}{0,8864}$
1,3	$\frac{0,0751}{1,0139}$	$\frac{0,0887}{1,0007}$	$\frac{0,1001}{0,9876}$	$\frac{0,1100}{0,9746}$	$\frac{0,1186}{0,9618}$	$\frac{0,1263}{0,9490}$	$\frac{0,1333}{0,9364}$	$\frac{0,1395}{0,9238}$	$\frac{0,1452}{0,9113}$	$\frac{0,1504}{0,8988}$	$\frac{0,1551}{0,8863}$

$$k_3 = 0,774 - 0,396/\bar{R};$$

$$k_4 = 0,155 - 0,402/\bar{R};$$

$\beta$  — коэффициент, учитывающий конечные размеры источника струйного потока.

Значение коэффициента  $\beta$  в формулах (16), (18) определяется по экспериментальным данным при условии  $x = x_{вх}$  и  $v_\delta = v_{\delta вх}$ . В общем случае он зависит от особенностей истечения газа из шлица, которые, как отмечалось выше, определяются геометрическими характеристиками камеры. Главной из них является относительная площадь входа потока. Наилучшее совпадение опытных и расчетных данных по форму-

лам (16), (18) наблюдается, если  $\beta$  определять по полученным нами эмпирическим уравнениям:

при  $m_0 < 1$

$$\beta = 1,285 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,105}; \quad (19)$$

при  $m_0 > 1$

$$\beta = 1,668 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,188}. \quad (20)$$

Формулам (15) — (18) можно придать вид обобщенных уравнений, если в качестве масштабных величин использовать значения  $\delta$  и  $v_\delta$  на границе входного участка и ввести координату  $\tilde{x}_1 = x/x_{\text{вх}}$ . В этом случае имеем:

при  $m_0 < 1$

$$\tilde{\delta} = \delta/\delta_{\text{вх}} = \tilde{x}_1^{k_1}; \quad (21)$$

$$\tilde{v}_\delta = v_\delta/v_{\delta \text{ вх}} = B \tilde{x}_1^{k_2}, \quad (22)$$

где  $B = 1,286 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,092}$ ;

при  $m_0 > 1$

$$\tilde{\delta} = \tilde{x}_1^{k_3}; \quad (23)$$

$$\tilde{v}_\delta = B \tilde{x}_1^{k_4}, \quad (24)$$

где  $B = 1,743 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,193}$ .

На рис. 4 приведено сопоставление опытных и расчетных данных по формулам (21) — (24). Совпадение следует признать вполне удовлетворительным.

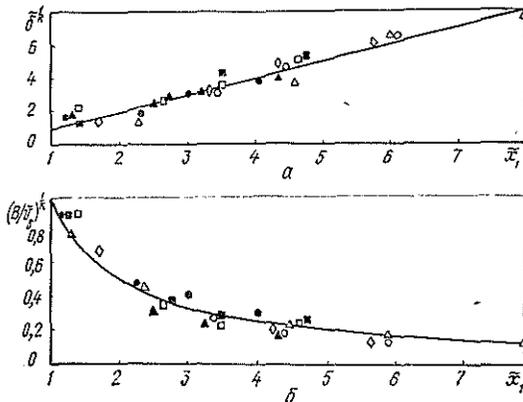


Рис. 4. Сопоставление опытных и расчетных данных для толщины пограничного слоя (а) и скорости на его границе (б) (Обозначения опытных точек приведены на рис. 3)

Подставив значение  $\tilde{v}_\delta$  из формул (22), (24) в уравнения (15), (17), найдем изменение  $\tilde{\delta}$  в явном виде:

при  $m_0 < 1$

$$\tilde{\delta} = 0,0563 B^{-0,0503} m_0^{-0,135} \bar{R}^{0,174} \bar{x}^{k_5} \bar{x}_{\text{вх}}^{k_6} \text{Re}_0^{-0,0503}; \quad (25)$$

при  $m_0 > 1$

$$\tilde{\delta} = 0,071 B^{-0,0535} m_0^{-0,692} \bar{R}^{0,161} \bar{x}^{k_7} \bar{x}_{\text{вх}}^{k_8} \text{Re}_0^{-0,0535}, \quad (26)$$

где  $k_5 = 0,795 - 0,389/\bar{R}$ ;  
 $k_6 = 0,0078 - 0,022/\bar{R}$ ;  
 $k_7 = 0,724 - 0,353/\bar{R}$ ;  
 $k_8 = 0,0082 - 0,0215/\bar{R}$ ;  
 $Re_0 = v_{\delta_{\text{вх}}} r_0 / \nu$ .

Необходимые для расчета характеристик потока на основном участке значения  $\delta$  и  $v_{\delta}$  в его начальном сечении, т. е. при  $x = x_{\text{вх}}$ , могут быть определены по следующим формулам:

$$\bar{v}_{\delta_{\text{вх}}} = v_{\delta_{\text{вх}}} / v_0 = 1,135 m_0^{-0,4}; \quad (27)$$

при  $m_0 < 1$

$$\bar{\delta}_{\text{вх}} = \delta_{\text{вх}} / r_0 = 0,0563 B^{-0,0503} m_0^{-0,135} \bar{R}^{0,174} \times \\ \times \bar{x}_{\text{вх}}^{k_9} Re_0^{-0,0503}; \quad (28)$$

при  $m_0 > 1$

$$\bar{\delta}_{\text{вх}} = 0,071 B^{-0,0535} m_0^{-0,692} \bar{R}^{0,161} \bar{x}_{\text{вх}}^{k_{10}} Re_0^{-0,0535}, \quad (29)$$

где  $k_9 = 0,8028 - 0,411/\bar{R}$ ;  
 $k_{10} = 0,7322 - 0,3745/\bar{R}$ .

В общем случае  $\bar{x}_{\text{вх}}$  является функцией  $\bar{f}_{\text{вх}}$  или  $m_0$  и определяется по формуле

$$\bar{x}_{\text{вх}} = x_{\text{вх}} / r_0 = 3,98 m_0^{0,706}. \quad (30)$$

Эти соотношения позволяют не только рассчитать основные параметры потока в периферийной зоне циклонных камер, но и перейти к решению соответствующей тепловой задачи. С этой точки зрения несомненный интерес имеет представление полученных в работе данных о распределении скорости в пристенном пограничном слое на боковой поверхности рабочего объема циклонных камер не только в виде рассмотренной степенной зависимости, но и в универсальных координатах.

На рис. 5 полученные нами данные представлены в координатах  $v^+ = v / (\tau_w / \rho)^{0,5}$ ;  $y^+ = (y / \nu) (\tau_w / \rho)^{0,5}$ . Для анализа принята трехслойная схема деления пристенного турбулентного пограничного слоя [3 — 5, 9]. В области вязкого подслоя ( $0 \leq y^+ \leq 5$ ) и промежуточного слоя ( $5 \leq y^+ \leq 40$ ) представленные распределения соответствуют зависимостям, обычно наблюдаемым в этих областях на поверхности пластины и в трубах [2]:

при  $0 \leq y^+ \leq 5$

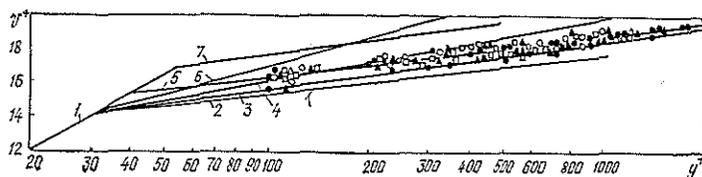


Рис. 5. Сопоставление распределения скорости в пристенном пограничном слое на боковой поверхности циклонной камеры в универсальных координатах с опытными данными и рекомендациями других авторов: 1 — [2]; 2 — [11]; 3 — [9]; 4 — [8]; 5 — [33]; 6 — [2]; 7 — [7] (Обозначения опытных точек приведены на рис. 3).

$$v^+ = y^+; \quad (31)$$

при  $5 \leq y^+ \leq 40$

$$v^+ = 5 \ln y^+ - 3,05. \quad (32)$$

В турбулентном ядре потока на основе обобщения опытных данных при  $40 \leq y^+ \leq 2000$  имеем

$$v^+ = 1,012 \ln y^+ + 11,71. \quad (33)$$

На рис. 5 проведено сопоставление полученных нами данных с результатами работ [1, 2, 7—9]. При сопоставлении принято, что в пристенной области  $v^+ \approx \omega_\varphi^+$  ( $\omega_\varphi^+$  — тангенциальная составляющая полной скорости потока). Следует отметить хорошее совпадение распределения (33) с данными работы [9]. Распределение  $v^+$  в пограничном слое на боковой поверхности циклонной камеры более пологое, чем на поверхности пластины и трубы, что связано с более высоким уровнем турбулентности циклонного потока.

#### Выводы

1. Численно решена задача о движении газа в периферийной зоне рабочего объема циклонных камер.

2. Предложена схема расчета основных аэродинамических характеристик потока в периферийной области циклонных камер. Полученные расчетные соотношения для определения толщины пристенного пограничного слоя и скорости на его границе учитывают влияние ядра потока, числа Рейнольдса, радиуса кривизны поверхности, условий ввода потока в камеру и вполне удовлетворительно соответствуют опытным данным.

3. Результаты выполненного исследования позволяют перейти к решению задачи конвективного теплообмена на боковой поверхности циклонных камер.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Бухман М. А., Вышенский В. В., Устименко Б. П. Гидродинамика и теплообмен циклонной камеры с многосторонним подводом воздуха // Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики.—Алма-Ата, 1970.—Вып. 6.—С. 184—194. [2]. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа.—М.: Наука, 1970.—904 с. [3]. Престон Дж. Г. Определение турбулентного поверхностного трения при помощи трубок Пито // Механика.—1955.—№ 6.—С. 64—68. [4]. Сабуров Э. Н. Аэродинамика и конвективный теплообмен в циклонных нагревательных устройствах.—Л.: Изд-во ЛГУ, 1982.—240 с. [5]. Сабуров Э. Н., Карпов С. В., Осташев С. И. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах / Под ред. Э. Н. Сабурова.—Л.: Изд-во ЛГУ, 1989.—274 с. [6]. Сабуров Э. Н., Карпов С. В. Циклонные устройства / Под ред. Э. Н. Сабурова.—М.: Экология, 1993.—368 с. [7]. Сабуров Э. Н., Леухин Ю. Л. Аэродинамика и теплообмен закрученного потока в цилиндрической камере // Инж.-физ. журн.—1985.—Т. 48, № 3.—С. 375—396. [8]. Сакипов З. Б. Теория и методы расчета полуограниченных струй и настильных факелов.—Алма-Ата: Наука КазССР, 1978.—204 с. [9]. Устименко Б. П. Процессы турбулентного переноса во вращающихся течениях.—Алма-Ата: Наука КазССР, 1977.—228 с. [10.] Федяевский К. К., Гиневский А. С., Колесников А. В. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости.—Л.: Машиностроение, 1973.—256 с. [11]. Халатов А. А. Теория и практика закрученных потоков.—Киев: Наук. думка, 1989.—192 с.

УДК 536.24

**В. Б. КУНТЫШ, А. Э. ПИИР, В. В. АКСЕНОВ**

Кунтыш Владимир Борисович родился в 1941 г., окончил в 1963 г. Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Архангельского государственного технического университета. Имеет 261 печатный труд в области интенсификации конвективного теплообмена развитых поверхностей при внешнем обтекании их однофазными газовыми теплоносителями и теоретических основ для проектирования высокоэффективных теплообменников воздушного охлаждения энергоносителей.



Пиир Адольф Эдвардович родился в 1940 г., окончил в 1962 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Архангельского государственного технического университета. Имеет свыше 100 печатных трудов в области теории термодинамических циклов энергоустановок и конвективного теплообмена в ребристых поверхностях нагрева.



Аксенов Василий Викторович родился в 1956 г., окончил в 1979 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики Архангельского государственного технического университета. Имеет 10 печатных трудов в области теплофизики и молекулярной физики.

**ТЕПЛООБМЕН И АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ  
В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО УСТАНОВЛЕННЫХ  
ПУЧКАХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ**

Даны рекомендации и расчетные зависимости теплоаэродинамических характеристик шахматных пучков из труб с алюминиевыми накатными ребрами в потоке воздуха, установленных с различными расстояниями между ними.

Heat aerodynamical characteristics recommendations and calculation relationships of aluminium rolled finned tubes staggered arrays with different distances between them in air stream, have been given.

В промышленных теплообменных установках, например в аппаратах воздушного охлаждения, встречаются компоновки из последовательно установленных пучков оребренных труб, особенности закономерностей теплообмена и аэродинамики в которых изучены недостаточно. Поэтому решение этой задачи представляется актуальным.

Эксперименты по исследованию теплоотдачи и аэродинамического сопротивления в последовательно установленных пучках оребренных труб проводили в горизонтальной аэродинамической трубе разомкнутого типа сечением  $300 \times 300$  мм. В рабочем участке трубы устанавливали два одинаковых трехрядных шахматных пучка оребренных труб, схемы расположения которых представлены на рис. 1. При проведении эксперимента изучали влияние первого (по ходу воздуха) пучка на характер теплообмена во втором в зависимости от расстояния  $l$ . Для этого использовали известный метод локального теплового моделирования с помощью пароэлектрического калориметра [6], устанавливаемого в средней части соответствующего ряда пучка.

При проведении эксперимента измеряли динамический напор воздуха, перепад статического давления в пучках, температуру воздуха до пучка и за ним, среднюю температуру поверхности трубы под основанием ребер, электрическую мощность, подводимую к калориметру.

В опытах использовали стальные трубы с накатным алюминиевым оребрением, изготовленные в акционерном обществе «Таллинский машиностроительный завод». Трубы имели следующие параметры: наружный диаметр ребра  $d = 56,5$  мм; диаметр по основанию ребра  $d_0 = 29,5$  мм; высота ребра  $h = 13,5$  мм; шаг ребра  $t = 2,52$  мм; толщина ребра  $\Delta = 0,55$  мм; коэффициент оребрения  $\varphi = 16,9$ .

Поперечный  $S_1$ , продольный  $S_2$  и среднедиагональный  $S_2'$  шаги в пучках составляли соответственно 64,7; 56,0; 64,7 мм.

Расстояние  $l$  между последним рядом первого (по ходу воздуха) пучка и первым рядом второго пучка изменялось пропорционально величине продольного шага  $S_2$  и составляло соответственно  $2S_2$ ,  $3S_2$  и  $4S_2$  (рис. 1).

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_i$  в каждом ряде пучка определяли по формуле

$$\alpha_i = \frac{Q_i}{F(t_{ст} - t_1)}, \quad (1)$$

где  $Q_i$  — количество теплоты, передаваемое калориметром воздуху в ряде  $i$  ( $i$  — номер ряда);

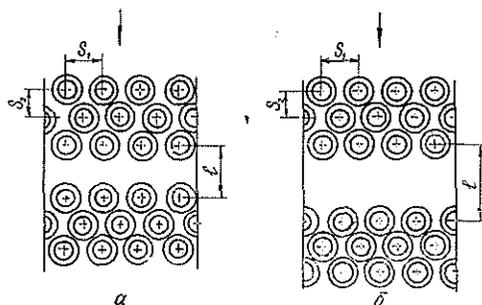


Рис. 1. Схемы компоновки труб в последовательно установленных пучках: а — коридорная; б — шахматная (стрелками показано направление потока воздуха)

$F$  — полная наружная поверхность калориметра;  
 $t_{ст}$  — температура стенки калориметра;  
 $t_1$  — температура набегающего потока воздуха.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  пучка принимали равным среднему арифметическому значению коэффициентов теплоотдачи всех рядов пучка.

Результаты определения теплоотдачи и аэродинамического сопротивления обрабатывали в критериальной форме [3]:

$$Nu_i = c_i Re^{n_i}; \quad (2)$$

$$Nu = c Re^n; \quad (3)$$

$$Eu/\varphi = B Re^{-m}, \quad (4)$$

где  $Nu_i$ ,  $Nu$  — числа Нуссельта для отдельного ряда и пучка в целом,  $Nu_i = \alpha_i d_0/\lambda$ ;  $Nu = \alpha d_0/\lambda$ ;  
 $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  
 $Re$  — число Рейнольдса,  $Re = \omega d_0/\nu$ ;  
 $\omega$  — скорость воздуха в сжатом сечении пучка;  
 $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости;  
 $Eu$  — число Эйлера,  $Eu = \Delta p/\rho \omega^2$ ;  
 $\Delta p$  — перепад статического давления воздуха;  
 $\rho$  — плотность воздуха;  
 $\varphi$  — коэффициент оребрения;  
 $c_i$ ,  $c$ ,  $n_i$ ,  $n$ ,  $B$ ,  $m$  — константы.

Теплофизические характеристики воздуха  $\lambda$ ,  $\rho$ ,  $\nu$  приняты по средней температуре воздуха в пучке. Эксперименты проводили в диапазоне изменения чисел  $Re = (5 \dots 35) \cdot 10^3$ . Среднеквадратичная ошибка при определении констант  $c_i$ ,  $c$ ,  $n_i$ ,  $n$ ,  $B$ ,  $m$  не превышала 3 %.

Значения постоянных коэффициентов в критериальных уравнениях теплоотдачи для 1-го ( $c_1$ ,  $n_1$ ), 2-го ( $c_2$ ,  $n_2$ ) и 3-го ( $c_3$ ,  $n_3$ ) рядов первого (числитель) и второго (знаменатель) пучков в зависимости от расстояния  $l$  между ними, а также средние значения этих констант ( $c$ ,  $n$ ) для первого и второго пучков в целом приведены в таблице.

Как показывает анализ экспериментальных данных, изменение расстояния  $l$  влияет на теплоотдачу в рядах этих пучков (см. таблицу, рис. 2, 3). Однако характер ее изменения по рядам пучков существенно различен: если в первом пучке теплоотдача 1-го ряда в среднем составляет 63 %, а 2-го — 95 % от уровня теплоотдачи 3-го ряда этого пучка, то в 1-м ряду второго пучка теплоотдача составляет 95 %, а 2-го — 100 % от уровня теплоотдачи 3-го ряда этого пучка, что приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи второго пучка по сравнению с первым в среднем на 11,4 % (см. таблицу).

Такое изменение теплоотдачи в рядах пучков обусловлено особенностями аэродинамики обтекания пучков потоком воздуха.

$l$ , мм	$c_1 \times 10^2$	$c_2 \times 10^2$	$c_3 \times 10^2$	$n_1 \cdot 10$	$n_2 \cdot 10$	$n_3 \cdot 10$	$c \cdot 10^2$	$n \cdot 10$
112	20,00	6,30	6,65	5,6	7,0	7,0		
	6,30	6,65	6,65	7,0	7,0	7,0		
168	20,00	6,30	6,65	5,6	7,0	7,0	5,72	7,0
	6,30	6,65	6,65	7,0	7,0	7,0	6,54	7,0
224	20,00	6,30	6,65	5,6	7,0	7,0		
	6,30	6,65	6,65	7,0	7,0	7,0		

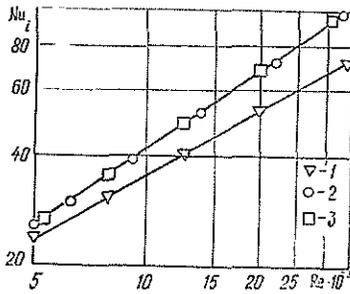


Рис. 2. Теплоотдача различных рядов первого пучка: 1, 2, 3 — соответственно 1-й, 2-й и 3-й ряды

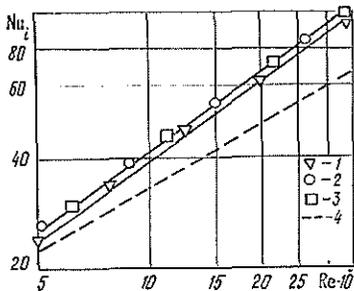


Рис. 3. Теплоотдача различных рядов: 1, 2, 3 — соответственно 1-й, 2-й и 3-й ряды второго пучка; 4 — 1-й ряд первого пучка

На обтекание 1-го ряда труб в первом пучке влияет начальная турбулентность потока [2], что близко к обтеканию одиночной оребренной трубы. При прохождении через 1-й ряд пучка воздушный поток дополнительно турбулизируется. В кормовой зоне оребренной трубы образуется клинообразная вихревая область, быстро диффундирующая в основной поток [1, 2]. Кроме того, происходит деформация поля скоростей последующим 3-м рядом этого пучка. Именно поэтому теплоотдача 2-го ряда в первом пучке резко возрастает, достигая примерно 95 % от уровня теплоотдачи в 3-м. После прохождения 2-го ряда первого пучка турбулизация потока возрастает из-за образования вихревой области в кормовой зоне 2-го ряда, что приводит к интенсификации теплообмена в 3-м ряду первого пучка.

Теплоотдача в 1-м ряду второго пучка в 1,5 раза больше, чем в 1-м ряду первого по ходу воздуха пучка, так как начальная турбулизация потока, набегающего на этот ряд, выше, чем в первом пучке, и не зависит от расстояния между пучками (см. таблицу, рис. 3).

Можно предположить, что в нашем случае, как и в [1], степень турбулентности потока максимально локализована в кормовой области, находящейся непосредственно за рядом труб. Именно здесь масштаб турбулентных пульсаций самый высокий.

Как установлено [1], при удалении от этой зоны вниз по потоку происходит выравнивание поля скоростей и степени турбулентности потока, что приводит на достаточно больших расстояниях от ряда оребренных труб к практической однородности характеристик потока. Именно по этой причине теплоотдача 1-го ряда второго пучка в нашем случае не зависит от расстояния между пучками, оставаясь в то же время выше, чем в 1-м ряду первого пучка.

После прохождения 1-го ряда второго пучка поток воздуха дополнительно турбулизируется из-за образования клинообразной вихревой

зоны в кормовой области за трубами этого пучка. Происходит также деформация поля скоростей следующим 3-м рядом этого пучка. Поэтому уровень теплоотдачи во 2-м ряду второго пучка выше, чем в 1-м.

Однако, уровень теплоотдачи во 2-м ряду второго пучка возрастает лишь на 5 % по сравнению с 1-м рядом. Интенсивность теплоотдачи во 2-м ряду первого пучка выше, чем в 1-м, на 34 %.

Это объясняется тем, что наиболее интенсивно поле скоростей потока воздуха перестраивается при прохождении первых двух рядов в первом пучке. Поэтому уровень теплоотдачи изменяется наиболее существенно именно при продвижении воздуха с 1-го ряда этого пучка на 2-й.

После прохождения первого пучка поле скоростей потока воздуха, набегающего на второй пучок, перестраивается менее существенно, чем потока, надвигающегося на первый пучок. Следовательно, теплоотдача во втором пучке при переходе с 1-го на 2-й ряд возрастает менее интенсивно, чем в первом пучке.

В дальнейшем, при переходе потока воздуха со 2-го на 3-й ряд второго пучка, происходит слабое увеличение уровня турбулентности потока, что компенсируется отсутствием деформаций поля скоростей в следующем 3-м ряду, который является в этом пучке последним. Поэтому уровень теплоотдачи в 3-м ряду второго пучка остается таким же, как и во 2-м.

Зависимость аэродинамического сопротивления пучков труб от числа  $Re$  при изменении расстояния  $l$  между ними представлена на рис. 4, 5.

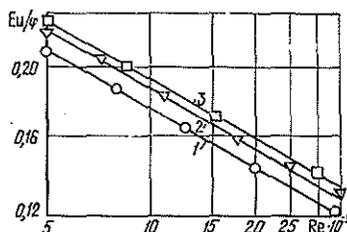


Рис. 4. Аэродинамическое сопротивление пучков оребренных труб при различных значениях  $l$ : 1 —  $l = 112$ ; 2 — 168; 3 — 224 мм

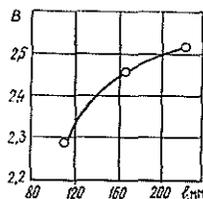


Рис. 5. Зависимость параметра  $B$  от расстояния между пучками  $l$ : (о — расчетные значения)

Как видно из рис. 4, все кривые располагаются параллельно друг другу. Поэтому константа  $m$  в уравнении (4) имеет одинаковое значение и равна 0,28 независимо от  $l$ .

Однако константа  $B$  в уравнении (4) монотонно возрастает от 2,29 до 2,52 при увеличении  $l$  (рис. 5). Этому соответствует увеличение аэродинамического сопротивления пучков примерно на 10 %.

Характер изменения аэродинамического сопротивления в зависимости от расстояния между пучками определяется особенностями их компоновки.

При минимальном расстоянии  $l$  между пучками 3-й ряд первого пучка и 1-й ряд второго пучка образуют два установленных коридорно ряда труб (см. рис. 1, а). С увеличением  $l$  (см. рис. 1, б) эти ряды образуют шахматную компоновку, что вызывает рост  $B$  примерно на 7,6 % (рис. 5) по сравнению с коридорной [4, 5]. Повышение  $l$  до максимального значения приводит к возрастанию  $B$  еще на 2,4 % (рис. 5).

Таким образом, теплоотдача и аэродинамическое сопротивление в последовательно установленных пучках оребренных труб определяются особенностями аэродинамики обтекания и компоновкой труб в пучках. При этом теплоотдача в рядах пучков зависит, прежде всего, от начальной турбулизации потока воздуха, а также от дополнительной турбулизации предыдущим рядом труб и наличия или отсутствия деформации поля скоростей в последующем ряду (в зависимости от его наличия или отсутствия).

Анализ полученных результатов показывает, что ощутимой интенсификации теплообмена можно достигнуть, искусственно турбулизируя набегающий поток воздуха с помощью специальных устройств, которые, однако, не должны приводить к резкому возрастанию аэродинамического сопротивления системы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Бурков В. В. *Алюминиевые теплообменники сельскохозяйственных и транспортных машин.*—Л.: Машиностроение, 1985.—239 с. [2]. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках.—М.: Наука, 1982.—472 с. [3]. Кунтыш В. Б., Топоркова М. А. Влияние разрыва в межтрубном пространстве на теплообмен и аэродинамическое сопротивление шахматных пучков оребренных труб // *Теплоэнергетика.*—1982.—№ 6.—С. 61—63. [4]. Кунтыш В. Б., Федотова Л. М., Кузнецов Н. М. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление оребренных труб пучков с неравномерными шагами в аппаратах воздушного охлаждения // *Энергетика.*—1982.—№ 2.—С. 60—65.—(Изв. высш. учеб. заведений). [5]. Хинце И. О. *Турбулентность, ее механизм и теория.*—М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963.—680 с. [6]. Экспериментальное исследование теплоотдачи и сопротивления пучков АВО из биметаллических труб / В. Б. Кунтыш, А. Э. Пир, А. И. Егоров // *Энергетика.*—1977.—№ 12.—С. 89—93.—(Изв. высш. учеб. заведений).

## НОВОСТИ НАУКИ

## СОРОСОВСКИЕ ПРОФЕССОРА ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ НАЗВАНЫ

Многие годы американский финансист и филантроп Джордж Сорос методично расширял масштабы и сферы приложения своей благотворительности в области культуры, искусства и науки. Он создавал свои общественные организации в странах бывшего социализма, уделял большое внимание и бывшему Советскому Союзу, где успешно развивался его фонд «Культурная инициатива». Почти два года назад он объявил о выделении 100 миллионов долларов для поддержки ученых-исследователей (так был образован Международный научный фонд), а год назад вернулся к своему старому намерению — образовать специальный фонд помощи высшему и среднему образованию. Последняя инициатива была объявлена им на пресс-конференции в Москве в феврале 1994 г., и им было сказано, что средства будут выделены на пятилетний срок.

Конечно, сложность поставленной задачи нельзя переоценить. Можно без всякой натяжки говорить, что полнокровное финансирование всей учительской массы, всех школьников, студентов, преподавателей высшей школы, включая профессоров, настолько ресурсоемко, что оно непосильно ни для одного человека в мире. Лишь само государство может заботиться в полной мере об этих людях. Поэтому правомерно и понятно, что, во-первых, Дж. Сорос решил сконцентрировать свою помощь только на самых лучших преподавателях и учащихся — на тонком слое элиты этих социальных групп, а во-вторых, согласился с тем, чтобы провести свою программу только в отношении обучения фундаментальным наукам — физике, химии, биологии и математике. В результате и была объявлена Международная Соросовская Программа образования в области точных наук, которую многие до сих пор смешивают с Международным научным фондом, но которая и организационно, и идейно отлична от МНФ.

При первых же обсуждениях будущей программы Дж. Сорос согласился с тремя принципиальными положениями: 1) поддержка должна касаться именно точных наук, ибо она позволит сохранить уникальный потенциал, развитый в течение столетия или даже больше в России, потенциал, признанный во всем мире в этих направлениях и существенный для всей мировой цивилизации; 2) поддержка лучших из лучших в сфере образования в области точных наук критически важна для будущего индустриального развития страны, решающим образом зависящего от успехов в указанных областях науки и 3) воплощение в жизнь этой Программы поможет лучшим образом использовать богатейший генофонд талантов, число которых исключительно велико в огромной стране, каковой является бывший Советский Союз, сохранить формировавшиеся десятилетиями научные школы, которым подчас нет равных в мире. К тому же этой мерой можно снизить, и снизить существенно, потери науки за счет внутренней и внешней утечки мозгов, когда потенциально сильные молодые люди уходят или в сферу коммерции внутри страны, или вообще покидают страну из-за невозможности выжить в это экономически губительное для них время. Важно подчеркнуть также, что эта Программа целиком направлена на интересы тех стран, где она разворачивается (Россия, Украина, Белоруссия и Грузия), по-

тому что вопросы отбора лучших с самого начала планировалось решать внутри стран без какого бы то ни было участия иностранных экспертов (этим подрубались под корень столь популярные у квасных патриотов истерические протесты против кражи мозгов и секретов), притом решать таким образом, чтобы в будущем от тех, кто получит Соросовские гранты, не требовалось бы отсылать какие бы то ни было результаты их работы на Запад.

Хотя теоретические предпосылки создания такой Международной Программы были очевидны, практические вопросы механизмов отбора тех, кого следовало отнести к элите образования, были совершенно не ясны. Было бы просто прибегнуть к старым методам отбора, основанным или на создании комитетов независимых экспертов, которым априорно можно доверять, но которые на практике не могут вырваться из прокрустова ложа групповых и личных интересов преимущественной поддержки «своих», или на учете решений существующих министерств и ведомств, которые выдвигали бы «своих проверенных», или на обращении к научным советам и обществам. Эти трудности отбора существовали всегда и были особенно остры в отношении интеллектуальной сферы, где помимо чисто административных трудностей существуют трудности иного порядка: высокая конкурентность, усиленные амбиции индивидуумов, особенно тех, кто уже многого добился, где групповые интересы нередко гротескно поляризованы (вспомним знаменитое описание академиком П. С. Александровым двух диаметрально различных путей эволюции московской и петербургской математических школ, описание, целиком построенное на признании групповых интересов, помноженных на личное неприятие друг другом основателей названных школ).

Поэтому представлялось важным развить новый метод отбора Соросовских профессоров, который был бы демократичным по сути и одновременно построенным на признании количественных факторов, на использовании таких алгоритмов отбора, которые исключили бы участие индивидуумов-решателей и перевели весь процесс в область компьютерного анализа показателей, присущих каждому кандидату. Тем самым мы стремились к тому, чтобы осуществить отбор на основе строго очерченных, широких по охвату параметров, иными словами, параметров, необходимых и достаточных для отбора будущих Соросовских профессоров.

Это предложение было рассмотрено и принято на первом же заседании Правления Программы, в которое вошли академики В. Е. Захаров (теоретическая физика и математика), В. Е. Фортон (физика), А. А. Богданов (биохимия), Л. В. Хотылева (генетика), Ю. Ю. Глеба (физиология), члены-корреспонденты РАН Н. В. Карлов (физика) и В. В. Власов (физикохимия), писатели Д. А. Гранин и А. И. Приставкин, признанные авторитеты в области образования кандидаты наук В. А. Болотов и М. Б. Беркинблит, профессор В. С. Меськов и западные ученые — лауреат Нобелевской премии Джошуа Ледерберг, вице-президент Национальной академии США Питер Рэйвин, сотрудник Фонда Сороса профессор Джоди Спиро и я. В настоящее время в работе Правления принимают участие члены-корреспонденты РАН Л. И. Леонтьев и М. И. Рабинович, а на последнем заседании, где подводились итоги конкурса и определялся персональный состав 500 Соросовских профессоров, 3000 Соросовских учителей, Заслуженных Соросовских профессоров и учителей и 1800 Соросовских студентов, принял участие академик Л. Б. Окунь. Об отборе Соросовских учителей и Соросовских студентов в ближайшее время мы расскажем в газетах «Поиск» и «Учительская газета», а здесь остановимся только на подпрограмме «Соросовские профессора».

Итак, первым шагом в организации конкурса на звание Соросовского профессора стало объявление в газетах, что любой профессор или доктор наук, читающий полные курсы лекций студентам в учебных институтах (самостоятельно от начала и до конца, без подменителей и ассистентов), опубликовавший за последние пять лет не менее пяти научных работ в престижных научных журналах (или столько же монографий, книг, учебников и учебных пособий), воспитавший не менее пяти кандидатов наук и имеющий в настоящее время доход не более семи с половиной тысяч долларов в год, может претендовать на участие в конкурсе. Было также объявлено, что предложить кандидатуру будущего Соросовского профессора могут как сам кандидат, так и его коллеги или ученики (на тот случай, если сам кандидат окажется излишне застенчивым). Всего на конкурс было подано 1233 заявления. Каждому кандидату была направлена анкета, содержащая вопросы о педагогической, научной и общественной активности, о полученных премиях и грантах, о числе учеников и воспитанников и пр. Все эти данные были введены в память компьютеров, и была составлена огромная по объему начальная база данных о претендентах.

Вслед за тем сотрудники Международной Соросовской Программы взялись за исключительно трудоемкую задачу определения того, как студенты оценивают качество лекций своих учителей. На основе опыта западных вузов была составлена анкета из двадцати вопросов, на каждый из которых надо было дать ответ по пятибалльной системе. Вопросы были отобраны из хорошо известного в США сборника вопросов для оценки профессоров и охватывали разные стороны работы лектора. Так, студенты могли выставить баллы профессору за его лекторское искусство или оценить его умение взаимодействовать со студентами как независимо мыслящими индивидуумами, за его умение пробуждать интерес к исследовательской деятельности, уходить за рамки учебников в сферу новых открытий, за его человеческие качества и т. д. Для каждого кандидата предстояло в октябре опросить не менее 10 студентов. Для этого представители Программы разъезжали по всей стране и посетили занятия групп, где преподавали кандидаты. Студентам раздали анкеты, специально напечатанные так, чтобы их нельзя было подделать на месте. Разумеется, опрос был анонимным и анкеты подписывать было не нужно. Всего было опрошено около 20 тысяч студентов, которые должны были поставить оценку профессору по каждому пункту анкеты (для этого надо было зачернить один из пяти кружочков напротив каждого из вопросов). Поскольку всего в 20 тысячах анкет содержалось почти два миллиона кружочков (оценок), студенты в целом поставили четыреста тысяч оценок. Небольшая деталь вызвала у некоторых студентов затруднение: чернить кружочки с оценками в анкетах просили карандашами. При популярном в России подозрении о возможном мошенничестве на всех уровнях некоторые решили, что было бы надежнее использовать или шариковые ручки, или даже проедающие насквозь бумагу фломастеры. Однако этот казус легко разрешился: естественно, что обработать вручную двадцать тысяч анкет да еще не ошибиться в двух миллионах возможностей было нельзя в отведенные сроки. Чтобы осуществить эту работу, в США была куплена лучшая из имеющихся лазерная машина для чтения анкет. Эта машина могла прочитывать зачернения, сделанные простыми карандашами, но не «замечала» и оставляла как пустые все отметки, выполненные чернилами, шариками или фломастерами. Лазерная машина прочитывала в день до 3000 анкет, суммировала все ответы на каждый из вопросов в данной группе и затем выдавала статистически обработанный результат для каждого из кандидатов. Замечу, что только двум профессорам студенты поставили чистые пятерки по всем 20 вопросам. Средние же цифры по разным

дисциплинам колебались около значений 3,9—4,1, а довольно много профессоров заработали у студентов двойки и, разумеется, не могли далее претендовать на победу в конкурсе. Собранные цифры были введены в банк данных и существенно дополнили его. В целом анализ студенческих ответов позволил, во-первых, узнать, кто из претендентов — лучший преподаватель, а во вторых, дать количественную оценку преподавательской активности претендентов.

Следующим этапом стало выяснение количественного критерия научной активности кандидатов в Соросовские профессора. Для этого также потребовалось провести громоздкую и сложную работу: был изучен индекс цитирования каждого претендента. Изучению индексов цитирования в мире придается огромное значение, в Филадельфии существует широко известный Институт научной информации, издающий каждый месяц объемистые тома со всеми процитированными в мире работами, а в последние годы выпускающий специальные компакт-диски для лазерного считывания в компьютерах. Именно эти диски и были использованы в нашей работе.

Индекс цитирования служит важной характеристикой в оценке научной значимости любых публикаций. Известны случаи, когда научный специалист печет статьи или даже книги, как блины, но они никого не интересуют, а потому на них никто не ссылается в своих работах. Информационный шум вокруг имени такого ученого оказывается большим, а реальная научная результативность оказывается минимальной. Ссылки на то, что открытие Грегора Менделя, создавшего генетику, пролежало без всякого интереса со стороны господ биологов 35 лет, в наши дни неактуально, ибо при имеющихся путях распространения информации всякая полезная новинка подхватывается, как правило, сразу. Поэтому в наши дни пример Менделя практически повториться не может. Бывает и иная ситуация, когда сотрудники одной или нескольких родственных лабораторий печатают массу работ, в которых одни и те же авторы меняются местами или когда эта группка (группки) живет как бы в своем собственном мире: они печатают работы, ссылаясь в них только друг на друга. В научном мире их никто не признает, но и они никого не признают. В истории СССР такие примеры были нередки, вспомним хотя бы лысенковцев, у которых были даже свои журналы, свои редколлегии, свой мирок, но мирок этот оказался лженаукой. Наконец, нередки случаи, когда даже у маститых ученых солидный индекс цитирования поддерживается благодаря давным-давно выполненным классическим работам, на которые ссылаются до сих пор многие, а результативность последних работ резко уступает старым работам. В таком случае легко впасть в ошибку иного рода: отдать предпочтение тем, кто уже активно в науке не работает, и в то же время отрезать путь к получению звания Соросовского профессора талантливым молодым ученым, еще не успевшим обзавестись работами классического уровня, но, однако, выдающим каждый год работы пусть не экстра-класса, но вполне замечаемые в научном сообществе.

Правление Программы согласилось внести два новшества в изучение индекса цитирования научных работ: во-первых, учесть цитирование работ претендентов не за всю их жизнь, а только опубликованных в последние пять лет.

Этим шансы маститых академиков и молодых профессоров уравнялись. Но мы добавили еще одно важное новшество. Чтобы устранить влияние самоцитирования, столь принятого в научной среде, мы пошли следующим путем.

Из банка данных, скрупулезно собираемых Филадельфийским институтом научной информации, были выбраны все статьи данного претендента за последние 5 лет: и те, где он был первым автором, и

те, где его имя было окружено соавторами. Теперь, зная всех соавторов за последние 5 лет, мы еще раз прокрутили филаделфийский банк данных и вычли из числа цитируемых трудов все данные о цитировании своих работ претендентом и ВСЕМИ ЕГО СОАВТОРАМИ, иными словами, цитирование работ претендентов их командами. Результат подчас оказывался обескураживающим: для некоторых из академических мэтров, внешне выглядящих вполне благопристойно, оказалось, что их печатная продукция никого в мире не интересует и никем, кроме «своих», не цитируется. Зато для многих из молодых профессоров и внешне незаметных профессоров из провинциальных вузов были получены вполне весомые коэффициенты цитирования. Важно подчеркнуть, что эти цифры у некоторых из российских ученых оказались на уровне, сопоставимом с выдающимися западными учеными. Причем заметим: в конкурсе участвовали не просто сотрудники Академии наук, а лишь активно работающие преподаватели вузов в ранге профессора.

Дополнительные баллы выставлялись за опубликованные учебники и монографии, за полученные гранты, за диплом об открытиях.

Все это в целом дало возможность составить алгоритм для компьютеров, которые сами, без какого бы то ни было постороннего участия (благожелательного или критического), отобрали имена победителей. Правление было наделено правом отвести из отобранных компьютерами или добавить к их числу не более 5 % претендентов. Это право использовано лишь частично и только после длительного обсуждения.

В список отобранных таким образом Соросовских профессоров вошли представители 41 города, 117 вузов, люди в возрасте от 42 до 81 года. Почти половина из них преподает не в Москве или в Санкт-Петербурге, что, кстати, точно соответствует распределению студентов по вузам страны (на указанные два города приходится, в соответствии с официальной статистикой, 49 % студентов).

Ставшие теперь Соросовскими профессорами лауреаты получают диплом, подписанный господином Соросом, денежный грант на два года, в который будет включена не только солидная стипендия, но и небольшая сумма на поездки и оплату секретарской помощи. От каждого Соросовского профессора потребуются в конце каждого года представить короткий отчет о преподавательской активности, справку о доходах (они не должны превышать 7,5 тысячи долларов в год). Если Соросовский профессор будет отсутствовать на работе более 3 месяцев в учебном году (не по болезни), на время отсутствия ему (ей) будет приостановлена выдача гранта. Каждый Соросовский профессор будет обязан также раз в полгода прочесть лекцию о состоянии науки в своей области Соросовским учителям. Эти лекции будут опубликованы.

В целом в 1994 г. Соросовскими профессорами в Российской Федерации стали 388 человек, 83 человека были удостоены этого звания на Украине, 11 — в Белоруссии и 18 — в Грузии. Правление Международной Соросовской Программы образования в области точных наук сердечно поздравляет лауреатов с победой, желает им новых успехов в преподавании и надеется, что Соросовские профессора внесут особый вклад и в подготовку научных кадров, и в развитие науки.

**Профессор Валерий Н. Сойфер,**

академик Нью-Йорской академии наук,  
преподаватель Правления Международной  
Соросовской Программы образования

\* \* \*

Перепечатывая из газеты «Известия» статью проф. В. Н. Сойфера, редакция «Лесного журнала» стремится привлечь внимание авторов и

читателей — работников лесной высшей школы, академий и университетов, сформировавшихся на базе лесотехнических вузов, к новой благородной инициативе известного американского финансиста и филантропа Джорджа Сороса. Им образован фонд помощи высшему и среднему образованию на пятилетний срок. Эта программа включает четыре фундаментальные науки: биологию, физику, математику и химию.

Список первых лауреатов нового фонда опубликован в газете «Известия» за 17 декабря 1994 г. Среди них, по разделу «Химия», представитель российской лесной высшей школы Михаил Яковлевич Зарубин, профессор, доктор химических наук, проректор С.-Петербургской лесотехнической академии.

Поздравляем Михаила Яковлевича с почетным званием «Соросовский профессор». Надеемся, что этому заслуженному успеху способствовали и публикации статей ученого в «Лесном журнале».

Нет сомнения, что в лесных вузах вырастут новые лауреаты фонда Дж. Сороса!

Редакция «Лесного журнала»

## ИЗ ЖИЗНИ ВУЗОВ

**ПРЕЗЕНТАЦИЯ  
АРХАНГЕЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

18 ноября 1994 г. в актовом зале Архангельского, теперь уже бывшего лесотехнического, института состоялось торжественное заседание ученого совета, посвященное преобразованию института в технический университет.

Собственно, рождение университета состоялось 26 мая 1994 г., когда был издан приказ Госкомвуза Российской Федерации № 524 «О переименовании высших учебных заведений и филиалов».

Язык управленческих документов скуп, лаконичен, маловыразителен. За простым словом «переименование» всегда стоит большая работа, изменения, сдвиги. Архангельский лесотехнический давно известен как крупный авторитетный учебный и научный центр. Совсем не случайно он первым среди родственных лесных вузов еще в 1949 г. был удостоен Ордена Трудового Красного Знамени — второго в СССР, после Ордена Ленина, знака отличия за успехи в труде. Но как вузу периферийному АЛТИ, думается, надо было привести особенно веские аргументы, позволяющие подняться рангом выше — стать техническим университетом.

Как обычно бывает, большинство работников института, даже члены ученого совета, профессора-ветераны, не говоря о нынешних студентах, не представляли себе всех масштабов того, что создано усилиями их и прошлых поколений. Были и скептики как в своем коллективе, так и в городе и среди тысяч выпускников АЛТИ. Всех убедили краткий, но насыщенный красноречивыми фактами доклад ректора университета, академика Международной и Российской инженерных академий О. М. Соколова и специальные выпуски многотиражной газеты «Наш темп».

Да, темп развития АЛТИ оказался более чем достаточным, чтобы удовлетворить широким и жестким требованиям, формально предъявляемым к вузу, претендующему именоваться техническим университетом: иметь свои научные школы, выпускать специалистов не менее чем 15 специальностей, в том числе гуманитарных, готовить специалистов разных уровней, сочетать учебную работу с широкой научной деятельностью, обладать большим отрядом научных кадров с наличием докторов наук более одного на 100 студентов, иметь развитую учебную и материально-техническую базу и социально-бытовую инфраструктуру, быть известным в России и регионе, иметь развитые международные связи.

Специальной проверкой установлено, что АЛТИ обладает всеми этими характерными чертами технического университета.

Более 40 тысяч специалистов выпустил АЛТИ. Большинство из них подтвердили свой высокий профессионализм, многие занимали и занимают ключевые посты в лесном комплексе. И не только в нем: почти 40 лет, со времен совнархозов, функционируют энергетический и строительный факультеты с четырьмя специальностями, идет подготовка инженеров по автомобильному транспорту. С 1966 г. возобновлена подготовка экономистов. Вуз постепенно становился политехническим.

Сформировались и окрепли научные школы по таежному лесоводству и лесной таксации, химии древесины и целлюлозы, сухопутному и водному транспорту леса, промышленной теплоэнергетике, экономической эффективности инвестиций. Не случайно при требовании к университету иметь не менее 5 % преподавателей со степенью доктора наук или званием профессора их в АЛТИ оказалось 8,3 %. Как достижение отмечены: тематика НИР по прорывным направлениям, тематика фундаментальных научных исследований, пять выдающихся разработок ученых института за последние 5 лет. Количество авторских свидетельств, если взять их отношение к числу преподавателей, оказалось выше нормативного (39,8 и 15,0 % соответственно).

Число специальностей не ниже требуемого, а выпуск специалистов в социально-экономическом направлении (10 %) даже превышает нормативный (5 %). Отвечает требованиям процент специалистов, подготовливаемых по схеме включенного обучения в зарубежных вузах (1 % от контингента студентов и аспирантов дневного обучения); количество преподавателей, повысивших свою квалификацию за рубежом по этой же схеме, больше нормативного.

АГТУ стал семидесятым техническим университетом России. Присутствовавшим на торжественном заседании было приятно слышать высокие оценки и добрые напутствия коллег из флагмана технических университетов — Московского технического университета им. Н. Э. Баумана: проректора по НИР Б. П. Назаренко, проф. М. И. Киселева, а также вице-президента Российской Академии наук Н. П. Лавёрова. Теплыми были приветствия мэра Архангельска В. Г. Герасимова, первого заместителя главы правительства области С. В. Потемкина, многих выпускников АЛТИ. Один из них генеральный директор АО «Лесозавод № 3» А. Э. Сасс не только благодарил своих учителей и высказал надежду, что новорожденный университет продолжит славные традиции АЛТИ, но и вручил чек от своего предприятия на 25 млн р.

Коллектив университета признателен за проявления материальной поддержки. Материально-техническая база вуза пока отстает от требований: не хватает аудиторий, втрое меньше требуемого библиотечный фонд, вдвое — издательские мощности и т. д. Несколько ниже норматива интенсивность командирования сотрудников за рубеж с научными целями, хотя делается здесь очень много. Чуть ли не постоянными стали визиты зарубежных ученых и специалистов. АГТУ имеет прямые договоры о научно-педагогическом сотрудничестве с Янгеллонским университетом (г. Краков, Польша); совместные научные исследования с учеными этого университета ведутся с 1991 г. В 1993 г. заключен договор о сотрудничестве с техническим вузом Остфриесланд (г. Эмден, Германия), термохимическим центром (г. Лунд, Швеция), университетом штата Мэн (США) и вузами Норвегии. Наш вуз принимает активное участие в международной программе «Баренц-регион». Создается «Лесная школа» по договору с администрацией области и советом Вестерботена (Швеция). Начата подготовка специалистов по оценке недвижимости через международную организацию ФИАБСИ. Органичной частью презентации стало присвоение звания почетного доктора АГТУ ректору Эмденской высшей технической школы Харро Оленбургу.

Презентация АГТУ состоялась накануне проведения в Архангельске традиционных ежегодных Ломоносовских чтений, посвященных на этот раз проблемам развития высшего образования в России и на Севере. Днем раньше была презентована Архангельская государственная медицинская академия. А именинников опередил еще в 1993 г. Поморский международный педагогический университет им. М. В. Ломоносова. Архангельск стал университетским городом.

---

Громкие названия радуют, но и обязывают. За 65 лет, прошедшие со дня открытия Архангельского лесотехнического института, накоплен богатый опыт, отмеченный преемственностью поколений ученых и педагогов, хорошими студенческими традициями.

Пусть университетский статус будет сигналом, стимулом для новых достижений!

**Е. С. Романов**

Архангельский государственный технический университет

---

## НАУЧНЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ И СОВЕЩАНИЯ

УДК 061.3 : 674.047

IV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ИЮФРО  
ПО СУШКЕ ДРЕВЕСИНЫ

Сушка древесины является важным технологическим процессом в деревообработке.

В последние годы исследователи многих стран уделяют все большее внимание вопросам повышения качества и снижения себестоимости сушки, а также совершенствования сушильной техники. Значительную роль в координации усилий ученых разных стран, работающих в области теории, техники и технологии сушки древесины, играют конференции ИЮФРО.

Очередная IV Международная конференция ИЮФРО по сушке прошла с 9 по 13 августа 1994 г. в Роторуа (Новая Зеландия). Она была организована Новозеландским лесным исследовательским институтом. На церемонии ее открытия выступил д-р М. Ванек — организатор предыдущей конференции в Вене (Австрия) в 1992 г. Он сделал краткий обзор работ по сушке древесины, выполненных за прошедшие два года.

Организатор нынешней конференции — д-р А. Хаслет, руководитель группы по сушке древесины Новозеландского лесного исследовательского института сообщил, что на IV Международную конференцию прибыли 112 ученых из 22 стран всех континентов, представлено 71 доклад (из них 21 стендовый).

Первое пленарное заседание началось с доклада М. Ванека и Ф. Камке (США) «Сравнение моделей сушки древесины», где рассматривались результаты компьютерного моделирования влажностного состояния пиломатериалов в процессе сушки и экспериментальные данные. Авторы проанализировали результаты моделирования с использованием исходных данных, полученных от 31 исследователя из 16 стран. Наиболее удачными оказались 12 моделей, в том числе и модель, разработанная в Московском государственном университете леса Б. Н. Уголевым, Н. В. Скуратовым (Россия). В докладе отмечено, что в настоящее время не существует универсальной математической модели процесса сушки пиломатериалов. По мнению авторов, существенное расхождение результатов моделирования связано с различными подходами к описанию процесса тепломассопереноса в древесине и определению ее коэффициентов.

Р. Кей (Новая Зеландия) представил обзор, посвященный тепломассопереносу при камерной сушке, в котором изложены результаты анализа системы уравнений, описывающей влагообмен древесины с сушильным агентом в зависимости от режима сушки и характера циркуляционных процессов в камере. Автор отмечает различие коэффициентов влагопереноса в ядровой и заболонной древесине, существенно влияющее на равномерность сушки пиломатериалов, и указывает на положительную связь между реверсированием воздушного потока в камере и качеством сушки.

Дальнейшие заседания проходили по секциям. На секции I «Исследование механизма сушки древесины» были представлены доклады, посвященные изучению влагообмена и влагопереноса в древесине при

сушке. В докладе А. Клоде (Канада) приведены результаты исследования динамики и кинетики низкотемпературного процесса сушки древесины. Методом конечных элементов решена двухмерная задача влагопроводности. Дана оценка влияния начальных и граничных условий, коэффициентов переноса на результаты численного моделирования. П. Перре (Франция) в своем выступлении раскрыл существенное влияние анатомического строения древесины на ее поведение в процессе сушки. Отмечено, что напряжения, возникающие на уровне микроструктуры древесины, являются причиной ее деградации при сушке. Интересная модель переноса свободной воды в древесине представлена И. Канагавой (Япония). Доклады М. Милота (США) и Т. Лангриша (Австралия) посвящены анализу влагообмена в штабеле пиломатериалов. Группа ученых из Новой Зеландии представила результаты исследования механизма диффузии пара в древесине сосны. А. Хантер (Австралия) изложил результаты моделирования переноса воды в древесине на базе диффузионного потенциала. В совместном докладе ученых из США и Австралии приведена характеристика механизма влагопереноса в древесине различных твердолиственных пород. О. Содестрем (Швеция) привел результаты экспериментальных исследований влияния различных факторов на интенсивность влагообмена при конвективной сушке древесины. Доклад В. Олека (Польша) посвящен исследованию влияния параметров сушильного агента на кинетику сушки буковых пиломатериалов.

На секции 2 а рассмотрено напряженно-деформированное состояние древесины при сушке. В докладе Р. Букера (Новая Зеландия) раскрыта взаимосвязь между коллапсом и растрескиванием древесины при сушке. Явление коллапса при низкотемпературной сушке эвкалиптовых пиломатериалов также было темой доклада Х. Фермааса (Южная Африка). Результаты анализа влияния непрерывных и прерывистых режимов сушки на усушку и растрескивание эвкалиптовых пиломатериалов изложены в выступлении С. Чейфа (Австралия). В докладе Н. В. Скуратова и Б. Н. Уголева (Россия) рассмотрены деформационные превращения в древесине при сушке и проанализированы явления механо-сорбционной ползучести. В докладах О. Далблома (Швеция), А. Мартенсона (Швеция), Д. Салина (Финляндия), А. Ранга-Маунуса (Финляндия), П. Дое (Австралия) описаны математические модели напряженно-деформированного и влажностного состояния древесины при сушке различной сложности. С. Свенсон (Швеция) изложил результаты экспериментов по определению свободной усушки и усадки древесины сосны.

Параллельно проходила секция 2 б, посвященная улучшению технологии сушки древесины. Термодинамический анализ системы древесина — влажный воздух, применительно к конвективной сушке, был представлен в докладе М. Тамаси-Бано (Венгрия). Л. Оливера (Канада) изложил результаты экспериментального исследования влияния режимов сушки и скорости циркуляции воздуха в камере на продолжительность и качество сушки пиломатериалов. Результаты использования ультразвукового метода измерения локальной влажности пиломатериалов в процессе сушки приведены в выступлении Д. Тейлора (Великобритания). Новые возможности применения тепловых насосов для сокращения энергетических затрат при сушке древесины обсуждены в докладе К. Каррингтона (Новая Зеландия). В обзоре Д. Ресела (Германия) дана оценка современного уровня развития вакуумной сушильной техники и технологии для пиломатериалов. В. Смит (США) и А. Розе (Австралия) посвятили свои доклады анализу особенностей сушки пиломатериалов из древесины твердых лиственных пород в вакуумно-диэлектрических камерах. Интересный способ сокращения про-

должительности сушки толстых сортиментов из древесины с низкой влажностью изложил Н. Хаттори (Япония). Для увеличения скорости сушки на пластах брусьев с помощью лазера делались тонкие продольные надрезы. В докладе В. Хедланда (Швеция) изложена методика измерения внутреннего давления и температуры в древесине при вакуумной сушке.

На секции 3 рассмотрены вопросы измерения и способы снижения сушильных напряжений. Д. Велинг (Германия) и Б. Эспинг (Швеция) представили результаты работы по подготовке новых национальных и Европейских стандартов качества сушки пиломатериалов из древесины хвойных и лиственных пород. Проблеме совершенствования методики контроля сушильных напряжений посвящен доклад Д. Фуллера (США). Вопросы теоретического и экспериментального обеспечения системы контроля состояния пиломатериалов в процессе камерной сушки обсуждены в выступлении Д. Вилджона (Южная Африка). В. Фортин (Канада) описал конструкцию и принцип действия датчика поверхностных деформаций, который может быть использован для контроля низкотемпературного процесса сушки пиломатериалов. Р. Литл (США) привел результаты экспериментальных исследований по снятию сушильных напряжений путем распыления холодной воды в сушильной камере. Т. Морен (Швеция) раскрыл вопросы улучшения технологии пропаривания и кондиционирования пиломатериалов при низкотемпературной сушке.

На секции 4 были представлены новые технологии сушки древесины. В докладе К. Хаяши (Япония) раскрыт способ интенсификации сушки четырехкантных брусьев за счет локального нагрева насыщенным паром. Р. Чен (США) изложил результаты экспериментальной работы по определению физико-механических характеристик древесины, подвергнутой обработке паром. Первые результаты экспериментального исследования двухстадийного способа сушки древесины с использованием избыточного давления приведены в докладе В. Шила (Германия). Вопросам повышения качества и эффективности сушки пиломатериалов топочными газами посвящено выступление Т. Номуры (Япония). В докладе Ф. Тейлора (США) представлены результаты экспериментов по улучшению технологии консервирования деревянных столбов путем их предварительной подсушки в сушильной камере перед пропиткой.

Проблемы развития высокотемпературной сушки древесины рассмотрены на секции 5. В докладе В. Фергюсона (Австралия) обсуждена математическая модель высокотемпературного процесса сушки, использованная для анализа кинетики сушки австралийской сосны. Изучению влияния низко- и высокотемпературных режимов сушки на физико-механические свойства древесины сосны посвящено выступление И. Симпсона (Новая Зеландия). В докладе Р. Кея (Новая Зеландия) отражены проблемы математического моделирования поведения пиломатериалов с различным содержанием ядровой и заболонной древесины при высокотемпературной сушке. Результаты экспериментальных работ по повышению интенсивности и улучшению качества высокотемпературной сушки древесины сосны приведены в докладе Р. Норвея (Австралия). В докладе В. Гарда (Нидерланды) рассмотрены вопросы использования компьютерной модели высокотемпературной сушки для разработки эффективных режимов и управления процессом.

Значительная часть представленных на конференцию докладов была посвящена математическому моделированию поведения древесины в процессе сушки, изучению теплопереноса в древесине и ее напряженно-деформированного состояния, получению физико-механических характеристик древесины различных пород. Это отражает возрастающий интерес ученых многих стран к фундаментальным исследова-

ниям свойств древесины, на базе которых возможно дальнейшее совершенствование сушильной техники и технологии.

Следующую конференцию решено провести в 1996 г. в Торонто (Канада). Следует ожидать, что вопросы сушки древесины найдут свое отражение на XX Мировом конгрессе ИЮФРО, который состоится в 1995 г. в Финляндии.

Участие в Конференции ученых из МГУЛ (акад. А. Н. Обливин, доц. Н. В. Скуратов) способствовало расширению международных связей университета. Достигнута договоренность о визите в МГУЛ ответственного сотрудника лесной службы Министерства сельского хозяйства США д-ра Х. Розена. Предполагается обсудить возможности сотрудничества в разработке новых композиционных материалов на основе древесины и совершенствовании технологии сушки древесины.

А. Н. Обливин, Н. В. Скуратов  
Московский государственный университет леса

---

## НЕКРОЛОГИ

## ПАМЯТИ ИВАНА СТЕПАНОВИЧА МЕЛЕХОВА



6 декабря 1994 г. из Москвы пришла печальная весть: умер Иван Степанович Мелухов — патриарх отечественного лесоводства, крупнейший ученый с мировым именем, академик РАСХН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заслуженный деятель науки России.

Родился Иван Степанович 15 сентября 1905 г. в д. Жаровиха (ныне в черте г. Архангельска) Архангельского уезда Архангельской губернии в семье рабочего лесопильного завода.

Трудовую жизнь он начал 9-летним мальчиком в качестве погонщика лошадей на лесопильном заводе. Полубив с раннего детства природу родных северных лесов, он избрал путь лесоведа. После окончания в 1930 г. Ленинградской лесотехнической академии И. С. Мелухов в течение многих лет изучал леса Европейского Севера, сочетая научные исследования с преподавательской работой в Архангельском лесотехническом институте. Уже в ранних научных публикациях им глубоко затронуты вопросы естественного возобновления ели, природы лесных пожаров, анатомического строения и физико-механических свойств древесины хвойных пород нашего Севера.

С 1934 г. по 1951 г. и с 1952 г. по 1962 г. И. С. Мелехов был заведующим кафедрой общего лесоводства Архангельского лесотехнического института, а в 1951—1952 гг. и Ленинградской лесотехнической академии. Одновременно (с 1936 г.) он проводил исследовательскую работу в системе АН СССР: 1936—1943, 1945—1960 гг.—руководитель научных экспедиций АН СССР по изучению лесов Севера; 1938—1942 гг.—руководитель лесной группы Северной базы АН СССР; 1942—1943 гг.—и. о. директора Архангельского стационара АН СССР; 1943—1957 гг.—сначала руководитель лесной группы стационара, 1957—1958 гг.—директор Северного отделения Института леса АН СССР. В 1956 г. И. С. Мелехов избран действительным членом (академиком) Всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В. И. Ленина (ВАСХНИЛ). И. С. Мелехов — организатор и первый директор Института леса и лесохимии АН СССР в Архангельске (1958—1962 гг.).

Широкое и систематическое изучение сплошных концентрированных вырубок Севера позволило И. С. Мелехову фундаментально разработать новое научное направление — типологию вырубок. Основным объектом научного познания стала для него природа леса в целом, где лес рассматривается как природная система, региональное явление, а тип леса раскрывается как динамическая система на биогеоценозном (экосистемном) уровне. Разработанное им учение о динамической типологии позволяет познавать лес в развитии, глубоко понимать прошлое и настоящее, решать практические задачи лесоводства и предвидеть будущее.

В 1962—1966 гг. И. С. Мелехов работал заместителем Председателя Государственного комитета по лесной, целлюлозно-бумажной, деревообрабатывающей промышленности и лесному хозяйству Совмина СССР (позднее при Госплане СССР). С 1965 г. по 1971 г.—академик-секретарь Отделения лесоводства и агролесомелиорации ВАСХНИЛ и член президиума ВАСХНИЛ.

К этому времени им капитально разработаны и обобщены вопросы рубок главного пользования, что получило отражение в монографии «Рубки главного пользования», вышедшей двумя изданиями (в 1962 и 1966 гг.). Он продолжает углубленные исследования в области экологической анатомии и камбиальной деятельности древесных пород в различных природных условиях; занимается проблемой комплексной продуктивности леса и путей ее повышения. Посвятив всю свою жизнь изучению лесов нашей страны, И. С. Мелехов хорошо знал леса и лесное хозяйство многих зарубежных стран (Чехословакия, Финляндия, США, Австрия, Швеция, ГДР, Румыния, Испания, ФРГ, Норвегия, Италия, Польша, Венгрия).

Решая многогранные вопросы лесоведения и лесоводства, И. С. Мелехов вкладывал много труда в воспитание и подготовку инженерных и научных кадров. Им подготовлено более 50 кандидатов и докторов наук. С 1962 г. он заведовал кафедрой лесоводства Московского лесотехнического института. В 1980 г. им выпущен учебник-монография «Лесоведение», получивший высокую оценку ученых. За этот труд он был удостоен высокой награды — стал лауреатом золотой медали им. Г. Ф. Морозова. В 1983 г. И. С. Мелеховым завершена публикация объемного учебного пособия «Лесная пирология», состоящего из пяти выпусков. В нем воплощено целостное учение о природе лесных пожаров и их последствиях, методах борьбы с пожарами и использовании положительной роли огня в лесном хозяйстве.

И. С. Мелехов — автор почти 300 работ по лесоведению, лесоводству и различным вопросам лесного хозяйства. Многие из них получили широкую известность и признание не только в нашей стране, но и за рубежом.

Иван Степанович — иностранный член Королевской Шведской академии сельского и лесного хозяйства (1968 г.); Венгерской академии наук (1979 г.); почетный член Лесного общества Финляндии (1969 г., член-корреспондент — 1962 г.); доктор honoris causa Брненского сельскохозяйственного университета (1966 г.).

И. С. Мелехов активно участвовал в международных лесных конгрессах, симпозиумах, конференциях. Он выступал с докладами на V (США) и VI (Испания) Мировых лесных конгрессах; на XIII (Австрия), XIV (ФРГ) и XV (США) конгрессах Международного союза лесных исследовательских организаций. Был вице-президентом VI Мирового лесного конгресса и председателем первой пленарной сессии этого конгресса. В 1967 г. на XIV конгрессе ИЮФРО избран членом Постоянного комитета Международного союза лесных исследовательских организаций, на XV конгрессе (1971 г.) — членом исполбюро ИЮФРО. Участвовал в Международном симпозиуме «Лес и внешняя среда»; являлся председателем комитета «Лесоводство» на XIV Тихоокеанском научном конгрессе (1979 г.).

Как у нас в стране, так и за рубежом известны работы И. С. Мелехова и в области лесной науки. Им вскрыты и показаны научные положения и предвидения М. В. Ломоносова, касающиеся важных сторон лесной науки. В 1957 г. И. С. Мелеховым была выпущена монография «Очерк развития науки о лесе в России». После книги Ф. К. Арнольда «История лесоводства в России, Франции и Германии», вышедшей в конце XIX в., это первая и пока единственная значительная работа нашего времени по истории лесной науки. В 1970 г. И. С. Мелехов выступал с докладом на Международном конгрессе историков в Москве и был избран в состав постоянно действующей Международной исторической комиссии по лесу от СССР.

В 1977 г. И. С. Мелехов создал и возглавил Комиссию по истории лесов СССР при секции охраны природы Московского общества испытателей природы.

И. С. Мелехов был членом КПСС с 1945 г., вел большую общественную работу. Он избирался депутатом Архангельского городского Совета депутатов трудящихся четырех созывов (1934—1953 гг.), депутатом Верховного Совета СССР пятого созыва (1958—1962 гг.). В 1966—1967 гг. являлся председателем научно-технического совета Министерства лесного хозяйства РСФСР, в 1967—1980 гг. — председателем научно-технического совета Государственного комитета лесного хозяйства Совета Министров СССР, в 1971—1975 гг. — председателем Экспертной комиссии ВАК по лесным специальностям. И. С. Мелехов — один из зачинателей и член редколлегии «Лесного журнала» (1958 г.), с 1980 г. по 1993 г. его главный редактор, а затем зам. гл. редактора этого периодического издания; он также был членом редколлегий журналов «Лесное хозяйство» и «Лесоведение».

За большую плодотворную деятельность И. С. Мелехов награжден орденом Ленина, орденом Октябрьской Революции, двумя орденами Трудового Красного Знамени и многими медалями.

В последние годы жизни И. С. Мелехов талантливо написал замечательные воспоминания о Лесотехнической академии и о родном Севере, изданные в трех брошюрах (1992, 1993 гг.); читаются они с захватывающим интересом и не оставляют равнодушными читателей.

Большая эрудиция, доброжелательность, чуткость к окружающим снискали глубочайшее уважение коллег, учеников, студентов, всех, с кем общался Иван Степанович, кто его знал лично.

Имя маститого ученого-лесоведа навечно вписано золотыми буквами в скрижали истории лесной науки, а научное наследие его будет всегда служить отечественному лесоводству на благо русского леса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ  
О ЖИЗНИ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И. С. МЕЛЕХОВА

- [1]. Мелехов И. С.: [Библиография трудов] // Козмин Н. Д. Перечень печ. работ Ин-та / Арханг. лесотехн. ин-т.—Архангельск, 1941.—С. 14—16. [2]. 50-летие профессора Ивана Степановича Мелехова // Лесн. хоз-во.—1956.—№ 2.—С. 82—83. [3]. Анисимов А. Иван Степанович Мелехов // Вестн. с.-х. науки.—1965.—№ 12.—С. 137. [4]. Исследователь, ученый, педагог // Лесн. хоз-во.—1965.—№ 9.—С. 24—25. [5]. Чертовской В. Г., Войчалъ П. И. Юбилей И. С. Мелехова // Лесн. журн.—1965.—№ 5.—С. 175.—(Изв. высш. учеб. заведений). [6]. Keresztesi V. [I. Sz. Melehov a 60 születesnapja] // As erdő.—1965.—Vol. 14, N 11.—P. 527. [7]. Ключев С. В. Библиография основных трудов И. С. Мелехова // Вопросы таежного лесоводства на Европейском Севере.—М., 1967.—С. 311—318. [8]. Akademiemitglied Prof. Dr. Ivan Stepanovic Melechow 65 Jahre // Arch. Forstwes.—1971.—Bd 20, N 2.—S. 205—211. [9]. Виноградов В. Н., Бойко Н. П., Калашников А. Ф. К 70-летию академика ВАСХНИЛ Ивана Степановича Мелехова // Вестн. с.-х. науки.—1975.—№ 9.—С. 96—97. [10]. И. С. Мелехову—70 лет // Лесн. хоз-во.—1975.—№ 9.—С. 17. [11]. Thomasius H., Pfalz W. Akademiemitglied Prof. Dr. Dr. h. c. Ivan Stepanovic Melechow zum 70: Geburtstag. // Soz. Forstwirtschaft.—1975.—N 11.—S. 351. [12]. Юбилей академика ВАСХНИЛ Ивана Степановича Мелехова // Лесн. журн.—1975.—№ 4.—С. 171—173.—(Изв. высш. учеб. заведений). [13]. Иван Степанович Мелехов: (К 70-летию со дня рождения) // Лесоведение.—1976.—№ 1.—С. 92—93. [14]. Кайрюкштитс Л. А. Значение трудов И. С. Мелехова в развитии лесоводства // Современные исследования продуктивности и рубок леса.—Каунас, 1976.—С. 7—15. [15]. Список печатных научных работ И. С. Мелехова // Там же.—С. 28—40. [16]. Чертовской В. Г., Синников А. С. Иван Степанович Мелехов // Вопросы лесовосстановления на Европейском Севере.—Архангельск, 1976.—С. 3—15. [17]. Keresztesi V. I. Sz. Melehov az mta tiszteletbeli tagja // Az erdő.—1979.—Vol. 28, N 9.—P. 410. [18]. Иван Степанович Мелехов / Ф. К. Невядомская.—М., 1981.—32 с. [19]. Юбилей академика ВАСХНИЛ И. С. Мелехова (к 75-летию со дня рождения) // Лесн. журн.—1980.—№ 4.—С. 134—136.—(Изв. высш. учеб. заведений). [20]. Иван Степанович Мелехов (к 80-летию со дня рождения) // Лесн. журн.—1985.—№ 4.—С. 132—134.—(Изв. высш. учеб. заведений). [21]. Ивану Степановичу Мелехову—85 лет // Лесн. журн.—1990.—№ 4.—С. 136.—(Изв. высш. учеб. заведений). [22]. Неволин О. А. Лесная типология в северном лесоустройстве.—Л.: ЛТА, 1984.—48 с. [23]. Мелехов И. С. Альма матер. Воспоминания о Лесотехнической академии. Ч. I. Студенческие годы.—СПб.: ЛТА, 1992.—98 с. [24]. Мелехов И. С. Альма матер. Воспоминания о Лесотехнической академии. Ч. II. Возвращение в академию и уход из нее.—СПб.: ЛТА, 1993.—108 с. [25]. Мелехов И. С. О родном Севере (из воспоминаний).—Архангельск, 1993.—113 с. [26]. Факультет лесного хозяйства / Госкомитет РФ по высшему образованию. Архангел. лесотехн. ин-т.—Архангельск, 1994.—37 с.

Московский государственный университет леса  
Архангельский государственный технический университет  
Санкт-Петербургская лесотехническая академия  
Архангельский институт леса и лесохимии  
Редколлегия и редакция «Лесного журнала»  
Коллеги и ученики

**УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ,  
ПОМЕЩЕННЫХ В «ЛЕСНОМ ЖУРНАЛЕ»  
В 1994 г.**

- Веретенников А. В. Кафедра ботаники и физиологии растений Воронежской государственной лесотехнической академии — 55 лет. № 4—16.
- Попов В. К., Успенский В. В. 75 лет Воронежской высшей школе лесоводов. № 4—7.
- Терентьев О. А. Комплексное использование и воспроизводство древесного сырья: достижения и проблемы. № 3—7.
- Шаталов В. Г. Лесная наука в Воронеже. № 4—13.

**ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО**

- Арефьев Ю. Ф. Энтормезистентность лесных монокультур. № 4—73.
- Артюховский А. К., Шаталов В. Г., Артюховская Е. А., Левов А. И. Газма-фон воздуха в различных типах лесорастительных условий и насаждениях зеленой зоны Воронежа. № 4—30.
- Бабич Н. А., Прохоров В. П. Влияние осадков и температуры воздуха на прирост культур сосны в высоту. № 1—18.
- Бабич Н. А. Продуктивность культур сосны на Европейском Севере. № 2—14.
- Бельчинская Л. И., Мезенцева В. Т., Краснобаярова Л. В., Шевченко Р. Г. Влияние паров стирола и ацетона на функциональную активность дуба черешчатого и березы бородавчатой. № 4—81.
- Бельчинская Л. И., Мезенцева В. Т., Краснобаярова Л. В. Оценка устойчивости семян *Pinus silvestris* L. к промышленным органическим газовым выбросам. № 4—84.
- Бельчинская Л. И., Мезенцева В. Т., Краснобаярова Л. В. Использование электрофизиологического метода для определения древесных биондикаторов стирола. № 4—87.
- Беспаленко О. Н., Загороднев А. Н. Естественное возобновление сосны обыкновенной и Цинных борах. № 4—64.
- Варфоломеев Л. А., Рыбинская А. П. Об агроэкологической сущности переработки отходов окорки древесины на органические удобрения. № 2—18.
- Веретенников А. В. Горизонты лесной биотехнологии. № 1—7.
- Веретенников А. В., Колесниченко В. М. Культура тканей и клонирование гибридов тополя. № 4—35.
- Веретенников А. В. Влияние засоряющих растворов на всхожесть и энергию прорастания семян сосны обыкновенной и акации белой. № 4—43.
- Веретенников А. В., Корчагин О. М. Фотосинтез всходов древесных растений при различном режиме освещения. № 4—45.
- Войнов Г. С. Оценка продуктивности сосновых лесов Архангельской области на типологической основе в статике. № 1—27.
- Горобцев А. И. Продуктивность плантажи прутьевых ив в Воронежской области. № 4—57.
- Гусев И. И., Неволин О. А., Третьяков С. В. Леса и лесистость Архангельской области. № 3—10.
- Гутман А. Л., Луния А. И., Вахтель В. М., Матвеев Н. Н., Шалин А. Н., Бучнева А. И. Особенности миграции цезия-137, осевшего в составе атмосферных выпадений при аварии ЧАЭС в лесных биоценозах центральной лесостепи. № 4—76.
- Карамышев В. Р. Особенности конструкции и расчета упругопредохранительной муфты лесохозяйственных машин. № 4—90.
- Карамышев В. Р. Расчет и исследование фрикционной упругопредохранительной муфты лесохозяйственных машин. № 4—93.
- Колесниченко В. М., Веретенников А. В. Опыт по генетической трансформации гибридов тополя. № 4—38.
- Колесниченко В. М., Веретенников А. В. Культура тканей и клонирование гибридов ореха. № 4—40.
- Мамонов Д. Н. Динамика таксационно-биометрических показателей зеленомошных сосняков Иркутской области. № 4—60.
- Орловский С. Н., Филимонов Э. Г. Оптимальные параметры лесопожарных агрегатов. № 1—32.
- Попов В. К., Царев В. А. Особенности роста различных клонов и гибридов тополя в условиях Волгоградской области. № 4—19.
- Попов В. К., Бочаров О. С. Автоматизация задач ведения лесного хозяйства. № 4—23.
- Посметьев В. И. К исследованию надежности лесных дисковых почвообрабатывающих орудий. № 4—86.
- Сабо Е. Д., Турбин А. А. Класс текущего бонитета по верхней высоте и его использование при бонитировании и анализе хода роста древостоев. № 1—11.
- Серников М. Т., Паринов В. Т. Соотношение таксационно-морфологических и биометрических показателей деревьев в дубраве сырьевой Шипова леса. № 4—70.
- Таранков В. И., Матвеев С. М. Радиальный прирост древостоев сосны обыкновенной в зоне действия промышленного загрязнения. № 4—47.
- Таранков В. И., Миленин А. И. Эколого-лесоводственные особенности морфологической структуры популяций дуба черешчатого различных фенологических разновидностей. № 4—51.
- Таранков В. И., Матвеев С. М., Вьонг Ван Кунь, Мамонов Д. Н. Особенности радиального прироста хвойных пород Иркутской области. № 4—54.
- Турчин Т. Я. Оценка и прогноз успешности порослевого возобновления дуба в пойменных лесах Дона. № 2—32.
- Тюрин Е. Г. Динамика таксационных показателей модальных древостоев Европейского Севера. № 1—23.
- Угрин А. И. Организация лесокультурной площади на основе парцеллярной структуры эдафических условий. № 2—29.
- Усольцев В. А., Мельникова И. В., Нагимов З. Я., Теткин С. В. Оценка массы крон сосны с использованием биологически обусловленных взаимосвязей. № 2—7.
- Успенский В. В., Мироненко А. В. Моделирование динамики сосновых древостоев с использованием сплайн-функции. № 4—65.
- Хайретдинов А. Ф., Габдельхаков А. К., Габдрахимов К. М. Распределение надземной фитомассы в сырьевых линиях Башкирского Предуралья. № 1—14.
- Шаталов В. Г., Казанцев И. Я., Акимов П. В. Состояние пойменных лесов и режим влажности почв в низовьях р. Северского Дона. № 4—26.
- Якушева Т. В., Кузнецов Е. Н., Грязькин А. В. Динамика роста молодого поколения ели под пологом древостоев и на вырубках. № 2—24.

**ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ**

- Вихарев А. Н. Выбор оптимальных параметров анкерных береговых опор. № 3—27.
- Демидовский Б. Б., Васильев-Козлов Б. Д., Орленко О. Д. Результаты испытаний гребневых тормозных колодок из чугуно-капронового прессматериала на маневровых тепловозах. № 1—58.
- Жуков А. В., Бобровский С. Э. Исследование динамической нагруженности трансмиссии колесного лесного трактора на базе МТЗ-82 № 1—38.
- Коровкин Р. Л., Казанцев В. В. Динамическое воздействие тепловоза ТУ-7 на переносные

- конструкции элементов временных путей. № 2—55.
- Кочнев А. М. Методика выбора конструктивных параметров балансирных тележек колесных лесопромышленных тракторов. № 1—53.
- Кучерявый В. И. Моделирование ресурса деталей лесных машин по критерию трещиностойкости. № 2—52.
- Мазуркин П. М. Функциональная классификация лесных машин. № 1—47.
- Мазуркин П. М. Производительность лесозаготовительной машины. № 2—42.
- Мазуркин П. М. Биотехническая эффективность проектируемых лесозаготовительных машин. № 2—46.
- Морозов С. И. К вопросу о решении задачи удара на лесотранспорте. № 1—40.
- Морозов С. И. Методика решения задачи удара колеса о рельс в стыках. № 2—35.
- Станчев Д. И., Жуков В. Т. О повышении срока службы лесных машин и оборудования за счет применения перспективных материалов. № 4—99.
- Харитонов В. Я., Гагарин П. Н., Долгова И. И. Лесотранспортная единица для первоначального лесосплава. № 3—18.
- Харитонов В. Я., Долгова И. И. Внутренний искусственный подплав для пучков недостаточной плавучести. № 3—23.
- Шкалов Е. А., Втюрина З. Д. Потребление и рекуперация электроэнергии при спуске на воду пучков бревен. № 1—50.

## МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

- Алексеев А. Е. О построении процесса производства пилопродукции с учетом способности древесины к деформированию. № 2—74.
- Алексеев А. Е. Ограничение способности пилопродукции к деформированию. № 3—47.
- Алексеев А. Е. Улучшение показателей распиловки бревен по образующей. № 3—51.
- Алексеев А. Е. О выборе положения бруса перед раскроем. № 3—58.
- Алексеев А. Е. Влияние ширины пластин на характер деформированного состояния брусьев. № 5—6—20.
- Алексеев А. Е. Влияние глубины обработки на характер деформированного состояния брусьев. № 5—6—23.
- Варфоломеев Ю. А., Костина Е. Г. Воздействие антисептиков на рост растений и генерацию ими активных форм кислорода. № 2—69.
- Глазков С. С., Семенова Л. К., Шут Н. И. Рекуперация отходов переработки коры пробкового дуба. № 4—103.
- Землянухин А. И. Об улучшении работы местных отсосов деревообрабатывающих станков. № 4—101.
- Ершов С. В. О двух подходах в расчете колебаний вращающегося диска пилы. № 2—78.
- Иванов Ю. М. Влияние размеров элементов на прочность конструкций при изгибе. № 1—62.
- Колешня А. Д., Никулин С. С. Стабилизация эксплуатационных свойств древесины. № 4—105.
- Межов И. С. Экономико-математическая модель переработки древесины с применением брусово-сегментного способа раскроя бревен. № 1—71.
- Межов И. С. Оптимизация раскроя древесины на комплексные изделия. № 2—65.
- Обливин А. Н., Спириин Л. А. Математическая модель прогнозирования физико-механических свойств ДСП. № 5—6—7.
- Онегин В. И., Паянский-Гвоздев В. М., Соена Л. М. Экспертные задачи принятия решений в технологии деревообработки. № 3—33.
- Полубояринов О. И., Сорокин А. М. Физические свойства еловой коры и ее компонентов. № 3—43.
- Серов Е. Н. Особенности разрушения стандартных образцов и их связь с работой конструкций. № 1—75.
- Суровцева Л. С., Волкова З. А. Использование низкокачественных пиломатериалов на заготовке для поддонов. № 3—40.
- Суровцева Л. С., Волкова З. А. Об использовании низкокачественных пиломатериалов на заготовке для поддонов. № 5—6—18.
- Турушев В. Г., Алексеев А. Е. Технологическое и информационное обеспечение многоцелевого раскроя круглых лесоматериалов. № 1—66.
- Турушев В. Г., Алексеев А. Е., Пастухова Е. В. Повышение эффективности использования кусковых отходов лесопиления. № 2—60.
- Филонов А. А., Тарасова А. И., Глазков С. С., Седых В. А. Повышение формоустойчивости древесины хвойных пород. № 4—108.

## ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

- Апушкинский А. Г., Пономарев Д. А. Сульфатная варка древесины березы в присутствии лесохимической смолы. № 5—6—10.
- Боголюбын К. Г., Рябева Н. В., Волкова И. Н., Вацке Н. Исследование конформационных превращений диоксанлигина в органических растворителях. № 5—6—109.
- Васильев С. Н., Троскина М. Ю., Рощин В. И., Ягодин В. И. Математическое описание процесса экстрагирования биологически активных веществ из древесной зелени. № 5—6—122.
- Васильев С. Н., Рощин В. И., Ягодин В. И., Троскина М. Ю., Аксенова Е. Г., Абишев Р. Ш. Исследование кинетических закономерностей процесса извлечения биологически активных веществ из древесной зелени. № 5—6—126.
- Васильев С. Н., Барчукова М. В., Ягодин В. И., Троскина М. Ю. Влияние измельчения сырья при извлечении биологически активных веществ древесной зелени. № 5—6—131.
- Веретнов А. К., Бывшев А. В., Кольцова И. М. Строение волокнистой структуры целлюлозных суспензий. № 5—6—93.
- Вураско А. В., Меньшиков С. Ю., Агеев А. Я., Петров Л. А., Скобелева В. Д., Беляева Г. Ф., Кокшаров В. Г., Андрейков Е. И. Каталитическая делигнификация древесины. № 3—94.
- Гелес И. С., Мелех М. В., Клеманский Ю. М., Коржова М. А., Левкина Г. М. Изучение химического состава и строения целлюлозы коры ели, сосны и лиственницы. № 1—92.
- Гелес И. С., Левкина Г. М. Влияние морфологии трахеид сосны и ели на результаты сульфитной варки и свойства получаемой небеленой целлюлозы. № 2—96.
- Гермер Э. И., Горенков Р. А. Интенсификация кислородно-щелочной делигнификации лигноцеллюлозных материалов с помощью 1, 10-фенаптролина. 5. Роль металлов, содержащихся в древесине, в реализации каталитического действия 1, 10-фенаптролина. № 3—90.
- Григорьев Л. Н. Критерий сравнительной оценки способов очистки выбросов в атмосферу. № 5—6—77.
- Гурьев А. В., Комаров В. И., Чижов Г. И. Формирование характеристик деформативности и прочности картона-лайнера в технологическом потоке КДМ. № 1—86.
- Дерманов Н. К., Йонсен Г. И. Абсорбционно-каталитическая очистка от сероводородо-дымовых газов содорегенерационных котлоагрегатов сульфатно-целлюлозного производства. № 5—6—80.
- Евтюгин Д. В., Шаталов А. А., Зарубин М. Я. Деструкция полисахаридов в присутствии кислорода в водно-органических средах различной природы. 1. Изменение химического состава полисахаридного комплекса в ходе кислородно-органо-сольвентной делигнификации. № 3—64.
- Евтюгин Д. В., Костюкевич Н. Г., Зарубин М. Я. Деструкция полисахаридов в присутствии кислорода в водно-органических средах различной природы. 2. Демонстрация полимеризации макромолекул полисахаридного комплекса в условиях кислородно-органо-сольвентной делигнификации. № 3—70.

- Ерыхов Б. П., Натанзон М. Я., Попов И. В. Оценка сухого трения методом крутильных колебаний. № 2—85.
- Иванов Ю. С., Иоффе Л. О., Двоскин Ш. Ф., Бродерсон А. Б. Кислородно-целюлозная целлюлоза, полученная в пульсационном аппарате. № 5—86.
- Калинин И. Н., Федорова Э. И., Осипов П. В., Меркулова Т. А. Озон-активатор гипохлоритной отбелки целлюлозы. № 5—6—48.
- Киприанов А. И., Пономарев Д. А., Демченко Е. А. Использование жидких продуктов пиролиза древесины. № 5—6—117.
- Киселев И. Я. Механизм формальдегидной денатурации ферментов. № 2—108.
- Комаров В. И. Деформативность целлюлозно-бумажных материалов при изгибе. № 1—96.
- Комаров В. И., Казаков Я. В., Сухов Д. А., Деркачева О. Ю. Влияние структуры стенок волокон на фундаментальные, деформационные и прочностные характеристики сульфатной небеленой целлюлозы. № 3—105.
- Комаров В. И. Жесткость при изгибе целлюлозно-бумажных материалов. Анализ методов измерения и влияния технологических факторов. № 3—112.
- Коржицкая З. А., Голубева Л. В., Коржова М. А. Получение сульфитной целлюлозы из древесины березы. № 5—6—43.
- Кугушев И. Д., Швецов Ю. Н. Расчет оптимальных параметров работы отсасывающей части бумагоделательной машины. № 5—6—54.
- Кулешов Л. Ф., Ноговицын А. А., Миронова В. В. Повышение надежности подогревателей систем принудительной циркуляции варочных установок целлюлозы. № 5—6—50.
- Леонова М. О., Левина Л. Ф., Суворова С. И., Шапиро И. Л., Пен Р. З. Низкотемпературная окислительная деглинификация древесины. 2. Варка основной щелы с принудительной пропиткой и низким жидкостным модулем. № 3—76.
- Леонович А. А., Иоффе Л. О. Изменение температуры стеклования целлюлозы при ее инклюдировании. № 5—6—102.
- Милонидова Л. А., Комарова Г. В. Возможность снижения жесткости лиственной сульфатной целлюлозы перед отбелкой. № 5—6—27.
- Николаев А. Н., Николаева Л. Н., Гордеева И. В. Биодсорбционная и адсорбционно-коагуляционная очистка сточных вод ЦБП. № 5—6—65.
- Николаев А. Н., Гордеева И. В. О снижении сероводородного загрязнения среды предприятий ЦБП. № 5—6—71.
- Новожилков Е. В., Гельфанд Е. Д. Локальная очистка целлюлозно-бумажных сточных вод сульфит-целлюлозного производства с помощью получения кормовых дрожжей. № 5—6—62.
- Пазухина Г. А., Теплоухова М. В., Хакимова Ф. Х. Деглинификация органосольвентной целлюлозы перуксусной кислотой и пероксидом водорода на ранних стадиях отбелки. № 5—6—32.
- Пазухина Г. А., Теплоухова М. В., Хакимова Ф. Х. Отбелка щелочной органосольвентной целлюлозы из осины перуксусной кислотой и пероксидом водорода. № 5—6—37.
- Петрова В. В. Структура целлюлозы поздней и ранней древесины ели по данным рентгеновской дифракции на больших и крайних малых углах. № 5—6—97.
- Поварова А. Ю., Чупка Э. Н. 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. № 3—81.
- Скребец Т. Э., Гурьев А. Ю., Рябева Н. В., Боголюбыч К. Г. Термодинамика поведения лигнина в растворителях различной породы. № 1—103.
- Соколов О. М., Кочергина Г. Г., Майер Л. В. Хроматография технических лигнинов на различных гелях. № 1—83.
- Сухов Д. А., Деркачева О. Ю., Комаров В. И., Казаков В. И. Изменение состава и структуры основных компонентов стенок волокон хвойной древесины в процессе сульфатной варки. № 3—100.
- Терентьев О. А., Куров В. С., Давыденко Э. И. Теоретический анализ пульсационного движения флюидов в потоке волокнистой суспензии. № 3—142.
- Тиранов П. П. Улучшение реологических свойств пасты сульфатного лигнина. № 5—6—105.
- Хабаров Ю. Г., Манахова С. В. О взаимодействии лигносульфонатов кислот с катионом железа (+3). № 2—93.
- Хакимова Ф. Х., Ковтун Т. И., Изюмов И. Г. Древесина топяка как сырье для целлюлозного производства. № 2—102.
- Чернобережский Ю. М., Николаев А. Н., Дягилева А. Б. Решение проблем охраны окружающей среды в рамках ГНТП (Обзор работ, выполненных в 1993 г. по направлению «Комплексное использование и воспроизводство древесного сырья»). № 5—6—58.
- Чупка Э. И., Анисимова Л. П., Моисеев Б. А., Рихтер Н. Е. Ингибированное окисление в условиях сульфатной варки с предобработкой древесины. № 3—85.

## ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

- Авраменко Т. В. Номенклатура продукции мебельного производства в условиях рыночной экономики. № 5—6—144.
- Бычков В. П. Об организационно-экономических факторах повышения эффективности технологического транспорта на лесных предприятиях. № 4—111.
- Бычков В. П. К методике оценки эффективности развития сети дорог на предприятиях малолесной зоны. № 4—113.
- Гончарова Н. М. Роль интеграции в развитии лесопромышленного комплекса. № 2—114.
- Иванов Л. Б. Показатели использования экономического потенциала предприятия. № 2—111.
- Иванов О. В., Стрижев Ю. Н., Соловьев В. С. К вопросу об оценке эффективности автоматизации технологических объектов управления. № 5—6—137.
- Кудряшов М. М. Цена лесных ресурсов в условиях экономического кризиса. № 5—6—141.
- Романов Е. С. Особенности перехода к рыночным отношениям на лесосплаве. № 1—111.
- Шутова Ю. А., Старшинов А. И. Оптимизация технологического процесса транспортировки в условиях стохастической неопределенности. № 5—6—147.

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И ОБМЕН ОПЫТОМ

- Аглуллини Ф. В. Продуктивность сосновых древостоев, сформировавшихся в процессе постепенных рубок. № 5—6—156.
- Акимов П. В. Экологическая обусловленность функций черноольховых древостоев в низовье Северского Донца. № 4—123.
- Ащеулов Д. Н., Таранков В. И. Состояние дубрав Хоперского государственного заповедника. № 4—120.
- Барабин А. Н. Об обильном урожае шишек ели на севере европейской части России в 1989 г. № 2—139.
- Барабин А. И., Елисеев А. А. Новый подход к оценке потенциальных и фактических урожаев семян лиственницы. № 5—6—160.
- Жиров А. И., Монахов А. К., Шубина М. А. О корреляции между высотой дубовых древостоев и оптической плотностью. РЛ-изображения. № 5—6—158.
- Исупова Т. С. К вопросу о разнотолщинности подотен ленточных пил. № 5—6—163.
- Кульгин А. А. Влияние температурных условий на созревание семян каштана конского и ясеня зеленого. № 2—137.

- Кувшин В. Е., Пивр А. Э., Аксенов В. В. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление в последовательно установленных научных оребренных трубах. № 5—6—183.
- Любов В. К., Дьячков В. А., Шмаков В. И., Финкер Ф. Э. Исследование теплофизических характеристик гидравлического дилатанта. № 5—6—135.
- Исаев Ю. А., Мурзина О. В. Керновая губка в сосновках Центрального Черноземья. № 4—125.
- Сабуров Э. Н., Орехов А. Н. Расчет аэродинамических характеристик циклонных камер большой относительной длины. № 1—115.
- Сабуров Э. Н., Загескина Т. Г. Исследование потока в периферийной области циклонных камер. № 5—6—171.
- Сабуров Э. Н., Орехов А. Н. Исследование теплоотдачи в циклонных камерах большой относительной длины. № 2—124.
- Сухов И. В. Результаты 49-летнего опыта выращивания культуры дуба на вырубках разного возраста в Шилловом лесу. № 4—128.
- Торнин А. И., Яковлев В. И. Влияние показателей качества изготовления выданных цепей на их эксплуатационные характеристики. № 5—6—162.
- Хавкин Е. И. Один из методов динамического анализа механизмов лесных погрузчиков. № 2—122.
- Шаповалова Л. Г., Варфоломеев Ю. А., Лабудин Б. В., Вешнеков А. В. Деформации высоких деревянных сооружений при изменении влажности. № 5—6—165.
- Шаталов В. Г., Одиоралов Г. А., Трешевская Э. И. Лавашифтно-геохимический подход к лесной рекультивации песчаных и песчано-меловых отвалов Курской магнитной аномалии. № 4—116.

### ИСТОРИЯ НАУКИ

- Исаев В. А. Профессор В. Э. Ден — защитник русского леса. № 1—131.
- Редько Г. И. Полковник корпуса лесных В. Е. фон Граф (к 150-летию стенового лесоразведения в России). № 1—125.

### ИЗ ЖИЗНИ ВУЗОВ

- Романов Е. С. Презентация Архангельского государственного технического университета. № 5—6—195.

### КОНФЕРЕНЦИИ И СОВЕЩАНИЯ

- Облинин А. И., Скуратов И. В. IV Международная конференция ИЮФРО по сушке древесины. № 5—6—198.

- Уголев Б. И. Брайская сессия Координационного совета по древесиноведению. № 4—133.
- Чибисов Г. А. Международные контакты. № 4—132.

### МЕТОДИКА И ПРАКТИКА ПРЕПОДАВАНИЯ

- Корельская Л. А. Движ как средство межкультурного общения для специальных целей. № 5—6—153.
- Мелехов И. С. Некоторые аспекты преподавания лесных наук на лесозаготовительных факультетах международной сферы. № 2—118.
- Соколов О. М., Раковский В. И. Новая профессия для российского рынка недвижимости. № 5—6—151.

### КРИТИКА И БИБЛИОГРАФИЯ

- Веретенников А. В. Монография о структуре и функциях фотосинтетического аппарата хвойн ели сибирской. № 1—157.
- Тюрин Е. Г., Неполов О. А. Ценная книга о лесных законах Петра I. № 1—135.

### НОВОСТИ НАУКИ

- Романов Е. С. Наука о лесе — в Российской Академии естественных наук. № 4—135.
- Валерий Н. Сойфер. Соросовские профессора высшей школы названы. № 5—6—189.

### ЮБИЛЕИ

- Коллектив кафедры водного транспорта леса, гидравлики и водных ресурсов Марийского политехнического института. Юбилей Юрия Яковлевича Дмитриева. № 1—139.
- Коллеги и ученики. Выдающийся ученый и педагог. № 1—140.

### НЕКРОЛОГИ

- Коллеги по работе, друзья. Чутка Эдуард Иммерихович. № 2—142.
- Московский государственный университет леса, Архангельский государственный технический университет, Санкт-Петербургская лесотехническая академия, Архангельский институт леса и лесохимии, редколлегии и редакция «Лесного журнала», коллеги и ученики. Памяти Ивана Степановича Мелехова. № 5—6—202.

- Морозов С. И., Веретенников А. В. Читательская конференция «Лесного журнала». № 2—143.