



Министерство науки и высшего образования и Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

# ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ ЦЕЛЛЮЛЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ



**МАТЕРИАЛЫ  
V МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
ПОСВЯЩЕННОЙ ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА В.И. КОМАРОВА**

**11–14 сентября 2019 г.**

**Архангельск  
2019**





Ministry of Science and High Education and of the Russian Federation  
Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

# THE ISSUES IN MECHANICS OF PULP-AND-PAPER MATERIALS



PROCEEDINGS  
5th INTERNATIONAL CONFERENCE  
IN MEMORY OF PROFESSOR VALERY KOMAROV

September 11–14, 2019

Arkhangelsk  
Russia

УДК 676.01  
ББК 35.779-306  
П 78

Составители – Я.В. Казаков, Ю.В. Севастьянова, Е.А. Топтунов

П 78

**Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов**

[Текст] : материалы 5 международной научно-технической конференции, посвященной памяти профессора В. И. Комарова, 11-14 сентября 2019 г. / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. автоном. образоват. учреждение высш. образования “Сев. (Аркт.) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова”. - Архангельск : [б. и.], 2019. - 368 с. : ил.

ISBN 978-5-6042336-6-5

Представлены материалы докладов по фундаментальным и прикладным исследованиям в области механики целлюлозно-бумажных материалов по следующим направлениям: физические основы и методы оценки механического поведения целлюлозно-бумажных материалов; новые технологические решения для повышения уровня механических свойств технической целлюлозы, бумаги и картона; перспективы развития ресурсосберегающих способов получения бумаги и картона из рециркулируемого сырья; нанотех-нологии в получении новых видов целлюлозы и бумагоподобных материалов.

УДК 676.01  
ББК 35.779-306

ISBN 978-5-6042336-6-5

© Северный (Арктический) федеральный университет  
имени М.В. Ломоносова, 2019





## Организационный комитет

Аким Э.Л. <i>председатель</i>	член Консультативного Комитета ФАО ООН по устойчивости лесного сектора, д-р техн. наук, профессор, СПбГУПТД, Россия
Филиппов Б.Ю. <i>сопредседатель</i>	Первый проректор по стратегическому развитию, д-р биол. наук, доцент, САФУ, Россия
Казаков Я. В. <i>сопредседатель</i>	зав. кафедрой ЦБиЛХП, доктор техн. наук, профессор, САФУ, Россия
Холмова М.А. <i>секретарь</i>	канд. техн. наук, доцент, САФУ, Россия
Алашкевич Ю.Д.	д-р техн. наук, профессор, СибГАУ, Россия
Белоглазов В.И.	канд. техн. наук, профессор, САФУ, Россия
Гурьев А.В.	начальник научно-исследовательского управления, канд. техн. наук, доцент, САФУ, Россия
Дернова Е.В.	зам. ген. директора по научно-технологическим вопросам УК «Объединенные бумажные фабрики», канд. техн. наук, доцент, Россия
Дубовый В.К.	д-р техн. наук, профессор, СПбГУПТД, Россия
Дулькин Д.А.	ген. директор УК «Объединенные бумажные фабрики», д-р техн. наук, Россия
Зылев Д.И.	генеральный директор АО «Архангельский ЦБК»
Канарский А.В.	д-р техн. наук, профессор, КНИТУ, Россия
Комарова Г.В.	канд. хим. наук, доцент, САФУ, Россия
Королева Т.А.	канд. техн. наук, доцент, САФУ, Россия
Севастьянова Ю.В.	директор ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера», канд. техн. наук, доцент, САФУ, Россия
Кузнецов И.С.	начальник отдела организационной работы аппарата ректора, САФУ, Россия
Смолин А.С.	д-р техн. наук, профессор, СПбГУПТД, Россия
Цибульски У.О.	директор по экспорту компании «Vim Finland OY», канд. техн. наук, Финляндия
Черная Н.В.	д-р техн. наук, профессор кафедры химической переработки древесины, профессор, БГТУ, Беларусь
Щербак Н.В.	канд. техн. наук, доцент, САФУ, Россия

## ПРОГРАММА МЕРОПРИЯТИЙ КОНФЕРЕНЦИИ

### Вторник, 10 сентября

Заезд участников. Размещение в гостиницах

### Среда, 11 сентября

- 9:00–9:30 Регистрация участников  
9:30–10:00 Открытие конференции  
10:00–13:30 Пленарное заседание  
13:30–14:15 Обед  
14:15–17:30 Сессия «Физические основы и методы оценки механического поведения целлюлозно-бумажных материалов»

### Четверг, 12 сентября

- 9:00–17:00 Стендовая сессия  
9:00–13:00 Сессия «Новые технологические решения для повышения уровня механических свойств технической целлюлозы, бумаги и картона»  
13:00–14:00 Обед  
14:00–15:40 Сессия «Перспективы развития ресурсосберегающих способов получения бумаги и картона из рециркулируемого сырья»  
16:00–17:30 Сессия «Нанотехнологии в получении новых видов целлюлозы и бумагоподобных материалов»  
17:30–18:00 Подведение итогов. Закрытие конференции  
18:30 Прием в честь участников конференции

### Пятница, 13 сентября

- 8:00–20:00 Выездная сессия и культурная программа

### Суббота, 14 сентября

- 9:00–18:00 Отъезд участников

## СОДЕРЖАНИЕ

Э.Л. Аким. Биорефайнинг растительного сырья, циркулярная экономика и проблемы механики древесных и целлюлозно-бумажных материалов	17
Я.В. Казаков. Кинетика деформирования целлюлозно-бумажных материалов при растяжении	23
R. Berger. Digitalization on its way to impact strength properties	32
А.С. Смолин. Современные тенденции развития технологии гофрокартона	39
Е.В. Новожилов, Д.Г. Чухчин, К.С. Болотова. Формирование вторичной клеточной стенки волокон древесины	47
М.Г. Михалева, Д.Н. Втюрина, Г.Г. Политенкова, С.Ю. Сарвадий, С.Н. Никольский, С.В. Стовбун, Н.В. Жолнерович, Н.А. Герман, И.В. Николайчик. Макро- и микроскопический подход к измерению шероховатости поверхности бумажных материалов	54
C. Czibula, C. Ganser, T. Seidlhofer, C. Teichert, U. Hirn. Transverse viscoelastic properties of pulp fibers investigated with atomic force microscopy	60
Н.П. Мидуков, Я.В. Казаков, В.С. Куров, А.С. Смолин, С. Хейнман. Исследование поперечного среза многослойного картона с использованием технологии ионной резки	65
А.Н. Романова, Я.В. Казаков, А.В. Малков. Влияние степени анизотропии на распределение локальных деформаций в образце бумаги при растяжении	68
T. Harter, U. Hirn. Structural influences on reversible and irreversible curl	75
Д.Ю. Васильева, Л.В. Юртаева, Ю.Д. Алашкевич. Отдельные бумагообразующие свойства волокна при безножевом способе размола	81
Е.В. Каплёв, Л.В. Юртаева, Ю.Д. Алашкевич. Влияние режима размола на физико-механические свойства сульфатной беленой целлюлозы	87
Д.И. Малютина, А.С. Смолин. Влияние размола растительных волокон на водопоглощение клееной бумаги	93
М.Г. Михалева, Г.Г. Политенкова, С.Н. Никольский, С.В. Стовбун. Бумагообразующие свойства технической целлюлозы	99



<i>Л.А. Миловидова, Т.А. Королева, М.А. Иконникова, А.А. Дряхлицын, В.В. Медведев.</i> Разработка технологии производства беленой лиственной сульфатной целлюлозы в жестких условиях. Часть I. Разработка технологии сульфатной варки	105
<i>И.А. Воронин, Ю.Д. Алашкевич, Н.С. Решетова.</i> Размол волокнистых полуфабрикатов с использованием инерционных тел	115
<i>М.В. Ломов, Г.А. Вишняков, И.А. Яворский.</i> Вакуумная система, как ключ к сохранению ресурсов целлюлозно-бумажного предприятия	121
<i>Л.Г. Махотина.</i> Особенности подготовки бумажной массы для направленного регулирования физико-механических и печатных свойств литой тары из вторичного волокна	127
<i>И.С. Тихонов, В.А. Кожухов, Ю.Д. Алашкевич.</i> Особенности безножевого размола волокнистых полуфабрикатов в целлюлозно-бумажном производстве	132
<i>Х.М. Кхоа, М.И. Макаров, Е.О. Окулова, Я.В. Казаков.</i> Прочностные и деформационные свойства целлюлозы из древесины тропических пород	136
<i>К.С. Дуплякова, А.А. Дряхлицын, Ю.В. Севастьянова.</i> Оптимизация схемы отбелики хвойной целлюлозы	141
<i>А.А. Масленникова, Е.О. Окулова, Я.В. Казаков, Н.А. Бабич.</i> Бумагообразующие свойства целлюлозы из древесины интродуцированных лесных культур	148
<i>А.В. Кокшаров, Е.В. Белых.</i> Сравнение скоростей размола сульфатной лиственной и сульфатной хвойной целлюлоз с высокой жесткостью	154
<i>А.В. Кокшаров.</i> Влияние условий варки сульфатной хвойной целлюлозы на ее физико-механические показатели	156
<i>А. В. Кокшаров, Е. В. Белых.</i> Лабораторные варки сульфатным способом	158
<i>А. В. Кокшаров.</i> Лабораторный размол сульфатной небеленой целлюлозы при низкой и высокой концентрации массы	160
<i>С.И. Третьяков, С.С. Дементьев.</i> Снижение вариабельности показателей работы БДМ-2 картонно-бумажного производства филиала АО «Группа «ИЛИМ» в г. Коряжме	163
<i>Е.А. Топтунов, А.М. Самухин, Н.В. Щербак.</i> Водоразлагаемые виды бумаги и картона	167



<i>А.В. Канарский, И.А. Хусаинов, Т.З. Ха, Л.А. Мингазова, З.А. Канарская, Е.Р. Якубов.</i> Химическая и биокаталитическая конверсия вторичных ресурсов переработки растительного сырья	172
<i>С.И. Басырова, М.Ф. Галиханов.</i> Поверхностные свойства модифицированного картона	175
<i>Ю.Д. Алашкевич, Р.З. Пен, В.А. Кожухов, И.А. Воронин, Н.В. Каретникова, Л.В. Чендылова.</i> Свойства вторичного волокна из влагопрочной макулатуры с полиуретановым покрытием	182
<i>А.В. Вураско, Е.И. Симонова, А.Р. Минакова, В.П. Сиваков, Я.В. Казаков.</i> Сравнительный анализ механических свойств целлюлозы из злаковых культур, полученных окислительно-органосольвентным способом	188
<i>В.И. Шуркина, Р.А. Марченко, Ю.Д. Алашкевич.</i> Определение оптимального режима размола волокнистой массы при использовании гарнитуры с криволинейной формой ножей	195
<i>Ю.Д. Алашкевич, М.С. Лурье, О.М. Лурье, А.С. Фролов.</i> Оптимизация гидродинамических режимов вихревых расходомеров в целлюлозно-бумажном производстве	198
<i>В.К. Дубовый, Н.А. Криницин, Г.А. Суслов.</i> Использование минеральных волокнистых полуфабрикатов в качестве сырья для производства технических видов бумаги	202
<i>Н.А. Горшкова, О.С. Бровко, К.Г. Боголицын, И.А. Паламарчук, Я.В. Казаков.</i> Влияние условий синтеза полиэлектролитного комплекса альгинат натрия хитозан на деформационно-прочностные характеристики пленок на его основе	207
<i>Е.В. Куркова, О.С. Мартянова, К.С. Архипов, Г.Е. Иванов.</i> Использование органических наполнителей для снижения плотности бумаги	212
<i>М.В. Талипова, А.В. Лянг.</i> Сочетание фильтрующего материала с сорбентами для очистки воздуха в средствах индивидуальной защиты органов дыхания.	219
<i>В.Н. Селезнёв.</i> Исследование и подбор оптимальной композиции офисных видов бумаги.	221
<i>В.Н. Сунайт, Л.Г. Махотина.</i> Использование порошковой целлюлозы из волокнистых полуфабрикатов высокого выхода в строительной отрасли	227



<i>Т.Е. Бойкова, Н.И. Богданович, С.Н. Долгобородова, Т.С. Мауричева.</i> Вода как один из основных прекурсоров повышения механо-химических характеристик целлюлозно-бумажной продукции	232
<i>Е.В. Дернова, В.В. Гораздова.</i> Влияние процесса сушки на трещиностойкость целлюлозно-бумажных материалов	238
<i>К.А. Иванов.</i> Система смешивания химикатов TrumpJet для КДМ/БДМ и результаты ее использования.	244
<i>Е.А. Глезман, А.М. Гурьянов, В.А. Житнюк, И.П. Рябов, А.М. Идиатуллин, Н.А. Тараканова.</i> Гофрокартон расчет прочности на сжатие по показателям прочности составляющих слоёв	249
<i>А.А. Дряхлицын, Ю.В. Севастьянова.</i> Смоляные затруднения при производстве сульфатной беленой целлюлозы из смеси березовой и осиновой древесины	257
<i>Д.Н. Жирнов, Е.В. Дернова, Д.А. Дулькин.</i> Прогнозирование качества тарного картона с использованием методов машинного обучения	263
<i>М.Г. Михалева, Г.Г. Политенкова, А.С. Веденкин, Д.В. Зленко, С.Н. Никольский, С.В. Стовбун.</i> Суперспирализация фундаментальное свойство биосистем. Целлюлозное волокно	268
<i>О.В. Федорова, Э.Л. Аким.</i> Физико-механические и физико-химические аспекты выделения лигнина из черного щелока	272
<i>А.А. Пекарец, О.А. Ерохина, В.В. Новожилов, С.В. Хоробрых, А.В. Таразанов, Ю.Г. Мандре, Э.Л. Аким.</i> Изучение упруго-релаксационных свойств древесины лиственницы и их роли при получении древесных брикетов	278
<i>И.А. Шаньязов, Ю.А. Гисматулина.</i> Технология получения беленого полуфабриката из мискантуса	284
<i>И.А. Шаньязов, Ю.А. Гисматулина.</i> Разработка технологии получения целлюлозы высокого выхода из мискантуса	289
<i>В.В. Коптяев, Ю.В. Севастьянова, Н.Ю. Поташева.</i> Современные методы определения бумагообразующих свойств волокнистых полуфабрикатов	295
<i>А.А. Гилязова, Е.К. Гладышева, Ю.В. Севастьянова.</i> Создание фильтровальной бумаги для биологических жидкостей с добавкой бактериальной целлюлозы	302
<i>У.Ж. Ешбаева, А.А. Джалилов.</i> Окрашенный модифицированный нитрон как степень защиты бумаги	308



---

<i>З.К. Галимова, М.М. Абдуназаров, Х.А. Бабаханова.</i> Бумага с добавлением отхода производства	314
<i>Э.Л. Алимбиев.</i> Тенденции комплексной автоматизации	319
<i>М.В. Захаров, Д.А. Вяткин.</i> Определение сорности целлюлозы на основе методов технического зрения	324
<i>М.Е. Романов, У. Цибульски.</i> Накипь в технологических средах ЦБП. Современный метод подбора ингибиторов образования минеральных отложений	328
<i>С.В. Булыгина, Ю.В. Севастьянова.</i> Создание и исследование свойств новых фильтровальных материалов на основе смеси бактериальной и растительных целлюлоз	335
<i>В.В. Коптяев, Ю.В. Севастьянова, Д.А. Дулькин, А.В. Канарский, Т.З. Ха, З.А. Канарская, Е.Р. Якубов.</i> Комплексная переработка рисовой шелухи с получением волокнистых полуфабрикатов	341
<i>К.С. Болотова, Д.Г. Чухчин, А.А. Гурьянова, И.В. Тышкунова, Е.В. Новожилов.</i> Структурные изменения клеточной стенки растительного волокна в процессе ферментативного воздействия	343
<i>Е.О. Окулова, А.В. Гурьев, Д.Г. Чухчин.</i> Оценка использования метода НПВО ИК-спектроскопии для анализа породного состава листовых целлюлозных полуфабрикатов	349



## CONTENTS

<i>E.L. Akim.</i> Biorefining of plant raw materials, circular economics and problems of wood mechanics and pulp and paper materials	17
<i>Y. Kazakov.</i> Kinetics of deformation of pulp and paper materials at tensile test	23
<i>R. Berger.</i> Digitalization on its way to impact strength properties	32
<i>A.S. Smolin.</i> Modern trends in the development of corrugated cardboard technology	39
<i>E.V. Novozhilov, D.G. Chukhchin, K.S. Bolotova.</i> The formation of secondary cell walls of plant fiber	47
<i>M.G. Mikhaleva, D.N. Vtyurina, G.G. Politenkova, S.Yu. Sarvadiy, S.N. Nikol'skij, S.V. Stovbun, N.V. Zholnerovich, N.A. German, I.V. Nikolaychik.</i> Macro- and microscopic approach to measuring surface roughness of paper materials	54
<i>C. Czibula, C. Ganser, T. Seidlhofer, C. Teichert, U. Hirn.</i> Transverse viscoelastic properties of pulp fibers investigated with atomic force microscopy	60
<i>N.P. Midukov, Y. Kazakov, V.S. Kurov, A.S. Smolin, S. Heinemann.</i> Research of the multilayered cardboard cross section with use of technology of ion beam cutting	65
<i>A.N. Romanova, Y.V. Kazakov, A.V. Malkov.</i> The influence of the anisotropy degree on the distribution of local deformations in the paper sample under tension	68
<i>T. Harter, U. Hirn.</i> Structural influences on reversible and irreversible curl	75
<i>D.Yu. Vasilyeva, L.V. Yurtaeva, Yu.D. Alashkevich.</i> A separate paper-forming property of the fiber with a blade during intralaser implementation method of grinding	81
<i>E.V. Kaplyov, L.V. Yurtaeva, Yu.D. Alashkevich.</i> The influence of mode of grinding on physico-mechanical properties of bleached kraft pulp	87
<i>D.I. Malyutina, A.S. Smolin.</i> Effect of grinding vegetable fibers on water sorption of glued paper	93
<i>M.G. Mikhaleva, G.G. Politenkova, S.N. Nikol'skij, S.V. Stovbun.</i> Papermaking properties of chemical pulp	99





<i>L.A. Milovidova, T.A. Koroleva, M.A. Ikonnikov, A.A. Dryahlitsyn, V.V. Medvedev.</i> Development of production technology of bleached hard wood sulphate pulp in hard conditions. Part 1 development of the technology of sulphate cooking	105
<i>I.A. Voronin, Yu.D. Alashkevich, N.S. Reshetova.</i> Grinded fiber semi-finished products using inertial bodies.	115
<i>M.V. Lomov, G.A. Vishniakov, I.A. Iavorskii.</i> Vacuum system is a key to save the pulp and paper mill resources	121
<i>L.G. Makhotina.</i> Features of preparation of pulp for the directional regulation of physico-mechanical and printing properties of molded packaging from recycled fiber	127
<i>I.S. Tikhonov, V.A. Kozhukhov, Yu.D. Alashkevich.</i> Peculiarities of knifeless of fiber semi-products in pulp and paper production	132
<i>H.M. Khoa, M.I. Makarov, E.O. Okulova, Y.V. Kazakov.</i> Strength and deformation properties of pulp from tropical wood	136
<i>K.S. Duplyakova, A.A. Dryahlicin, Yu.V. Sevastyanova.</i> Optimization of bleaching softwood pulp	141
<i>A.A. Maslennikova, E.O. Okulova, Y.V. Kazakov, N.A. Babich.</i> Papermaking properties of pulp from wood of introduced forest crops	148
<i>A.V. Koksharov, E.V. Belykh.</i> Comparison of grinding rates of kraft hardwood and softwood pulp with high lignin content	154
<i>A.V. Koksharov.</i> Influence of the conditions of pulping sulphatic soft wood pulp on its physical and mechanical properties	156
<i>A.V. Koksharov, E.V. Belykh.</i> Laboratory pulping felt sulphate method	158
<i>A.V. Koksharov.</i> Laboratory pulping of sulphate kraft pulp at low and high concentration of weight	160
<i>S.I. Tret'yakov, S.S. Dement'ev.</i> Reduction of variability of indicators of work BDM-2 Cardboard-paper productionthe branch of the jsc "ILIM group" in Koryazhma	163
<i>E.A. Toptunov, A.M. Samukhin, N.V. Shcherbak.</i> Water soluble paper and cardboard	167
<i>A.V. Kanarsky, I.A. Khusainov, T.Z. Ha, L.A. Mingazova, Z.A. Kanarskaya, E.R. Yakubov.</i> Chemical and biocatalytic conversion of secondary resources of vegetable raw materials	172
<i>S.I. Basyrova, M.F. Galikhanov.</i> Surface properties of modified cardboard	175



<i>Yu.D. Alashkevich, R.Z. Pen, V.A. Kozhukhov, I.A. Voronin, N.V. Karenikova, L.V. Chendylova.</i> Properties of the secondary fibers from wet-strength of the waste-paper with polyurethan covering	182
<i>A.V. Vurasko, E.I. Simonova, A.R. Minakova, V.P. Sivakov, Y.V. Kazakov.</i> Comparative analysis of mechanical properties of cellulite-the vines of cereals, obtained by the oxidation-organosolvent way	188
<i>V.I. Shurkina, R.A. Marchenko, Yu.D. Alashkevich.</i> Determination of the optimum mode of film suspension size when using the headset with the curvilinear form of knives	195
<i>Yu.D. Alashkevich, M.S. Lurie, O.M. Lurie, A.S. Frolov.</i> Optimization of hydrodynamic modes of vortex flowmeters in pulp and paper manufacture remain title	198
<i>V.K. Dubovy, N.A. Krinitsin, G.A. Suslov.</i> Use of mineral fibrous semi-finished products as a raw material for the production of technical types of paper	202
<i>N.A. Gorshkova, O.S. Brovko, K.G. Bogolitsyn, I.A. Palamarchuk, Y.V. Kazakov.</i> Influence of synthesis conditions of the polyelectrolyte complex alginate-chitosan on the deformation and strength attributes of the films on its basis	207
<i>E.V. Kurkova, O.S. Martyanova, K.S. Arkhipov, G.E. Ivanov.</i> Using organic fillers to reduce paper density	212
<i>M.V. Talipova, A.V. Liang.</i> Combination of filter material with sorbents for cleaning air in personal respiratory protective equipment	219
<i>V.N. Seleznev.</i> Research and selection of the optimal composition of office paper	221
<i>V.N. Sunait, L.G. Machotina.</i> Building sector applications of powder cellulose from wood pulp	227
<i>T.E. Boikova, N.I. Bogdanovich, S.N. Dolgoborodova, T.S. Mauricheva.</i> Water as one of the main precursors of increase mechano-chemical characteristics of pulp and paper products	232
<i>E.V. Dernova, V.V. Gorazdova.</i> The influence of drying process on the fracture toughness of pulp and paper products	238
<i>K.A. Ivanov.</i> Trumpjet flash mixing technology for BM/PM and effect of it's operation	244



<i>E.A. Glezman, A.M. Guryanov, V.A. Zhitnyuk, I.P. Ryabov, A.M. Idiatullin, N.A. Tarakanova.</i> Corrugated board. Calculation of the compressive strength in terms of strength of the constituent layers	249
<i>A.A. Dryahlicin, Yu.V. Sevastyanova.</i> Resin difficulty in the production of bleached kraft pulp from a mixture of birch and aspen wood	257
<i>D.N. Zhirnov, E.V. Dernova, D.A. Dulkan.</i> Prediction of the cardboard product quality using the machine learning methods	263
<i>M.G. Mikhaleva, G.G. Politenkova, A.S. Vedenkin, D.V. Zlenko, S.N. Nikolsky, S.V. Stovbun.</i> Superspiralization - fundamental property of biosystems. Cellulose fibre	268
<i>O.V. Fedorova, E.L. Akim.</i> Physical-mechanical and physico-chemical aspects of lignin isolation from black liquid	272
<i>A.A. Pekarets, O.A. Erokhina, V.V. Novozhilov, S.V. Khorobrykh, A.V. Tarazanov, Yu.G. Mandre, E.L. Akim.</i> The study of elastic-relaxation properties of larch wood and their role when obtaining wood briquettes	278
<i>I.A. Shanyazov, Yu.A. Gismatulina.</i> Technology of obtaining white-hemi-finished product from miscantus	284
<i>I.A. Shanyazov, Yu.A. Gismatulina.</i> Development of technology of receiving cellulose of the high exit from miskantus	289
<i>V.V. Koptyaev, Yu.V. Sevastyanova, N.Yu. Potasheva.</i> Modern methods of determining the paper-forming properties of fibrous semi-finished products	295
<i>A.A. Gilyazova, E.K. Gladysheva, Yu.V. Sevastyanova.</i> The creation of filter paper for biological fluids with the addition of bacterial cellulose	302
<i>U.Dj. Eshbaeva, A.A. Djalilov.</i> Colored modified nitron as a power protection of paper	308
<i>Z.K. Galimova, M.M. Abdunazarov, X.A. Babaxanova.</i> Paper with addition of production waste	314
<i>E.L. Alimpiev.</i> Trends in integrated automation	319
<i>M.V. Zakharov, D.A. Vyatkin.</i> Pulp dirt count based on image processing	324
<i>M.E. Romanov, Udo Zibulski.</i> Scale in pulp and paper industry. Advanced technique of selection of mineral deposits formation inhibitors	328
<i>S.V. Bulygina, Yu.V. Sevastyanova.</i> The creation and study of properties of new materials based on a mixture of bacterial and vegetable cellulose	335



- 
- V.V. Koptyaev, Yu.V. Sevastyanova, D.A. Dulkan, A.V. Kanarsky, T.D. Ha, Z.A. Kanarskay, E.R. Yakubov.* Complex processing of rice husk to produce fibrous semi-finished products 341
- K.S. Bolotova, D.G. Chukhchin, A.A. Guryanova, O.A. Yunitsyna, E.V. Novozhilov.* Structural changes in cell wall of plant fiber in the process of enzymatic treatment 343
- E.O. Okulova, A.V. Guriev, D.G. Chuhchin.* Evaluation of application ftir-spectroscopy method for analysis of the breed composition of the hardwood cellulose semi-finished products 349

## БИОРЕФАЙНИНГ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ, ЦИРКУЛЯРНАЯ ЭКОНОМИКА И ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ ДРЕВЕСНЫХ И ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Э.Л. Аким

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия*

*При переходе к циркулярной экономике проблемы механики древесных и целлюлозно-бумажных материалов определяют кратность использования вторичных волокон и количество ступеней при каскадном использовании древесины. Показана целесообразность на завершающей стадии жизненного цикла древесины получения биотоплива и его использования.*

## BIOREFINING OF PLANT RAW MATERIALS, CIRCULAR ECONOMICS AND PROBLEMS OF WOOD MECHANICS AND PULP AND PAPER MATERIALS

E.L. Akim

*St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design, St. Petersburg, Russia*

*In the transition to a circular economy, the problems of the mechanics of wood, pulp and paper materials determine the frequency of use of recycled fibers and the number of stages in the cascade use of wood. The expediency at the final stage of the wood life cycle of obtaining biofuels and its use is shown.*

Лесной сектор занимает лидирующее положение в переходе к «Зеленой Экономике» и к «Циркулярной Экономике». Как отмечалось в предыдущих публикациях [1–4], биорефайнинг древесины играет особую роль и при переходе к «Циркулярной экономике», которую также называют «Экономикой замкнутого цикла». Как известно, циркулярная или циклическая экономика – это экономика, основанная на повторном использовании ресурсов. Этим она отличается от линейной экономики (создание, использование, захоронение отходов).

Российский Лесной Комплекс экспортно-ориентирован и стал заметным игроком на мировых рынках, не только как поставщик «армирующей» северной хвойной целлюлозы, бумаги и картона из первичных волокон, но и как поставщик био-топлива нового поколения – пеллет и брикетов [1–4].

Лесная Технологическая Платформа, как часть Платформы «БиоТех 2030» [5–7] направлена на развитие Лесного Комплекса России по инновационному пути. Задачей Российской «Лесной технологической платформы»



как части Платформы «БиоТех2030» является создание и реализация инновационной модели развития лесного комплекса России, ее научное и кадровое обеспечение [8–9]. Один из ее приоритетов – био-рефайнинг древесины [1–3], – производство наукоемкой продукции, с высокой добавленной стоимостью, на базе комплексной глубокой переработки лесных ресурсов непосредственно в регионе произрастания. Из всего многообразия аспектов биорефайнинга остановимся на вопросе, какую роль проблемы механики древесных и целлюлозно-бумажных материалов играют при переходе к циркулярной экономике. Именно проблемы механики древесных и целлюлозно-бумажных материалов определяют **кратность использования вторичных волокон** и количество ступеней при каскадном использовании древесины.

Биорефайнинг древесины играет особую роль и при переходе к «Циркулярной экономике», которую также называют «Экономикой замкнутого цикла». Циркулярная (или циклическая) экономика основана на повторном использовании ресурсов. Этим она отличается от линейной экономики («создание, использование, захоронение отходов»). основополагающими принципами циркулярной экономики является предотвращение образования отходов, их повторное использование и переработка. В этой экономике появляются понятия: вторичное волокно; вторичная древесина; вторичный пластик.

Лесной сектор занимает лидирующее положение в переходе мира к «Зеленой экономике» и к «Циркулярной» экономике. Так, объем мирового использования вторичных волокон (макулатуры), выдерживающей 6–8 циклов переработки, превышает объемы первичного волокна [6–7]. ЦБП обеспечивает переход к созданию био-разлагаемой упаковки и одноразовой био-разлагаемой посуды. В Европе в обращении находится около 4 млрд. деревянных поддонов – паллет. Средний срок службы паллет составляет 5–7 лет и созданные для их многократного использования арендные центры – «пулы» являются прекрасным примером перехода к циркулярной экономике [6–7].

Целлюлозные фибриллы являются армирующим элементом древесины и других растений. Построенная из высоко ориентированных элементов надмолекулярная структура целлюлозы обеспечивает высокую прочность целлюлозных волокон, сохраняет свои армирующие функции в бумаге и картоне. Основные физико-химические вопросы биорефайнинга: До какого уровня надо «разбирать» «архитектуру», надмолекулярную структуру природного композита – древесины – нано-структуры, морфологической структуры? Какие структурные изменения происходят с полимерными



компонентами древесины? Как создать оптимальную структуру новых материалов и композитов, в частности брикетов? Какова прочность целлюлозных фибрилл в древесине в северных хвойных лесах? Как решить задачу максимальной реализации прочности целлюлозных фибрилл древесины?

Используя разработанную ранее Э.Л. Акимом [10–12] концепцию об определяющей роли релаксационного состояния полимерных компонентов древесины, на основании фундаментальных исследований структуры древесины лиственницы, впервые было установлено, что в древесине лиственницы арабиногалактан (АГ) находится в виде аква-комплексов, находящихся в жидком состоянии. Это позволило предложить инновационные методы, как получения волокнистых полуфабрикатов, так и извлечения из щепы арабиногалактана. Методы апробированы в лабораторных и в промышленных масштабах. Предложенные инновационные технологии получения волокнистых полуфабрикатов из древесины лиственницы и извлечения арабиногалактана защищены 19 патентами РФ.

Разработанные технологии переработки 100% лиственницы, а также ее смесей с другими видами древесного сырья реализованы на Братском филиале ОАО «Группа «Илим», который с ноября 2014 года перешел на инновационные технологии производства целлюлозы. На 1 января 2018 года выпущено и реализовано свыше 2 млн. тонн целлюлозы, произведенной по инновационной технологии, на сумму свыше 60 миллиардов рублей.

При реализации этой технологии на первых ее стадиях комплекс «арабиногалактан – вода» используется как био-топливо, в составе черного щедрока.

Производство биотоплива второго поколения – древесных пеллет и брикетов, в том числе древесноугольных, создано в РФ за 20 лет практически без государственного финансирования. При этом доля России в мировой торговле лесными товарами ни по одному другому виду продукции не составляет тех 5–6 %, от мирового рынка, которые сегодня РФ имеет по пеллетам.

В последние годы произошел качественный скачок в производстве в России биотоплива второго поколения – от использования импортного оборудования и технологий к созданию отечественных инновационных технологий и даже оборудования. Так, используя импортное оборудование в г. Онега создали уникальную технологию производства пеллет из гидролизного лигнина (150 тыс. тонн в год), которая может успешно тиражироваться в СНГ.



Но если по пеллетам все производство строится на импортном оборудовании, то по брикетам сегодня есть уникальная, защищенная 4 патентами РФ технология Александра Пекарца [13–15] - инновационная экструзионная релаксационно-аэродинамическая технология (ЭРАТ) получения древесных и угледревесных брикетов. Это производство базируется на уникальном оборудовании, которая по этим патентам производится уже и на территории ЕС [15]. Обеспечивающая лучшее в мире качество древесноугольных брикетов, первоначально предназначенная для переработки древесных опилок, эта технология может быть использована при решении проблем переработки бытового и муниципального мусора древесного происхождения.

Создание этой инновационной технологии позволяет предложить новый подход к решению проблем свалок, как к составной части перехода к «Умному городу будущего». В этом случае использование для получения биотоплива вторичной древесины можно рассматривать как путь сокращения твердых отходов мегаполиса.

В структуре древесного сырья, используемого в качестве биотоплива, например, в Швеции, вторичная древесина уже сегодня играет доминирующую роль. При так называемом «каскадном» использовании древесины на завершающей стадии жизненного цикла именно получение биотоплива и его использование являются наиболее экологически дружественными вариантами, исключая дополнительное выделение парниковых газов [13–16]. Так, при получении древесно-пластиковых композитов [17–18] в качестве наполнителя используется гранулированный флото-шлам, содержащий мелкое целлюлозное волокно и минеральные наполнители – карбонат кальция и глинозем.

Созданные за последние 20 лет новые технологии, реализованные в производстве твердого биотоплива второго поколения, позволяют принципиально по новому решать большинство задач, связанных с промышленной переработкой большинства видов твердых отходов – от бытовых, до промышленных и сельскохозяйственных.

При этом безусловно целесообразно учитывать не только отечественные Справочники по НДТ, но и основополагающие Директивы ЕС 2008/98/ЕС (Рамочная — Waste Framework Directive) и 2000/76/ЕС (О сжигании отходов – The Waste Incineration Directive).

Интересен конечно и шведский опыт, а также опыт США, где в 1990-2000 в два этапа была реализована программа по увеличению сбора и использования вторичного волокна с 25...30 % до 50 %. Если учесть, что в 1990 году душевое потребление бумаги и картона в США составляло





свыше 300 кг в год, то понятно о каком масштабе идет речь. При этом в США в 90-х годах XX века основной причиной создания программ по расширению использования вторичного волокна явилась необходимость сокращения площадей свалок вблизи мегаполисов.

Примером программы является, конечно, и знаменитая «Мусорная революция» в Швеции, где, как и во всем Европейском Союзе, установлена «Мусорная иерархия»:

- Предупреждение появления отходов (ответственное потребление и т.п.);
- Повторное использование;
- Переработка для повторного использования материала;
- Прочая переработка (в том числе энергетическое использование);
- Захоронение.

Судьба древесных отходов в Швеции заслуживает отдельного упоминания и анализа. Анализ изменения структуры импорта древесных отходов и древесного топлива за последние 20 лет, сделанный Сергеем Передерием на Биотопливном Конгрессе в апреле 2019 года показал, что импорт древесного топлива в Швецию трансформировался от импорта пеллет к импорту древесных отходов – вторичной древесины.

Возникает законный вопрос: если мусорная революция возможна в Швеции, то почему она не возможна в Санкт-Петербурге или других мегаполисах России?

В конечном итоге, при переходе к циркулярной экономике именно проблемы механики древесных и целлюлозно-бумажных материалов определяют кратность использования вторичных волокон и количество ступеней при каскадном использовании древесины. Примеры использования вторичных волокон (макулатуры), выдерживающей 6–8 циклов переработки, деревянных поддонов – паллет, вторичной древесины, показывают целесообразность на завершающей стадии жизненного цикла древесины получения биотоплива и его использования. При решении проблем переработки бытового и муниципального мусора древесного происхождения инновационная экструзионная релаксационно-аэродинамическая технология (ЭРАТ) открывает новые широкие возможности.



### Список литературы

1. Akim E.L. in Book: E. Hansen, R. Panwar, R. Vlosky. “The Global Forest Sector: Changes, Practices, and Prospects” Taylor & Francis Group, 2017, NY, 462 p., ISBN: 978-1-4398-7927-6.
2. Akim E. L. Biorefining of Wood // Fibre Chemistry, 2016. Vol. 48, No. 3, p. 181–190,
3. Аким Э.Л. Роль биорефайнинга древесины при переходе Лесного Сектора к «Зеленой экономике». В Сборнике материалов XXIII Международного Биос-форума и Молодежной Биос-олимпиады / Составители: профессор А.И. Шишкин и др.– СПб.: СПб НЦ РАН, ВВМ; Любавич, 2018, 336 с.
4. Wertz J.-L., Deleu M., Coppee S., Richel A. “Hemicelluloses and Lignin in Biorefineries” Taylor & Francis Group, 2018.
5. Прогноз развития лесного сектора Российской Федерации до 2030 года: Рим: ЕЭК ООН, 2012. 106 с.
6. Forest Products Annual Market Review 2016-2017. Forestry and Timber. UNECE, 165 p.
7. Ежегодный обзор рынка лесных товаров 2015-2016: Женева: ЕЭК ООН, 2017. 135 с.
8. Forest-based Sector Technology Platform (FTP). Strategic Research and Innovation Agenda for 2020. Forest-based Sector Technology Platform (FTP). Annex to the Strategic Research and Innovation Agenda. CEPI.
9. National Research agenda 2007-2030. Russian forest-based sector. 2007.
10. Аким Э.Л. Исследование процесса синтеза волокнообразующих ацетатов целлюлозы. Дисс. д.т.н. – 1971 г. Ленинград, Ленинградский институт текстильной и легкой промышленности им. С.М. Кирова
11. Аким Э.Л. Синтетические полимеры в бумажной промышленности. М.: Лесная промышленность, 1985. 248 с.
12. Аким Э.Л. «Взаимодействие целлюлозы и других полисахаридов с водными системами» в кн. «Научные основы химической технологии углеводов» / [А.Г.Захаров и др.]; М. Издательство ЛКИ, 2008. 528 с.
13. Пекарец А.А. Патенты РФ RU 2628602; RU 2596683; RU 2653513; RU 2678089.
14. Мандре Ю.Г., Пекарец А.А., Аким Э.Л. Карбонизация и торрефикация древесины. Леса России. 2018. Т.2. 109–111 с.
15. Pekaretz A., Mandre Y., Vinogradov N., Akim E. Bio refining of larch sawdust producing wood and wood-charcoal briquettes: scientific and technological aspects. EUBCE 2019.
16. Wood Energy in the ECE Region Data, trends and outlook in Europe, the Commonwealth of Independent States and North America, UNECE/FAO 2018.
17. Klyosov A. Wood-Plastic Composites. Wiley, 2007.
18. Клёсов А. А. Древесно-полимерные композиты: пер. с англ. / А. А. Клёсов. Санкт-Петербург, 2010. 735 с.

## КИНЕТИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

**Я.В. Казаков**

*Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия*

*Представлены результаты количественной оценки деформационного поведения при растяжении образцов печатных и упаковочных видов бумаги и картона, занимающих ведущее место в ассортименте отечественной бумажной промышленности. Приведен анализ изменения модуля упругости и работы деформирования в процессе растяжения с постоянной скоростью и дано обоснование их вязко-упруго-вязкопластического поведения при растяжении.*

## KINETICS OF DEFORMATION OF PULP AND PAPER MATERIALS AT TENSILE TEST

**Y. V. Kazakov**

*Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia*

*The results of a quantitative evaluation of the deformation behavior at tensile loading of samples of printing and packaging types of paper and cardboard, which occupy a leading position in the assortment of the paper industry, are presented. An analysis of trends for the modulus of elasticity and the work of deformation in the process of stretching at a constant speed is given. The rationale for their visco-elastic-viscoplastic behavior under tension is given.*

Наиболее часто в практике оценки потребительских свойств технической целлюлозы, бумаги и картона, используется испытание на растяжение. Получаемая при этом кривая зависимости «нагрузка-удлинение» ( $\langle F, N - \Delta l, \text{мм} \rangle$ ) является интегральной характеристикой поведения целлюлозно-бумажных материалов в результате возрастания нагрузки или деформации и представляют собой внешнюю (феноменологическую) картину сопротивления материала растягивающей нагрузке. Несомненным преимуществом такого подхода является возможность получения целого спектра деформационных и прочностных характеристик, в том числе реологических, за одно проведенное испытание на растяжение [1].

Использование зависимости напряжение-деформация для оценки качества целлюлозно-бумажных материалов даёт возможность количественной оценки различных видов деформации в испытуемом материале, а исследование их соотношений представляется важным для изучения закономерностей деформирования, оптимизации технологий с целью производства материалов с заданной деформативностью, а также для проектирования новых видов материалов [2].



При испытании образца целлюлозно-бумажного материала, нагружаемого с постоянной скоростью, регистрируется кривая зависимости «нагрузка-удлинение»  $\langle F-\Delta l \rangle$ , обработка которой даёт спектр характеристик [3]. Определяются характерные точки зависимости напряжение-деформация  $\langle \sigma-\varepsilon \rangle$ : предел упругости (1); эффективная точка (Э); точка начала пластических деформаций (П); точка начала дополнительной вытяжки (В); точка разрушения образца (Р). В каждой характерной точке рассчитываются величины прочностных и деформационных характеристик: усилие ( $F$ ), Н; напряжение ( $\sigma$ ), МПа; деформация ( $\varepsilon$ ), %; работа ( $A$ ), мДж; текущий модуль упругости ( $E_\tau$ ), МПа; модуль общей деформации ( $E^{од}$ ), МПа; время релаксации напряжения ( $n$ ), сек [4].

Зависимость «напряжение-деформация» может рассматриваться, как индикатор состояния структуры целлюлозно-бумажного материала, поскольку любые изменения структуры приводят к изменению хода кривой «напряжение-деформация» и, как следствие, величин деформационных характеристик.

В проведенном эксперименте использованы образцы печатных и упаковочных видов бумаги и картона, занимающих ведущее место в ассортименте отечественной бумажной промышленности и различающихся по композиции, массе  $1 \text{ м}^2$ , числу слоев и технологии формования: газетная бумага, офсетная бумага и 3 вида картона для плоских слоев гофрированного картона: с белым покровным слоем «топ-лайнер», «крафт-лайнер» и «тест-лайнер» из макулатуры. Характеристика образцов представлена в табл. 1.

Данные образцы, различающиеся по содержащей в композиции белой и небеленой целлюлозы нормального выхода, древесной массы, макулатуры, соответственно, обладают различным уровнем физико-механических характеристик. Образцы отличаются по плотности ( $0,61 \dots 0,77 \text{ г/см}^3$ ), неоднородности структуры, оцениваемой по индексу формования ( $77 \dots 361$ ), воздухопроницаемости ( $11,5 \dots 37 \text{ с}$ ), анизотропии жесткости  $TSI_{MD/CD}$  ( $2,38 \dots 3,56$ ). Таким образом, исследованные образцы дают представление о степени варьирования деформационных характеристик различных целлюлозно-бумажных материалов.

Испытаны образцы шириной 25 мм, вырезанные в машинном (MD), поперечном машинному (CD) направлении и под углом  $45^\circ$  к машинному направлению. Испытание на растяжение производилось на вертикальной разрывной машине ИТС 101 со скоростью 20 мм/мин, активная длина об-



разца составляла 100 мм. Для каждого направления испытано по 5 параллельных образцов, из которых отброшено по одному выпадающему результату [5].

Таблица 1 – Характеристика исследованных образцов бумаги и картона

Материал	Масса 1 м <sup>2</sup> , г	Композиция по волокну	Золь- ность, %	Слойность	Анизотропия <i>TSM<sub>D/CD</sub></i>
Газетная бумага	45	ХТММ – 90 % сульфатная хвойная беленая целлюлоза – 10 %	5	однослойная	3,56
Офсетная бумага	60	сульфатная хвойная беленая целлюлоза – 30 % сульфатная лиственная беленая целлюлоза – 10 %	15	однослойная	2,38
Картон топ-лайнер	125	сульфатная хвойная небеленая целлюлоза – 40 % сульфатная лиственная небеленая целлюлоза – 30 %;	–	основной бурый слой – 60 %	2,55
		сульфатная хвойная беленая целлюлоза – 20 % сульфатная лиственная беленая целлюлоза – 20 %	10	покровный белый слой – 40 %,	
Картон крафт-лайнер	140	небеленая сульфатная хвойная целлюлоза высокого выхода – 80 % полуцеллюлоза – 20 %	–	основной слой – 80 %	2,88
		небеленая сульфатная хвойная целлюлоза высокого выхода – 100 %	–	покровный слой – 20 %	
Картон тест-лайнер	125	макулатура МС5Б – 100 %	–	однослойный	2,42

Данные, отражающие кинетику изменения прочностных и деформационных характеристик в процессе испытания, рассчитываются по усредненной кривой напряжение-деформация через каждые 0,05 мм удлинения.

Типичные кривые зависимости напряжение-деформация, полученные при одноосном испытании на растяжение для образцов, вырезанных в трех направлениях – MD, CD и 45° представлены на рис.1. Данные зависимости четко показывают анизотропию свойств бумаги при одноосном растяжении, уменьшение жесткости в упругой области деформирования, величины предела упругости и увеличение общей деформации до разрушения при увеличении угла вырезки образцов от машинного направления (MD).

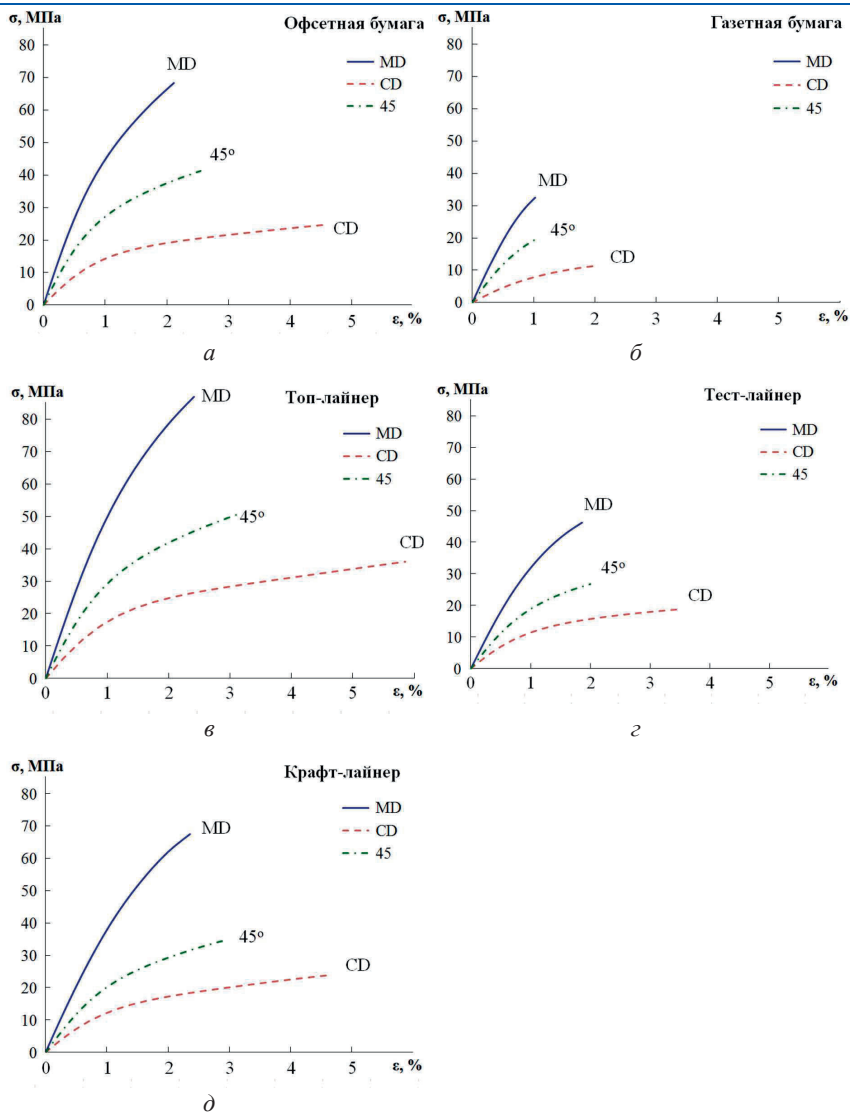


Рис.1. Зависимости «напряжение-деформация», отражающие кинетику деформирования различных целлюлозно-бумажных материалов: а – офсетная бумага; б – газетная бумага; в – картон топ-лайнер; г – картон тест-лайнер; д – картон крафт-лайнер

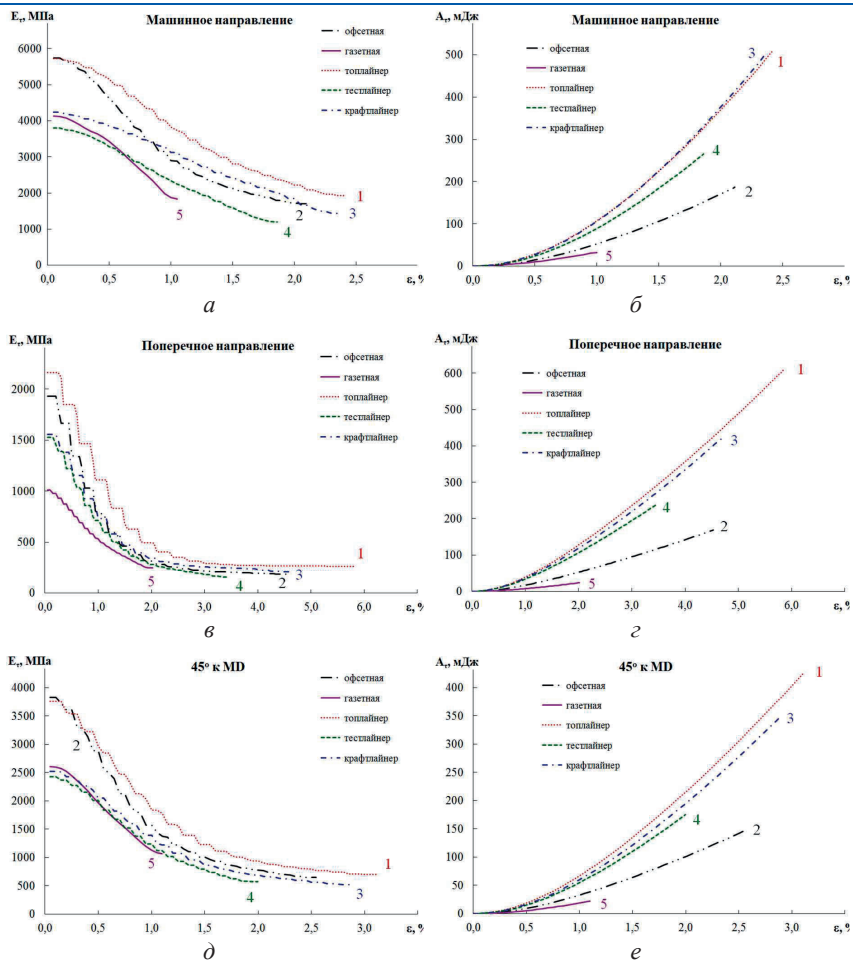


Рис.2. Кинетика изменения в процессе деформирования: *a, в, д* – текущий модуль упругости ( $E_t$ ); *б, г, е* – работы деформирования ( $A$ ); *a, б* – в направлении MD; *в, г* – в направлении CD; *д, е* – в направлении 45° к MD; 1 – топ-лайнер; 2 – офсетная бумага; 3 – крафт-лайнер; 4 – тест-лайнер; 5 – газетная бумага

Все эти отличия обусловлены преимущественной ориентацией целлюлозных волокон в структуре листа бумаги и картона. Для различных материалов полученные зависимости отличаются величинами напряжений и деформаций, а также расположением кривой для образцов, вырезанных под углом 45°



по отношению к образцам MD и CD, которые связаны со степенью анизотропии образцов, прочностью и длиной волокон, составляющих композицию бумаги, а также технологией формования [6].

Закономерно, что наибольшей прочностью и жесткостью обладают материалы из первичных чисто целлюлозных полуфабрикатов – картон топ-лайнера рис.1,в, и офсетная бумага, рис. 1,а, что выражается в более крутом ходе зависимости « $\sigma$ – $\varepsilon$ », и большей величине разрушающего напряжения и деформации разрушения. Повышенное содержание лигнина, например, в полуфабрикатах из которых изготовлен крафт-лайнер, приводит к снижению жесткости и растяжимости, рис.1,д, а использование механической массы (в случае газетной бумаги) эти эффекты усиливает в очень высокой степени, рис.1,б.

Кинетика изменений в процессе деформирования характеристик текущих модуль упругости ( $E_\tau$ ) и работа деформирования ( $A_\tau$ ), представлены на рис.2. Величина модуля упругости выражает скорость роста напряжения в образце при его деформировании. Текущий модуль,  $E_\tau = d\sigma/d\varepsilon$ , отражает «мгновенную» жесткость при заданном уровне деформации. Работа выражает накопленную в образце энергию при его растяжении.

При испытаниях образцов в направлении MD, механическое поведение определяется, главным образом, поведением волокон. Механизм процессов, приводящих к разрушению образцов MD, в большей степени обусловлен деформированием внутримолекулярных связей в целлюлозных волокнах, что приводит к вязко-упругому характеру деформирования.

При деформировании образцов в направлении CD определяющее влияние имеют межмолекулярные и межволоконные водородные связи, и механизм деформирования при этом можно определить, как упруго-вязко-пластический.

При деформировании образцов, вырезанных под углом  $45^\circ$  в наибольшей степени играют роль сдвиговые деформации, а траектория линии разрыва образцов направлена под углом  $45^\circ$  к продольной оси образца. Механизм деформирования в данном случае можно определить, как смешанный упруго-вязко-пластический с учетом сдвиговых эффектов.

Соответственно, кинетические закономерности изменения жесткости образцов в процессе растяжения имеют свои особенности, в зависимости от преимущественной ориентации волокна в образце.

Для образцов в машинном направлении, рис.2, а, скорость изменения упругости материала выше для бумаги (кривые 2,5), чем для картона (кривые





1,3,4). По всей видимости, здесь играет роль фактор толщины листа – у бумаги она существенно меньше, чем у картона, и, соответственно, меньшее количество материала в объёме образца.

Для образцов в поперечном машинному направлению, рис.2, в, скорость изменения упругости материала существенно выше только для газетной бумаги (кривая 5). Причина этого – повышенная анизотропия ( $TSI_{MD/CD}=3,56$ ) и лигнин в механической массе, препятствующий прочному связеобразованию в условиях пониженной плотности материала, что приводит к деформированию и разрыву межволоконных связей при растяжении.

Для образцов, вырезанных под углом  $45^\circ$  машинному направлению, прослеживаются следующие тенденции. Кривые для бумаг (газетной и офсетной) имеют несколько более высокий наклон, то есть данные материалы демонстрируют повышенную скорость потери жесткости связей, однако в меньшей степени, чем для образцов CD. Это связано с особенностями развития сдвиговых деформаций в образцах с меньшей толщиной.

Изменение величины работы деформирования ( $A_\tau$ ), выражающей накопленную в образце энергию при его растяжении, представлено на рис.2, б, г, е. Численно работа деформирования вычисляется как площадь под кривой «нагрузка-удлинение», поэтому ее величина напрямую зависит от массы  $1 \text{ м}^2$  материала. Соответственно, кривые кинетики развития работы деформирования четко разделяются на картон и бумагу, и располагаются в ряд: топ-лайнер – крафт-лайнер – тест-лайнер – офсетная бумага – газетная бумага. Скорость роста данных кривых соотносится с ходом кривых «нагрузка-удлинение», которые в существенной степени определяются массой  $1 \text{ м}^2$  материала.

Регистрируемые при испытании на растяжение зависимости нагрузка-удлинение определяют величины деформационных и прочностных характеристик образцов, вычисляемых при их обработке.

Материалы по величинам характеристик в упругой зоне деформирования располагаются по убыванию в ряд: топ-лайнер – офсетная бумага – крафт-лайнер – тест-лайнер – газетная бумага. Это соответствует изменениям в композиции по волокну: (небеленая + беленая сульфатная) – беленая сульфатная – ЦВВ – вторичное волокно на основе ЦВВ, полуцеллюлозы и сульфатной небеленой целлюлозы – механическая масса.

При переходе к замедленно-упругой зоне офсетная бумага и крафт-лайнер меняются местами в этом ряду, что связано с более жестким волокном крафт-лайнера и большим объемом структуры за счет массы  $1 \text{ м}^2$ .



Упругая составляющая напряжения составляет 19...26 % в направлении MD, 19...21 % в направлении CD и 21...22,5 % в направлении 45°, что определяется изменением вклада внутриволоконных и межволоконных связей в материале.

Величины напряжений, при которых начинается область предразрушения (участок дополнительной вытяжки) составляет 91...94 % в направлении MD, 89...96 % в направлении CD и 91,5...95,1 % в направлении 45°.

Упругая составляющая общей деформации  $\varepsilon_{уп}$ , %, при увеличении угла ориентации волокон изменяется от 13...20 % до 6...10 %, то есть несколько снижается. Замедленно-упругая составляющая,  $\varepsilon_{зам}$ , %, изменяется от 69...75 % до 70...79 %, то есть несколько возрастает. При этом пластическая составляющая общей деформации,  $\varepsilon_{пл}$ , %, при увеличении угла ориентации волокон изменяется от 11...16 % до 11...24 %. Таким образом, увеличение общей деформации определяется, главным образом, пластической составляющей зоны предразрушения.

Соответственно, упругая составляющая работы деформирования,  $A_{уп}$ , %, при увеличении угла ориентации волокон снижается от 1,8...4,8 % до 0,8...1,7 %. Наименьшие величины – у крафт-лайнера и тест-лайнера, а наибольшие – у газетной бумаги, что во многом связано с общей способностью к деформированию, которая у газетной бумаги самая низкая и обусловлена повышенным содержанием лигнина и пониженной способностью к связеобразованию.

Увеличение вклада замедленно-упругой составляющей и составляющей зоны предразрушения связано с композицией по волокну и соответствует, как увеличению прочности волокон, так и средней длины.

По результатам проведенного эксперимента на основании анализа кривых зависимости «напряжение-деформация» дана оценка различия в деформационном поведении различных целлюлозно-бумажных материалов в условиях одноосного растяжения с постоянной скоростью при использовании вертикальной разрывной машины с микропроцессорным управлением. Изменение величин деформационных характеристик при отклонении преимущественного угла ориентации волокон от машинного к поперечному связано с изменением соотношения вклада внутриволоконных и межволоконных связей и величиной анизотропии, связанной с длиной волокна и условиями формования на сетке БДМ.

Различия величин деформационных характеристик в образцах различной структуры и композиции во многом связаны с прочностью и размерами



волокон, а также их способностью к связеобразованию, обусловленной содержанием лигнина. Исследованные материалы по величинам характеристик деформативности располагаются по убыванию в ряд: топ-лайнер – офсетная бумага – крафт-лайнер – тест-лайнер – газетная бумага. Это соответствует изменениям в композиции по волокну: (небеленая + беленая сульфатная) – беленая сульфатная – ЦВВ – вторичное волокно на основе ЦВВ, ПЩ и сульфатной небеленой целлюлозы – механическая масса.

Наибольший вклад в работу деформирования при растяжении материалов вносит замедленно-упругая зона, при этом вклад упругой составляющей не превышает 5 %.

Таки образом, на примере типичных представителей целлюлозно-бумажных материалов, приведена количественная характеристика их вязкоупруго-вязкопластического поведения при растяжении с постоянной скоростью.

#### Список литературы

1. Комаров В.И. Деформация и разрушение волокнистых целлюлозно-бумажных материалов. Архангельск: Изд-во Архан. гос. техн. ун-та, 2002. 440 с.
2. Комаров В.И., Казаков Я.В. Анализ механического поведения целлюлозно-бумажных материалов при приложении растягивающей нагрузки / Лесной вестник МГУЛ. 2000. №3 (12). С.52–62.
3. Свид. № 2001610526 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программное обеспечение лабораторного испытательного комплекса для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов (КОМПЛЕКС). / Я.В. Казаков, В.И. Комаров; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО АГТУ (RU). № 2001610250; заявл. 11.03.2001; опубл. 10.05.2001, Реестр программ для ЭВМ. 1 с.
4. Казаков Я.В. Характеристики деформативности как основополагающий критерий в оценке качества целлюлозно-бумажных материалов: дисс. д-ра техн. наук: 05.21.03 / Казаков Яков Владимирович. Архангельск: 2015. 534 с.
5. Казаков Я.В., Казакова О.Я., Манахова Т.Н., Малков А.В. Определение упругих констант целлюлозно-бумажных материалов при растяжении в плане листа // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Т.81. 2015. №8. С.53–58.
6. Казаков, Я.В. Практика использования характеристик деформативности для оценки качества бумаги и картона. / В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов»: матер. I Междунар. науч.-техн. конфер. Архангельск; Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, 2011. С.88–94.

## DIGITALIZATION ON ITS WAY TO IMPACT STRENGTH PROPERTIES

**R. Berger**

*BTG Instruments GmbH, Wessling, Germany*

*BTG Process Solutions experts specialize in the implementation of solution concepts that give high initial benefits at low resource requirements, thus providing a solid basis for an efficient approach to Industry 4.0. This is illustrated by a number of examples from industrial practice including the optimization of a pulp bleach plant, the implementation of a prediction model on a paperboard machine and the Vigilance 4.0 concept applied to the operation of a Yankee cylinder for tissue manufacture.*

### ЦИФРОВИЗАЦИЯ КАК СПОСОБ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЧНОСТНОСТНЫЕ СВОЙСТВА

*Специалисты BTG Process Solutions специализируются на реализации концепций решений, которые дают высокие начальные преимущества при низких требованиях к ресурсам, тем самым обеспечивая прочную основу для эффективного подхода к Industry 4.0. Приведены ряд примеров из промышленной практики, включая оптимизацию установки для отбелики целлюлозы, реализацию прогнозной модели на КДМ и концепцию Vigilance 4.0, применяемую для работы цилиндра Янки для производства тиссю-бумаги.*

#### SUMMARY

Continuing digitalization on the way to Industry 4.0 opens up a number of new opportunities for pulp and paper manufacturers and converters. Options range from process optimization to the establishment of new value creation networks and business models. Even skeptical entrepreneurs will have to face these facts if they want to remain competitive. Paper industry managers find themselves confronted with the problem of finding optimal solution concepts that will sustainably ensure business success. However, significant expenditure and the need for a high level of resources constitute a major stumbling block for many companies on their path to the fourth industrial transition.

BTG Process Solutions experts specialize in the implementation of solution concepts that give high initial benefits at low resource requirements, thus providing a solid basis for an efficient approach to Industry 4.0. This is illustrated by a number of examples from industrial practice including the optimization of a pulp bleach plant, the implementation of a prediction model on a paperboard machine and the Vigilance 4.0 concept applied to the operation of a Yankee cylinder for tissue manufacture.

## INTRODUCTION

For many years now, digitalization of the paper industry has in part been brought forward very successfully. Nevertheless, the preconditions for and the options inherent in Industry 4.0 are still far from being attained and fully exhausted. To effectively approach Industry 4.0, key requirements have to be fulfilled that are crucial for a steep potential ramp-up curve. At the same time the business opportunities and goals of users have to be taken into account and adequately protected.

BTG Process Solutions focus on designing and offering modular solution concepts that enable step-by-step implementation. Accordingly, any measures taken can be precisely adapted to available customer resources. This generates high benefits over the near term at low resource needs and minimized risks and customers may introduce follow-up measures soon after. This approach has proven successful in many projects. BTG attaches great importance to working out a chain of action together with its customers directly upon introduction and use of IT systems rather than at the end of that process.

## BTG AS A PARTNER

“Our business processes are aimed at securing sustainable and verifiable economic success for our customers“.

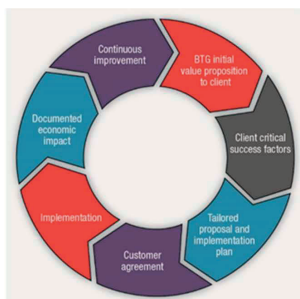


Fig. 1. Model of BTG business processes

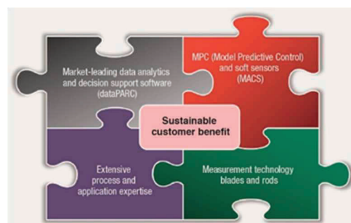


Fig. 2. Tools and competencies

In collaboration with its customers, BTG first conducts a detailed analysis of existing challenges and their prioritization. Every solution concept is geared to meeting customer requirements, and critical success factors are mutually agreed as a basis for satisfactory completion of the project. Upon expiry of the agreed project life, the degree of attainment of success factors is verified and documented, thus evaluating the project results and enabling further optimization measures to be defined.



Long-standing experience recognized expertise in the areas shown in Fig. 2 and a customer-oriented approach make BTG a powerful business ally when it comes to developing and implementing solution concepts along the avenue toward Industry 4.0.

### **INDIVIDUALIZED SOLUTION CONCEPTS**

Being both client and application focused, BTG's solution concepts have since many years been adopted in various business sectors. Dedicated modules and tools have been specifically created for the pulp and paper industry which guarantee not only high efficiency but also the necessary acceptance by operational staff. Features like an open structure and ease of handling enable customers to maintain, optimize and extend the systems on their own so that the achieved know-how remains in the customers' possession. Here are a few additional characteristics:

- Architecture ensures digital consistency and IT security;
  - Compatible with all systems and infrastructures;
- Modular design and extendable configuration;
  - Solution concepts are task-focused, permitting forward-looking development;
- Customized solutions for step-by-step implementation;
  - No overburdening of customer resources;
  - Near-term benefits enable further action;
  - Minimized project risk;
- No cross-linkage with existing systems;
  - High flexibility and transformation capability ensure further advancement by the customer;
- Fast and efficient, easy to handle;
  - High take-up on the part of users leads to a high level of use and distinct benefits;
- Open IT and platform structure;
  - Integration of BTG resources possible, but not obligatory;
- Individualized trainings and services;
  - Customer can easily maintain, optimize and extend the systems on his own;
  - Acquired know-how remains in the customer's possession;
- Sustainable benefits through continuing support;
  - Automatic reporting, remote service or on-site support.

### **AVENUES TOWARD INDUSTRY 4.0**

Fig. 3 shows four levels leading up to Industry 4.0. In the representation, superordinate aspects like vertical and horizontal interconnections or system engineering have intentionally been left out. Irrespective of complexity, however,

the success of superordinate measures and concepts is in each case dependent on the quality of the subordinate structure – which means benefits will be all the higher, all the earlier and far more sustainable the better the subordinate stage was optimized. That's nothing new, but this maxim is often neglected.

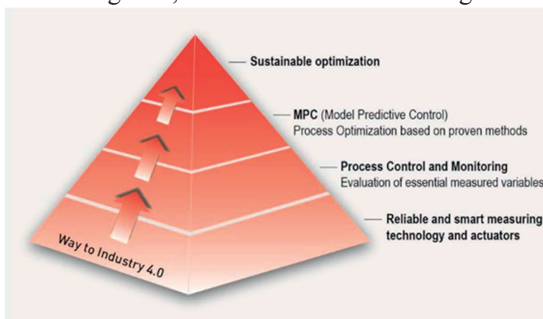


Fig. 3. Simplified representation of the levels leading up to Industry 4.0

### **LEVEL 0: RELIABLE AND SMART MEASUREMENT TECHNOLOGY AND ACTUATORS**

Smart and innovative measuring techniques, suitable actuators and correctly rated control circuits are fundamental for successful operations on higher levels. BTG's field experience has revealed that level 0 frequently offers a high potential for optimization. Mutually agreed measures taken at the customer's facility generate high benefits, because even seemingly little mistakes may give rise to major process or product changes. For example, an 0.2 % deviation from a target consistency of 3.7 % results in a mass flow variation of approx. 5.5 %. This in turn impacts the workload and functional quality of assemblies, the adherence to the original formulation or else the volume specific dosage of additives.

### **LEVEL 1: PROCESS CONTROL AND MONITORING**

On this extended control technology level, software solutions are employed which provide the personnel in charge with vital tools for process monitoring and optimization. There are a multitude of products and solution concepts available for this purpose, such as

#### **– Loop tuning**

Control circuits are continuously monitored, and control response data is evaluated. A dashboard shows all control circuits sorted according to their allocation and indicating their control quality. This enables process control staff to quickly and clearly identify less-than-optimal controls. A mouse-click brings up recommendations for improvement if this is required.



– **Centerlining**

Manages process and quality data of all products and quickly and clearly generates target settings based on reference products.

– **Scorecard**

A clearly arranged and aggregated representation of complex interrelationships enables a quick analysis of a situation while giving focused guidelines for action. For details refer to the “Vigilance 4.0” case study below.

– **Sandbox**

While production is going on, users may - within a secure area – try out various changes in settings and scenarios and may simulate and compare their impact on the process and product while the original process remains undisturbed.

## **LEVEL 2: MODEL PREDICTIVE CONTROL**

The complexity of processes mostly prevents control staff from regularly achieving optimal results. Available software solutions either give recommendations for action or they directly interfere with process control. Here are a few examples:

– **Stocktracking**

Measured variables of material or product streams are tracked location-discrete and time-discrete along a defined process section. They are used, e.g., to optimize product change-over or the machine load factor.

– **Soft sensors**

Soft sensors are used for modelling status data of processes or products. These models serve to achieve permanent control even in cases where acquired process or laboratory data is only available on a time-discrete basis. Additionally, models make it possible to compare measured vs. modelled properties. In this way, any measuring errors or measurement drifts are quickly detected and can be adjusted.

## **LEVEL 3: SUSTAINABLE OPTIMIZATION**

A basic prerequisite for sustainable optimization is a close collaboration between vendor and user. In this context, processes are analyzed, actual causes and potentials are identified, appropriate measures are defined and finally implemented and monitored in daily industrial practice. All these steps are decisive for the creation of smart software and hardware solutions which are characterized by efficiency, the degree of their local and global interlinking, their variability in case of changes and their user friendliness. Accordingly, continual development of





smart software and network solutions combined with innovative measuring technologies is a vital stepping stone on the way toward sustainable optimization. Moreover, via ever growing interconnections across company boundaries, users gain access to information, auxiliaries and tools which help to intensify value creation or to establish new business models.

## CASE STUDIES

In the majority of typical client projects, challenges are outlined before data analysis is started. Based on historic data and current process observations, BTG issues a benefit analysis which identifies the areas with an optimization potential. Optimization measures invariably yield customer benefits that are calculated on conservative and optimistic assumptions and which form the basis for an action plan. A brief outline is given of three case studies below.

### PULP BLEACH PLANT

In a pulp mill producing 500,000 t/a bleached kraft, the multi-stage bleach line is mainly controlled via discontinuous kappa measurements (kappa factor control) and brightness measurements. Following an analysis of the as-is state and historic data, an action plan was proposed which predicted chemical cost savings of some 4 % (conservative) to 8 % (optimistic). The discontinuous fiber kappa measurements were replaced by continuous total kappa measurements (by bleach load transmitters) and the MACSBleach software of Capstone was installed (details see text box). In the first half year after implementation, savings of 7,6 % as against the reference period were obtained with an ROI being realized within approx. 7 months.

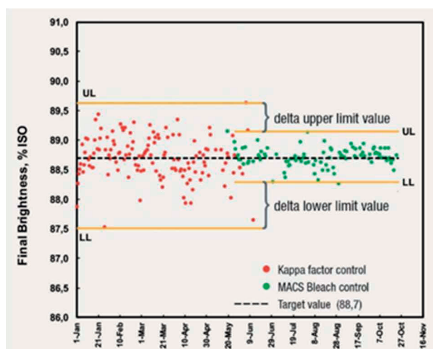


Fig. 4. Optimization of pulp bleach



## WET-STRENGTH PAPERBOARD

The paperboard machine produces 630,000 t/a paperboard mainly for refrigerated and deep freeze packages. The bulk of products are wet-strength finished. Typically, wet-strength agents are dosed with a high safety margin to account for major fluctuations in measured wet-strength properties and for considerably delayed laboratory values. Sudden or short-term underdosages always entail the risk of high extra expenditure arising due to broke or customer complaints.

The MACS software solution applied historic data to set up a prediction model for the wet strength properties of the paperboard with some 20 TAGs. The model was optimized with additional historic data and lab values from production. After a trial period of approx. 2 months, control was successfully automated. The reduced dosages of wet strength agent yielded a benefit of about 550,000 euros/a.

## OUTLOOK

As far as the paper industry is concerned, Industry 4.0 will take place as an evolution rather than a revolution which latter is to be expected in many other industrial sectors.

The ongoing vertical and horizontal interconnections between processes, the application of self-learning systems and links to information and value creation networks enable a previously unknown optimization of production and business processes. This includes the development of new business segments and processes – a trend leading to a rapidly increasing number of vendors and offerings in this area, which makes it still harder for users to keep an overview. Moreover, the business models and intentions of suppliers are not always clearly intelligible, which constitutes a major challenge to users: trying not to get left behind they must at the same time avoid serious mistakes in decision-making. In particular, users need to ensure a balanced expertise / power relationship between themselves and vendors and other network partners so as not to lose their own empowerment for action.

BTG successfully supports paper industry companies in their efforts to master this structural change by means of consistently customer-focused business processes, continuing advancement of solution concepts and the creation of superordinate IT structures and innovative measuring technologies.

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ГОФРОКАРТОНА

**А.С. Смолин**

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург, Россия*

*В статье сформулированы существенные преимущества гофрокартона как материала для современной упаковки, соответствующей принципам циркулярной экономики. Охарактеризованы основные тенденции развития технологии гофрокартона и тары из него, связанные с повышением экономической эффективности производства и ростом качества продукции для удовлетворения растущих требований рынка.*

### MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF CORRUGATED CARDBOARD TECHNOLOGY

**A.S. Smolin**

*Graduate School of Technology and Energy St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design, St. Petersburg, Russia*

*The article formulates the significant advantages of corrugated cardboard as a material for modern packaging that complies with the principles of circular economy. The main technical developments of the technology of corrugated materials, corrugated cardboard and containers made of it are described, which are associated with an increase in the economic efficiency of production and an increase in product quality to meet growing market demands.*

Гофрокартон – самая массовая продукция целлюлозно-бумажной промышленности в России и в мире. К 2021 году ожидается выпуск двухсот миллионов тонн гофрокартона, что составит примерно 45 % мирового производства товарной продукции.

Интенсивное развитие производства имеет объективные предпосылки, а именно:

– Экономичность. Низкая себестоимость и, соответственно, цена гофро-ящика, что подкрепляется широким использованием вторичного волокна. Стоимость гофротары по отношению к цене упаковываемого товара самая низкая из всех видов упаковочного материала.

– Экологичность. Массовое применение вторичного волокна, развитая система сбора использованной гофротары, современная технология переработки гофроящиков в макулатуру, экономическая безопасность



для окружающей среды перерабатываемых отходов гофротары полное соответствие принципам циркулярной экономики.

– Технологичность. Современные высокопроизводительные технологические потоки производства материалов для гофрокартона, развитая логистика и компактность транспортировки лайнера и флутинга, автоматизированные системы производства гофрокартона и гофротары, высокая вариативность видов гофротары, легкость управления качеством готовой продукции.

– Барьерная функция. При правильном подборе конструкции гофротары и защитных характеристик гофрокартона (влагопрочность, комбинированная упаковка, поверхностная обработка, композиция лайнера и флутинга, характеристика клеевого адгезива) гарантируется сохранность упаковываемого продукта в рамках товаров, предназначенных для упаковки в гофротару.

– Информационно-эстетическая функция. Поверхностные характеристики плоских слоев гофрокартона, обеспечивающие нанесение современных видов печати, включая офсетную цифровую, лайнер с верхним белым слоем на основе беленой целлюлозы либо облагороженной макулатуры, отделка поверхности, включая мелование.

Совершенствование технологии гофрокартона и гофротары направлено на сохранение вышеуказанных преимуществ и их поступательное развитие в соответствии с растущими требованиями потребителей. Принцип торговли «хорошо упаковано – наполовину продано» предполагает не только улучшение информационно-эстетической функции, но и развитие других приоритетов гофротары – барьерных, экономических, технологических.

Достижение таких показателей невозможно без современных положений и закономерностей, определяющих теоретические основы и технологические и технические решения в области производства основных ресурсов гофрокартона-лайнера и флутинга.

Трехслойный гофрокартон при использовании первичных волокнистых материалов содержит в своем составе 50...55 % сульфатной хвойной небеленой целлюлозы, с выходом 54...56 %, жесткостью 65...85 ед. Каппа, содержанием лигнина 9...11 % и 45...50% нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы с выходом 75...80 %, жесткостью 100...110 ед. Каппа, содержанием лигнина 18...20 %.



При использовании вторичного волокна сохраняются приблизительно такие же соотношения, поскольку первоисточником волокон для макулатуры всегда являются первичные волокна. Естественно, некоторые коррективы вносит цикличность вторичных волокон.

Таким образом, полимерный состав гофрокартона представлен целлюлозными и гемицеллюлозными структурами и лигнином. При этом физико-химические характеристики этих полимеров достаточно различны. Преобразования, происходящие с материалами, составляющими гофрокартон, тесно связаны с основными положениями теории физического (релаксационного) состояния полимеров, составляющих лигнофицированные волокна [1].

К выводам, полученным на основании этой теории и имеющим важное значение для производства гофрокартона, следует отнести:

- положение о том, что целлюлоза и гемицеллюлоза могут перейти из стеклообразного состояния в высокоэластическое при температуре 220 °С, однако в реальных условиях этот переход происходит при комнатной или даже минусовой температуре при условии пластификации достаточным количеством воды.

- переход лигнина из стеклообразного в высокоэластическое состояние происходит при температуре 130 °С, а в условиях достаточного увлажнения – при температуре 80...120°С.

- образование прочных межволоконных связей возможно лишь в случае состояния полимеров, образующих контакт, в высокоэластическом либо вязкотекучем состоянии.

Рассматривая процессы размола, отлива, прессования и первой стадии сушки, следует отметить что целлюлозная и гемицеллюлозная составляющая волокон постоянно находится в расстеклованном высокоэластическом состоянии, то есть потенциально готова к связеобразованию, что реализуется на последующих стадиях процесса сушки.

При этом лигнин, которого вполне достаточно в лигнофицированных волокнах, находится в стеклообразном состоянии, поскольку при размоле, отливе и прессовании при наличии необходимого количества воды температура процесса никоим образом не достигает 80 °С. Эта температура возможна в процессе сушки, но там воды явно недостаточно. При достижении сухости 55...60 %, где начинается образование прочных водородных связей, межволоконная вода практически отсутствует.



Таким образом, можно сделать вывод, что лигнин в технологическом процессе производства бумаги и картона постоянно находится в стеклообразном состоянии, и это основная причина неучастия лигнина в образовании межволоконных водородных связей. (рис. 1).

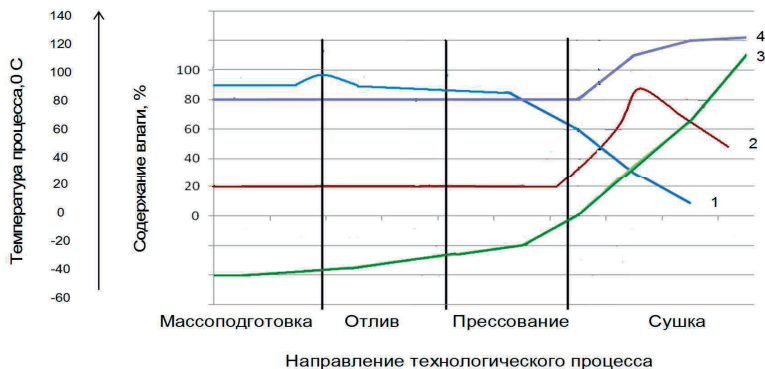


Рис. 1. Релаксационные переходы в производстве бумаги и картона  
 1 линия влагосодержания; 2 линия температуры;  
 3 температура стеклования целлюлозы и гемицеллюлоз;  
 4 температура стеклования лигнина

Следовательно, наличие в лайнере и флютинге лигноцеллюлозных волокон определенным образом видоизменяет основные параметры технологии этих материалов и повышает значимость релаксационных явлений [1].

Специалистам, работающим в области тароупаковочных материалов на основе растительных волокон, хорошо известно, что прочность и жесткость материалов – это различные понятия. Прочность материала определяется напряжением, необходимым для того, чтобы этот материал разрушить. При оценке качества целлюлозно-бумажных материалов наиболее значимым является испытание на растяжение.

Жесткость определяет реологические свойства материала, относящиеся к линейно-упругим деформациям. Жесткость картона-лайнера относится к его деформационным характеристикам наряду с разрушающим усилием при сжатии кольца RCT, (H) и сопротивлением сжатия короткого участка образца SCT (кН/м).

Наиболее значимой характеристикой картона-лайнера, обеспечивающей во многом каркасность и штабелируемость гофролящика, является жесткость при изгибе. Гофрокартон и ящик из него при внешних нагрузках



испытывают главным образом деформацию изгиба боковых стенок ящика, проявляющегося в виде вертикальных и горизонтальных линий излома, изгиб стенок, деформации углов между вертикальными стенками. Чем выше жесткость при изгибе, тем выше каркасность ящика и способность сопротивляться вышеуказанным деформациям.

Таким образом, исходя из роли лигнина в формировании прочности и жесткости лигнофицированных волокон, следует считать установленным, что жесткость целлюлозы (химический показатель), жесткость и прочность волокон (физико-химическая характеристика) во многом определяют свойства образцов бумаги и картона (физико-механические показатели).

В табл. 1 представлено изменение основных показателей для образца ЦВВ (число Каппа 67) в зависимости от степени помола.

Из данных табл. 1 хорошо прослеживается влияние на модуль упругости и сопротивление продавливанию сил связи, а также влияние пухлости (т.е. толщины) на жесткость при изгибе.

Таблица 1. Влияние процесса размола ЦВВ на прочностные и деформационные (жесткостные) показатели

Степень помола °ШР	13	17	20	25	30
Нулевая разрывная длина, $L_0$ , м	7150	10290	11090	9800	9950
Пухлость $V$ , см <sup>3</sup> /г	2,58	1,54	1,43	1,45	1,31
Силы связей $F_{св}$ , МПа	0,154	0,994	1,203	1,351	1,653
Сопротивление продавливанию $P$ , кПа	26	351	412	396	475
Модуль упругости $E$ , МПа	1320	5600	7910	6150	9830
Жесткость, $EI$ , мН×см <sup>2</sup>	96	104	83	76	77

Так, жесткость при изгибе неразмолотой целлюлозы при низком модуле упругости достаточно велика за счет толщины образца. Данные табл. 1 также показывают, что оптимальным для прочности является степень помола 25...30<sup>0</sup> ШР, для жесткости – 17...20<sup>0</sup> ШР. Как правило, выбирают среднее, но это отличная иллюстрация различия в понятиях прочности и жесткости картона-лайнера.



Таким образом:

– прослеживается достаточно тесная связь между жесткостью целлюлозы, жесткостью волокон, жесткостью картона-лайнера и жесткостью гофрокартона и гофротары, во многом определяемая наличием лигнина в материалах.

– установлены существенные различия в формировании показателей прочности и деформативности (жесткости) картона-лайнера и разноплановость изменения этих показателей в зависимости от основных технологических процессов.

– сравнительный анализ показателей крафт-лайнера и тест-лайнера подтверждает значительное преимущество крафт-лайнера по прочности и близкие значения жесткости крафт-лайнера и тест-лайнера [2].

На протяжении последних 10–15 лет продолжается тенденция к снижению массы  $1 \text{ м}^2$  лайнера и флютинга и уменьшению массоемкости гофроящика. Ожидание, что с увеличением использования вторичного волокна снижение массы  $1 \text{ м}^2$  материалов замедлится, в целом не оправдалось, хотя достичь необходимого качества лайнера и флютинга на основе вторичного волокна значительно сложнее, чем на свежем волокне. Соотношение 90–60–90 сегодня не только пропорции классической женской фигуры, но и ближайшее будущее для трехслойного, надеюсь, микрогофрокартона. Сегодня крафт-лайнер массой  $105 \text{ г/м}^2$  и флютинг  $80..90 \text{ г/м}^2$  – реальная продукция. Со снижением массы  $1 \text{ м}^2$  гофроматериалов и массоемкости гофроящика прежде всего необходимо считаться с падением жесткости и коркаемости гофротары из-за уменьшения толщины стенок ящика. Малые массы  $1 \text{ м}^2$  гофроматериалов определяют развитие микрогофрокартона, для стандартных профилей гофров уже реализованные массы  $1 \text{ м}^2$  лайнера и флютинга, повидимому, являются предельными [3].

Следует также отметить определенные изменения химической технологии лайнера и флютинга. Эти изменения прежде всего связаны с поверхностной обработкой материалов. Оказалось, технологически и экономически целесообразным в ряде случаев заменить проклейку в массе поверхностной проклейкой. Для поверхностной проклейки используются композиции на основе крахмала. При этом не только снижается водопоглощение, но и возрастают показатели прочности, в частности, прочность поверхности материалов. Поверхностная обработка способствует также улучшению печатных свойств лайнера благодаря увеличению гладкости и снижению пылимости.





Дальнейшим развитием химической технологии лайнера является процесс мелования. Технология мелования лайнера показала, отличные результаты с точки зрения качества печати. Основной проблемой в реализации упомянутых технологий является оборудование для покрытий – пленочные клеильные прессы. В настоящее время установка новых и модернизация действующих картоноделательных машин безусловно должна предусматривать данное оборудование [4].

В непосредственной связи с процессами поверхностной обработки является технология вайт-топ-лайнера. Картон-лайнер в верхнем белом слое широко востребован гофропроизводителями. В России крафт-лайнер с белым слоем выпускается в Сыктывкаре. В настоящее время ведутся работы на ряде предприятий по освоению производства тест-лайнера с белым слоем. Современной тенденцией является замена белого слоя в тест-лайнере на основе первичной беленой целлюлозы на облагороженную макулатуру.

Для решения этой задачи необходима реализация процесса деинкинга – облагораживание и обесцвечивание писчепечатной макулатуры путем многоступенчатой флотации.

Первые опытно-промышленные выработки в российских условиях уже проведены и дали положительный результат [5].

Велика вероятность, что растущая потребность в вайт-топ-лайнере в ближайшее время может привести к изменению конфигурации сеточных частей в плане появления двух формеров на плоской сетке, что позволит значительно повысить качество топ-лайнера, создавая трехслойный вариант.

В плане все более широкого использования вторичного волокна следует обратить внимание на тенденцию комбинировать в трехслойном, а тем более пятислойном гофрокартоне слои из свежего волокна (чаще всего верхний слой) и флутинга и нижнего слоя из вторичного волокна. Такая оптимизация ценообразования характерна для большинства гофропредприятий [6].

В определенной степени это улучшает проблему цикличности. В то же время в целом практически в любой коробке, пришедшей на переработку, велика доля вторичных волокон.

Таким образом, оценивая в целом современные тенденции развития технологии гофрокартона следует констатировать стремление к росту качества, особенно в барьерной и информационно-эстетической функциях, сохранения при этом высокой экономической эффективности гофрокартона и тары на его основе.

### Список литературы

1. Akim E.L., Smolin A.S. Role of the relaxation state of polymer components in wood when making composite packaging materials (corrugated cardboard) // *Fibre Chemistry*. Vol. 50, No. 4, November, 2018. p. 336–344.
2. Смолин А.С. Формирование основных характеристик картона-лайнера. // Сб. трудов 18-ой МНТК «Год экологии в России и на предприятиях ЦБП ОАО «Караваево», 2017. С. 8–13.
3. Дернова Е.В., Дулькин Д.А. Технологичность как условие эффективной переработки тарного картона на высокоскоростных гофроагрегатах // Сб. трудов IV МНТК «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов. САФУ, Архангельск, 2017. С. 54–59.
4. Князева Ю.А. Оценка жизненного цикла, как характеристика экологичности продукции ЦБП // *Целлюлоза, бумага, картон*. 2016. №8, С. 82–88.
5. Мидуков Н.П. Импортзамещающая технология производства картона вайт-лайнера из 100 % макулатуры // *Химическая технология*. №1. 2019. С.29–34.
6. Мурадян К.А., Смолин А.С. Изменение прочностных показателей трехслойного гофрированного картона в зависимости от вида исходного сырья // Сб. трудов 19-ой МНТК «Производство бумаги и картона для гофротары и упаковки», ОАО «Караваево». 2018г. С. 7–11.

## ФОРМИРОВАНИЕ ВТОРИЧНОЙ КЛЕТОЧНОЙ СТЕНКИ ВОЛОКОН ДРЕВЕСИНЫ

**Е.В. Новожилов, Д.Г. Чухчин, К.С. Болотова**

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия*

*Представлены особенности формирования слоев вторичной стенки в волокнах ксилемы (древесины). Установлено, что слой  $S_1$  образуется за счет накопления крахмала в волокнах с первичными стенками. Эндоглюканаза, доставленная экзосомами, участвует в гидролизе микрофибрилл слоя  $S_1$  в местах образования пор. Сахароза для образования слоя  $S_2$  поступает в волокна через поры.*

### THE FORMATION OF SECONDARY CELL WALLS OF PLANT FIBER

**E.V. Novozhilov, D.G. Chukhchin, K.S. Bolotova**

*Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia*

*Features of layers formation in secondary wall of xylary fibers (wood) are presented. It is established that  $S_1$  layer is formed by starch accumulation in the fibers with primary walls. The endoglucanase derived by exosomes participates in the hydrolysis of  $S_1$  layer in the sites of pit formation. Sucrose for the formation of  $S_2$  layer enters into fibers through the pits.*

Основную часть древесного вещества составляют волокна – вытянутые анатомические элементы, длина которых значительно больше ширины. Исследования морфогенеза и структурной организации растительных волокон имеют исключительно важное значение для современной науки о растениях.

Все растительные волокна имеют одинаковое строение: клеточные стенки с многочисленными порами и внутреннюю полость – люмен. Вторичные стенки волокон составляют основную часть ксилемы. Морфология вторичной стенки во многом определяет физические и физико-химические свойства древесных растений. Стенки древесных волокон состоят из нескольких слоев с различной структурной организацией, химическим составом и свойствами [1]. Эти стенки могут быть разделены на первичную стенку  $P$  и вторичную стенку, имеющую внешний слой  $S_1$ , средний слой  $S_2$  и внутренний слой  $S_3$  (иногда называемый третичной стенкой  $T$ ). Однако, несмотря на прогресс в знаниях и технических возможностях современного научного оборудования, различные проблемы, касающиеся морфогенеза растительных волокон, остаются во многих аспектах нерешенными [2].



Цель работы – установить особенности формирования вторичной стенки в ксилемных волокнах древесных растений.

**Материалы.** Для исследования были взяты стебли и ветви березы *Betula pubescens* и ели *Picea abies* (Россия, Архангельская область, 64° 32'N, 40° 33'E). Деревья находились в разных фазах вегетативного роста, сбор образцов проводился в разные сезоны (май–октябрь).

**Подготовка, обработка и визуализация образцов.** При подготовке образцов использовали криомеханическую деструкцию [3]. Сколы образцов были подготовлены для микроскопических исследований. Сублимационную сушку проводили с использованием оборудования Labconco (FreeZone 2.5L). Изображения были получены с использованием сканирующего электронного микроскопа SEM Sigma VP Zeiss. Для повышения контрастности изображения образцов, на поверхность сколов наносили золото-палладиевое покрытие толщиной менее 5 нм с помощью устройства Q150TES.

**Эксперименты с дейтерированной водой.** Новый подход, предложенный нами – использование дейтерия в качестве метки, характеризующей последовательность формирования клеточной стенки. В качестве объекта использовали ветку тополя *Populus balsamifera* диаметром 5 мм. Ветку помещали в воду и выдерживали в климатической камере «BINDER» (Германия) при температуре 25 °C и относительной влажности 80 %. Когда у ветки сформировались листья, часть воды (25 %) была заменена на D<sub>2</sub>O. Через 10 дней после начала использования D<sub>2</sub>O был сделан срез нижней части ветки (образец 1). Еще через 10 дней сделан второй срез (образец 2). Для отслеживания распространения дейтерия использовали метод ИК-микроскопии. Избыток дейтерированной воды и дейтерий, предположительно входивший в состав веществ, не являющихся основными компонентами клеточных стенок (пектинов, крахмала и т.д.), предварительно удаляли путем многократной промывки образцов горячей водой и ацетоном. Определение дейтерированных компонентов проводили на ИК-Фурье-спектрометре Vertex 70v (Bruker, Germany) с использованием ИК-микроскопа HYPERION 3000 (Bruker, Germany). Применяли точечный МСТ детектор, позволяющий снимать ИК-спектры в точке размером 1 мкм. На поперечном срезе ветки проводили сканирование прямоугольных областей 40×200 мкм с шагом 40 мкм в направлении от корки к сердцевине. (всего 40 сканирований на глубину 1,6 мм). Для получения информации о содержании дейтерия в клеточных стенках вычисляли соотношение поглощения при волновых числах 2100 см<sup>-1</sup> и 2900 см<sup>-1</sup> (валентные колебания C-D и C-H-связей соответственно). Была предложена формула для расчета индекса ID, эта величина

пропорциональна концентрации дейтерия в клеточной стенке. Замена  $H_2O$  на  $D_2O$  в процессе роста и параллельный контроль поверхности анализируемого образца методом СЭМ позволил точно установить зоны биосинтеза основных компонентов клеточных стенок с участием дейтерированных сахаров.

**Результаты и обсуждение.** Вторичная стенка придает волокну окончательную форму и обеспечивает его механические свойства. В нашей работе представлены фотографии, демонстрирующие этапы формирования вторичной стенки волокон. Трахеиды *Picea abies* с первичными стенками показаны на рис. 1А. Они находятся под большим давлением и сильно сжаты в радиальном направлении. Толщина первичных стенок – около 100 нм, что соответствует толщине этих стенок в зрелых древесных волокнах. В первичных стенках микрофибриллы целлюлозы образуют структуру в виде сетки (рис. 1Б), что обеспечивает эластичность материала стенок и не препятствует некоторому расширению и удлинению волокон.

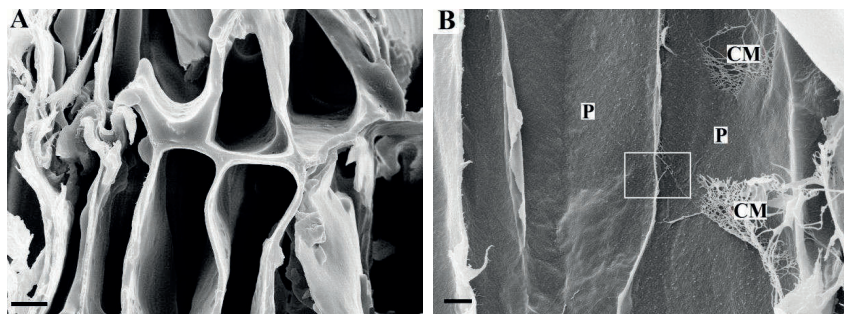


Рис. 1. Трахеиды *Picea abies* с первичными стенками (А) и (В)  
 P – первичная стенка трахеиды, CM – целлюлозные микрофибриллы  
 Масштабная линейка: А – 2 мкм, В – 1 мкм

Начальный этап расширения волокон с первичными стенками в радиальном направлении показан на рис. 1А. Это происходит за счет увеличения тургора, что связано с образованием из запасенного крахмала низкомолекулярных углеводов. Удлинение волокон (интрузивный рост) возможно насколько, насколько это позволяют другие волокна, расположенные выше и ниже.

Современная теория морфогенеза клеток высших растений предполагает, что отложение слоев вторичной стенки на первичную стенку происходит изнутри клетки за счет действия протопласта [4]. При этом возникает

вопрос – из какого субстрата формируются слои вторичной стенки древесных волокон. Считается [4], что продукты фотосинтеза поступают в камбиальную зону по проводящим элементам флоэмы, главным образом, в виде сахарозы. В нашем эксперименте смесь обычной и дейтерированной воды участвовала в биосинтезе глюкозы в листьях ветки тополя. Из дейтерированной глюкозы формировалась дейтерированная сахароза, которая по ситовидным трубкам и лучам доставлялась к клеткам растения. Участие дейтерированных сахаров в биосинтезе должно неизбежно привести к включению дейтерия в состав целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина клеточных стенок. Однако, в зоне волокон с первичными стенками в течение всего эксперимента значения индекса ID, пропорционального концентрации дейтерия в клеточной стенке, фактически находились на уровне фона. Это означает, что в этой зоне дейтерированная сахароза не участвовала в биосинтезе основных полимеров клеточной стенки. В то же время известно, что волокна с первичными стенками имеют большие запасы крахмала [4]. Установлено расхождение крахмала при расширении волокон ксилемы [5].

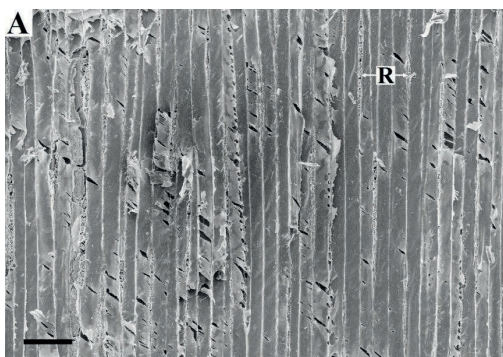


Рис. 2. Трахеиды ели со слоем  $S_1$  на тангентальном сколе утолщающейся ксилемы (угол наклона микрофибрилл около  $60^\circ$ ). Масштабная линейка: А – 100 мкм

Отложение наружного слоя  $S_1$  вторичной стенки происходит после завершения расширения и удлинения волокна. Этот слой откладывается на структуру первичной стенки.

Как видно из рис. 2, трахеиды с сформированным слоем  $S_1$  не имеют пор, значит, этот слой формируется только за счет запаса углеводов (крахмала), накопленного в протопласте клеток с первичными стенками.

Формирование пор происходит на определенной стадии морфогенеза древесного волокна. Поры соединяют люмены соседних волокон и способствуют транспорту воды и растворенных веществ по растению. В структуре волокон лиственных видов образуются простые поры, у трахеид хвойных видов образуются окаймленные поры.



Биосинтез вторичной стенки прекращается, когда весь субстрат (крахмал) расходуется на строительство слоя  $S_1$ . Появление пор в стенках клеток необходимо для доставки нового субстрата внутрь волокон. Как показано на рис. 3, поры начинают формироваться в волокнах, имеющих слой  $S_1$ . Сначала становятся видными контуры будущих пор в слое  $S_1$ , затем в этих местах образуются окаймленные поры (рис. 3А) или простые щелевидные поры (рис. 3В). Эти данные доказывают несостоятельность известной теории [4], согласно которой поры в элементах ксилемы развиваются в первичных поровых полях первичных стенок волокон.

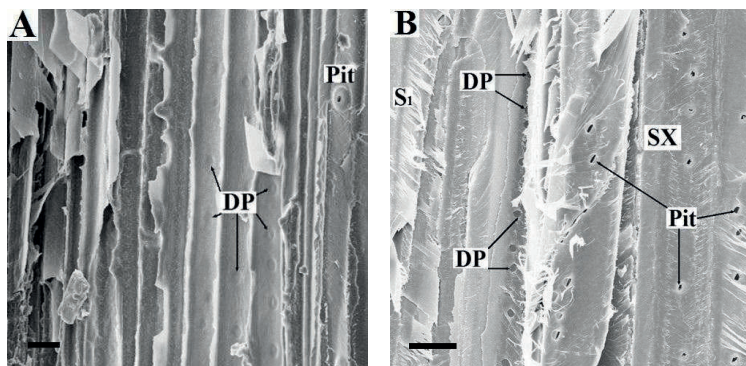


Рис. 3. Формирование пор в структуре ксилемных волокон  
 А – ель *Picea abies*, В – береза *Betula pubescens*  
 DP – будущая пора, Pit – пора,  $S_1$  – слой  $S_1$ , SX – вторичная ксилема.  
 Масштабная линейка: А – 2 мкм, В – 1 мкм

Наши исследования показали, что в формировании пор в волокнах участвуют внеклеточные везикулы, которые имеют размеры около 100 нм. По этому показателю эти везикулы следует отнести к экзосомам [6]. Как показано на рис. 4, экзосомы расположены на внутренней поверхности стенок трахеид или волокон в местах формирования полостей пор.

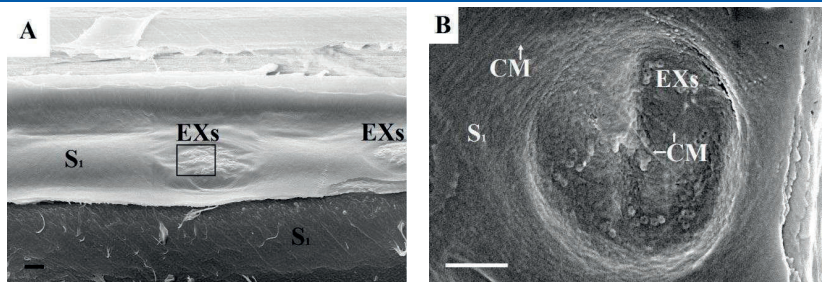


Рис. 4. Образование окаймленных пор в трахеидах ели *Picea abies* с участием эндогликаназа, транспортируемых экзосомами  
 CM – целлюлозные микрофибриллы, DP – будущая пора, EXs – внеклеточные везикулы (экзосомы), S<sub>1</sub> – слой S<sub>1</sub>  
 Масштабная линейка: А – 1 мкм, В – 1 мкм

Чтобы проделать отверстия в микрофибриллах слоя S<sub>1</sub>, нужны ферменты целлюлазного комплекса. Установлено наличие активности фермента эндогликаназы (ЭГ) в зоне утолщающейся ксилемы [7]. ЭГ производят локальное разрушение аморфных частей микрофибрилл слоя S<sub>1</sub>, этого достаточно, чтобы образовать полости пор в клеточных стенках ксилемных волокон. Целлюлозные микрофибриллы первичной стенки формируют мембрану поры, от действия ЭГ они защищены ксилоглюканом.

Во всех типах древесины слой S<sub>2</sub> составляет до 80...90 % от стенки древесного волокна. Зона высокой концентрации дейтерия обнаружена в ксилеме в волокнах при формировании слоя S<sub>2</sub>. Следовательно, дейтерированная сахароза участвует в биосинтезе компонентов слоя S<sub>2</sub> вторичной стенки. Углеводы для строительства слоя S<sub>2</sub> проникают через поры. Радиальный транспорт углеводов из флоэмы осуществляют лучи. Образование слоев S<sub>1</sub> и S<sub>2</sub> разделено во времени.

**Закключение.** Микрофибриллы слоя S<sub>1</sub> формируются за счет накопленного запаса крахмала в волокне. Поры в волокнах образуются только после отложения слоя S<sub>1</sub> вторичной стенки волокна. Эндогликаназы, доставленные экзосомами, участвуют в гидролизе микрофибрилл слоя S<sub>1</sub> в местах образования пор. Углеводы (сахароза) для строительства слоя S<sub>2</sub> поступают из флоэмы по лучам и проникают в люмен волокна через поры.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00855 "Надмолекулярная организация целлюлозных микрофибрилл растительного и бактериального происхождения" с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова.*





### Список литературы

1. Fengel D, Wegener G. Wood (chemistry, ultrastructure, reactions). Walter De Gruyter, Berlin, 1984.
2. Gorshkova T, Brutch N, Chabbert B, Deyholos M, Hayashi T, Lev-Yadun S, Mellerowicz E, Morvan C, Neutelings G, Pilate G. Plant fiber formation: state of the art, recent and expected progress, and open questions. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2012. Vol. 31. P. 201–228.
3. Bogolitsyn K, Zubov I, Gusakova M, Chukhchin D, Krasikova A. Juniper wood structure under the microscope. *Planta*. 2015. Vol. 241. P. 1231–1239.
4. Evert R. *Esau's Plant anatomy: meristems, cells, and tissues of the plant body: their structure, function, and development*. 3rd ed. Wiley-Interscience. 2006.
5. Begum S, Nakaba S, Yamagishi Y, Oribe Y, Funada R. Regulation of cambial activity in relation to environmental conditions: understanding the role of temperature in wood formation of trees. *Physiologia Plantarum*. 2013. Vol. 147. P. 46–54.
6. Colombo M, Raposo G, Théry C. Biogenesis, secretion, and intercellular interactions of exosomes and other extracellular vesicles. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*. 2014. Vol. 30. P. 255–289.
7. Yu L, Sun J, Li L. PtrCel9A6, an endo-1,4- $\beta$ -glucanase, is required for cell wall formation during xylem differentiation in *Populus*. *Molecular Plant*. 2013. Vol. 6. P. 1904–1917.

## МАКРО- И МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.Г. Михалева<sup>1</sup>, Д.Н. Втюрина<sup>1</sup>, Г.Г. Политенкова<sup>1</sup>, С.Ю. Сарвадий<sup>1</sup>, С.Н. Никольский<sup>1</sup>, С.В. Стовбун<sup>1</sup>, Н.В. Жолнерович<sup>2</sup>, Н.А. Герман<sup>2</sup>, И.В. Николайчик<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИЦ ХФ РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

*В работе обобщены результаты исследований различных видов целлюлозно-бумажной продукции (волокнистые полуфабрикаты, упаковочные материалы, продукция для полиграфии) по показателю «шероховатость». Шероховатость материалов измерена как косвенными методами (макроскопический подход), так и методом атомно-силовой микроскопии (микроскопический подход).*

## MACRO- AND MICROSCOPIC APPROACH TO MEASURING SURFACE ROUGHNESS OF PAPER MATERIALS

M.G. Mikhaleva<sup>1</sup>, D.N. Vtyurina<sup>1</sup>, G.G. Politenkova<sup>1</sup>, S.Yu. Sarvadiy<sup>1</sup>, S.N. Nikol'skiy<sup>1</sup>, S.V. Stovbun<sup>1</sup>, N.V. Zholnerovich<sup>2</sup>, N.A. German<sup>2</sup>, I.V. Nikolaychik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FRCCP RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus

*The paper summarizes the results of studies of various types of pulp and paper products (fibrous semi-finished products, packaging materials, printing materials) by the indicator "roughness". The roughness of materials was measured via indirect methods (macroscopic approach) as well as direct method of atomic force microscopy (microscopic approach).*

Параметр «шероховатость» относится к фундаментальным свойствам поверхности твердых материалов, который определяет их прочность, износостойкость, химическую стойкость, цветопередачу, внешний вид и другие параметры [1]. Шероховатость – совокупность неровностей с относительно малыми шагами, образующих микрорельеф поверхности (ГОСТ 2786–73, рекомендации ИСО Р 486).

В целлюлозно-бумажном производстве термином «шероховатость» обозначается неровность поверхности, которая определяется по расходу воздуха (ГОСТ 30115–95, ИСО 8791–1–86). Следовательно, применяемые методы анализа свойств бумаги и картона являются косвенными, дают лишь усредненную (брутто) характеристику поверхности и не соответствуют определению, принятому в материаловедении (см. выше).

Для получения объективной информации о реальных параметрах поверхности различных видов целлюлозно-бумажной продукции необходимо



применение современных методов анализа, к которым относится атомно-силовая микроскопия (АСМ).

Атомно-силовой микроскоп был создан в 1982 году Гердом Биннигом, Кельвином Кузйтом и Кристофером Гербером в Цюрихе (Швейцария), как модификация изобретённого ранее сканирующего туннельного микроскопа. Для определения рельефа поверхностей непроводящих тел использовалась упругая консоль (кантилевер), отклонение которой, в свою очередь, определялось по изменению величины туннельного тока, как в сканирующем туннельном микроскопе. Однако такой метод регистрации изменения положения кантилевера оказался не самым удачным, и двумя годами позже была предложена оптическая схема: луч лазера направляется на внешнюю поверхность кантилевера, отражается и попадает на фотодетектор. Такой метод регистрации отклонения кантилевера реализован в большинстве современных атомно-силовых микроскопов. Изначально атомно-силовой микроскоп фактически представлял собой профилометр, только радиус закругления иглы был порядка десятков ангстрем. Стремление улучшить латеральное разрешение привело к развитию динамических методов. Пьезовибратором возбуждаются колебания кантилевера с определённой частотой и фазой. При приближении к поверхности на кантилевер начинают действовать силы, изменяющие его частотные свойства. Таким образом, отслеживая частоту и фазу колебаний кантилевера, можно сделать вывод об изменении силы, действующей со стороны поверхности и, следовательно, о рельефе. Возможности метода АСМ представлены в табл. 1.

Вопросы высокоточного контроля параметров выпускаемой бумажной продукции имеют все возрастающее значение, особенно при изготовлении бумаги и картона для нанесения печати, бумаги для денежных знаков. Структура и свойства поверхности целлюлозных материалов напрямую влияют на качество печатных документов, отображение мелких особенностей изображений. Применение АСМ обеспечивает отображение параметров материала в нанометровом диапазоне и визуализацию его структуры, изучение показателей шероховатости и адгезии.

В ИХФ РАН начаты и при участии БГТУ продолжаются фундаментально-прикладные исследования структуры поверхности всего спектра целлюлозно-бумажной продукции – волокнистые полуфабрикаты (беленая и небеленая товарная целлюлоза из хвойных и лиственных пород древесины), различные виды бумаги и картона с покрытием, целлюлозные материалы ультратонкого измельчения, включая наноцеллюлозу [7–14].



Метод АСМ является универсальным и не имеет ограничений по таким параметрам как толщина, объемная плотность, наличие тиснения и др. Кондиционирование при этом не требуется. Продолжительность анализа поверхности не превышает 40–50 минут.

Таблица 1. Микроскопия при анализе объектов различного масштабного уровня

Вид микроскопии	Возможности и ограничения метода	Литература
Оптическая микроскопия  Наилучшее разрешение 200 нм	Наблюдение и изучение микроорганизмов, растительных и животных клеток, мелких кристаллов, деталей, микроструктуры металлов и сплавов и т. п., определение их формы, размеров, строения и многих других характеристик микрообъектов. Основной недостаток – крайне низкая разрешающая способность	[2,3]
Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)  Наилучшее разрешение 0,4–10 нм	Получение изображения поверхности объекта с высоким пространственным разрешением, информации о составе, строении и некоторых других свойствах приповерхностных слоёв. Микроскопы дороги в производстве и обслуживании. Микроскопы, направленные на достижение высоких разрешений, должны быть размещены в устойчивых зданиях (иногда под землей) и без внешних электромагнитных полей. Образцы должны рассматриваться в вакууме, так как молекулы, составляющие воздух, будут рассеивать электроны. Как правило, работают с проводящими образцами. Непроводящие материалы требуют нанесения проводящего покрытия (золото/палладий, сплав углерода, осмий, и т.д.). Метод неприменим для изучения биологических объектов	[3,4]
Атомно-силовая микроскопия (АСМ)  Наилучшее разрешение 0,1–10 нм	АСМ позволяет получить истинно трёхмерный рельеф поверхности. Непроводящая поверхность, рассматриваемая с помощью АСМ, не требует нанесения проводящего покрытия, которое часто приводит к заметной деформации поверхности. Для нормальной работы СЭМ требуется вакуум, в то время как большинство режимов АСМ могут быть реализованы на воздухе или даже в жидкости, что позволяет изучать биомакромолекулы и живые клетки. АСМ способен дать более высокое разрешение, чем СЭМ.  АСМ в состоянии обеспечить реальное атомное разрешение в условиях сверхвысокого вакуума	[3-6]



В результате выполненных работ показано следующее.

1. Установлено, что метод АСМ полностью применим к оценке шероховатости различных видов бумаги и картона, предназначенных для нанесения многоцветной печати. При испытании бумаги и картона по методу Паркера (косвенный метод) возможны два момента. Первое. Одно значение шероховатости по Паркеру для продукции разных изготовителей характеризуется различным значением шероховатости, полученной с применением АСМ. Значения шероховатости, полученные методом АСМ, различаются в 3–4 раза. Второе. Верно и обратное. Установлено, что разным значениям шероховатости, измеренной по методу Бендсена, соответствуют одинаковые значения шероховатости, измеренной методом АСМ. Таким образом, метод прямого анализа поверхности мелованных видов бумаги и картона может в перспективе рассматриваться в качестве метода оперативного контроля качества материала, полученного в процессе поверхностной обработки различных материалов [7,8].

2. Испытания образцов бумаги для полиграфии (бумага газетная, бумага офсетная улучшенного качества – пухлая, бумага офсетная, бумага для офисной техники, бумага мелованная матовая и глянцевая, бумага литого мелования) методом АСМ показали полное соответствие полученных величин шероховатости данным по линиатуре растра и оптимальному разрешению [9,10].

3. Установлена область существования линейной корреляции ( $R^2=0,96$ ) между показателями шероховатости, измеренной по методу Бендсена и методом АСМ [7,8]. Испытания проведены для следующих видов продукции – бумага мелованная, бумага мелованная литого мелования, бумага-основа для мелования, бумага мешочная, бумага для гофрирования. Свободный член линейной функции не равен нулю и имеет положительное значение. Таким образом, реальное значение шероховатости будет низким, но никогда не равным нулю. Показано, что при анализе свойств образцов бумаги с тиснением косвенным методом исключительно широкий диапазон шероховатости (630–5400 мл/мин) обусловлен не микрорельефом поверхности, а параметром «волнистость». При этом значения шероховатости по методу АСМ составляли  $(250\pm 50)$  нм. Полученные равные значения шероховатости по методу Бендсена для образцов товарной целлюлозы (небеленая, белая сульфатная и сульфитная целлюлозы из хвойной и лиственной древесины) обусловлены тем обстоятельством, что в процессе анализа поток воздуха направляется сквозь материал по пути наименьшего сопротивления [11,12].



4. Испытания образцов небеленой и беленой товарной целлюлозы из древесины и однолетних растений (хлопок) позволили установить существование взаимно однозначного соответствия между шероховатостью, измеренной методом АСМ и переводными коэффициентами, характеризующими грубость волокон. При прочих равных условиях именно грубость волокон определяет шероховатость товарной целлюлозы. Установленная корреляция имеет реальную физическую основу и не является случайным совпадением [11,12].

5. При применении метода атомно силовой микроскопии был экспериментально подтвержден выполненный ранее теоретический анализ структуры целлюлозы, основанный на понимании принципов организации хиральных суперспирализованных структур. Это позволило предложить биофизическую модель процесса промышленного нитрования древесной целлюлозы [13].

#### Список литературы

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т.: Т. 1 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1986. 656 с.
2. Иванова Т. А., Кирилловский В. К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. М., 1984.
3. Amelinckx S., Dyck D., Landuyt J., Tendeloo G. (Eds.). Handbook of Microscopy. Applications in Materials Science, Solid-state Physics and Chemistry. Methods I, Weinheim, Germany (1997).
4. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Российская академия наук, Институт физики микроструктур г. Нижний Новгород, 2004 г. 110 с.
5. Сулов А. А., Чижик С. А. Сканирующие зондовые микроскопы (обзор) // Материалы, Технологии, Инструменты. Т.2 1997. № 3, С. 78–89.
6. Wiesendanger R. Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy, Cambridge University Press, Cambridge (1994).
7. Михалева М.Г., Втюрина Д.Н., Никольский С.Н., Стовбун С.В., Жолнерович Н.В., Герман Н.А., Николайчик И.В. Атомно-силовая микроскопия – современный метод определения шероховатости целлюлозно-бумажной продукции // В сборнике: Химия и химическая технология переработки растительного сырья материалы докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В. М. Резникова. Белорусский государственный технологический университет. 2018. С. 126–130.
8. Михалева М.Г., Втюрина Д.Н., Сарвадий С.Ю., Никольский С.Н., Стовбун С.В., Жолнерович Н.В., Герман Н.А., Николайчик И.В. Анализ шероховато-



сти поверхности целлюлозно-бумажных материалов прямым и косвенным методами // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2019. № 1 (217). С. 67–71.

9. Кирсанкин А.А., Михалева М.Г., Никольский С.Н., Мусохранова А.В., Стовбун С.В. Прямой метод контроля качества поверхности мелованных видов бумаги // Химия растительного сырья, 2016. № 4. С. 157–161.

10. Михалева М.Г., Втюрина Д.Н., Кирсанкин А.А., Никольский С.Н., Стовбун С.В. Прямой метод контроля качества поверхности мелованных видов бумаги // XXIX Симпозиум «Современная химическая физика», сборник тезисов, 2017, С. 217; ISBN 978–5–85493–304–3.

11. Никольский С.Н., Кирсанкин А.А., Михалева М.Г., Политенкова Г.Г., Стовбун С.В. Изучение топографии поверхности материалов на целлюлозной основе методом атомно-силовой микроскопии // материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти профессора Комарова (Архангельск, 14–16 сентября 2017 г.) / Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2017. 377 с.

12. Кирсанкин А.А., Михалева М.Г., Политенкова Г.Г., Никольский С.Н., Стовбун С.В. Изучение топографии материалов на целлюлозной основе методом атомно-силовой микроскопии // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2018. Т. 22. № 1. С. 88–93. DOI: 10.18698/2542–1468–2018–1–88–93.

13. Стовбун С. В., Никольский С. Н., Мельников В. П., Михалева М. Г., Литвин Я. А., Щеголихин А. Н., Зленко Д. В., Твердислов В. А., Герасимов Д. С., Рогозин А. Д. Химическая физика нитрования целлюлозы // Химическая физика, 2016, том 35, №4, С. 20–35.

## TRANSVERSE VISCOELASTIC PROPERTIES OF PULP FIBERS INVESTIGATED WITH ATOMIC FORCE MICROSCOPY

C. Czibula<sup>1,3</sup>, C. Ganser<sup>1,3</sup>, T. Seidlhofer<sup>2,3</sup>, C. Teichert<sup>1,3</sup>, U. Hirn<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Physics, Montanuniversitaet Leoben, Austria

<sup>2</sup>Institute for Paper, Pulp and Fibre Technology, Graz University of Technology, Austria

<sup>3</sup>Christian Doppler Laboratory for Fiber Swelling and Paper Performance, Graz University of Technology, Austria

*In order to gain more insight on how mechanical properties of fibers are related to properties of the paper, our work focusses on the transverse viscoelastic behavior of pulp fibers at different relative humidity and in water. Therefore, we developed a novel atomic force microscopy-based method to investigate nanoscale viscoelastic properties by combining contact mechanics and viscoelastic models.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ВОЛОКОН В ПОПЕРЕЧНОМ НАПРАВЛЕНИИ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

*Для лучшего понимания связи между механическими свойствами волокон и свойствами бумаги, наша работа сфокусирована на поведении вязкоупругости в поперечном направлении волокон целлюлозы при разной относительной влажности и в воде. Таким образом, мы разработали оригинальный метод, базирующийся на атомно-силовой микроскопии, для исследования вязкоупругих свойств в наномасштабе, путем объединения механики контактного взаимодействия и моделей вязкоупругости.*

Investigations of the mechanical properties in transverse fiber direction, are scarce. Earlier investigations of the transversal elastic modulus were based on lateral compression of wet fibers [1–3]. For pulp fibers, no information on the transversal viscoelastic properties has been reported so far. For wood, on the other hand, the viscoelastic behavior of pine specimens along the grain [4] and of green wood in transverse direction [5] has been investigated. The present work focusses on the transverse viscoelastic behavior of single pulp fibers investigated at varying relative humidity (RH) and in water [6].

In order to measure transverse viscoelastic properties of pulp fibers, an atomic force microscopy (AFM)-based method combining contact mechanics with a viscoelastic material model is used [7]. Contact mechanics is necessary to transform the measured force and indentation depth values from AFM-nanoindentation (AFM-NI) into stress and strain, which cannot be measured directly in AFM and are needed by the viscoelastic model. The Johnson-Kendall-Roberts [8] contact model was chosen as it allows to account for adhesion forces.



To describe the bulk behavior of viscoelastic materials at the continuum scale, simple empiric models are often used. These consist of springs describing the elastic behavior and dash pots describing the viscous behavior. Here, a generalized Maxwell model of order 2 (GM2) was applied and is sketched in Fig. 1a. It consists of three springs ( $E_\infty$ ,  $E_1$ ,  $E_2$ ) and two dashpots ( $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ).  $E_\infty$  corresponds to a purely elastic response at infinitely slow loading, whereas the instantaneous elastic modulus  $E_0$  corresponds to an infinitely fast loading. Both dashpots become rigid, and only the springs deform:  $E_0 = E_\infty + E_1 + E_2$ . The combination of spring and dashpot in series ( $E_1$  and  $\eta_1$ ,  $E_2$  and  $\eta_2$ ) are so-called Maxwell elements, and for each of these elements a relaxation time  $\tau_i$  can be defined. It is the ratio between viscosity  $\eta_i$  and elastic modulus  $E_i$  of the  $i^{\text{th}}$  Maxwell element. More details are presented in [6,7].

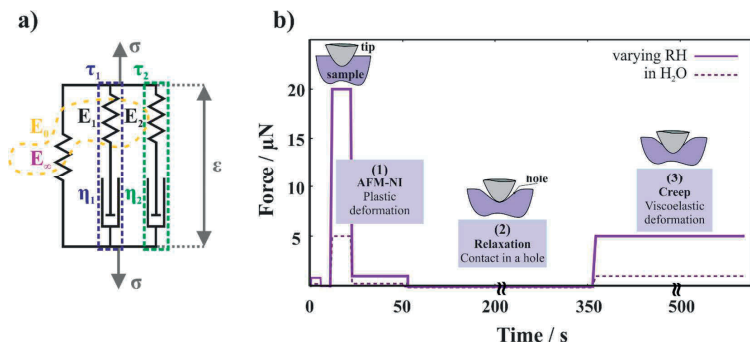


Fig. 1. Linear viscoelastic model to describe solids and load schedule of the AFM creep experiment. *a* – Generalized Maxwell model of order 2 (GM2). It consists of three springs  $E_\infty$ ,  $E_1$ ,  $E_2$  and two dashpots  $\eta_1$ ,  $\eta_2$ . *b* – Applied load schedule, the solid line indicates the loading at varying RH, the dashed line is applied during measurements in water. The load schedule consists of three parts. The icons in (1), (2), and (3) indicate the tip – sample interaction at the different loads

In Fig. 1b, the load schedule for the experimental procedure is presented and shows a very simple repetition of loading to a certain force, holding and subsequent unloading to zero force. It should be noted that at varying RH (Fig. 1b, solid line) the load applied is four times higher than during measurements in water (Fig. 1b, dashed line). In [6] the loading of the surface is described in more detail.

The measurements in this work have been acquired with an Asylum Research MFP-3D AFM. The instrument is equipped with a closed-loop planar x-y-scanner with a scanning range of  $85 \mu\text{m} \times 85 \mu\text{m}$  and has a z-range of about  $15 \mu\text{m}$ . For the viscoelastic measurements, LRCH silicon probes (Team Nanotec, Germany) with a hemispherical tip (radius of about  $300 \text{ nm}$ ) have been used. To



measure at controlled humidity, an AFM fluid cell was employed. With nitrogen flow through a home-built setup, the desired humidity levels can be reached.

Past experiments [9,10] proved that embedding the fibers in nail polish works very well. The samples are unbleached and unrefined kraft pulp fibers consisting of a mixture of spruce and pine fibers. The fiber length is about 3–5 mm and the diameter ranges from 20 to 30  $\mu\text{m}$ . To ensure that the fibers are tested in equilibrium moisture content, the samples were equilibrated overnight for at least eight hours at the desired relative humidity level. For measurements in water, the fibers were immersed in water about 24 hours before testing.

Experimental creep curves with corresponding GM2 fits at different RH are presented for pulp fibers in Fig. 2. In Fig. 2a, curves at 10 %, 25 %, 45 %, 60 %, and 75 % RH have been recorded. The indentation depth increases with increasing RH, ranging from about 10–100 nm. The GM2 model fits the data at different RH very well, with slight deviations at high RH. For measurements of the pulp fibers in water, the GM2 fits show deviations, and a third relaxation time is needed to describe the behavior in a more satisfying way (Fig. 2b). Therefore, a GM3 model with an additional Maxwell element which has a faster relaxation time ( $\tau = 1 \text{ s}$ ) was implemented [6].

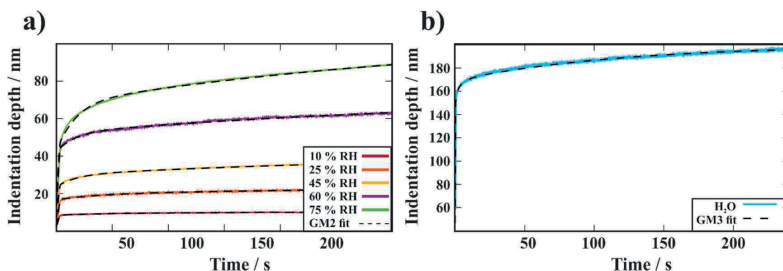


Fig. 2. *a* – Representative experimental creep curves at 10 %, 25 %, 45 %, 60 %, and 75 % RH for pulp fibers with the corresponding GM2 fit curves as black dashed lines. *b* Representative experimental creep curve of a measurement point in water with the corresponding GM3 fit as a black dashed line

In Fig. 3, the viscoelastic parameters of the GM2 model at different RH, as well as the viscoelastic results of the GM3 model for the water measurements are presented. For each RH and water value at least 44 single measurement points from six different pulp fibers have been evaluated. Fig. 3a presents a comparison of the elastic moduli  $E_\infty$ ,  $E_0$ . Here, the fibers show a slightly decreasing trend from 10 % to 75 % RH. In this RH range, the elastic moduli decrease by a factor of 10. The viscosities  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  in Fig. 3b behave in a similar way, also showing a decrease



by a factor of 10–20 from 10 % to 75 % RH. In contrast, the relaxation times  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  stay quite constant in this RH range as depicted in Fig. 3c.

The interaction between pulp fibers and water is different in water than at lower RH up to 75 % RH. The fibers exhibit a drop of factor 100 for the elastic moduli (Fig. 3a) compared to the lowest measured RH. For the viscosity values ( $\eta_1$ ,  $\eta_2$ ,  $\eta_3$ ), the drop is at least of three orders of magnitude. One possible explanation for the behavior in water is an accelerated relaxation, which has been accounted for by introducing a third Maxwell element to form a GM3 model. Otherwise, it might be necessary to apply a poroelastic model [11] to describe the pulp fibers' behavior in water.

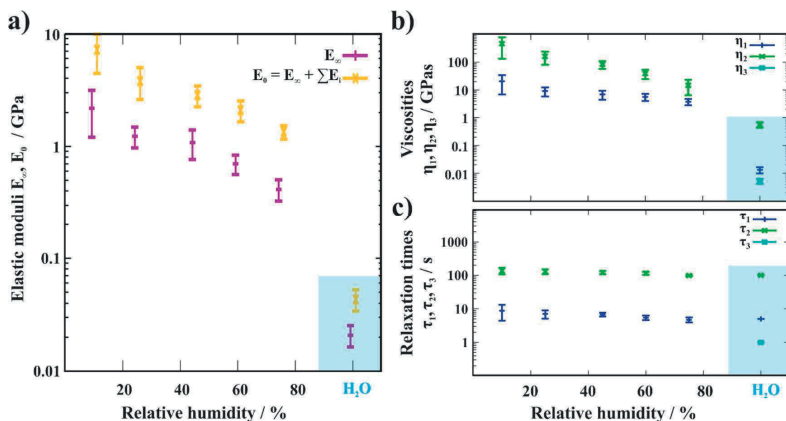


Fig. 3. Semilogarithmic plots of the viscoelastic values for six individual pulp fibers at different RH and immersed in water. For the RH range, the GM2 model and for the measurements in water, the GM3 model was employed for the viscoelastic evaluation. In (a) the elastic moduli  $E_\infty, E_0$  are presented, in (b) the viscosities  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$  are depicted and in (c) the relaxation behavior is described by the relaxation times  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ . The mean values are plotted with the corresponding confidence intervals of 95 %

In this work, an AFM-based method has been applied to investigate the transverse viscoelastic properties of pulp fibers [6]. Combining contact mechanics with viscoelastic GM models enabled the measurement of local creep on pulp fibers. The experiments have been carried out at different RH, ranging from 10 % RH to 75 % RH, and in water. All the results for the elastic and viscous parameters show a gradual decrease with increasing RH until 75 % RH.

Fibers immersed in water show a more pronounced decrease in the elastic and viscous values. Here, the elastic moduli drop by a factor 100 and the viscosities decrease at least three orders of magnitude compared to 10 % RH. One reason



could be that in water, the relaxation of the material is accelerated. Since pulp fibers are porous [12, 13] and behave more gel-like immersed in water [14, 15], a poroelastic approach might be needed to describe the material's behavior more accurately [16].

#### Literature Cited

1. Dunford J., Wild P. Cyclic transverse compression of single wood-pulp fibres // *J. Pulp Pap. Sci.* 2002. № 28(4). p. 136–141.
2. Hartler N., Nytrén J. Transverse Compressibility of pulp fibers. 2. Influence of cooking method, yield, beating, and drying. *Tappi*, 53(5). 1970. p. 820–823.
3. Wild P., Omholt I., Steinke D., Schuetze A. Experimental characterization of the behaviour of wet single wood-pulp fibres under transverse compression // *J. Pulp Pap. Sci.* 2005 31(3). p. 116–120.
4. Penner A. P., Jayaraman K., Bhattacharyya D. Viscoelastic behaviour of solid wood under compressive loading. *Holzforschung*. 2006. 60(3). p. 294–298.
5. Bardet S., Gril J. Modelling the transverse viscoelasticity of green wood using a combination of two parabolic elements // *Comptes Rendus – Mec.* 2002. № 330(8). p. 549–556.
6. Czibula C., Ganser C., Seidlhofer T., Teichert C., Hirn U. Transverse viscoelastic properties of pulp fibers investigated with an atomic force microscopy method // *J. Mater. Sci.* 2019. № 54(17). p. 11448–11461.
7. Ganser C., Czibula C., Tschamuter D., Schöberl T., Teichert C., Hirn U. Combining adhesive contact mechanics with a viscoelastic material model to probe local material properties by AFM // *Soft Matter*. 2018. № 140(1). p. 140–150.
8. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. Surface Energy and the Contact of Elastic Solids. *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 1971. 324(1558). p. 301–313
9. Ganser C., Hirn U., Rohm S., Schennach R., Teichert C. AFM nanoindentation of pulp fibers and thin cellulose films at varying relative humidity. *Holzforschung*. 68(1). 2014. p. 53–60.
10. Ganser C., Teichert C. AFM based nanoindentation of cellulosic fibers, in *Applied Nanoindentation of Advanced Materials*, Ed. Tiwari A., Wiley, 2017. p.247–267.
11. Lopez-Sanchez P., Rincon M., Wang D., Micromechanics and poroelasticity of hydrated cellulose networks // *Biomacromol.* 2014. № 15. p. 2274–2284.
12. Stone J. E., Scallan A. M. Effect of Component Removal upon the Porous Structure of the Cell Wall of Wood // *J. Pol. Sci.* 1965 № C 11. p. 13–25.
13. Maloney T. C., Paulapuro H. The Formation of Pores in the Cell Wall // *J. Pulp Pap. Sci.* 1999. № 25(12). p. 430–436.
14. Pelton R. A model of the external surface of wood pulp fibers // *Nord. Pulp Pap. Res.* 1993. № J. 8. p. 113–119.
15. Scallan A. M., Grignon J. The effect of cations on pulp and paper properties // *Sven. Papperstidn.* 1979. № 2. p. 40–47
16. Galli M., Comley K., Shean T., Oyen M., Viscoelastic and poroelastic mechanical characterization of hydrated gels // *J. Mater. Res.* 2009. № 24. p. 973–979.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО СРЕЗА МНОГОСЛОЙНОГО КАРТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ИОННОЙ РЕЗКИ

Н.П. Мидуков<sup>1</sup>, Я.В. Казаков<sup>2</sup>, В.С. Куров<sup>1</sup>, А.С. Смолин<sup>1</sup>, С. Хейнманн<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Россия

<sup>2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия

<sup>3</sup>Технический университет Дрездена, Германия

*Доклад посвящён новому способу подготовки и оценки поперечного среза многослойного картона тест-лайнера. Для повышения качества поперечного среза использована технология ионной резки многослойного картона, которая позволила оценить основные показатели многослойного картона.*

## RESEARCH OF THE MULTILAYERED CARDBOARD CROSS SECTION WITH USE OF TECHNOLOGY OF ION BEAM CUTTING

N.P. Midukov<sup>1</sup>, Y.V. Kazakov<sup>2</sup>, V.S. Kurov<sup>1</sup>, A.S. Smolin<sup>1</sup>, S. Heinemann<sup>3</sup>

<sup>1</sup>St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

<sup>3</sup>Technical university of Dresden

*The report describes to a new way of preparation and assessment of a cross section of multilayered cardboard of the test-liner. For improvement of quality of a cross section the technology of ion beam cutting of multilayered cardboard which allowed to estimate key indicators of multilayered cardboard is used.*

Механические и поверхностные показатели картона во многом определяются микроструктурой. Современные методы микроскопического анализа позволяют увидеть микроструктуру на поверхности картона. Сложнее исследовать поперечный срез, так как волокна при выполнении среза деформируются и меняют первоначальную форму. Методы подготовки биологических материалов, которые применяются при исследовании целлюлозных волокон, включают лиофильную сушку, применение микротомы для нарезки тонких образцов, использование реактивов для придания окраски, добавление инертных веществ заполняющих пространство между волокнами. Очевидно, что такие способы оказывают влияние в той или иной степени на микроструктуру волокнистого материала. В результате меняется расположение волокон и наполнителя, что приводит к недостоверной оценке поперечного среза.

Одним из инновационных методов подготовки проб является технология ионной резки, которая позволяет сохранить структуру материала и исследовать явления, происходящие внутри многослойного картона.

Для оценки предлагаемого метода использованы волокнистые материалы из различных видов макулатуры. Для нижнего слоя использовалась макулатура марки МС-5Б, а верхний слой формировался из макулатуры МС7-А писчее печатных видов бумаг. При подготовке макулатуры для верхнего покровного слоя использовалась технология сухого диспергирования [1].

Анализ межволоконных связей производился за счёт оценки изображения поперечного среза, полученного с помощью электронного микроскопа TESCAN MIRA3 LMH (производитель – Чешская Республика). Подготовка образцов для исследований проводилась с помощью установки для ионного травления SEMPrep2 (модель SC-2100), произведённой в Венгрии (компания Technoorg Linda Ltd).

Подготовка образцов включала в себя: нарезку картона шириной 10 мм; напыление образцов хромом в вакуумной камере; определение оптимальных условий резки исходя из материала и толщины картона (ускоряющее напряжение, время травления); электронная микроскопия (получение изображений поперечного среза с высоким разрешением, определение элементного состава).

На рис.1. представлено сравнение существующего способа (срез картона скальпелем или на микротоме).

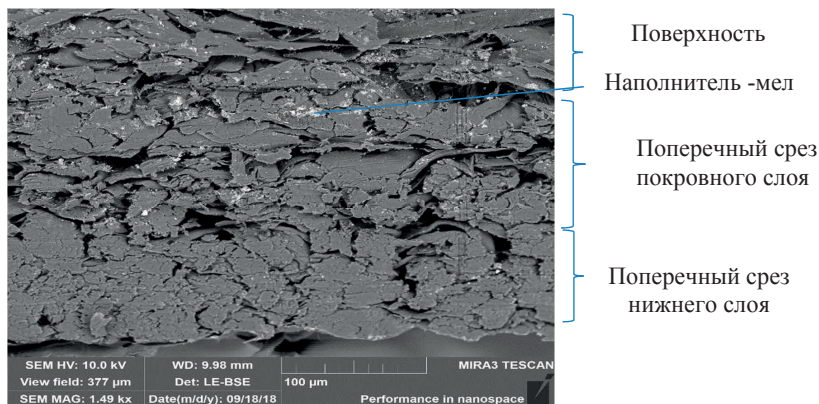


Рис.1. Поперечный срез картона, полученный микротомом

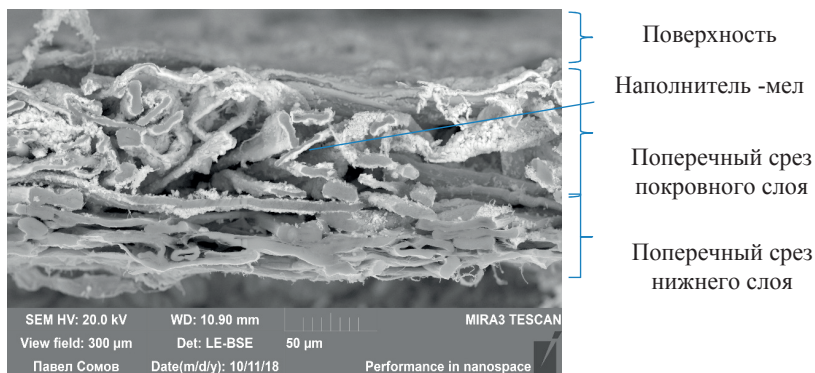


Рис.2. Поперечный срез картона, полученный ионной резкой

Ионная резка картона (рис. 2), в отличие от существующих способов подготовки образцов (рис. 1), позволяет: выделить области среза волокон, фибрилл, протяжённость контактов волокон; оценить распределение наполнителей (мела, каолина и др.); оценить насколько плотно располагаются волокна между собой; установить границу слоёв, полученных из волокон различной природы и подготовленных с помощью различных технологий, определить шероховатость и равномерность распределения толщины слоёв в многослойном картоне.

Количественная оценка перечисленных параметров поперечного среза позволяет оценить механические и поверхностные показатели многослойного картона.

### Список литературы

1. Мидуков Н.П., Ефремов Д.С., Куров В.С., Смолин А.С. Сухой способ диспергирования волокон для последующего производства картона. Химия растительного сырья. № 3, 2018. С 279–286.



## ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ АНИЗОТРОПИИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В ОБРАЗЦЕ БУМАГИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

**А.Н. Романова, Я.В. Казаков, А.В. Малков**

*Северный (Арктический) федеральный университет, г. Архангельск, Россия*

*Дана количественная оценка величины и неоднородности локальных деформаций в анизотропных образцах бумаги лабораторного изготовления при испытании на растяжение. Установлены закономерности развития растягивающих, сжимающих и сдвиговых составляющих деформации. Показано, что увеличение степени анизотропии приводит к повышению вклада поперечных и сдвиговых деформаций.*

### THE INFLUENCE OF THE ANISOTROPY DEGREE ON THE DISTRIBUTION OF LOCAL DEFORMATIONS IN THE PAPER SAMPLE UNDER TENSION

**A.N. Romanova, Y.V. Kazakov, A.V. Malkov**

*Northern (Arctic) federal university, Arkhangelsk, Russia*

*A quantitative estimate of the magnitude and inhomogeneity of local deformations in samples of a handmade paper sheets during a tensile test is given. The patterns of development of tensile, compressive and shear deformation components were established. It is shown that an increase in the degree of anisotropy leads to an increase in the contribution of transverse and shear deformations.*

Для бумаги, как листового волокнистого материала, характерна неоднородность и анизотропия структуры. Причиной этого являются многостадийность технологии и сопутствующие процессы фибрилляции, фильтрации и фракционного распределения волокон, их природа и морфологические особенности [1].

Присущая структуре бумаги и картона гетерогенность является основной причиной возникновения неоднородностей полей локальных деформаций при приложении нагрузки, что, в свою очередь, влечет за собой появление вариаций в величинах локальных деформаций [2,3,4,5].

Цель данной работы заключалась в установлении зависимости между степенью анизотропии структуры бумаги и характером распределения полей локальных продольных, поперечных и сдвиговых деформаций в условиях одноосного растяжения.

Для проведения исследования были использованы анизотропные лабораторные отливки бумаги из смеси товарной сульфатной белой хвойной – 30 % и лиственной – 70 % целлюлозы. Изготовление анизотропных лабораторных отливок было произведено на динамическом листоотливном аппарате (ДЛОА), TechPap SAS, Франция, при различных параметрах отлива. Полученные отливки обладали различной степенью анизотропии

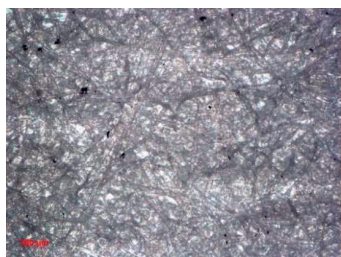


структуры, имели прямоугольную листовую форму размерами  $0,90 \times 0,25$  м и массу  $1 \text{ м}^2$  125 г. Параметры отлива представлены в табл. 1.

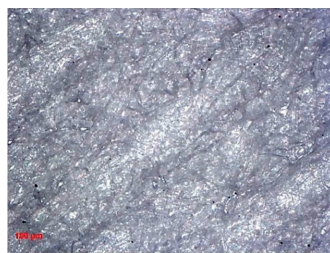
Таблица 1. Параметры изготовления анизотропных лабораторных отливок бумаги на динамическом листоотливном аппарате

Фактор	Регулируемый параметр	Величина параметра для режима	
		R1	R6
Скорость сетки	Окружная скорость формующей сетки ДЛОА, $v$ , м/мин	800	1350
Скорость струи (давление струи)	Обороты насоса, подающего массу на сетку, $p$ , об/мин	1400	300
Диаметр форсунки	Типоразмер форсунки, $d$	2504	2504
Продолжительность отлива, мин	–	3	5
Анизотропия	Анизотропия	min	max

Дополнительным фактором стала продолжительность процесса отлива, которая увеличивалась при малом диаметре отверстия форсунки, что привело к усилению ориентации волокон в машинном направлении. Анизотропный характер полученных отливок визуально можно наблюдать по изображениям (рис.1), полученным с помощью [микроскопа высокого разрешения Imager M2m](#) (Carl Zeiss, Германия).



*a*



*б*

Рис.1. Изображения образцов лабораторной анизотропной бумаги, для изготовления которых были использованы режимы: *a* – R1, *б* – R6

Изображение, представленное на рис.1, *б*, свидетельствует о лучшей ориентации волокон в структуре лабораторного анизотропного образца бумаги, изготовленного при соблюдении параметров режима R6.

Для изучения деформационного поведения лабораторные анизотропные образцы бумаги шириной 25 мм были вырезаны под углами  $0,30,60$  и  $90^\circ$  к машинному направлению и подвергнуты испытанию на одноосное растяжение с



постоянной скоростью 10 мм/мин согласно методике [6]. Расстоянием между зажимами составило 100 мм. В процессе испытания были получены кривые зависимостей «нагрузка-удлинение» и «напряжение-деформация» (рис. 2).

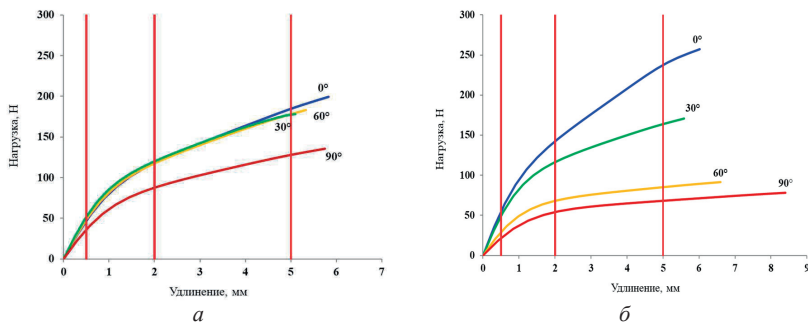


Рис.2. Кривые зависимостей “ $F-\Delta L$ ” для лабораторных образцов бумаги серий:  $a - R1$  и  $b - R6$  при одноосном растяжении с постоянной скоростью до общей деформации 0,5, 2 и 5 мм, угол вырезки образцов к MD 0,30,60 и 90°

Графики наглядно продемонстрируют изменение характера деформирования бумаги с различной степенью анизотропии структуры при растяжении, что количественно отразилось на величинах деформационных и прочностных характеристик и оказало влияние на анизотропию ее деформационно-прочностных свойств, табл. 2.

Таблица 2. Деформационные характеристики лабораторных анизотропных образцов бумаги

Характеристика	Направление	Режим отлива	
		R1	R6
Индекс формования		35,9	33,1
Жесткость при растяжении, $TSI$ , кН·м/г	MD (0 °)	9,52	11,54
	CD (90 °)	6,62	3,93
	MD/CD	<b>1,43</b>	<b>2,93</b>
Разрывная длина $L$ , м	MD	5514	6440
	CD	3509	1849
	MD/CD	<b>1,57</b>	<b>3,48</b>
Предел упругости $\sigma_1$ , МПа	MD	8,0	6,1
	CD	6,1	4,1
	MD/CD	<b>1,31</b>	<b>1,49</b>
Деформация в точке разрушения $\epsilon_p$ , %	MD	5,83	6,02
	CD	5,75	8,40
	CD/MD	<b>1,01</b>	<b>0,72</b>
Модуль упругости в области предразрушения, $E_2$ , МПа	MD	399	345
	CD	231	54
	MD/CD	<b>1,73</b>	<b>6,39</b>



В соответствии методикой [4,5] испытания, фотофиксации и обработки данных, применяемой для количественной оценки локальных деформаций и расчета полей локальных напряжений, были испытаны изготовленные при режимах отлива R1 и R6 и вырезанные под углом 0,30,60 и 90° к машинному направлению (MD) образцы, на которые предварительно нанесена сетка точек, размерами 4×4 мм. Расчеты основаны на методе конечных элементов (МКЭ) для треугольных изопараметрических элементов, позволяющем дать количественную оценку развивающихся локальных растягивающих (продольных), сжимающих (поперечных) и сдвиговых деформаций в структуре лабораторных образцов бумаги. Для обработки данных эксперимента и визуальной интерпретации результатов их обработки использовано программное обеспечение [7].

Для анализа распределения полей локальных деформаций были выбраны снимки, полученные при общей деформации 0,5, 2,0 и 5,0 мм. Исследованные точки отмечены пересечением кривых деформирования с вертикальными прямыми на рис.2. Первая точка (0,5 мм) соответствовала упругой области, вторая – замедленно-упругой (2,0 мм) области деформирования всех образцов, третья точка (5,0 мм) относилась к зоне предразрушения.

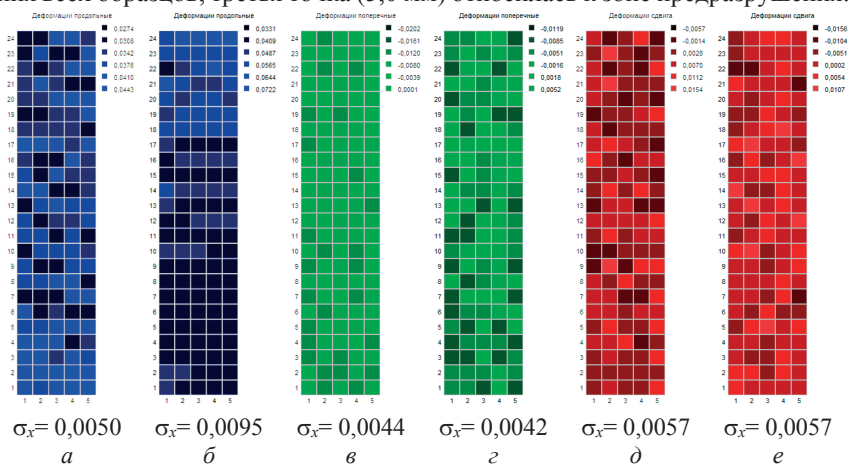


Рис. 3. Диаграммы распределения локальных деформаций: *а, б* – продольных; *в, г* – поперечных; *д, е* – сдвиговых, развивающихся в структуре образцов бумаги по режиму R1 и R6 при одноосном растяжении с постоянной скоростью до общей деформации 5 мм, угол вырезки образцов к MD 90°



После математической обработки координат и смещений узлов сетки до и после растяжения были получены диаграммы распределения локальных деформаций и напряжений в образце при растяжении, рис. 3, позволяющие визуально оценить их. Количественная оценка обнаруженных неоднородностей производилась путем статистической обработки полученных данных с определением средних и стандартных отклонений. За характеристику неоднородности локальных деформаций было принято среднее квадратическое отклонение  $\sigma_x$ . Результаты математической обработки величин локальных деформаций при величинах общей деформации 0,5, 2,0 и 5,0 мм представлены на рис. 4.

Полученные данные показывают, что при постоянной величине общей деформации и увеличении угла преимущественной ориентации волокон (угла вырезки образцов к MD) в анизотропных лабораторных образцах бумаги, изготовленных в соответствии с параметрами режимов отлива R1 и R6, локальные растягивающие (продольные) деформации возрастали (рис. 4, а); сжимающие (поперечные) уменьшались (рис. 4, в); сдвиговые имели максимум в диапазоне от 30 до 60° к MD (рис.4, д). В свою очередь, увеличение общей деформации образцов способствовало более выраженному характеру полученных зависимостей и росту средней величины локальных деформаций всех видов в их структуре.

Средние величины растягивающих деформаций (рис. 4, а) имели большие значения, чем сжимающие и сдвиговые (рис. 4, в, д, соответственно), что связано с тем, что они возникали вдоль оси приложения нагрузки. Эту же причину имеют близкие величины локальных растягивающих деформаций у образцов серий R1 и R6. Преобладание деформаций сжатия у образцов, вырезанных в MD, (рис. 4, д) связано с тем, что сжатие происходило перпендикулярно преобладающей оси ориентации волокон в структуре, что способствовало развитию деформаций главным образом у межволоконных связей. Большая величина поперечных деформаций у образцов R1 объясняется меньшей степенью анизотропии структуры (рис. 4, б). Также обнаружена разница в закономерностях формирования сдвиговых деформаций, рис. 4, д. Для образцов R6 максимум в диапазоне 30-60° при общей деформации 2 и 5 мм наблюдался при более высоких средних величинах деформации.

Увеличение общей деформации и изменение угла ориентации волокон в структуре образца незначительно отражается на величине неоднородности

локальных деформаций, оцениваемой по среднему квадратическому отклонению (рис. 4, б, з, е). При этом отмечено, что чем выше величина локальных деформаций, тем выше и их неоднородность.

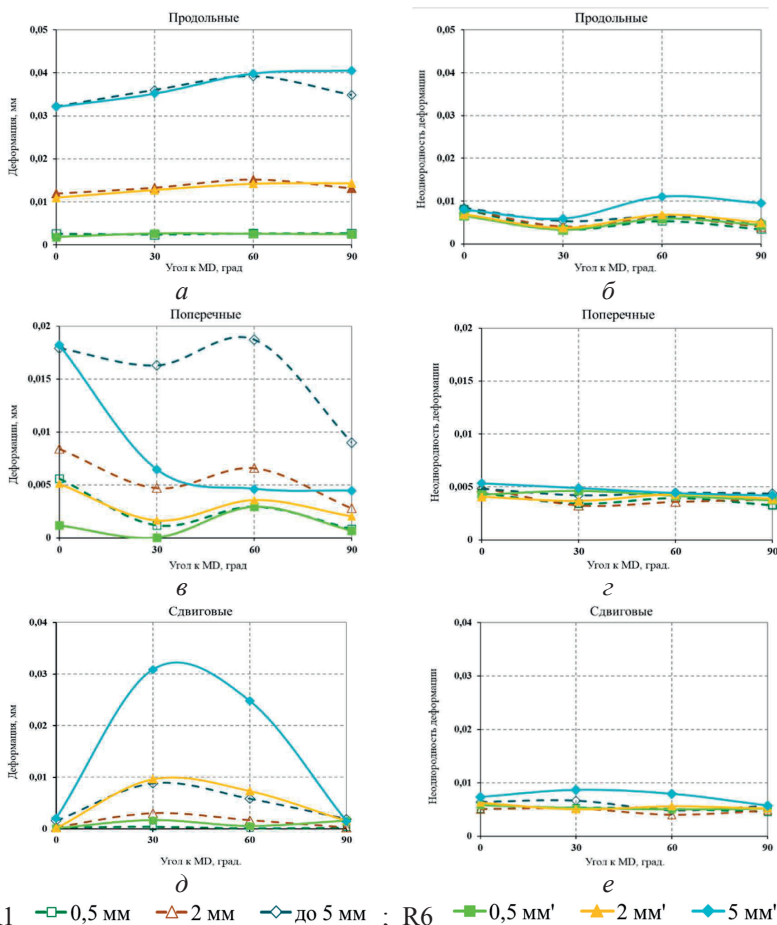


Рис. 4. Влияние угла вырезки лабораторных образцов бумаги серий R1 и R6 к MD на средние значения локальных деформаций: а – продольных, в – поперечных и д – сдвиговых и их среднее квадратическое отклонение (б, з, е) при одноосном растяжении до общей деформации 0,5, 2,0 и 5,0 мм



Таким образом, с применением предложенной и экспериментально апробированной методики количественной оценки вклада продольных, поперечных и сдвиговых локальных деформаций в общую деформацию образцов бумаги при одноосном растяжении, установлены зависимости между параметрами структуры бумаги (степенью анизотропии и углом преимущественной ориентации волокон) и характеристиками полей локальных продольных, поперечных и сдвиговых деформаций, развивающихся в условиях одноосного растяжения.

#### Список литературы

1. Смолин А.С., Аксельрод Г.З. Технология формования бумаги и картона. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 121 с.
2. Wong L., Kortschot M. T., Dodson, C. T. J. Effect of formation on local strain fields and fracture of paper. *J. Pulp Pap.* 1996.Sci. 22, J213–J219.
3. Ostoja-Starzewski M., Castro J., Random formation, inelastic response and scale effects in paper. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 2003 A 361, p. 965–985.
4. Казаков Я.В. Количественная оценка неоднородности деформирования образца бумаги при одноосном растяжении с постоянной скоростью // *Лесн. журн.*, 2013. №2. С.180–185. (Изв. высш. учеб. заведений).
5. Романова А.Н., Казаков Я.В., Малков А.В. Влияние направления ориентации волокна в образце картона на соотношение растягивающих, сжимающих и сдвиговых деформаций при испытании на растяжение / В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов»: матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. (Архангельск, 14–16 сентября 2017 г.) // Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2017. С.108–113.
6. Свид. № 2001610526. Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программное обеспечение лабораторного испытательного комплекса для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов (КОМПЛЕХ). / Я.В. Казаков, В.И. Комаров; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО АГТУ (RU). № 2001610250; заявл. 11.03.2001; опубл. 10.05.2001, Реестр программ для ЭВМ. 1 с.
7. Свид. № 2014617014 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для анализа полей локальных деформаций и напряжений в образцах бумаги при растяжении (Неоднородность деформирования) / Я.В.Казаков, О.Я.Казакова, А.В.Рудалев; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВПО САФУ (RU). № 2014614773; заявл. 22.05.2014; опубл. 09.07.2014, Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

## STRUCTURAL INFLUENCES ON REVERSIBLE AND IRREVERSIBLE CURL

T. Harter<sup>1,2</sup>, U. Hirn<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Paper, Pulp and Fibre Technology, Graz University of Technology, Austria

<sup>2</sup>Christian Doppler Laboratory for Fiber Swelling and Paper Performance, Graz University of Technology, Austria

*For a better understanding of the influence of the structural paper setup on curl we investigated fibre orientation two-sidedness as a reason for paper deformation. With laminat splitting we demonstrate fibre orientation z-profiles of 80 gsm copy paper to show how wire shaking decreases the fibre orientation two-sidedness. With climate experiments we investigated on dried-in strains in the same paper samples and saw that wire shaking also reduced the curl caused by these strains.*

### ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА ОБРАТИМУЮ И НЕОБРАТИМУЮ СКРУЧИВАЕМОСТЬ БУМАГИ

*С целью лучшего понимания влияния особенности структуры бумаги на скручиваемость мы исследовали двусторонность ориентации волокон в ее структуре как причину деформации. Путем расслаивания предварительно заламинированных образцов копировальной бумаги массой 80 г/м<sup>2</sup> и последующей демонстрацией полученных z-профилей ориентации волокон в их структуре показано как тряска формующей сетки бумагоделательной машины снижает двусторонность ориентации волокон. Также обнаружено, что тряска формующей сетки привела к уменьшению скручиваемости, вызванной деформациями при увлажнении и остаточными, возникающими в исследуемых образцах бумаги после увлажнения и последующей сушке.*

Curl of paper is a common issue in the paper industry and has been described intensively [1–4]. Modern fast-running printing processes demand good planar stability also during the paper is exposed to high temperatures and changing humidities, as they can happen during the printing. Origin of these deformation phenomena is not only lying in printing but is mostly already caused in paper production. The structural setup of paper, i.e. the alignment of the fibres, has an impact on the curl behaviour of the paper. Not only the planar fibre orientation, but also the setup over the thickness (z-direction) can cause deformation.

Two-sidednesses, as these discrepancies over the z-direction are called, can manifest in different aspects such as fibre orientation, fillers or moisture. Fibre orientation two sidedness unintendedly occurs during the papermaking process starting at the wire section, talking about dewatering in one direction, different jet-wire-ratios or wire shaking. All these influences affect the setup of the paper and can thereby cause a two-sidedness. Fig. 1 demonstrates how different fibre orientation in the top and bottom side of a paper can lead to a deformation of the

paper when it is dried. In this image the top side has a more anisotropic distribution of the fibres, meaning more fibres are aligned in machine direction compared to the bottom side. Swelling and dewatering of the fibres changes their dimension mainly in the transversal direction, i.e. the top side shrinks more when dried causing the paper to deform.

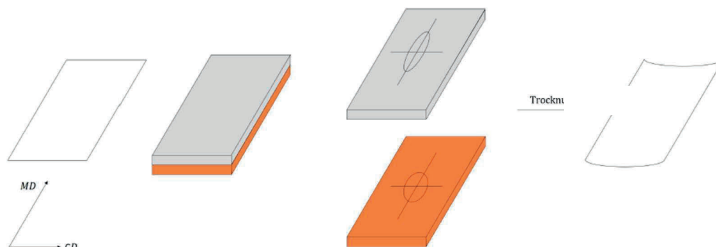


Fig. 1. Fibre orientation two-sidedness in paper as simplified two-layer model. The top side with a higher anisotropy as the bottom is liable for deformation after drying of the paper

Wire shaking is the transversal moving of the wire in a fourdrinier machine. Therefore, a wire shaking unit can be applied at the breast roll of the paper machine. As this transversal movement happens simultaneously to the normal longitudinal run of the wire in machine direction, the wire shaking does not affect the paper web homogeneously. Rather as a result of these two movements the impact of the wire shaking is applied as a sine to the paper web as depicted in Fig. 2. For the investigated paper machine, the periodic time of this sine was 150 cm, calculated by the machine speed and the shaking number of the wire shaking unit. In this figure the sample taking is demonstrated where layers of paper were cut from a reel. At different positions in cross direction stripes with a length of over 150 cm were taken.

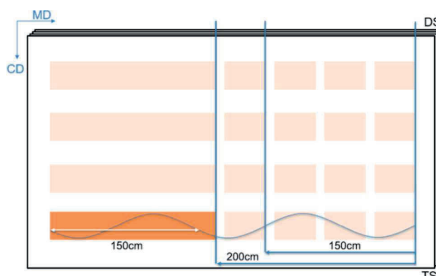


Fig. 2: Sample preparation out of machine produced paper. The sine represents the impact of the wire shake due to the machine run. The highlighted stripe of paper with a length greater than 150 cm demonstrates the way samples were taken from the reel material



To get an insight into the setup of paper in z-direction the method of laminat splitting is introduced [5]. The main idea of this method is to separate the different layers of the paper and measure the fibre orientation of each of it. In a first step samples were cut out of the paper stripes with a 38 mm × 90 mm punch before dyed in a 1:100 Cartasol/water mixture for 24 hours. After dying, the samples were dried under constrain and at room temperature for another 48 hours. Laminat splitting is now applied on the dried and dyed paper. Therefore, the sample is framed with thin plastic and put in a laminating pouch. The sandwich is then run through the laminator allowing the glue of the pouch to enter the sample. The frame allows the two pouch foils to be split apart. This procedure of splitting is repeated up to 30 times for the 80 gsm office paper. After all separable layers are divided all of them are again put in a laminating pouch and sealed for the scanning as it can be seen in Fig. 3.

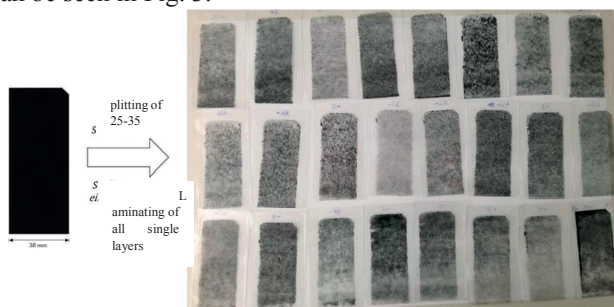


Fig. 3: The dyed paper sample is splitted in 25 to 35 layers. All of these layers are laminated for the scanning. The cropped corner in the top right was used for orientation

Scanning was done for all the samples with a resolution of 3000 dpi. Evaluation of the fibre orientation was done with a MATLAB® code which generates a gradient vector over the investigated area from the lighter voids to the darker fibres. As a result we obtain the fibre orientation of all the layers.

The influence of the periodic impact of the wire shaking on the setup of the paper was investigated via sheet splitting repeatedly done every 150 cm in machine direction. Results for these repeatedly measurement of the fibre orientation in z-direction can be seen in Fig. 4. In that diagram fibre orientation anisotropy z-profiles for the paper produced in drag, i.e. the suspension jet speed is lower than the wire speed, can be seen. The left diagram thereby represents the profile without wire shake. The shape of the curve already shows a two sidedness with a higher anisotropy in the upper half of the paper and a more isotropic bottom

side. The wire shake has changed the appearance of the z-profiles to a more uniform look and only a small anisotropy in the lower 40 % of the paper.

In the profile at 1300 mm nearly no anisotropy can be seen. Fig. 4 demonstrates that the profiles have a similarity when compared at the same point of the periodic time confirming the inhomogeneous but repeating impact of the wire shaking on the paper web.

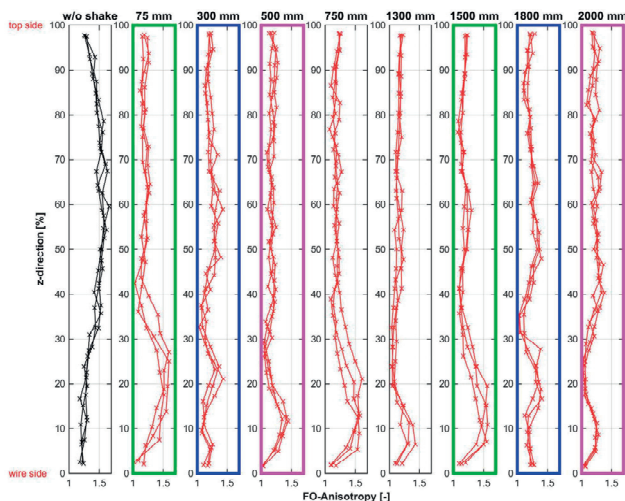


Fig. 4. Z-profiles of fibre orientation anisotropy of 80 gsm copy paper produced in drag. The position the samples were taken is noted above each diagram in mm. Same colour frame illustrate that one complete periodic time passed between the samples

Drying of paper with a structural two-sidedness under constrain can lead to dried-in strains. Paper with dried-in strains do not show any or only little deformation after production. However, when the paper is exposed to water, e.g. during offset or inkjet printing, these strains are released causing permanent deformation.

Revelation of the drying induced strains was done by exhibiting the paper to different relative humidities ranging from 30 % RH up to 90 % RH. Stripes of the paper, with the dimensions of 6 mm x 60 mm were cut out and applied to a self-built case before put into the climate chamber. The case was introduced to avoid mechanical deformation due to the fan of the climate chamber. Case, chamber and application of the samples can be seen in Fig. 5.



Fig. 5. Laboratory equipment for climate experiments. Climate chamber (left), self-built case for probe protection (middle) with sample holder where the  $6 \times 6$  mm specimens were placed (right)

The relative humidity in the chamber was varied between 30 % RH, 50 % RH and 90 % RH. Starting with 30 % RH at each point the deformation of the samples were measured with curvature tables with defined radii. To determine the moisture content a sample was gravimetrically observed during the climate changes. The change in curvature was plotted over the moisture content of the sample.

In Fig. 6 on the left the measurement principle is shown where the probe deforms only because of the changing humidity and on the right results for paper tested with laminat splitting is depicted. In this figure it can be seen that the dried-strains are released at a moisture content of  $\sim 7\%$  to  $\sim 11\%$  (50...90 %RH) for both samples. Once these strains are released the deformation cannot be made undone, even when the moisture content is reduced, i.e. the sample is dried. The drying is achieved only by reducing the relative humidity to 30 % in the climate chamber. With the dried-in strains released the final curl of the paper has been increased to 15  $1/m$  for the paper without wire shake and 5  $1/m$  for the paper produced with activated wire shake. The structural changes observed with laminat splitting can be one reason for the lower deformation after the paper was exposed to high humidity.

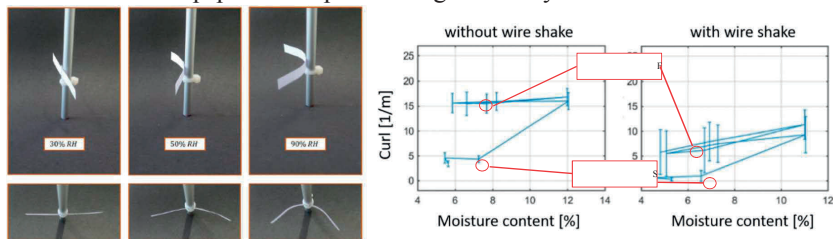


Fig. 6: Measurement of dried-in strains. Left: Specimen in sample holder deforming only due to change of relative humidity. Right: Results of measurement for machine produced paper (drag) with and without wire shake



With this work we were able to demonstrate that a wire shaking unit non-uniformly decreases the fibre orientation anisotropy two-sidedness for 80 gsm office paper produced in drag. For the same paper wire shaking reduced the impact of dried-in strains, whereas structural reasons must not be the only influence.

#### Literature cited

1. Glynn P., Jones H.W. H., Gallay W. (1961) Drying Stresses and Curl in Paper // Pulp and Paper Magazine of Canada. 1961. № 62(1), p. T39–T48.
2. Green C. J. Curl, expansivity, and dimensional stability. In: Handbook of physical and mechanical testing of paper and paperboard. Marcel Dekker Inc. 1984.
3. Kajanto I., Niskanen K. Dimensional stability // Paper Physics (Papermaking Science and Technology 16). Fapet Oy. 1998. p. 222–259.
4. Uesaka T. (2002). Dimensional stability and environmental effects on paper properties. In: Handbook of physical testing of paper. Marcel Dekker Inc. 2002. p. 115–171,
5. Hirn U., Bauer W. (2007). Evaluating an improved method to determine layered fibre orientation by sheet splitting // 61st Appita Annual Conference and Exhibition, Gold Coast, Australia 6-9 May 2007: Proceedings. Appita Inc., 2007. p. 71.



## ОТДЕЛЬНЫЕ БУМАГООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКНА ПРИ БЕЗНОЖЕВОМ СПОСОБЕ РАЗМОЛА

**Д.Ю. Васильева, Л.В. Юртаева, Ю.Д. Алашкевич**

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика  
М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия*

*В статье были рассмотрены отдельные бумагообразующие свойства на примере  
сульфатной хвойной целлюлозы и макулатуры концентрацией 2 %.*

### A SEPARATE PAPER-FORMING PROPERTY OF THE FIBER WITH A BLADE DURING INTRALASIK IMPLEMENTATION METHOD OF GRINDING

**D.Yu. Vasilyeva, L.V. Yurtaeva, Yu.D. Alashkevich**

*Siberian state University of science and technology named after academician M. F. Reshetnev,  
Krasnoyarsk, Russia*

*In article some paper-forming properties on the example of coniferous cellulose  
and waste paper with concentration of 2% were considered.*

Бумага – волокнистый материал, состоящий в основном из слоя специально обработанных растительных волокон, тесно переплетённых между собой и соединённых силами сцепления, возникающими между волокнами при их обработке. Практика целлюлозно-бумажного производства, научно-исследовательские работы, проведенные как в России, так и за рубежом, свидетельствуют, о том, что на структуру готовой бумаги оказывают различные факторы, одними из которых являются бумагообразующие свойства волокон, которые волокнистая суспензия приобретает в процессе размола.

Размол – это процесс механической обработки растительных волокон в присутствии воды [1].

Установлено, что механическая прочность готового полуфабриката напрямую зависит как от степени помола волокнистых материалов, так и от степени сцепления волокон друг с другом. При этом значения прочностных показателей не зависимо от вида целлюлозы достигая своего максимального значения, начинают постепенно снижаться за счет высокой степени расщепления и укорачивания волокон в процессе размола.

Уменьшение длины волокна в процессе размола неблагоприятно воздействует и на оптические свойства готового продукта. Непрозрачность го-



тового продукта повышается в результате увеличения количества коротковолокнистой массы, плотного сцепления волокон и снижения межволоконных заполненных воздухом пространств, приводя к уменьшению рассеивания света и большей светопрозрачности бумаги [2].

В работах [3,4] установлена взаимосвязь между механическими свойствами готовой бумаги и бумагообразующими свойствами волокнистых материалов для безножевых аппаратов «типа-струя-преграда». Из найденных функциональных зависимостей видно, что физико-механические свойства готовых отливок напрямую зависят от бумагообразующих свойств разрабатываемого волокнистого полуфабриката, последние в свою очередь характеризуются такими показателями, как склонность волокнистого полуфабриката к фибриллированию или к укорачиванию.

В связи с этим с целью исследования влияния вида сырья на развитие бумагообразующих свойств волокнистой массы в лаборатории кафедры Машины и аппараты промышленных технологий СибГУ им. М.Ф. Решетнева проведена серия экспериментов с сульфатной беленой целлюлозой и макулатурой на безножевой установке типа «струя-преграда». Связано это с тем, что безножевой способ размола является наиболее щадящим методом, что особенно важно для макулатуры, которая имеет изначально пониженные бумагообразующие свойства по сравнению с первичными волокнами. Волокна оборотного брака в результате влияния технологических стадий изготовления бумаги и картона (ропуск, размол, сушка, отделка и т.д.), а также процессов переработки бумаги и картона (например, процессы гофрообразования) приобретают новые физические свойства, которые являются причиной ухудшения бумагообразующих свойств. Поэтому бумага, произведенная из вторичного волокна, обладает меньшей прочностью и гибкостью.

Основным фактором, способствующим росту использования вторичного волокна, является необходимость выпуска дополнительного объёма бумажно-картонной продукции. Однако расширение использования макулатуры сдерживается, с одной стороны, постепенным ухудшением качественных характеристик вторичного волокна, а с другой – повышением требований к качеству готовой продукции. Тем не менее, учитывая то обстоятельство, что с развитием бумажного производства, увеличением применения бумаги во многих различных целях уничтожаются огромные площади леса, исследования разработки вторичного сырья в настоящее время являются актуальными.



Графически ход процесса размола волокнистой суспензии и оборотного брака представлен на рис. 1.

Как видно из рисунка с увеличением степени помола длина волокна не зависимо от вида обрабатываемой масс уменьшается. Несмотря на значительное превосходство количественных значений длины волокна беленой целлюлозы перед макулатурой, качественные зависимости обрабатываемых волокнистых масс остаются одинаковыми не зависимо от степени помола.

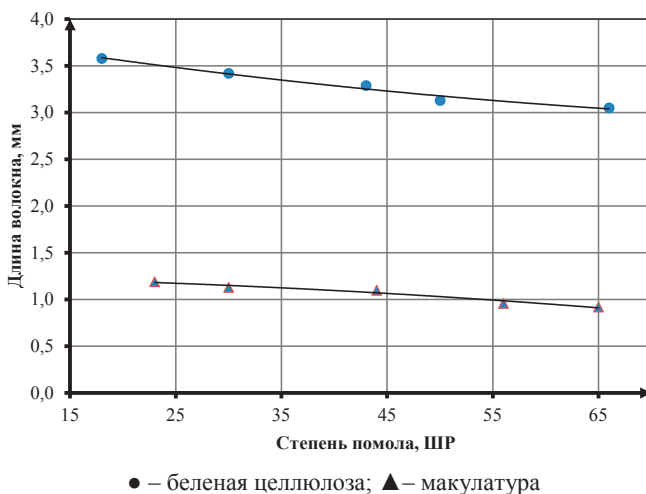


Рис. 1. Зависимость длины волокна от степени помола

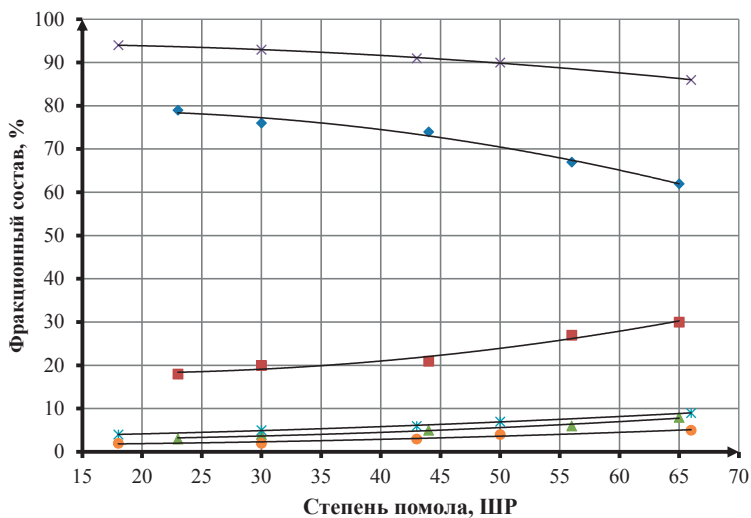
Укорачивание волокон – сложный процесс, механизм его можно приближенно сравнить с механизмом разрезания их ножницами. Фрагменты волокон, образующиеся в процессе размола, называются мелочью. Предполагается, что длинные волокна образуют как бы каркас в бумажном листе, а мелочь заполняет этот каркас, упрочняя его. Когда соотношение содержания длинных волокон к содержанию коротких волокон в бумаге возрастает, ее прочностные свойства улучшаются.

В зависимости от степени точности определения и учета коротковолокнистых фракций результаты расчетов среднеарифметической длины волокна могут отличаться друг от друга. Это связано с тем, что при определе-



нии среднеарифметической длины волокна не учитывается весовое содержание отдельных фракций волокон по длине, поэтому данный показатель является менее показательным.

С увеличением степени помола волокнистой массы увеличивается содержание коротковолокнистой фракции из-за рубки волокон в процессе разработки. Однако значительное количество мелких фрагментов волокна сильно ухудшает способность целлюлоз к обезвоживанию на сетке бумагоделательной машины. Опыт эксплуатации бумагоделательных машин показывает, что даже однородная суспензия, будучи обезвоженной, может дать лист с облачным просветом, а из суспензии, содержащей большое количество мелочи, всегда получится лист еще худшей структуры. Поэтому так важно процесс размолу оборотного брака вести более щадящим способом и уделять особое внимание содержанию фракционного состава волокнистой суспензии.



Фракции макулатуры: ◆ – грубая; ■ – средняя; ▲ – мелкая;  
 Фракции беленой целлюлозы: ✕ – грубая; ✧ – средняя; ● – мелкая

Рис. 2. Зависимость фракционного состава от степени помола

Из рис. 2 видно, что с увеличением степени помола волокнистой массы количество грубой фракции уменьшается и увеличивается доля сред-





ней и мелкой фракции. Так, например, содержание грубой фракции во вторичном волокне составляет 62...79 % в зависимости от степени помола, тогда как в белой целлюлозе этот показатель составляет 86...94 %, количество средней фракции колеблется соответственно в пределах 18...30 % и 4...9 %. Что касается содержания мелкой фракции, то она составила около 2...5 % не зависимо от вида обрабатываемого сырья.

Структура бумаги зависит не только от свойств образующих ее компонентов и сил взаимодействия между ними. Большое значение имеет характер распределения и расположения компонентов по площади и объему бумажного полотна. В процессе отлива листа очень важна скорость обезвоживания. Этот процесс представляет собой жидкую суспензию волокон, которая превращается во влажное бумажное полотно с уплотнением образовавшегося на сетке слоя волокон и с изменением фильтрующих свойств. При этом с увеличением степени помола волокна целлюлозы образуют плотный слой, затрудняющий через него фильтрацию воды на сетке бумагоделательной машины.

Показатель удерживаемой волокном воды, водоудерживающей способности, выражается в процентах и характеризует степень набухания и гидратации волокон при размоле. То есть характеризует способность волокон к образованию межволоконных связей и получения более прочной бумаги.

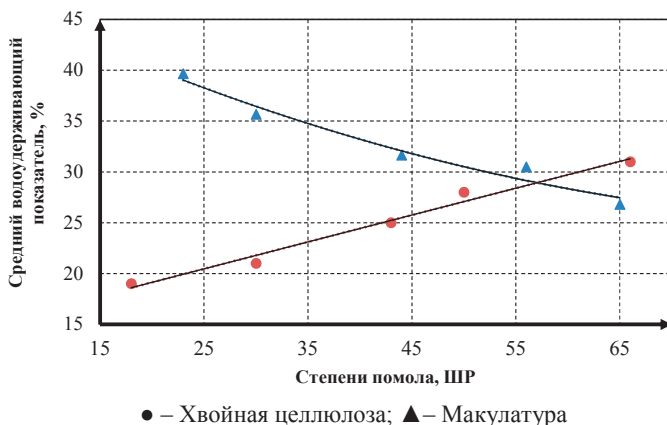


Рис. 3. Зависимость водоудерживающего показателя от степени помола



Из рис. 3 можно увидеть, что с повышением степени помола показатели водоудерживающей способности белой целлюлозы возрастают, а показатели макулатурной массы, наоборот, снижаются. Повышение водоудерживающей способности, с одной стороны, положительно сказывается для производства высококачественных бумаг, так как способствует более равномерному распределению различных наполнителей при формировании бумажного полотна. С другой стороны, уменьшение показателя водоудерживающей способности позволяет экономить на энергозатратах при обезвоживании бумажной массы на сетке бумагоделательной машины и увеличить производительность при производстве бумаги не высокого качества [5].

Таким образом, можно сделать вывод, качество готовой бумаги зависит от свойств полуфабрикатов, при этом имеется в виду как поведение волокнистых полуфабрикатов в технологических процессах, так и влияние их на свойства массы и бумажной продукции.

#### Список литературы

1. Брянцева З.Е. Атлас ультраструктуры древесных полуфабрикатов, применяемых для производства бумаги. М.: Лесная промышленность, 1984. 232 с.
2. Иванов С.Н. Технология бумаги. М.: Государственное лесотехническое издательство, 1960. 719 с.
3. Алашкевич Ю. Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дисс.... докт. техн.наук. Л., 1980. 334 с.
4. Кутовая Л.В. Комплексный параметр процесса обработки волокнистых суспензий безножевым способом в установке типа «струя-преграда»: дисс..... канд. техн. наук. Красноярск, 1998. 150 с.
5. Фляте Д.М. Технология бумаги. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 440 с.



## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАЗМОЛА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУЛЬФАТНОЙ БЕЛЕНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

**Е.В. Каплёв, Л.В. Юртаева, Ю.Д. Алашкевич**

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика  
М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия*

*В статье рассмотрены различные режимы размолва безножевой установки типа «струя-преграда» и влияние их на физико-механические свойства сульфатной беленой целлюлозы.*

## THE INFLUENCE OF MODE OF GRINDING ON PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF BLEACHED KRAFT PULP.

**E.V. Kaplyov, L.V. Yurtaeva, Yu.D. Alashkevich**

*Siberian state University of science and technology named after academician M. F. Reshetnev  
Krasnoyarsk, Russia*

*The article deals with the different modes of grinding of the legless installation of the "jet-barrier" type and their influence on the physical and mechanical properties of sulfate bleached cellulose.*

Процесс размолва связан с перемещением больших масс волокнистых суспензий в рабочих органах размалывающих машин, что сказывается как на самом процессе размолва, так и на энергозатратах при перемещении волокнистой суспензии. В связи с этим, эффективность размольного оборудования может быть обеспечена на основе знания гидродинамических процессов, происходящих при взаимодействии рабочих органов размольного оборудования с волокнистой суспензией.

На свойства готовой бумаги влияет не только вид исходных волокон, но и способ их обработки на всех стадиях производства, в том числе и процесс размолва. Размалывающее оборудование предназначено для разделения различных полуфабрикатов на волокна, измельчение волокон и придания им определенных свойств.

Несмотря на то, что наибольшее распространение в настоящее время получили ножевые размалывающие машины, такие как конические и дисковые мельницы, тем не менее исследования в области безножевого способа размолва остаются актуальными. Это связано с тем, что в ножевых размалывающих машинах волокна подвергаются сильным рубящим воздействиям



и раздавливанию, что, в конечном счете, приводит к снижению прочностных показателей готовой продукции и значительно затрудняет использование в производстве коротковолокнистых листовых пород древесины и оборотного брака.

Безножевой же размол более мягкий, щадящий режим обработки, что особенно важно для волокнистой суспензии из оборотного брака, которая уже однажды претерпевала стадию размола [1,2].

Независимо от вида, процесс размола целлюлозы связан с перемещением больших масс волокнистых суспензий в рабочих органах размалывающих машин, что сказывается как на самом процессе размола, так и на энергозатратах при перемещении волокнистой суспензии. В связи с этим, эффективность размольного оборудования может быть обеспечена на основе знания гидродинамических процессов, происходящих при взаимодействии рабочих органов размольного оборудования с волокнистой суспензией [3].

Так, например, на гидродинамику явлений при течении волокнистой суспензии в рабочих органах ножевых машин оказывают влияние зазор между ножами, геометрические параметры гарнитуры, угол установки ножей ротора относительно ножей статора, концентрации суспензии и др [1].

У безножевых машин и аппаратов параметрами, влияющими на процесс размола, являются: скорость истечения струи, расстояние от насадки до преграды, форма и размер насадки, форма, размер и угол установки преграды, вид преграды, концентрация массы [1,2].

И если в ножевых машинах гидродинамические явления представляют только составную часть общего механизма воздействия на волокно при размоле, то в безножевых машинах этот фактор является определяющим. Тем не менее, гидродинамические явления в процессе размола волокон, как в ножевых, так и в безножевых машинах имеют общие закономерности, влияющие на механические параметры отливок.

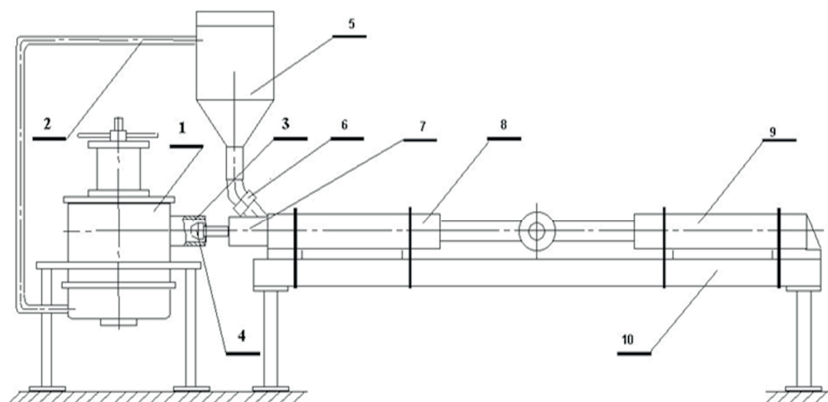
Авторами [1–3] установлено, что волокнистые полуфабрикаты, обработанные способами, исключаящими ножевое воздействие на волокно, имеют высокие прочностные показатели и поэтому наряду с усовершенствованием ножевых машин необходимо изучать и внедрять безножевые методы обработки волокон.

В связи с этим в СибГУ им. М.Ф.Решетнева, на кафедре машин и аппаратов промышленных технологий ведутся исследования гидродинамических процессов, происходящих при взаимодействии рабочих органов размольного оборудования с волокнистой суспензией, с использованием как ножевого, так и безножевого способов размола (рис. 1).



Учитывая, что данная установка включает в себя два способа размола (ножевой и безножевой), мы имеем возможность регулировать долю воздействия того или иного способа, и таким образом обеспечивать необходимое качество обработки волокна [1]. Для выделения безножевого способа размола воздействие ножевой гарнитуры в установке можно исключить двумя способами.

С этой целью ротор ножевой гарнитуры установки оставляют неподвижным, и размол массы представляет собой безножевой способ с неподвижной преградой. Для того, чтобы проводить безножевой размол с подвижной преградой, устанавливается максимальный зазор между ножами ротора и статора, таким образом ножевая часть мельницы не влияет на интенсивность размола.



1 – камера гидродинамического размола; 2 – трубопровод возврата; 3 – раструб; 4 – насадка; 5 – емкость; 6 – всасывающий клапан; 7 – выпускной клапан; 8 – рабочий цилиндр; 9 – приводной цилиндр; 10 – рама

Рис.1. Схема экспериментальной безножевой установки типа «струя–преграда»

При безножевом размолке на установке типа «струя-преграда» с использованием подвижной преграды в обязательном порядке присутствует эффект кавитации. Для размола волокнистой массы этот эффект является позитивным от которого зависит степень обработки волокна. Волокна за счет кавитационного воздействия подвергаются преимущественному расщеплению (фибриляции) вдоль их оси, в результате повышаются физико-механические свойства [2–4].

С целью исследования различных режимов работы безножевой установки типа «струя-преграда» (рис. 1) в программе Comsol Multiphysics была построена модель гидропоршня с удлинителем и насадкой безножевой установки типа «струя-преграда» (рис. 2–4).

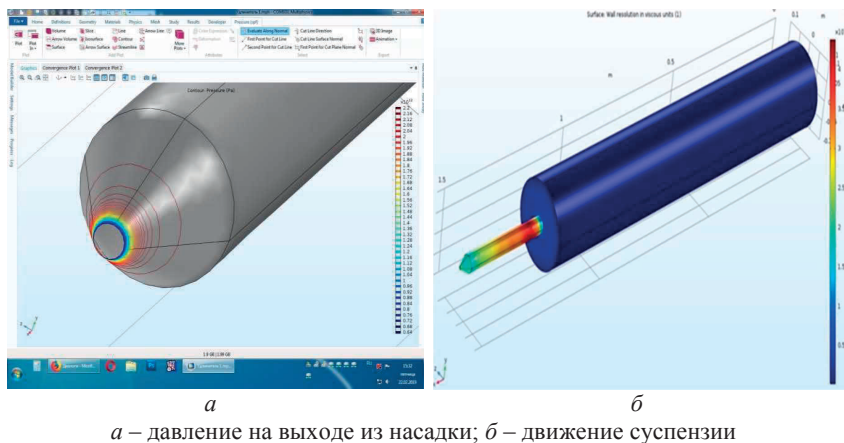


Рис. 2. Модель гидропоршня с удлинителем и насадкой безножевой установки типа «струя-преграда» (12 МПа)

Как видно из рис. 2*б* внезапное сужение потока суспензии в удлинителе, сопровождается резким увеличением скорости с последующим снижением её к насадке и одновременным снижением давления. В результате чего в месте перехода из большого диаметра в малый создаются пространства с завихрениями вращающейся жидкости. Такие же завихрения образуются в начале узкой части удлинителя за счёт того, что при входе в неё (узкую часть) жидкость продолжает некоторое время двигаться по инерции в направлении центра удлинителя, поэтому основное русло потока ещё некоторое время продолжает сужаться.

При внезапном сужении потока увеличивается и эффект кавитации, который является одним из факторов процесса размола в аппаратах данного типа и оказывает положительное влияние на формирование механических свойств волокнистых полуфабрикатов.

На рис. 3,4 показаны модели гидропоршня с удлинителем и насадкой безножевой установки типа «струя-преграда» при различных скоростях истечения жидкости.

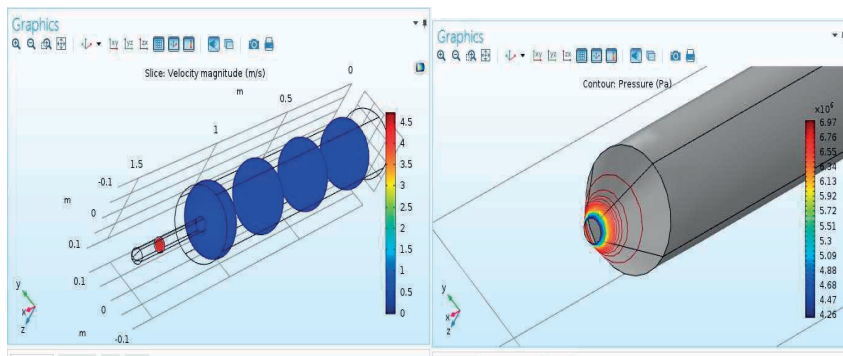


Рис. 3. Скорость истечения жидкости в установке типа струя-преграда при давлении 7 МПа

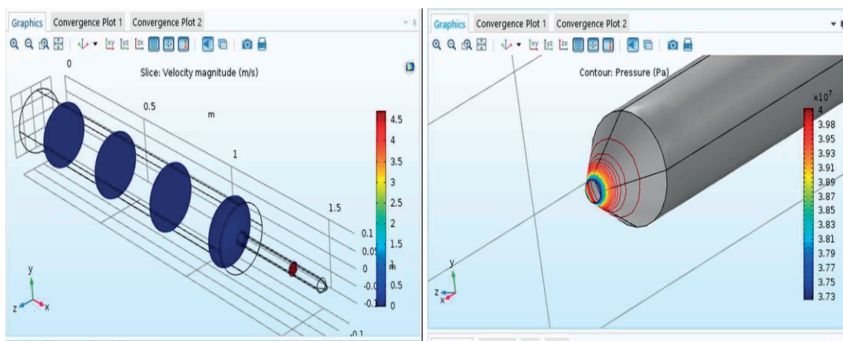
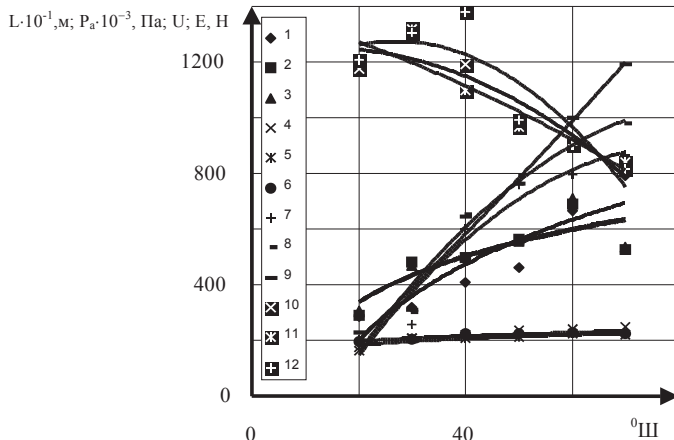


Рис. 4. Скорость течения жидкости в установке типа струя-преграда при давлении 4 МПа

Как видно из рис. 2–4, все схемы модели гидропоршня с удлинителем и насадкой безножевой установки типа «струя-преграда» не зависимо от скорости движения поршня в гидроцилиндре и истечения суспензии остаются одинаковыми. Количественные изменения параметров струи оказывают влияние только на качественные показатели физико-механических характеристик готовых отливок (рис. 5).



1,2,3 – разрывная длина; 4,5,6 – сопротивление продавливанию;  
 7,8,9 – число двойных перегибов; 10,11,12 – сопротивление раздиранью соответственно при  $v = 130,5$  м/с,  $v = 115,4$  м/с,  $v = 97,1$  м/с

Рис. 5. Зависимость физико-механических отливок от скорости истечения струи

Таким образом, можно сделать вывод, что гидродинамика движения волокнистых суспензий в размольном оборудовании имеет характерные особенности внутренней структуры потока при различных скоростях движения. Данные особенности характера движения волокнистых суспензий необходимо учитывать при проектировании подводящих массопроводов и конкретных проточных частей напорных ящиков.

#### Список литературы

1. Алашкевич Ю. Д., Марченко Р.А., Решетова Н.С. Процесс безножевой обработки волокнистой суспензии в установке «струя–преграда». // Химия растительного сырья. 2009. № 2. С. 157–163.
2. Алашкевич Ю. Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. ... докт. техн. наук. Л. 1980. 334 с.
3. Ерофеева А.А. Безножевой размол волокнистых полуфабрикатов с учетом реологических особенностей суспензий: дис. .... канд. техн. наук. Красноярск. 2012. 135 с.
4. Кутовая Л.В. Комплексный параметр процесса обработки волокнистых суспензий безножевым способом в установке типа «струя-преграда». дис. .... канд. техн. наук Красноярск. 1998. 150 с.





## ВЛИЯНИЕ РАЗМОЛА РАСТИТЕЛЬНЫХ ВОЛОКОН НА ВОДОПОГЛОЩЕНИЕ КЛЕЕНОЙ БУМАГИ

Д.И. Малютина, А.С. Смолин

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург, Россия*

*Работа посвящена исследованию зависимости времени размола различных волокнистых полуфабрикатов на степень проклейки, клеем на основе димера алкилкетена. Изучена способность разных волокнистых полуфабрикатов к проклейке. Установлена зависимость изменения водопоглощения от степени помола. Экспериментально подтверждено, что степень проклейки бумаги ухудшается с увеличением удельной поверхности волокон, что является следствием процесса размола.*

### EFFECT OF GRINDING VEGETABLE FIBERS ON WATER SORPTION OF GLUED PAPER

D.I. Malyutina, A.S. Smolin

*Saint Petersburg State University of Technologies and Design, St. Petersburg, Russia.*

*The work is devoted to the study of the dependence of the grinding time of various fibrous semi-finished products on the degree of sizing, glue based on alkylketene dimer. The ability of different fibrous semi-finished products to sizing was studied. The dependence of changes in water absorption on the degree of grinding. It is experimentally confirmed that the degree of paper sizing deteriorates with an increase in the specific surface of the fibers, which is a consequence of the grinding process.*

Данная работа посвящена исследованию процесса проклейки, а именно влиянию размола различных волокнистых полуфабрикатов и их природы на степень проклейки бумаги.

Представленные в работе результаты, выполнены на значимую тему, Процесс внутримассной проклейки сохраняет свою актуальность, исследования в этой области и поиск оптимальных технологических решений активно продолжаются и в настоящее время. При широком разнообразии исследований, посвященных процессу внутримассной проклейки, практически обойден вниманием вопрос влияния процесса размола на степень водопоглощения в присутствии проклеивающих реагентов, кроме того, большая часть исследований по проклейке выполнены с клеями на основе канифоли. В настоящей работе исследуются сравнительно новые проклеивающие реагенты на основе димеров алкилкетена.

Стоит отметить, что термин «проклейка», сохранившийся в историческом смысле, технологических является некорректным, поскольку не отвечает сути происходящих механизмов.



Действительно, никакого склеивания волокон между собой не происходит, при действии гидрофобизирующих реагентов создается менее водопроницаемая и водопоглощающая структура материала благодаря равномерному мелкомасштабному распределению гидрофобных частиц реагентов по поверхности волокон и фибрилл, что создает определенные препятствия активному проникновению воды глубоко внутрь структуры материала и формирует определенную степень водонепроницаемости, сохраняя при этом необходимую степень гидрофильности бумаги и картона.

Этому механизму в наибольшей степени соответствуют общепринятый в настоящее время метод оценки водопроницаемости – метод Кобба, прямо оценивающий количество поглощаемой влаги за определенный промежуток времени.

В классической литературе [1] отмечается, что при высоких степенях помола водонепроницаемость возрастает, благодаря уплотнению структуры, снижению пористости и воздухопроницаемости.

В настоящее время вопрос внутримассной проклейки не изучен в полной мере, в частности, почему с увеличением разработанности целлюлозы проклейка клеем АКД ухудшается.

Данные о влиянии степени помола на водопоглощение в присутствии проклеивающих реагентов отсутствуют. При этом процесс размола волокна должен оказывать влияния на водопоглощение, поскольку при размоле происходит значительное изменение структурных характеристик волокнистых систем.

Поверхность волокон в начале процесса размола увеличивается медленно, а затем заметно быстрее, что и показано на кривой изменения удельной поверхности целлюлозы в процессе размола в зависимости от его продолжительности (рис. 1)

Получение информации о поверхности волокон, из которых состоят волокнистые полуфабрикаты, используемые для производства различных видов бумаги и картона, является ключевым моментом характеристики бумагообразующих свойств. Состояние и степень развития поверхности волокон определяет силу их взаимодействия с другими компонентами бумажной массы и имеет решающее влияние на процесс формирования структуры бумажного полотна при формовании, прессовании и сушке на бумагоделательной машине. Тем самым формируются его механические свойства и деформационное поведение образцов целлюлозно-бумажных материалов.

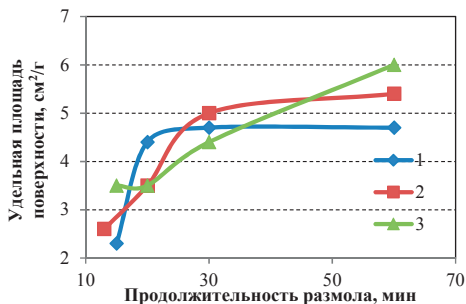


Рис.1. Изменение удельной поверхности по ВЕТ образцов хвойной и лиственной целлюлозы в процессе размола (1– СФАХВ небеленая, 2 – СФАХВ беленая, 3 – СФАЛ беленая)

При разработке волокон в процессе размола неизбежно изменяется их поверхность, что оказывает влияние на силу взаимодействия волокон как между собой, так и с другими компонентами бумажной массы; процесс формирования бумажного полотна; бумагообразующие и прочностные свойства волокнистых полуфабрикатов.

Для количественной характеристики поверхности волокон, которая увеличивается в процессе удаления лигнина и, в большей степени, при размоле, с акцентом на степень фибриллированности, может использоваться величина удельной поверхности, измеренная методом низкотемпературной сорбции азота. Установление взаимосвязей удельной величины поверхности волокон и основных бумагообразующих, упругих и прочностных свойств позволит прогнозировать деформационные свойства бумажного полотна при различной интенсивности размола

Известно, что удельная поверхность мелочи намного превышает удельную поверхность самого волокна, а ее присутствие не только изменяет структурные и механические свойства бумаги, но и отрицательно сказывается на расходе полезных химических вспомогательных веществ. Поэтому измерение степени помола следует рассматривать только как технологический показатель общего состояния бумажной массы. Для более точной оценки удельной поверхности следует определение относительного водоудержания при центрифугировании (WRV). Как видно из рис. 2, чем более развита удельная поверхность целлюлозы, тем выше значения водоудержания волокна. Но далее водоудерживающая способность начинает выравниваться, это можно объяснить общей деструкцией волокна [2].

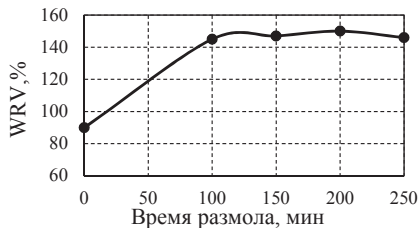
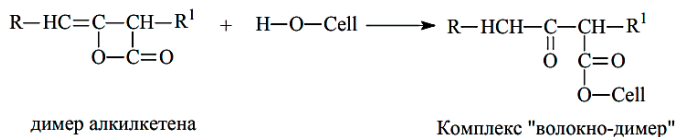


Рис. 2. Изменение водоудержания от продолжительности размола

Для придания гидрофобности бумаге необходимо включить в технологический цикл производства процесс внутримассной проклейки. В основу проклейки входит введение в массу химических веществ, способных при обезвоживании, под действием повышенных температур приобретать гидрофобные свойства.

Механизм проклейки достаточно сложен и находится в постоянном развитии, его суть заключается в осаждении частиц клея на волокне. Синтетические проклеивающие материалы, которые реагируют с –ОН группами целлюлозы – это уход от традиционных способов проклейки. Синтетические реагенты дороже, чем канифоль и действуют в нейтральной и щелочных средах. Как правило данные химикаты не готовятся на производстве, а привозятся в готовом виде.

Взаимодействие между АКД и гидроксилами целлюлозы происходит по реакции [3]



**Эксперимент.** Для проведения исследований использовали следующие волокнистые полуфабрикаты:

- Сульфатная беленая листовая целлюлоза (СФАЛБ)
- Сульфатная беленая хвойная целлюлоза (СФАХВБ)
- Беленая химико-термомеханическая масса (БХТММ)
- Макулатура марки МС-5Б
- Сульфатная беленая эвкалиптовая целлюлоза (СФАБЭЦ)

В работе использовался клей АКД, являющийся проклеивающим веществом в нейтральной среде.



Подготовка бумажной массы, роспуск и размол волокнистых полуфабрикатов, а также обработка бумажной массы проклеивающим веществом и определение поверхностной впитываемости воды при одностороннем смачивании (метод Кобба) производились в соответствии с действующими стандартами [4] и представлена на рис. 3.

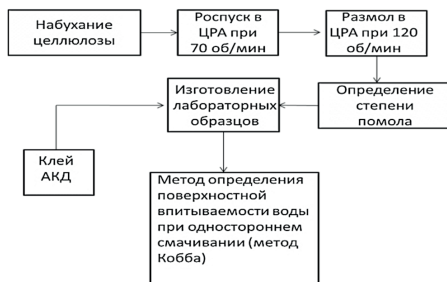


Рис.3. Схема исследования целлюлозы

Результаты представлены на рис. 4–6.

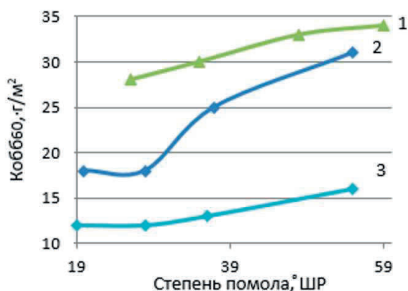


Рис.4. График изменения степени проклейки от времени размола (1 – Макулатура марки МС5-Б; 2 – СФАХВБ; 3 – СФАЛБ)

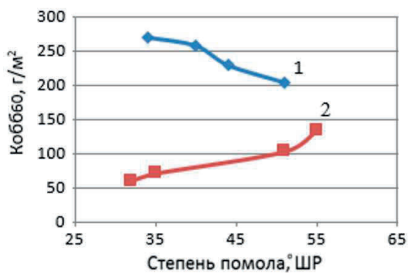


Рис.5. График изменения степени проклейки от времени размола (1 – БХТММ; 2 – СФАБЭЦ)

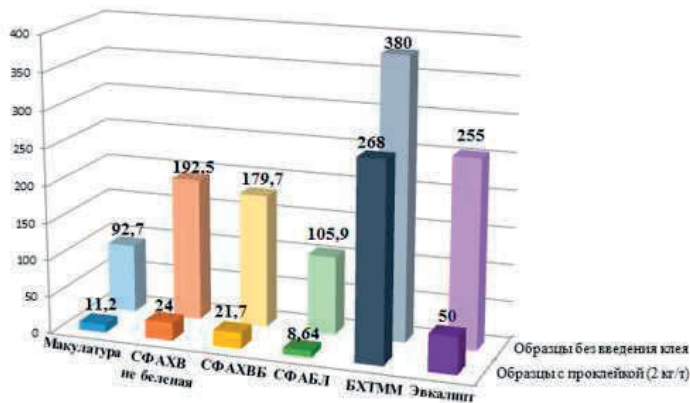


Рис.6. Способность к проклейке разных полуфабрикатов

### Выводы:

1. С увеличением степени помола исследуемых видов волокон, водопоглощение возрастает.
2. Увеличение водопоглощения происходит одновременно с увеличением удельной поверхности волокон и связано с недостаточным количеством клея для растущей поверхности.
3. Различные виды волокнистых полуфабрикатов проклеиваются по-разному, это связано с наличием остаточного лигнина, количеством коротких волокон и доступностью гидроксильных групп.

### Список литературы

1. Фляте Д.М. Технология бумаги. Учебник для вузов. М.: Лесн. пром-сть. 1988. 432 с.
2. Кларк Дж. Технология целлюлозы (наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка ее на бумагу, методы испытания) / Пер. с англ. А.В. Оболенской и Г.А. Пазухиной. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 456 с.
3. Блинушова О.И., Дулькин Д.А., Ковернинский И.Н. Развитие теории механизма проклейки тест-лайнера димерами алкилкетена // Химия растительного сырья. 2008. №1. 8 с.
4. Шабиев Р.О., Смолин А.С., Парамонова Л.Л. Изготовление и испытание лабораторных образцов бумаги и картона из вторичного сырья: уч. пособие. СПб.: СПбГТУРП, 2013. 66 с.

## БУМАГООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА ТЕХНИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

**М.Г. Михалева, Г.Г. Политенкова, С.Н. Никольский, С.В. Стовбун**  
*ФИЦ ХФ РАН, Москва, Россия*

*В работе обобщены результаты исследований по установлению количественной взаимосвязи между бумагообразующими свойствами, с одной стороны, природными и технологическими факторами, определяющими процессы получения технической целлюлозы, с другой стороны.*

### PAPERMAKING PROPERTIES OF CHEMICAL PULP

**M.G. Mikhaleva, G.G. Politenkova, S.N. Nikol'skij, S.V. Stovbun**  
*FRCCP RAS, Moscow, Russia*

*The paper summarizes the results of studies to establish the quantitative relationship between the paper-forming properties, on the one hand, natural and technological factors, which determine the processes for the production of industrial pulp, on the other hand.*

Совершенствование технологии варки и отбелки целлюлозы, процессов получения полуфабрикатов высокого выхода, расширения сырьевой базы для производства бумаги и картона, увеличение степени использования вторичных источников сырья, неразрывно связаны с решением вопроса о качестве и областях наиболее эффективного применения получаемых волокнистых полуфабрикатов.

Обязательной частью любого исследования по модифицированию существующих или созданию новых технологий волокнистых полуфабрикатов для бумаги и картона является анализ бумагообразующих свойств полуфабрикатов. По существу, вся история развития бумажного производства неразрывно связана с познанием свойств волокнистого сырья, получивших наименование «бумагообразующие свойства», и изучением показателей качества продуктов его переработки.

Этот термин – одно из основополагающих начал науки о бумаге, её технологии и применении.

В настоящее время в научно-технической литературе содержится обширнейший массив экспериментальных данных по свойствам технической целлюлозы и полуфабрикатов высокого выхода. Несмотря на опубликованные результаты исследований, практически не решена проблема количественного описания с единых позиций взаимосвязи между природными и технологическими факторами, с одной стороны, и бумагообразующими



свойствами, с другой стороны. Иными словами, отсутствует единый системный подход.

В результате всесторонних исследований процессов делигнификации и свойств небеленой целлюлозы сформировались две условно самостоятельные группы экспериментальных данных. Первая характеризует древесный остаток после варки (выход сортированной массы и количество непровара, содержание остаточного лигнина или жесткость в единицах Каппа). Вторая группа включает испытания полученного материала по фундаментальным химическим и физико-механическим свойствам, морфологическим и наноморфологическим характеристикам, стандартным показателям механической прочности. Аналогичный подход используется при изучении процессов отбелки и облагораживания целлюлозы. Иными словами, делигнификация и последующая отбелка волокнистого сырья, с одной стороны, и характеристики получаемого материала, с другой стороны, изучаются отдельно, создавая искусственную границу между причиной и следствием.

Предложенный авторами настоящей работы подход к формированию бумагообразующих свойств небеленой и беленой технической целлюлозы позволяет объединить физико-химические основы процессов делигнификации и последующей переработки волокнистых полуфабрикатов со свойствами конечной продукции – бумаги и картона.

Техническая целлюлоза, получаемая в результате химической переработки растительного сырья, имеет больше отличий, чем сходства с теми волокнами, которые присутствуют в ксилеме.

Процессы получения и переработки древесной целлюлозы включают большое число переменных факторов. Их правомерно разделить на две независимые группы – природные и технологические факторы.

Природные факторы (геоклиматические и условия биосинтеза) формируют структуру, морфологические особенности, физические свойства и химический состав растительного сырья, они определяют целевое назначение, условия делигнификации и отделки целлюлозы.

Технологические факторы являются наиболее важной группой переменных. Главным технологическим фактором, определяющим все дальнейшие процессы переработки волокнистого материала, является способ варки. Именно он определяет формирование таких свойств, как способность к размолу, когезионная способность и грубость волокон, физико-механические свойства полуфабрикатов и конечной продукции. Интенсивное воздействие высокой температуры и варочных реагентов приводит к приобретению растительными волокнами качественно новых характеристик по сравнению





с сырьем: 1) половина древесинного вещества переходит в варочный раствор в виде продуктов распада; 2) возрастает доля углеводной фракции в древесном остатке; 3) качественно меняются свойства волокон.

Именно на стадии варки формируется волокнистый полуфабрикат для производства бумажно-картонной продукции. Происходящие изменения в свойствах целлюлозы настолько существенны, что волокнистые материалы именуется по названию того процесса, в котором они были получены. В самом названии технической целлюлозы подчеркивается чрезвычайная значимость процесса для формирования тех свойств волокон, которые именуется «бумагообразующие». Приемлемая дифференциация определяющих их факторов возможна лишь при минимизации количества переменных параметров, но без ущерба для конечного результата. При таком подходе правомерно выделить два независимых друг от друга фактора: 1) порода древесины (природный фактор); 2) варочный процесс (технологический фактор). Именно они играют доминирующую роль в формировании бумагообразующих свойств целлюлозы.

Анализ бумагообразующих свойств нельзя выполнять исключительно к одному виду целлюлозы (сульфатная, сульфитная и пр.). Объяснить формирование свойств полуфабриката реально лишь при сопоставлении характеристик волокнистых материалов, полученных различными способами.

В порядке убывания степени важности для бумажно-картонного производства бумагообразующие свойства логично расположить следующим образом: 1) способность к размолу; 2) грубость волокон (масса единицы для); 3) когезионная способность волокон; 4) стандартные показатели механической прочности.

Аналитическое обобщение опубликованных данных и экспериментальных результатов, полученных авторами настоящей работы, позволили сформулировать единую научно обоснованную концепцию формирования бумагообразующих свойств технической целлюлозы. В сокращенном виде закономерности формирования бумагообразующих свойств представлены на рис. и в табл. 1,2.

В основу концепции положены физико-химические превращения древесинного вещества под действием варочных реагентов.

После соответствующей доработки представляется реальным создание единого подхода, охватывающего не только закономерности формирования бумагообразующих свойств волокнистых полуфабрикатов, но и тенденции их изменения при многократном использовании в производстве бумаги и картона.



Для этого имеется большой массив экспериментальных данных и установленных эмпирических зависимостей.

$[RH]/[RH]_0, \%$

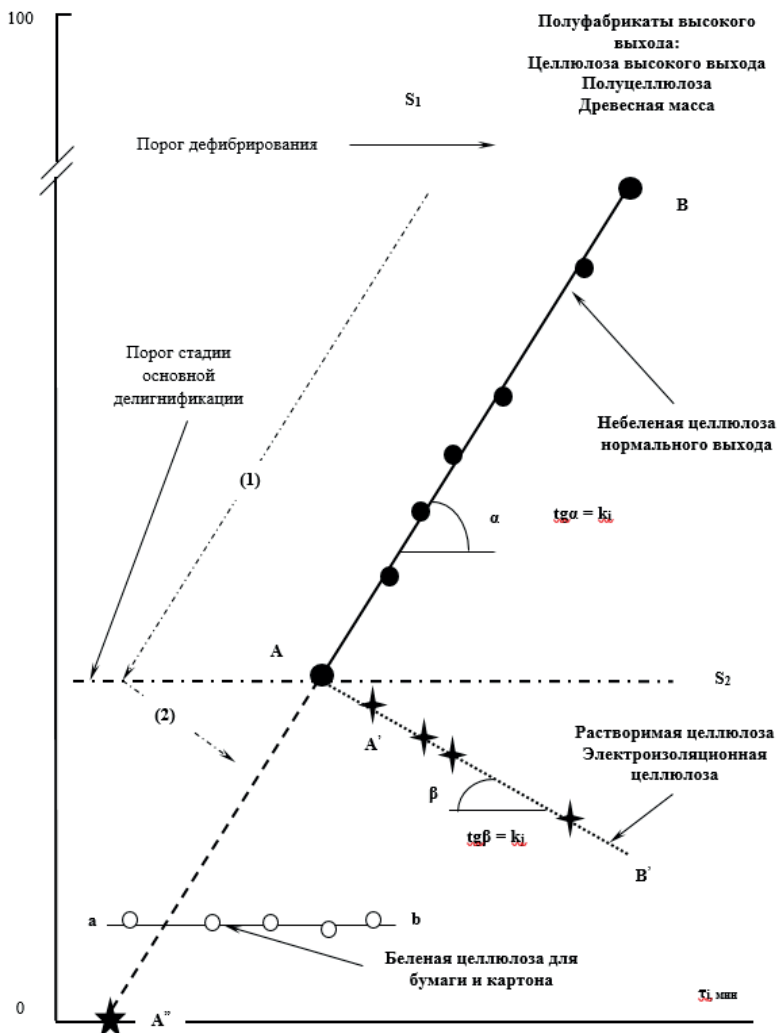


Рис. 1. Формирование бумагообразующих свойств волокнистых полуфабрикатов



Таблица 1. Параметры волокнистых полуфабрикатов

№ п/п	Параметр	
	Обозначение	Расшифровка параметра
1	Система координат:	
1	$\tau_i$	Время размола целлюлозы до заданной степени помола (30 – 60)°ШП, мин
	$[RH]/[RH]_0 = L_{исх.}$	Содержание лигнина в целлюлозе по отношению к находящемуся в исходной древесине, %
2	(1)	Делигнификация растительного сырья
3	(2)	Облагораживание целлюлозы
4	Отрезок [A, B]	Стадия основной делигнификации
5	Отрезок [A', B']	Конечная стадия делигнификации
6	$k_i (=tg\alpha)$	Угловой коэффициент, характеризующий способность к размолу небеленой целлюлозы нормального выхода
7	Отрезок [a, b]	Способность к размолу беленой целлюлозы. Ордината $[RH]/[RH]_0 \approx 0$
8	A (★)	Способность к размолу небеленой целлюлозы с нулевым содержанием остаточного лигнина
9	$k_j (=tg\beta)$	Угловой коэффициент, характеризующий способность к размолу небеленой целлюлозы с повышенным содержанием $\alpha$ -целлюлозы
10	Линия $S_1$	Точка (порог) дефибрирования целлюлозы. Начиная с этого момента, происходит формирование целлюлозы нормального выхода за счет образования кластера дефектов в межклеточном пространстве. Множество точек, характеризующих небеленую целлюлозу, расположено в части плоскости, ограниченной линиями $S_1, S_2$ , осями «продолжительность размола целлюлозы - $\tau_i$ » и «концентрация остаточного лигнина - $[RH]/[RH]_0 = L_{исх.}$ »
11	Линия $S_2$	Пороговая граница стадии основной делигнификации (содержание $\alpha$ -целлюлозы не менее 91...92 %). Граница не связана с образованием кластера дефектов (порогом протекания). Она обусловлена сменой компонента клеточной оболочки, лимитирующего способность технической целлюлозы к размолу.

Варочный процесс и функционализация основных компонентов древесинного вещества являются главными параметрами, определяющими свойства волокнистых полуфабрикатов и их дальнейшую переработку в бумагу и картон.

Представленный в работе подход позволяет с единых позиций прогнозировать показатели качества новых волокнистых полуфабрикатов.



Таблица 2. Взаимосвязь способа делигнификации со свойствами технической древесной целлюлозы

Варочный процесс		
Сульфитный	Окислительный	Щелочной
Основные функциональные группы остаточного лигнина		
-SO <sub>3</sub> H	-COOH, =CO	-OH
«гидрофильность» целлюлозы ←		
→ «гидрофобность» целлюлозы		
Свойства волокон		
Параметр	Тенденция	Примечания
Модуль продольной упругости волокон	→	---
Способность поверхности волокон к смачиванию	←	---
Суспензия целлюлозы в воде		
Способность к размолу	←	---
Степень влияния остаточного лигнина на способность к размолу целлюлозы	→	С повышением «гидрофобности» волокнистой массы усиливается влияние природы и количества остаточного лигнина
Энергозатраты на размол, удельная нагрузка на кромки ножей, касательное напряжение размола	→	---
ζ – потенциал		
Электропроводность суспензии	←	---
Поверхностная электрическая проводимость		
Способность к механической пергаментации	←	---
Способность к проклейке		
Канифольный клей	→	Небеленая целлюлоза
	←	Беленая целлюлоза
Димеры алкилкетенов	→	---
Свойства бумаги		
«Естественная» проклейка	←	---
Сопrotивление раздиранию	→	---
Линейная деформация при увлажнении (вода, воздух)	→	---
Мягкость бумаги	←	Материалы санитарно-гигиенического назначения



**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БЕЛЁНОЙ  
ЛИСТВЕННОЙ СУЛЬФАТНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ  
В ЖЁСТКИХ УСЛОВИЯХ.  
ЧАСТЬ I. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СУЛЬФАТНОЙ ВАРКИ**

**Л.А. Миловидова, Т.А. Королева, М.А. Иконникова, А.А. Дряхлицын,  
В.В. Медведев**

*Северный (Арктический) Федеральный Университет, Архангельск, Россия*

*В статье обсуждаются результаты исследовательской работы по влиянию повышенной температуры, расхода щелока при общей продолжительности сульфатной варки лиственной древесины 48 мин на качество небелёных полуфабрикатов.*

**DEVELOPMENT OF PRODUCTION TECHNOLOGY OF BLEACHED  
HARDWOOD SULPHATE PULP IN HARD CONDITIONS.  
PART 1. DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF SULPHATE  
COOKING**

**L.A. Milovidova, T.A. Koroleva, M.A. Ikonnikova, A.A. Dryahlitsyn, V.V. Medvedev**  
*Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia*

*The article discusses the results of research work on the effect of elevated temperature and alkali consumption during sulphate pulping of hardwood for 48 minutes on the quality of unbleached semi-finished products.*

В настоящее время постоянно возрастает потребность в высококачественных писчих и печатных видах бумаг, основным сырьём для производства которых является белёная лиственная целлюлоза.

Мощность современных варочных установок составляет более 2000 т/сутки, при этом варианты современных технологий варки Lo-Solids, G2 [1,2] предполагают проведение процесса варки лиственной древесины в интервале температур 150...155 °С при достаточно длительной продолжительности пропитки 40...60 мин и варки 1,5...2 часа. Кроме того, предусмотрена распределенная подача белого щелока. Целлюлоза, полученная в таких условиях, обладает повышенной белимостью и высокими прочностными характеристиками.

Проектная производительность варочных установок на большинстве российских предприятий составляет не более 1000 т/сутки, и в настоящее время увеличение выработки целлюлозы обеспечивается за счёт увеличения



мощности загрузочной линии варочного котла и связанного с этим изменения режима варки: сокращения продолжительности, повышения температуры и расхода активной щелочи.

Разработка общих рекомендаций для действующих предприятий невозможна, поскольку для каждого предприятия всегда есть различия в существующих технологиях, используемом оборудовании и древесном сырье. Дополнительным осложнением для российского производителя является совместная переработка древесины березы и осины при нерегулируемом соотношении.

Принципиальных отличий в химическом составе древесины березы и осины не обнаружено, но морфологический состав волокна различен. Волокна березовой целлюлозы имеют большую длину, содержат меньше сосудов и паренхимных клеток, волокна осинового целлюлозы более короткие и сравнительно толстостенные. Эти различия определяют особенности в технологии получения полуфабрикатов из древесины березы и осины [3].

Кроме того, из-за существенной разности в плотности древесины этих пород скорость пропитки и варки древесины заметно различаются. В результате имеют место колебания в расходе древесины и весового выхода целлюлозы [3].

Цель выполненной работы состояла в изучении возможности получения лиственной целлюлозы предназначенной для отбелки с числом каппа 20 и 25 ед. при увеличении производительности потока по варке древесины березы, осины и их смеси в соотношении 50:50 только за счёт увеличения объёма загрузки щепы в варочный котёл и ужесточения условий варки.

Так как временной режим варки должен быть привязан к размерам конкретного варочного котла одного из предприятий, было рассчитано время нахождения массы в каждой варочной зоне при увеличении его производительности по варке практически в три раза (табл.1). В этой же таблице приведены интервалы варьирования температур в варочных зонах для поиска оптимального режима варки.

Варка древесины проводилась на варочной установке CRS 420, имеющей 8 вращающихся автоклавов вместимостью 1200 мл. Установка имеет следующие системы: контроль и регулирование температуры с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ ; регулирование давления с точностью  $\pm 0,3$  МПа; расчет Н-фактора. По окончании варки производится быстрое охлаждение автоклавов водопроводной водой.



Образцы производственной щепы были фракционированы на лабораторном анализаторе АЛГМ. Для варки использовались фракции с сит 20 и 10 мм. Базисная плотность древесины берёзы составляла  $470 \text{ кг/м}^3$ , осины  $350 \text{ кг/м}^3$ .

Для исключения процессов переосаждения лигнина и гемицеллюлоз в конце варки содержание остаточной активной щёлочи в чёрном щелоке должно быть не ниже 18 г/л в ед. г/л, ед.  $\text{Na}_2\text{O}$  или остаточной эффективной щёлочи 5,0 г/л в ед. Предварительно древесина пропаривалась, влажность древесины после пропарки составляла 60 %.

Таблица 1. Временной режим варки древесины в котле

Зона варочного котла	Температура в зоне, °С	Продолжительность нахождения массы в зоне, мин
Пропитка	117	15
Верхняя варочная зона (ВВЗ)		
Берёза	149...160	8
Осина	152...156	
Смесь	149...158	
Нижняя варочная зона (НВЗ)		
Берёза	155...166	25
Осина	158...162	
Смесь	155...164	

При поиске оптимальных режимов варки древесины берёзы температура на конечной стоянке варки изменялась в интервале  $155...166 \text{ }^\circ\text{C}$ , расход щёлочи варьировался в интервале от 17,0 до 22,0 %.

Результаты варок представлены в таблице 2. На начальном этапе была проведена проверка рекомендуемых для современных варочных установок значений температуры –  $155 \text{ }^\circ\text{C}$  и расхода щёлочи 18 %. В условиях данного временного режима была получена целлюлоза с числом каппа выше 40,0.

Число каппа на уровне 20 было получено при расходе активной щёлочи 17 % и температуре варки  $166 \text{ }^\circ\text{C}$ , расходах 18,0 и 19,0 % и температуре  $166 \text{ }^\circ\text{C}$  и расходе 20,0 % и температуре  $164 \text{ }^\circ\text{C}$  (серии варок 2,3,4,6). При этом удовлетворительное значение остаточной эффективной щёлочи было получено только при расходе активной щёлочи на варку 18 и 19 % и температуре варки  $166 \text{ }^\circ\text{C}$ . Сокращение расхода щёлочи на варку до 17 % сопровождалось снижением концентрации эффективной щёлочи в чёрном щелоке до опасного значения 3,5 г/л.

Требуемое значение числа каппа близкое к 25 ед, было получено при температуре  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  и расходе щёлочи 22 %.



Следует отметить, что в интервале рассмотренных температур и расходов щелочи на варку при значении числа каппа близком к 20,0 выход целлюлозы был постоянным, что говорит о сохранении избирательности варочного процесса.

Анализ результатов, представленных в табл. 2, позволяет сделать заключение, что повышение температуры варки на каждый градус приводит к снижению числа каппа целлюлозы из березовой древесины примерно на 2,5 единицы, а наиболее заметное влияние на число каппа в интервалах температур 160...166 °С оказывает увеличение расхода щёлочи от 19,0 до 20,0 %. Увеличение расхода щелочи на 1,0% приводит к снижению числа каппа целлюлозы на 1,0 единицу.

Для варки древесины осины требуются более мягкие условия по сравнению с варкой древесины берёзы. Исследуемый интервал расхода активной щелочи составлял 18,0...20,0 %, интервал температур – 158...162 °С (табл. 3). При минимальной температуре 158 °С и расходе щёлочи 17, 18 % число каппа целлюлозы составило 28,3 и 24,9 ед, соответственно. Требуемое значение числа каппа 20 ед. было получено при проведении варок с расходом активной щелочи 18,0 % и 19,0 % при температуре 160 °С (серии варок 12,15).

Таблица 2. Показатели целлюлозы полученной при варке древесины берёзы\*

№ серии варки	Условия варки			Показатели целлюлозы				Концентрация остаточной щёлочи в чёрном щёлоче г/л, ед. Na <sub>2</sub> O	
	расход акт. щелочи, % от массы древесины в ед. Na <sub>2</sub> O	температура в зонах варки, °С		Н - фактор	выход сортированной целлюлозы, %	выход неперевара, %	число каппа	активная	эффективная
		ВВЗ	НВЗ						
1	18,0	149	155	151	64,5	-	43,9	19,8	5,8
2	17,0	160	166	391	52,5	0,01	20,6	17,4	3,5
3	18,0	160	166	391	51,5	0,00	20,6	18,5	4,7
4	19,0	160	166	389	51,0	0,00	19,5	22,5	7,2
5	20,0	154	160	231	51,9	0,00	27,7	23,6	13,6
6	20,0	158	164	328	51,7	0,02	21,9	23,7	12,0
7	20,0	160	166	395	49,8	0,00	17,5	22,3	7,8
8	22,0	154	160	233	50,2	0,00	24,9	20,8	9,0
9	22,0	158	164	331	49,6	0,10	18,1	26,0	14,2

\*средние значения показателей рассчитаны для серии 3 – 4 параллельных варок





Повышение температуры варки при расходе щёлочи до 19 % и более позволяет существенно снизить значение числа каппа целлюлозы. Наибольший эффект оказывает повышение температуры варки до 162 °С. В целом, зависимости, полученные при варке древесины осины аналогичны тем, что получены для варки березы.

Процесс варки древесины осины, в отличие от древесины березы, менее чувствителен к повышению температуры: при увеличении расхода щёлочи на 1,0 % число каппа снижается на 1,6 ед., тогда как для варки древесины берёзы снижение числа каппа составляет 2,5 ед. Скорее всего, это объясняется более мягкими условиями варки, в первую очередь, более низкими температурами в варочных зонах.

По сравнению с варкой древесины берёзы при варке древесины осины до одного и того же значения числа каппа Н - фактор существенно снизился (табл. 2.3), причем снижение Н – фактора было тем больше, чем ниже число каппа. Так, при получении целлюлозы с числом каппа 20,0 снижение Н – фактора составило 40 %, при получении целлюлозы с числом каппа 24,0 – около 13,0 %.

Таблица 3. Показатели целлюлозы полученной при варке древесины осины\*

№ серии варки	Условия варки			Показатели целлюлозы			Концентрация щёлочи в чёрном щёлоке г/л, ед. Na <sub>2</sub> O		
	расход акт. щелочи, % от массы древесины в ед. Na <sub>2</sub> O	температура в зонах варки, °С		Н - фактор	выход сортированной целлюлозы, %	выход непровара, %	число каппа	активная	эффективная
		ВВЗ	НВЗ						
10	17,0	152	158	194	55,8	0,23	28,3	18,9	3,5
11	18,0	152	158	196	55,0	0,01	24,9	21,9	8,0
12	18,0	154	160	231	55,9	0,06	20,2	19,9	3,6
13	18,0	156	162	277	54,9	0,05	18,2	21,3	7,5
14	19,0	152	158	200	56,1	0,13	25,5	22,9	12,5
15	19,0	154	160	231	54,8	0,16	20,6	21,5	13,1
16	19,0	156	162	281	54,3	0,13	17,0	25,0	9,7
17	20,0	152	158	196	55,3	0,06	23,6	21,9	12,4
18	20,0	154	160	233	55,4	0,07	19,3	23,7	13,2

\*средние значения показателей рассчитаны для серии 3 – 4 параллельных варок



Результаты варок смеси древесины берёза/осина представлены в табл. 4. Также как при варке березовой древесины, при проведении варки на температуре 155 °С была получена жесткая целлюлоза с числом каппа 45,0 при практически такой же концентрации остаточной щелочи в чёрном щёлоке, как при варке березы, что свидетельствует о необходимости повышения температуры варки. На основании полученных результатов для варки смеси пород в соотношении 50:50 был выбран интервал температур 162...164 °С и интервал расхода щелочи на варку 17,0... 22,0 %. Это позволило получить образцы целлюлозы с числом каппа от 15,8 до 24,2.

В интервале расхода активной щёлочи 17...22 % при температуре варки 162 °С в среднем число снижается на 1,7 ед на каждый процент увеличения расхода щёлочи. При этом наибольшее снижение числа каппа 3,9 ед. отмечено при увеличении расхода щёлочи от 20 до 22 % (табл.4). Повышение температуры варки до 164 °С при расходе щелочи 18 % оказывает заметный ускоряющий эффект варки целлюлозы.

Таблица 4. Показатели целлюлозы полученной при варке смеси древесины берёза/осина (50/50)\*

№ серии варки	Условия варки				Показатели целлюлозы			Концентрация щёлочи в чёрном щёлоке г/л, ед. Na <sub>2</sub> O	
	расход акт. щелочи, % от массы древесины в ед. Na <sub>2</sub> O	температура в зонах варки, °С		Н - фактор	выход сортированной целлюлозы, %	выход непровара, %	число каппа	активная	эффективная
		ВВЗ	НВЗ						
19	18,0	149	155	151	–	–	45,0	19,7	9,0
20	17,0	156	162	287	54,5	0,06	24,2	18,9	6,6
21	18,0	156	162	280	53,2	0,07	21,9	28,5	11,6
22	18,0	158	164	327	52,5	0,01	18,5	22,5	7,2
23	19,0	156	162	276	52,1	0,04	20,4	24,5	12,4
24	20,0	156	162	276	52,1	–	19,7	25,4	13,7
25	22,0	156	162	279	51,3	–	15,8	26,5	15,7

\*средние значения показателей рассчитаны для серии 3 – 4 параллельных варок

Параметры варки смеси пород по таким показателям, как Н-фактор и температура варки близки к среднему арифметическому результату



для варки осины и березы. Расход щелочи на варку соответствует расходу щелочи на варку березы.

Целлюлоза, полученная из древесины осины, отличается более высоким выходом при одинаковых значениях числа каппа по сравнению с березовой целлюлозой. Выход целлюлозы из смеси пород ниже среднего арифметического значения, что обусловлено существенным переваром древесины осины (табл. 5).

Таблица 5. Влияние породы древесины на выход сортированной целлюлозы

Число каппа целлюлозы	Выход целлюлозы из древесины, %		
	береза	осина	смесь береза/осина 50/50
20,0	51,5	55,9	52,1
24,0	50,2	55,3	54,5

В табл. 6 приведены оптимальные режимы варок целлюлозы, выбор которых был сделан на основании значений по выходу сортированной целлюлозы, концентрации остаточной эффективной щелочи в черном щелоке и требуемых значений числа каппа целлюлозы (табл. 6). Для образцов целлюлозы (табл. 6,7), были определены такие характеристики, как: вязкость, плотность отливки, показатели механической прочности при степени помола 30 °ШР и структурно-морфологические характеристики волокна.

Образцы целлюлозы из осиновой древесины имели максимальные значения вязкости, поскольку для осиновой целлюлозы характерно более высокое содержание гемицеллюлоз. При этом на вязкость целлюлоз с одинаковым числом каппа, полученных из осиновой, березовой древесины и их смеси, не оказывает влияния температура варки и расход щелочи в выбранных интервалах изменения этих параметров. Это еще раз подтверждает отсутствие влияния условий варки в выбранных интервалах температуры и расхода щелочи на избирательность варочного процесса. В целом, значения вязкости для всех целлюлозных образцов достаточно близки, чему соответствуют характер изменения значений нулевой разрывной длины.

Наиболее заметные отличия у полученных образцов целлюлозы имеет показатель сопротивления раздиранию, причем влияние на этот показатель оказывает порода древесины. Максимальное значение сопротивления раздиранию – у целлюлозы из древесины березы. У образца целлюлозы из осиновой древесины этот показатель на 6...8 % ниже, соответственно, изменяется и величина плотности отливки. Эти различия также обусловлены более высоким содержанием гемицеллюлоз и меньшей длиной волокна у осиновой целлюлозы и, как следствие, образованием более плотной, «сомкнутой» отливки.



Следует отметить, что значение сопротивления раздиранию у целлюлозы из смешенной древесины практически такие же, как у осиновой целлюлозы.

Как и следовало ожидать, наиболее короткое волокно при максимальном содержании сосудов имеет осиновая целлюлоза, также осиновая целлюлоза имеет и максимальное содержание мелкой фракции.

Анализ образцов целлюлозы, выполненный на сортировке Сомервиль (табл. 8) показал, что для образцов целлюлозы с числом каппа 20 единиц, а именно, для целлюлозы из берёзы и смеси пород содержание костры составляет 0,05 %. Для образца целлюлозы из осиновой древесины с более высоким числом каппа 24,9, отмечено и более высокое содержание костры, что, безусловно, приведёт к ухудшению белимости целлюлозы.

Содержание непровара было невысоким во всех случаях, но максимальное значение (0,04 %) зафиксировано для образца целлюлозы, полученного из смеси пород. При выполнении анализа на сортировке Сомервиль дополнительно были определены потери волокна, которые рассчитывались по разнице между исходной массой и волокном, оставшимся при пропуске сортированной массы на лабораторной сече, снабженной ситом 100. Максимальное содержание мелкого волокна отмечено для целлюлозы, полученной при варке смеси пород древесины. Наиболее вероятное объяснение этого факта – различная скорость варки осины и березы, в результате чего осиновая целлюлоза имела более низкое значение числа каппа и, вследствие этого, повышенное содержание мелкого волокна.

Таблица 6. Показатели лиственной сульфатной целлюлозы

Порода древесины	Условия варки				Показатели целлюлозы							
	расход щелочи, %	температура в в НВЗ, °С	Н-фактор	содержание ост. э. щ. в чёрном щёлоче, г/л	число каппа, ед.	выход сортированной целлюлозы, %	вязкость, мл/г	разрывная длина, м	нулевая разрывная, Н·см	индекс прочности при растяжении, Н*/м/г	плотность оглилки, г/см <sup>3</sup>	индекс раздирания, мН·м <sup>2</sup> /г
Берёза	19	166	390	7,1	19,5	51,0	1000	8200	122	77,6	0,73	8,1
Осина	18	158	200	8,0	24,9	55,0	1350	8700	132	82,7	0,76	7,6
Смесь	19	162	280	12,4	20,4	52,1	1100	8300	119	76,6	0,74	7,7



Таблица 7. Структурно-морфологические характеристики волокна лиственной целлюлозы, определённые на приборе L&W Fiber Tester

Порода древесины	Средняя длина волокна, мм	Средняя ширина волокна, мкм	Средний фактор формы	Грубость волокна	Доля мелочи, %	Число сосудов на 1 г
Береза	1,071	23,7	90,4	92,1	1,3	26751
Осина	1,002	26,4	91,5	122,9	2,6	57772
Смесь	1,002	24,2	90,5	91,7	2,3	42273

Таблица 8. Результаты анализа целлюлозы на сортировке Сомервилль

Наименование фракции	Порода древесины и содержание фракций волокна, %		
	береза	осина	Смесь 50/50
Костра	0,05	2,73	0,05
Непровар	0,00	0,01	0,04
Сортированное волокно	99,07	96,40	97,0
Потери, %	0,89	0,87	2,95

Таким образом, результаты, полученные в ходе эксперимента, позволяют сделать следующие выводы:

установлена возможность получения лиственной сульфатной целлюлозы с числом каппа 20 и 25, предназначенной для дальнейшей отбелки из древесины берёзы, осины и их смеси в соотношении 50/50 при общей продолжительности варки 48 мин.;

показано, что при общей продолжительности варки целлюлозы 48 мин. для получения целлюлозы с числом каппа 20 ед., варку следует вести при следующих условиях: для варки березовой древесины расход активной щелочи – 19,0 %, температура - 166 °С, для варки осины расход щелочи – 18,0 % температура – 160 °С, для варки смеси пород 50/50 расход щелочи – 19,0 %, температура варки – 162 °С;

для получения целлюлозы с числом каппа 24...25 целесообразно снижение конечной температуры варки, при этом наиболее существенное снижение температуры требуется при варке березы (до 160 °С);

показано, что все образцы целлюлозы с числом каппа близким к значениям 20 и 25 ед полученные по оптимальным режимам имеют обычный для таких целлюлоз выход и показатели механической прочности. Показатели механической прочности всех видов полуфабрикатов после размола до 30 °ШР не имеют существенных отличий.



---

### Список литературы

- 1 Marcoccia B., Laakso R., McClain G. Lo-Solids pulping: Principles and applications // TAPPI J., 1996, vol.79, nr.6, P.179–188.
- 2 Metso Files, 2009
- 3 А.И. Бобров, М.Г. Мутовина, Т.А. Бондарева, В.К. Малышкина. Производство волокнистых полуфабрикатов из лиственной древесины. М.: Лесн. Пром-сть, 1984. 248 с.
4. M.H. Johansson and O. Samuelsson Alkaline Destruction of Birch Xylan in the Light of Recent Investigations of Its Structure. // Svensk Papperstidn. 1977. V. 80, № 16. P. 519–524.



## РАЗМОЛ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНЕРЦИОННЫХ ТЕЛ

И.А. Воронин<sup>1</sup>, Ю.Д. Алашкевич<sup>2</sup>, Н.С. Решетова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

<sup>2</sup>Институт химии и химической технологии СО РАН, Красноярск, Россия

*В данной работе представлены экспериментальные исследования размола волокнистых полуфабрикатов на установке с использованием инерционных тел с различными углами установки ножей.*

### GRINDED FIBER SEMI-FINISHED PRODUCTS USING INERTIAL BODIES

I.A. Voronin<sup>1</sup>, Yu.D. Alashkevich<sup>2</sup>, N.S. Reshetova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian state university of science and technologies name of the academician M. F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup>Institute of Chemistry and Chemical Technology SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

*The paper presents experimental studies of the grinding of fibrous semi-finished products on the installation using inertial bodies with different installation angles of knives.*

Интенсивность прироста степени помола волокнистых полуфабрикатов позволяет судить о производительности размольной установки при определенном качестве помола и удельных затратах электроэнергии на размол [1,4].

Экспериментальные исследования по изучению влияния угла скрещивания ножей инерционного тела с ножами барабана на процесс размола проводились с учетом различных конструктивных особенностях инерционных тел, концентрации обрабатываемой волокнистой суспензии и частоты вращения рабочих органов установки. Размолу подвергалась целлюлоза до 70 °ШР концентрацией 5 % при частоте вращения инерционных тел 228 об/мин [2].

Как видно из рис. 1, качественные зависимости кривых носят идентичный характер вне зависимости от конструктивных особенностей рабочей зоны инерционных тел. Интенсивность прироста степени помола снижается по мере увеличения углов установки элементов шероховатости инерционного тела относительно его оси, что можно объяснить тем, что увеличение угла шероховатости инерционного тела влечет за собой увеличение угла



скрещивания ножей рабочих поверхностей размольной установки, а последнее обеспечивает значительное увеличение точек контакта ножей при их пересечении, а следовательно циклической элементарной длины  $L_{0,эл}$  [3]. Это обеспечивает в конечном счете снижение производительности размольной установки, так как возрастает эффект рубки волокна при размоле, и при этом наблюдается снижение качества помола [3].

Эксперимент по выявлению влияния концентрации массы на время размола проводился в диапазоне скоростей инерционных тел от 114 до 228 об/мин с интервалом 57 об/мин. Концентрация волокнистой массы принималась от 1 до 7 % с интервалом 1 %. Масса размалывалась до 60 °ШР. На рисунке 2 представлен график зависимости времени размола от концентрации массы для значения частоты вращения инерционных тел 228 об/мин. Из рис. 2 видно, что с повышением концентрации масса до 5 % наблюдается увеличение времени размола волокна не зависимо от конструкции шероховатой поверхности инерционных тел и скорости их вращения.

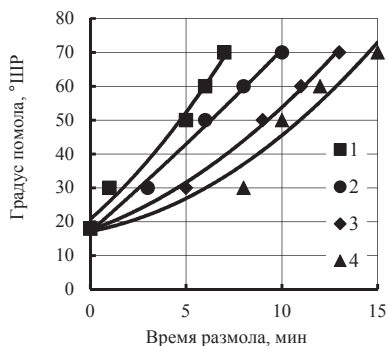


Рис. 1. Зависимость прироста степени помола от времени размола: 1 – 0°; 2 – 20°; 3 – 35°; 4 – 80° (углы скрещивания ножей инерционного тела с ножами барабана, град)

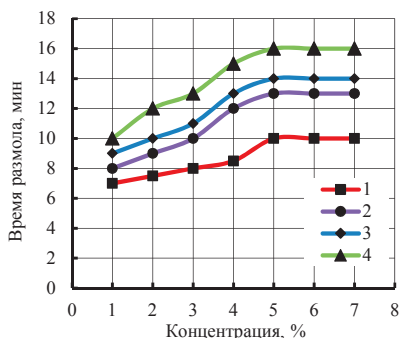


Рис. 2. Зависимость времени затраченного на разمول от концентрации волокнистой массы при частоте вращения инерционного тела 228 об/мин: 1 – 0°; 2 – 20°; 3 – 35°; 4 – 80° (углы скрещивания ножей инерционного тела с ножами барабана, град)

При размоле волокнистой массы концентрацией выше 5 % время размола остается величиной постоянной, то есть разمول волокон прекращается не зависимо от конструкции инерционных тел и скорости их вращения.





Наилучшие значения времени размола наблюдаются при угле установки ножей  $35^\circ$ . Это можно объяснить следующим образом. При угле установки ножей  $35^\circ$  образуется минимальный угол скрещивания равный  $0^\circ$ , то есть наблюдается зеркальное расположение ножей. При этом угле скрещивания образуется минимальное количество точек пересечения (контактов) кромок ножей инерционного тела с кромками ножей барабана. На волокна, при таком расположении ножей, действует в большей степени эффект фибрилляции волокна, что в дальнейшем ведет к повышению качества размалываемой массы и производительности установки.

Оценка зависимости основных бумагообразующих свойств волокнистой массы и физико-механических характеристик готовых отливок от концентрации проводились при различных значениях конструктивных особенностей шероховатой поверхности инерционных тел, их частоты вращения и прироста степени помола до  $60^\circ\text{ШР}$ .

На рис. 3 представлен график зависимости основных бумагообразующих свойств волокнистой массы от концентрации при частоте вращения инерционных тел  $228$  об/мин, угле скрещивания ножей инерционных тел с ножами барабана  $0^\circ$ , степени помола волокнистой массы  $60^\circ\text{ШР}$ . Из графика видно, что зависимости водоудерживающей способности  $W$ , средней длины волокна  $L_a$  и внешней удельной поверхности  $S$ , имеют характер близкий к линейному с незначительным повышением показателей средней длины волокна и внешней удельной поверхности. Вместе с тем наблюдается значительное повышение межволоконных сил связи  $\sigma$  по параболической зависимости с ростом концентрации волокнистой массы.

На рис.4 представлена зависимость основных физико-механических свойств готовых отливок от концентрации волокнистой массы. Из графика видно, что все упомянутые физико-механические показатели отливок имеют тенденцию роста с повышением концентрации массы. Более интенсивный рост по параболической траектории наблюдается у показателя числа двойных перегибов  $U$ . Повышение значений физико-механических характеристик готовых отливок с ростом концентрации можно объяснить повышением основных бумагообразующих свойств волокнистой массы (рис. 4).

На рис. 5 представлена графическая зависимость времени размола волокнистой массы от частоты вращения инерционных тел для различной величины степени помола по  $^\circ\text{ШР}$ .

В качестве примера исследовалась волокнистая суспензия концентрацией  $5\%$  и угле установке ножей на инерционном теле  $35^\circ$ . Угол скрещивания ножей при этом составлял  $0^\circ$ .

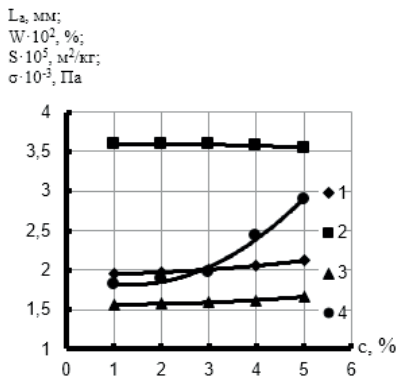


Рис. 3. Зависимость бумагообразующих свойств волокнистой массы от концентрации: 1 – средняя длина волокна,  $L_a$ ; 2 – водоудерживающая способность,  $W$ ; 3 – внешняя удельная поверхность,  $S$ ; 4 – межволоконные силы связи,  $\sigma$

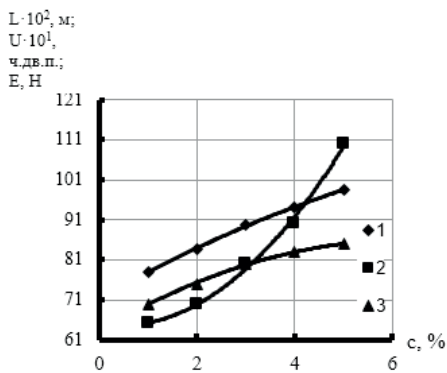


Рис. 4. Зависимость физико-механических свойств готовых отливок от концентрации волокнистой массы: 1 – разрывная длина,  $L$ ; 2 – число двойных перегибов,  $U$ ; 3 – сопротивление раздиранию,  $E$

Из проведенных теоретических исследований выяснилось, что конструктивные особенности рабочих тел установки в процессе размола оказывают существенное влияние на основные технологические характеристики [2]. Основной конструктивной особенностью рабочих тел является угол установки ножей инерционного тела относительно его оси, а следовательно имеет смысл проанализировать влияние изменение угла скрещивания ножей инерционного тела с насечкой барабана на процесс размола волокнистой массы.

На рис. 5 представлена зависимость основных бумагообразующих свойств волокнистой массы от угла скрещивания ножей инерционного тела с ножами барабана [2].

Из графика видно, что зависимости водоудерживающей способности, средней длины волокна, внешней удельной поверхности и межволоконных сил связи имеют параболический характер с незначительным повышением показателей средней длины волокна и внешней удельной поверхности. Вместе с тем наблюдается значительное снижение межволоконных сил связи с ростом угла скрещивания ножей инерционного тела с ножами барабана.

Показатель водоудерживающей способности с увеличением угла скрещивания имеет тенденцию роста.

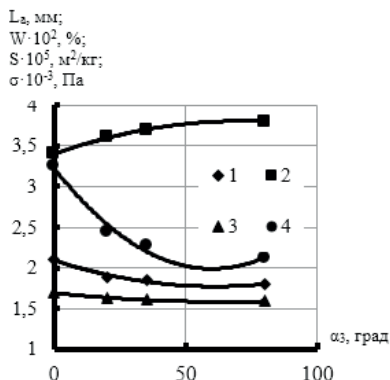


Рис. 5. Зависимость бумагообразующих свойств волокнистой массы от угла скрещивания ножей инерционного тела с ножами барабана: 1 – средняя длина волокна,  $L_a$ ; 2 – водоудерживающая способность,  $W$ ; 3 – внешняя удельная поверхность,  $S$ ; 4 – межволоконные силы связи,  $\sigma$

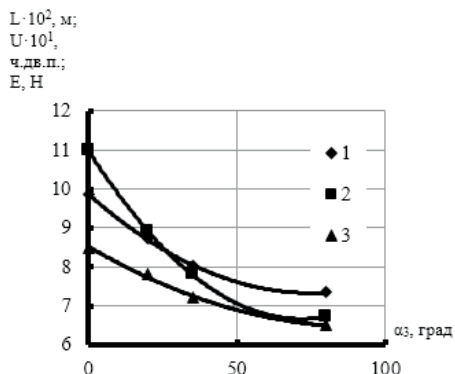


Рис. 6. Зависимость физико-механических свойств готовых отливок от угла скрещивания ножей инерционного тела с ножами барабана: 1 – разрывная длина,  $L$ ; 2 – число двойных перегибов,  $U$ ; 3 – сопротивление раздиранью,  $E$

На рис. 6 представлена зависимость физико-механических свойств готовых отливок от частоты вращения инерционных тел.

Из графика видно, что все упомянутые физико-механические показатели отливок снижаются с повышением угла скрещивания ножей инерционных тел с ножами барабана. Все зависимости снижаются по параболической траектории. Снижение значений физико-механических характеристик готовых отливок с ростом угла скрещивания ножей можно объяснить снижением основных бумагообразующих свойств волокнистой массы (рис. 5).

По итогам проведенной экспериментальной работы можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментальные исследования показали, что наилучшими значениями частоты вращения инерционных тел и концентрации волокнистой массы являются:  $n = 228$  об/мин и  $c = 5$  %, позволяющие получить массу с высокими показателями качества.



2. Интенсивность прироста степени помола снижается по мере увеличения углов установки элементов шероховатости инерционного тела относительно его оси.

3. При размоле волокнистой массы концентрацией выше 5 % время размола остается величиной постоянной, то есть размол волокон прекращается не зависимо от конструкции инерционных тел и скорости их вращения.

4. Наилучшее значение угла установки ножей на инерционном теле является угол равный  $35^\circ$ , что соответствует углу скрещивание ножей равным  $0^\circ$ . На волокна, при таком расположении ножей, действует в большей степени эффект фибрилляции волокна, что в дальнейшем ведет к повышению качества размалываемой массы и производительности установки.

Определена зависимость изменения основных бумагообразующих свойств целлюлозы и физико-механических характеристик отливок при использовании инерционных тел с различными углами установки ножей.

#### Список литературы

1. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис. .... докт. техн. наук: 05.21.03 – Красноярск. 1986. 170 с.

2. Воронин И. А. Нетрадиционный способ обработки волокнистых суспензий с использованием инерционных тел в целлюлозно-бумажном производстве: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Красноярск. 2011. 156 с.

3. Набиева А. А. Оценка влияния и совершенствования технологических параметров ножевых размалывающих машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Красноярск. 2004. 156 с.

4. Smith S. Die rationelle Theorie das Ganzzeughollandar. Otto Ernst Verlag. – Teil I. Berlin. 1922.105 p.

*Исследование выполнено при поддержке краевого государственного автономного учреждения «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках участия в V Международной конференции, посвященной памяти профессора В. И. Комарова. "Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов".*

## ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА, КАК КЛЮЧ К СОХРАНЕНИЮ РЕСУРСОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**М.В. Ломов, Г.А. Вишняков, И.А. Яворский**  
*БКТ-Сервис, Санкт-Петербург, Россия*

*Вакуумная система БДМ является одним из существенных потребителей электроэнергии предприятия, непосредственно влияет на производительность машины и потребление пара. Рассмотрены основные шаги по оптимизации вакуумной системы, современные способы генерации и регулирования вакуума.*

### VACUUM SYSTEM IS A KEY TO SAVE THE PULP AND PAPER MILL RESOURCES

**M.V. Lomov, G.A. Vishniakov, I.A. Iavorskii**  
*BKT-Service, Saint-Petersburg, Russia*

*The paper machine vacuum system is one of the significant consumers of electricity, it directly affects to machine performance and steam consumption. The main steps to optimize the vacuum system, modern methods of vacuum generation and control are considered.*

В современных условиях усиления дефицита ресурсов, борьбы за сохранение экологии, роста конкуренции для предприятий ЦБП, как одних из наиболее ресурсоемких производств, все острее возникает необходимость использования ресурсосберегающих технологий, оптимизации производственных процессов, повышения эффективности работы БДМ.

Одной из основных ресурсоемких частей БДМ является вакуумная система. Она обеспечивает генерирование вакуума и его подвод к потребителям: отсасывающим ящикам сеточного стола, отсасывающим камерам гаучвала и прессовых валов, сукномойкам системы кондиционирования прессовых суконов. Для примера энергопотребление вакуумной системы современной БДМ, производящей газетную бумагу, составляет 12,8 % от общего энергопотребления машины [1].

В тоже время, на многих производствах вакуумная система работает неэффективно. На стадии проектирования, когда точно не известны все параметры системы, используют допущения в расчетных моделях, что может повлечь ошибки в выборе оборудования и проектировании системы. В процессе эксплуатации БДМ модернизируются с целью повышения качества продукции, эффективности работы, производительности или переходом



на выпуск другой продукции, изменяются характеристик сеток, сукон. Часто эта модернизация не проходит системно и не затрагивает вакуумную систему. Со временем происходит износ оборудования, снижается производительность насосов [2,3].

Последствия неэффективной работы вакуумной системы не всегда очевидны и могут быть компенсированы работой других частей БДМ, но имеют большое влияние на ее производительность, качество и стоимость продукции (табл. 1) [2,3].

Таблица 1. Результаты неэффективной работы вакуумной системы БДМ

Результат	Причина
Снижение качества продукции	Вакуумная система влияет на формирование полотна в сеточной части и его качество
Повышенные энергозатраты на генерацию вакуума	Насосы работают вне области максимальной эффективности
Повышенный износ сетки, сукон, планок	Завышенный уровень вакуума на потребителях
Повышенная нагрузка на приводы гауч-вала, прессовых валов	
Неэффективная работа сукон	Неэффективная работа сукномоек системы кондиционирования сукон
Повышенный расход пара в сушильной части	Недостаточная сухость после сеточного стола или прессовой части

Работа по модернизации вакуумной системы должна начинаться с ее обследования. В ходе обследования составляется актуальная схема вакуумной системы, определяется состояние насосов, параметры их работы, состояние задвижек, трубопроводов, сепараторов, замеряется скорость воздуха в трубопроводах. На основе этих данных разрабатывается план мероприятий по модернизации.

Для эффективной работы вакуумной системы необходимо оптимизировать конфигурацию элементов сеточного стола в соответствии производительностью машины и выпускаемой продукцией, определить оптимальный уровень вакуума на каждом элементе и необходимый расход водо-воздушной смеси. При этом высокий уровень вакуума на потребителях не гарантирует эффективное обезвоживание. Исходя из требуемых уровней вакуума и расхода, рассчитываются размеры водоотделителей, диаметры подводящих трубопроводов, подбираются типоразмер и производительность вакуумных насосов или вентиляторов.



Сегодня при модернизации вакуумных систем с одной стороны есть тенденция совершенствования конструкции вакуумных насосов, повышения их энергоэффективности и снижения потребности в уплотнительной воде, с другой – расширения использования высоконапорных вентиляторов и турбовакуумных установок с регулируемым приводом взамен водокольцевых вакуумных насосов.

Водокольцевые насосы имеют невысокий КПД 40...50 %, однако обеспечивают практически постоянную производительность во всем рабочем диапазоне уровней вакуума. Мощность, потребляемая приводом насоса, мало зависит от уровня вакуума (рис. 1а). При превышении допустимого уровня вакуума, возникает кавитация, водяное кольцо срывается, производительность резко падает, дальнейшая работа насоса невозможна.

Важную роль в обеспечении эффективности работы водокольцевых насосов играет температура, качество и расход уплотнительной воды. С увеличением температуры уплотнительной воды снижаются допустимый уровень вакуума и производительность насоса. Недостаточный расход уплотнительной воды снижает производительность насоса, увеличивает риск возникновения кавитации [4]. Важно следить за температурой водо-воздушной смеси, входящей в насос, и не допускать в ней наличие пара, который, сконденсировавшись внутри насоса, повышает температуру уплотнительной воды и может так же привести к кавитации. Для защиты от пара используют завесу холодной воды в сепараторе или входном патрубке [7].

На выходе насоса рекомендуется устанавливать сепаратор-глушитель для снижения вероятности появления противодавления и снижения рабочих характеристик. Для снижения потребления оборотной воды используется замкнутая система ее подачи с контуром охлаждения.

Уровень вакуума рекомендуется регулировать с помощью спускного клапана или байпасного клапана (рис. 1б). Использование дроссельной заслонки увеличивает нагрузку на привод. Регулирование так же возможно за счет изменения частоты вращения ротора с помощью частотного привода [3,5,8] или изменением диаметра шкивов ременной передачи. Диапазон регулирования ограничен: минимальная скорость определяется скоростью образования водяного кольца, максимальная – мощностью двигателя.

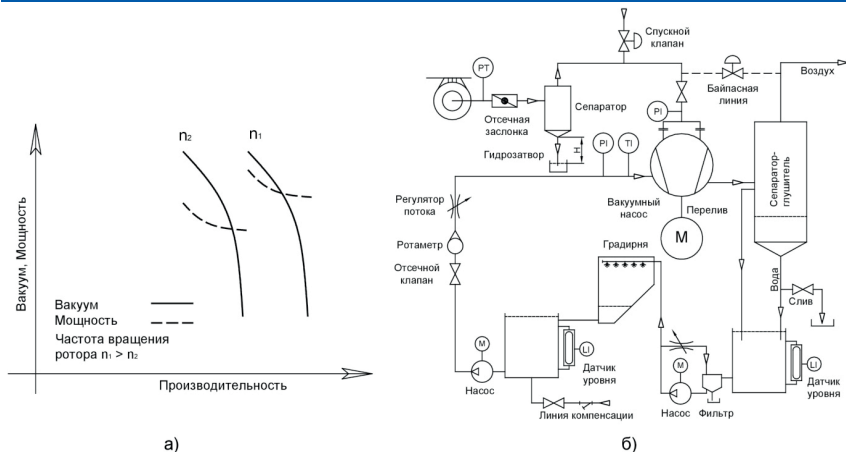


Рис. 1. Водокольцевой вакуумный насос: а – типовая рабочая характеристика, б – типовая схема подключения

Использование вакуумных насосов остается актуальным в качестве источника вакуума для сукномоек и отсасывающих валов прессовой части. Здесь требуется постоянная производительность, не зависящая от проницаемости сукна, которая изменяется в процессе работы [3]. Наименьшие затраты электроэнергии обеспечиваются, когда насос работает в зоне наибольшей эффективности, с определенными уровнем вакуума и производительностью, которые мало изменяются в процессе работы. Т.е. если водокольцевой насос подобран верно, и БДМ выпускает один тип продукции. Если БДМ выпускает разные, часто меняющиеся типы продукции, то потребность в вакууме и производительности будет меняться, энергоэффективность насоса ухудшится.

Вентиляторы имеют ряд существенных преимуществ над водокольцевыми насосами: отсутствие необходимости в уплотнительной воде, более высокий КПД 60...70 %, возможность более точного регулирования уровня вакуума и производительности. У вентиляторов с уменьшением расхода падает потребляемая мощность, (рис. 2а), что позволяет дополнительно оптимизировать энергопотребление на разных режимах работы машины. Однако вентиляторы работают на больших частотах вращения крыльчатки, нежели водокольцевые насосы, поэтому, выше требования к обслуживанию под-





шипников привода. Они более требовательны к сепарации воды, перед вентилятором рекомендуется устанавливать дополнительный защитный сепаратор.

Регулирование уровня вакуума при применении вентиляторов возможно за счет дросселирования на входе [8] или применения частотного привода, (рис. 2б).

При резких изменениях давления или расхода, либо работе при малых расходах или высоком вакууме может возникнуть помпаж: пульсация расхода, уровня вакуума, тока двигателя. Следует предусматривать антипомпажную защиту.

С ростом расхода увеличивается ток двигателя, может произойти его перегрузка. Для облегчения пуска вентилятора необходимо контролировать расход на входе в вентилятор, применять плавный пуск. В целом схема управления вентилятором сложнее схемы управления насосом.

Применение вентиляторов особенно оправдано в сеточной части, где невысокий вакуум и требуется контролировать интенсивность обезвоживания для обеспечения требуемых свойств, уменьшения обрывов полотна [2], а также, когда требуется часто изменять вакуум при переходе на другой вид продукции [3]. Актуально применять вентиляторы и в качестве источников вакуума для новых элементов сеточного стола при его модернизации.

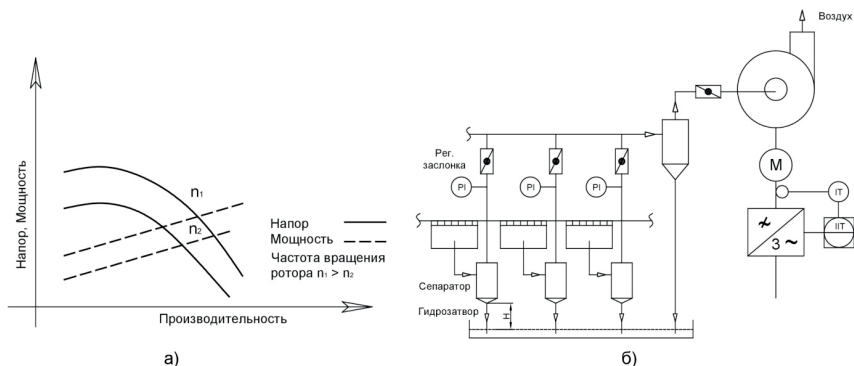


Рис. 2. Вентилятор: а – типовая рабочая характеристика, б – типовая схема подключения

Развитие регулируемого привода, совершенствование конструкции вентиляторов и насосов, методов контроля и регулирования параметров их



работы расширяют возможности по проектированию гибкой и эффективной вакуумной системы. Оптимизация вакуумной системы позволяет снизить энергопотребление на 300...900 кВт/час, повысить качество продукции, увеличить срок службы сеток и суков, уменьшить расход пара в сушке, в конечном итоге снизить себестоимость продукции.

#### Список литературы

1. Osara M. Energy-saving solutions for the paper machine. Metso. TAPPSA-2010 [http://www.tapssa.co.za/pdf/PM101011\\_Metso\\_Osara\\_PM\\_Energy\\_TAPPSA\\_for\\_organizer.pdf](http://www.tapssa.co.za/pdf/PM101011_Metso_Osara_PM_Energy_TAPPSA_for_organizer.pdf)
2. Sweet D. Papermaking best practices with vacuum-dewatering systems: Part 1 // Paper 360. TAPPI. 2017. <https://paper360.tappi.org/2017/11/29/papermaking-best-practices-with-vacuum-dewatering-systems-part-1/>
3. Dugan T. Optimizing Five Liquid Ring Vacuum Pumps on a paper machine // Blower & vacuum best practices. 2017. p.10–16
4. Aliasso, J. How to Control Liquid Ring Vacuum Pumps // Pumps & Systems Magazine. 2005. p 2. <http://www.graham-mfg.com/usr/pdf/techlibvacuum/27.pdf>
5. Skelton K. Variable frequency drives for a vacuum pump system // Pumps & Systems Magazine. 1998. p 2.
6. Vacuum Systems for the Paper Industry. NASH. LRP:B-BR100-A1-EN /02-2006.
7. Moerman, F. Water ring pumps a better solution for your wet vacuum process? // Pumps & process Magazine. 2011, p. 23–25.
8. Valmet. Papermaking Savings Potentials. 2012.

## ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ БУМАЖНОЙ МАССЫ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ И ПЕЧАТНЫХ СВОЙСТВ ЛИТОЙ ТАРЫ ИЗ ВТОРИЧНОГО ВОЛОКНА

**Л.Г. Махотина**

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия*

*Тара из бумажного литья, все больше завоевывают рынок упаковки. В работе представлены результаты исследования по подготовке бумажной массы для изготовления литой тары из вторичного волокна, которые позволили разработать влагостойкую биоразлагаемую упаковку.*

## FEATURES OF PREPARATION OF PULP FOR THE DIRECTIONAL REGULATION OF PHYSICO-MECHANICAL AND PRINTING PROPERTIES OF MOLDED PACKAGING FROM RECYCLED FIBER

**L.G. Makhotina**

*St. Petersburg state University of industrial technologies and design, St. Petersburg, Russia*

*Containers made of paper casting are increasingly gaining market packaging. The paper presents the results of a study on the preparation of paper pulp for the manufacture of cast containers from recycled fiber, which allowed the development of moisture-resistant biodegradable packaging.*

### **Введение**

Тара из бумаги и картона является наиболее экологически чистым видом упаковки, занимает во всем мире ведущее положение. Свыше 40 % мирового потребления бумаги и картона приходится на тароупаковочные виды. В Китае на долю тароупаковочных видов бумаги и картона приходится около 60 %. Именно поэтому Китай, ставший в последние годы всемирной фабрикой товаров повседневного спроса, вышел на первое место среди производителей бумаги и картона [1,2].

В отличие от бумаги для печати объемы производства и потребления тароупаковочных видов бумаги и картона в мире постоянно увеличиваются (табл. 1, 2) [2,3].



Таблица 1. Производство и потребление бумаги и картона в странах СЕРИ

Бумага и картон, млн. т.	Производство			Потребление		
	2015	2016	% изменения 2015/2016	2015	2016	% изменения 2015/2016
Тароупаковочные виды	44,7	45,7	2,4	38,9	39,8	2,2

Основным потребителем картонно-бумажной упаковки в России является пищевая промышленность. На ее долю приходится 65 % от всего рынка. Одним из главных требований на рынке упаковки сегодня является «эко-тренд», а бумажная упаковка считается одним из самых экологичных видов. Наиболее востребован тарный картон – это гофрокартон и его составляющие (лайнер и флютинг). Однако и другие виды упаковки на основе бумаги и картона, к которым относится тара из бумажного литья, все больше завоевывают рынок и связано это с отказом в ряде стран от упаковки и одноразовой посуды из синтетических полимерных материалов (табл. 2).

Таблица 2. Производство тароупаковочных видов бумаги и картона

Тароупаковочные виды бумаги и картон, млн. т	Производство в Европе			Производство в Северной Америке		
	2011	2014	2015	2011	2014	2015
Тарный картон	26,8	28,1	28,7	32,9	33,9	34,4
Коробочный картон	9,7	10,4	10,7	7,3	12,1	12,0
Мешочная бумага	5,1	5,5	5,6	3,1	1,8	1,9
Другие виды	4,0	4,1	4,2	5,7	2,4	2,3
Тароупаковочные виды бумаги и картона: всего	45,5	48,1	49,1	49,0	50,4	50,7

Изделия из бумажного литья производят из жидкой волокнистой массы. Форму изделия приобретают в отливных сетчатых матрицах соответствующих конфигураций. Это позволяет получать изделия с высокой стабильностью заданной формы.

Литые изделия из жидкой волокнистой массы формируются тремя основными способами: вакуумированием, гидравлическим давлением; давлением сжатого воздуха.



Для изготовления литых изделий используют вторичное волокно из макулатурного сырья. Макулатура является основным видом сырья в производстве тары из бумажного литья.

Технологический процесс производства тары из бумажного литья состоит из следующих операции: сортировка и роспуск макулатуры на волокнистую массу; очистка и сортировка массы; составление композиции бумажной массы; формовка изделий; холодное прессование изделий; калибрование изделий.

Основными требованиями, предъявляемыми к волокнистой массе для бумажного литья, являются: быстрое и равномерное оседание на сетчатых формах; обеспечение малой усадки и незначительного коробления отливков в процессе сушки.

Снятие отливок с отливных и прессовых форм производится обычно сжатым воздухом. Для этого пресс-формы имеют целую сеть равномерно расположенных отверстий, через которые подаётся сжатый воздух, создавая избыточное давление между поверхностью пресс-формы и самим изделием. Пересъем изделий с одной формы на другую также производится при помощи сжатого воздуха и вакуума, создаваемого в приемной пресс-форме. Сушат отливки в камерных сушилках периодического и непрерывного действия или, чтобы избежать коробления и получить изделия более стабильные по размерам, сушку производят на контрформах.

После отлива изделия имеют рыхлую структуру и прочность высушенных изделий невелика. Для получения изделий заданных размеров и придания им необходимой прочности производится калибровка изделий в обогреваемых пресс-формах при температуре 200 °С, удельное давление прессования в зависимости от вида изделий и требований к его прочности составляет от 2 до 5 МПа. Калибровке подвергаются отливки, предварительно высушенные до постоянной массы и влажности 8...10 %.

Расширение ассортимента и повышение требований по увеличению прочности и влагопрочности, оптических и печатных свойств, внешнего вида готовых изделий заставляет производителей литой упаковки совершенствовать как технологию, так и методы испытаний.

Для решения этих проблем при изготовлении литой упаковки в современных экономических условиях предприятия идут по пути, который уже в значительной степени пройден производителями картона и бумаги, а именно проводят исследования по расширению наименований химикатов в бумажную массу для улучшения определённых свойств изготавливаемой продукции.

В работе представлены результаты исследования по подготовке бумажной массы для направленного регулирования физико-механических и печатных свойств литой тары из вторичного волокна, которые позволили разработать влагостойкую биоразлагаемую литую упаковку.

#### Методическая часть

В качестве объектов исследования использовали бумажную массу и отливки массой  $125 \text{ г/м}^2$  из смеси макулатуры марок: МС-6Б/1; МС-7Б/3; МС-8В/1. Для увеличения прочности во влажном состоянии использовали полиамидаминэпихлоргидридную смолу (ПААЭГ).

#### Экспериментальная часть

Были изучены электро-кинетические свойства бумажной массы и физико-механические свойства отливок с различным содержанием смолы влагостойкости.

Анализ полученных данных показал, что использование смолы влагостойкости повышает сопротивление разрыву на 16 % в сухом и на 100 % во влажном состоянии, сопротивление продавливанию на 27 % в сухом состоянии и на 14 % во влажном состоянии (рис. 1,2).

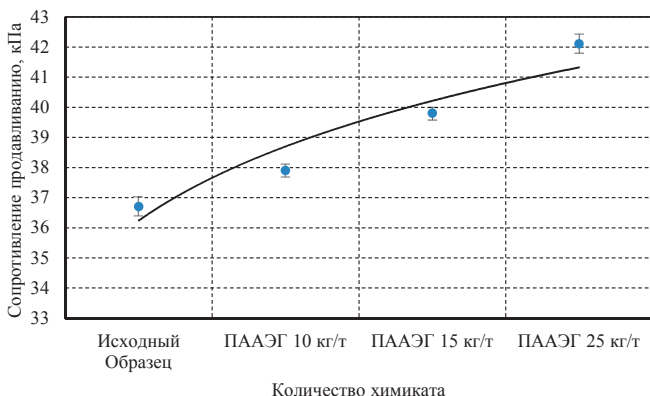


Рис. 1. Изменение показателя сопротивления продавливанию во влажном состоянии в зависимости от количества добавленной ПААЭГ

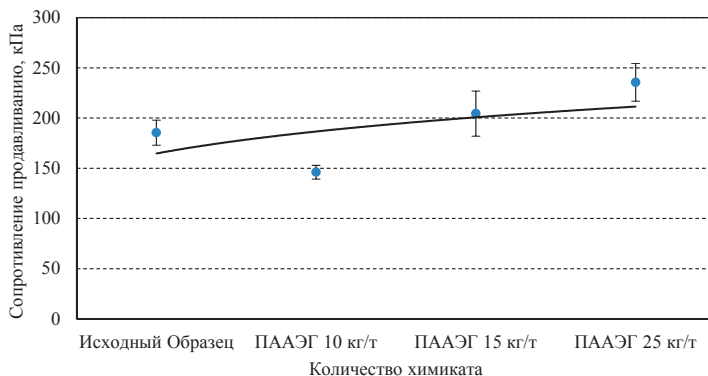


Рис. 2. Изменение показателя сопротивления продавливанию во влажном состоянии в зависимости от количества добавленной ПAAЭГ

### Выводы

Показана перспективность использования смол влагопрочности для повышения физико-механических и прочностных свойств литой тары как во влажном, так и сухом состоянии.

### Список литературы

1. Key Statistics / 2016 Confederation of European Paper Industries (CEPI). Brussels, 2017. 37 p.
2. ICFPA Sustainability Progress Report / International Council of Forest and Paper Associations, 2015. 40 p.
3. Ежегодный обзор рынка лесных товаров, 2015–2016 годы: аналитический отчет / ЕЭК ООН/ФАО. Нью-Йорк и Женева, 2016. 162 с.

## ОСОБЕННОСТИ БЕЗНОЖЕВОГО РАЗМОЛА ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ В ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**И.С. Тихонов, В.А. Кожухов, Ю.Д. Алашкевич**

*Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М.Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия*

*Описан принцип работы безножевых установок для размол волокнистых полуфабрикатов, область применения и экономическая эффективность.*

## PECULIARITIES OF KNIFELESS OF FIBER SEMI-PRODUCTS IN PULP AND PAPER PRODUCTION

**I.S. Tikhonov, V.A. Kozhukhov, Yu.D. Alashkevich**

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia*

*The principle of operation of knifeless plants for grinding fibrous semi-finished products, the scope and cost-effectiveness.*

Размол – одна из важнейших операций бумажного производства, от которой в значительной степени зависят многие свойства бумаги. Лист бумаги, отлитый из неразмолотых волокнистых материалов, получается неудовлетворительным по своему строению, внешнему виду и физико-механическим свойствам. Он обладает неравномерным, облачным просветом, большой пористостью, пухлостью и малой прочностью. Это объясняется тем, что сравнительно длинные жесткие волокна сплетаются в хлопья и, оседая на сетке, дают неоднородный по структуре лист. Неразмолотые волокна обладают малой пластичностью, слабо развитой поверхностью и мало гидратированы, вследствие чего такие волокна плохо связываются друг с другом в бумажном листе.

Цель размол волокнистых материалов заключается в следующем: подготовить волокнистый материал к отливу, придать ему определенную степень гидратации, сделать волокна гибкими, пластичными, увеличить их поверхность (фибрилляцией и набуханием), обеспечить лучший контакт и связь волокон в бумажном листе (придать ему прочность); придать бумажному листу путем укорочения, расщепления и фибрилляции волокон требуемую структуру и физические свойства: объемный вес, пухлость, пористость, впитывающую способность и др. [1].





А.М. Кряжевым предложен аппарат безножевого размола механохимического обессмоливания целлюлозы. В аппарате МХО рабочая поверхность не содержит режущей кромки, следовательно, наличие в массе мелких металлических предметов (скрепок, кнопок и т.п.) не будет оказывать отрицательного воздействия на рабочие органы аппарата. На аппарате МХО были проведены исследования по роспуску различных видов макулатуры, в том числе с двухсторонним пленочным покрытием. Для эффективного отделения пленки была показана необходимость предварительного надреза или надрыва ее поверхности, для доступности воды к бумаге-основе. Далее в процессе обработки фрагментов макулатуры, возникающие в аппарате МХО усилия сжатия и сдвига, создавали условия для насыщения водой бумаги-основы и разделения ее на волокна. Кроме того, разработанный способ позволяет отбирать концентрированный экстракт с целью извлечения ценных компонентов, например из отходов фотобумаги для черно-белой печати – соли серебра. Была также показана высокая эффективность роспуска и отделения пленки при переработке, упаковок для жидких пищевых продуктов (типа Тетрапак). Проведено исследование и установлена возможность роспуска ветхих денежных купюр, вышедших из употребления и нарезанных в виде «сечки» на двушнековом аппарате трения АТ для безножевого измельчения волокнистых материалов, разработанного в АО «Петрозаводскмаш». Результаты исследования показали, что повторный пропуск массы через аппарат увеличивает степень помола массы, но средневзвешенная длина волокна практически не меняется [2].

Также А.М. Кряжевым были исследованы физико-механические показатели качества макулатурного волокна и степень диспергирования посторонних включений после обработки в промышленном термодисперсионном устройстве фирмы «Фойт» и в аппарате МХО. Показано, что при практически одинаковых показателях качества обработанного волокна степень помола после обработки на аппарате МХО была ниже на 5...7 °ШР. Кроме того, аппарат МХО при одинаковой производительности 100 т/сут имеет в два раза меньшую установленную мощность двигателя (200 кВт). Поэтому, учитывая преимущества аппарата МХО по удельному расходу электроэнергии и более мягкому (безножевому) воздействию на целлюлозное волокно, делает его применение в промышленности в составе установок для термодисперсионной обработки макулатуры достаточно перспективным [2].

С.В. Барановский исследовал интенсификацию процесса экстракции коры лиственницы сибирской. Чтобы оценить влияние обработки коры



в безножевом аппарате «струя-преграда» на фракционный состав и свойства коры, необходимо знать состав и свойства исходного материала. После дезинтеграторной обработки основной размер частиц коры составляет менее 1 мм (доля коры с размером частиц 0,6...0,1 мм более 80 %, мелкая фракция с размером частиц менее 0,1 мм составляет 8 % коры), то есть можно считать, что кора имеет однородный фракционный состав [3].

Анализ результатов позволяет охарактеризовать процесс измельчения коры в аппарате, как процесс уменьшения частиц крупной фракции и увеличения частиц средней и мелкой фракций. Таким образом, С.В. Барановский установил, что в аппарате «струя-преграда» действительно происходит разрушение в основном частиц крупной фракции коры на средние и мелкие. Характер этого разрушения имеет определенную закономерность – в среднем при разрушении крупной фракции образуется 54 % средней и 46 % мелкой. Около половины крупных частиц не разрушаются при обработке суспензии коры в аппарате «струя-преграда», причем при любых условиях воздействия. Также было отмечено, что наиболее интенсивное разрушение коры происходит впервые минуты обработки. Так, после тридцатисекундной обработки суспензии разрушилось около трети частиц крупной фракции, после 15 мин – более половины. Полученные С.В. Барановским результаты показали, что продолжительность обработки суспензии более 45 мин не приводит к изменению фракционного состава частиц коры. Состав и размеры частиц после указанной продолжительности обработки можно назвать пределом разрушения коры или пределом ее измельчения в гидродинамическом аппарате [3].

Необходимо отметить, что обработка коры в аппарате «струя-преграда» позволяет существенно (в 2,5...3 раза) повысить выход экстрактивных веществ по сравнению с существующим в промышленном производстве дубильных экстрактов [3].

Совмещение процессов экстракции и измельчения коры в аппарате «струя-преграда» позволяет твердый послезэкстракционный остаток использовать в качестве сырья для биохимических производств, что переводит производство дубильных экстрактов в разряд безотходных [3].

На основании проведенных С.В. Барановским исследований были разработаны рекомендации по совершенствованию технологии получения листовничного дубильного экстракта Тарутинского завода дубильных экстрактов, заключающиеся во введении в технологическую схему дополнительных узлов. Переоборудование заключается в замене батареи диффузо-



ров периодического действия на дезинтегратор и кавитатор (аппарат динамического экстрагирования). Данное совершенствование позволяет: периодический процесс экстракции перевести практически в непрерывный; получить более качественный экстракт с большим содержанием веществ и одубину со структурой, приемлемой для дальнейшей переработки. Проведенные технико-экономические расчеты показали экономическую целесообразность получения листовничного дубильного экстракта. Уровень рентабельности составил 29 %, срок окупаемости 1,7 года, прибыль свыше 4 млн. рублей в год [3].

Безножевой размол волокнистых полуфабрикатов с использованием установки «струя-преграда» имеет значительные преимущества перед дисковыми размольными машинами по качеству бумагообразующих свойств волокнистых материалов [4]. Вместе с тем, безожевой размол имеет большей расход электроэнергии на процесс размола. В ряде работ академика Ю.Д. Алашкевича с его учениками решена задача позволяющая приблизить удельный расход электроэнергии на процесс размола в безожевой установке к показателям расхода энергии дисковой мельнице за счет изменения отдельных конструктивных и технологических параметров установки «струя-преграда» [5].

#### Список литературы

1. Иванов, С.Н. Технология бумаги: [учеб. пособие]. М: Изд. 3-е. Школа бумаги, 2006. 695 с.
2. Кряжев А. М Интенсификация технологических процессов механическим воздействием на техническую целлюлозу: автореф. дис. .... докт. техн. наук. Архангельск: ВНИИБ, 2004. 36 с.
3. Барановский С. В. Итенсификация процесса экстракции коры листовничной сибирской: автореф. дис. .... канд. техн. наук. Красноярск: СибГТУ, 2005. 24 с.
4. Марченко Р. А. Интенсификация безожевого размола волокнистых полуфабрикатов в целлюлозно-бумажном производстве: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: СибГТУ, 2016. 20 с.
5. Алашкевич Ю.Д. Основы теории гидродинамической обработки волокнистых материалов в размольных машинах: дис.... д-р. техн. наук: – 05.21.03. Красноярск, 1986. 361 с.

## ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ ТРОПИЧЕСКИХ ПОРОД

**Х.М. Кхоа, М.И. Макаров, Е.О. Окулова, Я.В. Казаков**

*Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия*

*В статье представлены исследования прочностных и деформационных характеристик волокна из бамбука и акации, полученных сульфатным способом. Установлено, что целлюлоза из бамбука и акации обладают большей эластичностью, но пониженной прочностью. Показана перспективность использования бамбука и акации для использования в композиции картона.*

### STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF PULP FROM TROPICAL WOOD

**H.M. Khoa, M.I. Makarov, E.O. Okulova, Y.V. Kazakov**

*Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia*

*The article presents studies of the strength and deformation characteristics of bamboo and acacia fibers obtained by the sulfate method. Bamboo and acacia cellulose have been found to have greater elasticity, but lower strength. The promising use of bamboo and acacia for use in the composition of cardboard are shown.*

Основными проблемами, стоящими перед целлюлозно-бумажной промышленностью, является более полное использование сырья, повышение выхода и качества полуфабриката [1]. В связи с этим постоянно ведется поиск новых источников растительной биомассы, в том числе полученных из нетрадиционных растительных ресурсов. Считается, что древесина некоторых тропических растений, таких как бамбук, акация, обладает большим потенциалом из-за быстрого роста, простоты выращивания, низкой стоимости и их характеристик, подходящих для деревообрабатывающей промышленности в целом и для целлюлозно-бумажной промышленности в частности. Актуальность темы также связана с поиском возможных путей утилизации промышленных отходов, образующихся при механической переработке древесины тропических растений [2,3].

Исследования прочностных и деформационных характеристик волокна, полученных сульфатным способом, проведены на образцах древесины бамбука и акации, местом произрастания которых является Вьетнам.



Для сравнения, в тех же условиях получены образцы целлюлозы из традиционных лиственных пород – смеси лиственной березовой и осиновой дрезвины.

Варку целлюлозы проводили на автоклавной системе CAS 420. Условия варки: гидромодуль 3, содержание активной щелочи в белом щелоке 100,5 г/л; расход активной щелочи на варку 17...19 %; температура варки 160 °С. Общая продолжительность варки достигала 5 часов, включая подъем температуры в течение 90 мин. Механические свойства образцов были исследованы для лабораторных отливок, массой 75 г/м<sup>2</sup> для образцов после размола на мельнице Йокро до степени помола 30 °ШР, для целлюлозы акации 120 г/м<sup>2</sup> и 20 °ШР. Испытания серий образцов проведены после кондиционирования в стандартных условиях по показателям. Определены свойства: сопротивление разрыву, продавливанию и раздиранию. Результаты представлены в табл. 1.

Испытания на растяжение проведено с получением и обработкой зависимости нагрузка-удлинение по методике [4]. Для каждого образца проведено 5 параллельных определений и рассчитано среднее значение. На рис. 1 представлен график зависимости «напряжение - деформация», для образцов целлюлозы бамбука, акации и хвойных, лиственных образцов целлюлозы.

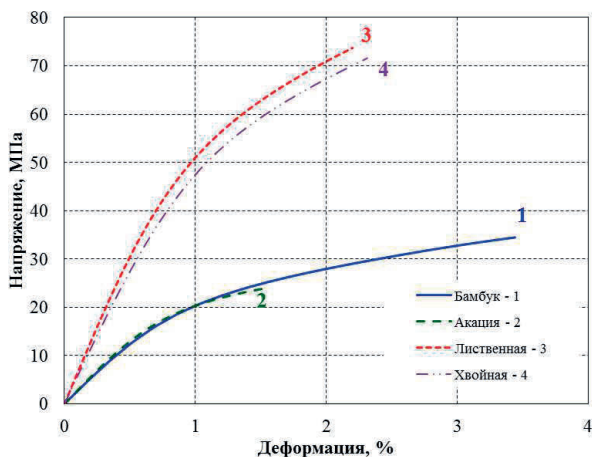


Рис. 1. График зависимости «напряжение - деформация», полученный при испытании на растяжение



Таблица 1. Механические характеристики отливок из бамбуковой, лиственной целлюлозы и целлюлозы акации

Характеристика	бамбук	акация	лиственная	хвойная [5]
Масса 1 м <sup>2</sup> , г	75	125	75	75
Степень помола, °ШР	30	20	30	30
Средняя толщина образца $\delta$ , мкм	128	216	85,8	94
Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	0,57	0,45	0,84	0,78
Сопrotивление продавливанию, П, кПа	305	210	365	490
Разрывная длина $L$ , м	6050	4400	8800	9450
Сопrotивление раздиранию, $R$ , мН	1153	821	575	930
Жесткость при растяжении, $S$ , кН/м	340	600	550	570
Энергия, поглощаемая при растяжении, ТЕА, Дж/м <sup>2</sup>	102,5	50,0	89,6	104,6
Предел упругости, $\sigma_1$ , МПа	9,2	9,3	19,2	20,7
Разрушающее напряжение, $\sigma_p$ , МПа	34,4	23,9	73,7	71,6
Разрушающее усилие, $F_p$ , Н	66,2	77,3	94,8	106,8
Предел упругой деформации $\epsilon_1$ , %	0,36	0,34	0,30	0,37
Деформация разрушения $\epsilon_p$ , %	3,44	1,52	2,20	2,31
Начальный модуль упругости, $E_1$ , МПа	2660	2800	6450	5720
Модуль упругости в области предразрушения, $E_2$ , МПа	373	510	1370	1350

Образцы из бамбука являются более эластичными и способными к большим деформациям, образцы целлюлозы из акации, также, сохраняя меньшую жесткость, оказались менее прочными и растяжимыми. Прочность и жесткость традиционных лиственных и хвойных пород оказалась существенно выше. В первую очередь это связано со структурой их волокон.

На рис. 2 представлено процентное соотношение величин механических характеристик отливок из целлюлозы бамбука, акации и лиственной, хвойной целлюлозы. За 100 % приняты значения отливок из бамбука.

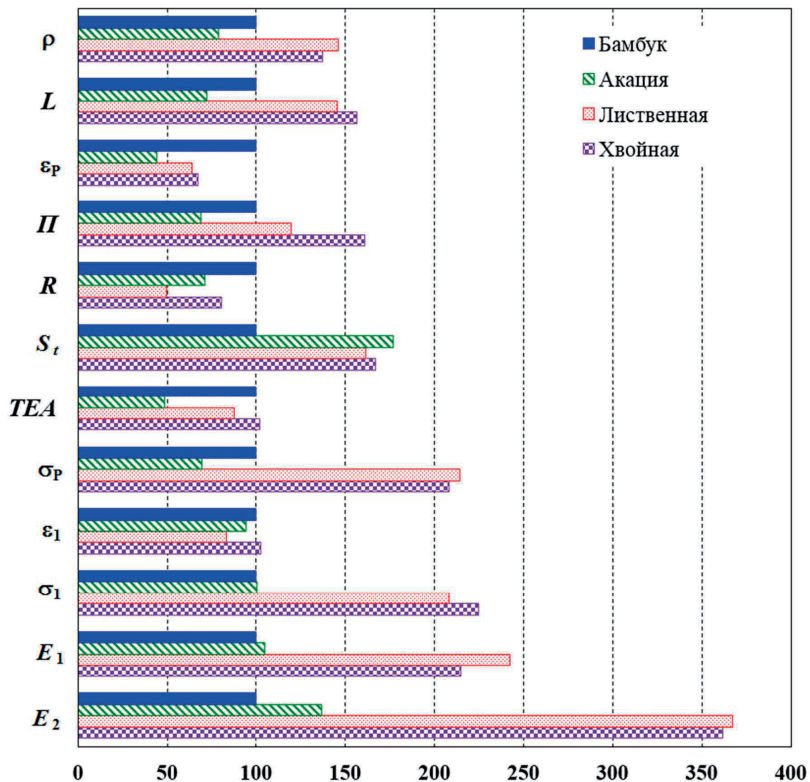


Рис.2. Относительные величины прочностных и деформационных характеристик исследованных образцов

Образцы из бамбука и акации сильно уступают хвойным и лиственным по модулю упругости, пределу упругости и разрушающему напряжению. Однако имеют так же неплохой результат в сопротивлении раздиранию и деформации разрушения. Образцы целлюлозы из акации имеют хороший результат в сопротивлении продавливанию, пределе упругости и разрушающем усилии. Можно утверждать, что образцы отливок из бамбука практически по всем физико-механическим характеристикам уступают образцам из лиственной, хвойной целлюлозы и образцам целлюлозы акации. Обладая при этом большей толщиной и меньшей плотностью.



По результатам проведенного эксперимента сделаны следующие выводы:

По механическим свойствам целлюлоза бамбука обладает меньшей на 45 % прочностью при растяжении, большим на 50 % сопротивлением раздиранию, меньшей на 62 % жесткостью при растяжении, большей на 34 % деформацией разрушения. Целлюлоза акации обладает пониженными прочностными и деформационными свойствами. Таким образом, бамбуковая целлюлоза обладает меньшей прочностью и жесткостью, но большей эластичностью и растяжимостью.

Использование небеленой целлюлозы из бамбука и акации возможно в композиции небеленых видов бумаги и картона для повышения эластичности и растяжимости.

*Работа выполнена на оборудовании ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова) при финансовой поддержке Минобрнауки России*

#### Список литературы

1. Технология целлюлозно-бумажного производства. Справочные материалы. В 3 т. Т. I. Сырьё и производство полуфабрикатов. Ч. 1. Производство полуфабрикатов. СПб.: Изд-во ГЛТА, 2002. 432 с.
2. Akinlabi E.T., Kwame A.-Fenin, Damenortey R.A. Bamboo The Multipurpose Plant. Springer International Publishing AG, 2017.
3. Kobayashi F., Take H., Asada Ch., Nakamura Y. Methane production from steam-exploded bamboo // J. of Biosci. And Bioengineering. 2004. Vol. 97. №6. P. 426–428.
4. Комаров В.И., Казаков Я.В. Анализ механического поведения целлюлозно-бумажных материалов при приложении растягивающей нагрузки // Лесной вестник МГУЛ. 2000. №3 (12). С.52–62.
5. Манахова Т.Н. Влияние структурно-морфологических свойств волокна на деформативность и прочность хвойной сульфатной небеленой целлюлозы / дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2014. 170 с.



## ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ ОТБЕЛКИ ХВОЙНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

**К.С. Дуплякова, А.А. Дряхлицын, Ю.В. Севастьянова**

*Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия*

*В ходе исследовательской работы доказана целесообразность внедрения ступени КЩО и возможность сокращения количества ступеней в схемах отбеливки хвойной сульфатной целлюлозы.*

## OPTIMIZATION OF BLEACHING SOFTWOOD PULP

**K.S. Duplyakova, A.A. Dryahlicin, Yu.V. Sevastyanova**

*Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia*

*In the course of studies proved the feasibility of introducing oxygen-alkali stage and the possibility of reducing the number of stages in the schemes of bleaching of coniferous sulfate cellulose.*

Одним из основных этапов отбеливки целлюлозы является внедрение ступени КЩО.

Целью данной работы является разработка технологии отбеливки хвойной целлюлозы. Для достижения данной цели исследования были определены следующие задачи:

- 1) отработать режим сульфатной варки хвойной целлюлозы
- 2) отработать режим кислородной делигнификации целлюлозы
- 3) на основании полученных данных подобрать оптимальный режим

для отбеливки целлюлозы.

В рамках комплексной научно-исследовательской работы, в полученных с предприятия образцах технологической щепы, были определены следующие параметры: базисная плотность древесины, фракционный состав в соответствии с ГОСТ 15815–83 и SCAN 40:01, а также проведена микроскопия срезов отдельных щепок с использованием микроскопа «AXIO IMAGER.M2M» для определения качества среза после рубительной машины.

В состав хвойной щепы входит: 75 % смесь хвойных пород (сосна + ЕПК), 25 % лиственница. Фракционный состав щепы в соответствии с ГОСТ 15815–83, АЛГМ представлен в табл. 1. В результате проведения фракционного анализа образцов хвойной технологической щепы установлено, что содержание согласованной фракции находится в пределах нормы и составляет

90,3 % (SCAN 40:01) и 81,0 % (ГОСТ 15815–83). Была определена базисная плотность древесины, которая составила 537 кг/м<sup>3</sup>. Повышенный показатель средней плотности для образцов хвойной древесины связан с 25 % примесью лиственницы, для которой плотность составляет 660 кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 1. Фракционный состав щепы

Остаток на сите с диаметром отверстия, мм	Хвойная, %	Норма (марка Ц-3), %
30	15,0	6,0
20-10	81,0	81,0
5	3,6	10,0
Поддон	0,40	3,0
Итого	100,0	100,0
Содержание коры и гнили	5,2	10,0

Качество среза хвойной технологической щепы представлено на рис. 1.



Рис. 1. Качество среза хвойной технологической щепы

Анализ качества среза выявил недостаточное качество среза для образцов хвойной щепы, что вероятнее всего связано с качеством привозной щепы. Более жесткие условия контроля качества технологической щепы, позволят повысить качество среза и фракционный состав, что, в свою очередь, положительно повлияет на впитываемость варочного раствора и в последствии на качество готового полуфабриката.

Температурный режим и условия варки по технологии Lo-Solids для хвойной целлюлозы представлены на рис. 2 и в табл. 2.

Результаты моделирования процесса варки по технологии Lo-Solids хвойной сульфатной целлюлозы представлены в табл. 3. В ходе моделирования процесса варки по технологии Lo-Solids были получены образцы хвойной целлюлозы в диапазоне числа Каппа от 19,8 до 34,0 единиц. При этом выход полуфабриката изменяется от 40,4 % до 44,6 %. Варьируе-

мым фактором при проведении эксперимента являлся расход активной щелочи – от 16,0 % до 22,0 % к массе а.с.д. При повышении числа Каппа вязкость полуфабриката изменяется от 780 до 1 060 мл/г.

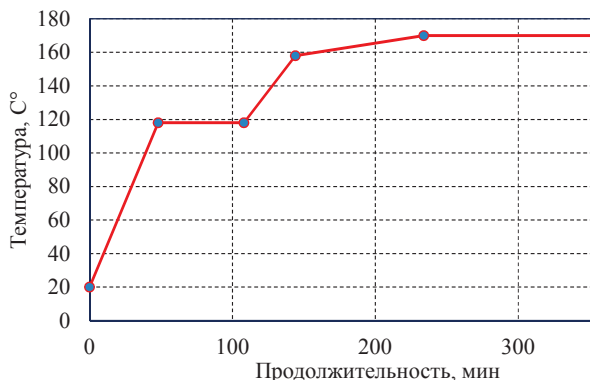


Рис. 2. Температурный режим варки хвойной целлюлозы

Таблица 2. Исходный режим варки для хвойной целлюлозы

Расход БЩ на варку	% к а.с.д.	17...19
Гидромодуль	–	3,0...3,5
Общая щелочность	г. ед. Na <sub>2</sub> O/л	120
Активная щелочность	г. ед. Na <sub>2</sub> O/л	100...105
Концентрация взвеш. веществ	мг/л	19...25
Сульфидность	%	28...30
Целевые показатели:		
Число Каппа	ед.	≤ 32
Вязкость	мл/г	–
Остаточная акт. щелочь в ЧЩ	г/л ед. Na <sub>2</sub> O	5-7

Избирательность сульфатной варки показана на рис. 3,4. Линейная зависимость (рис. 3) показывает влияние числа Каппа на выход хвойной целлюлозы.

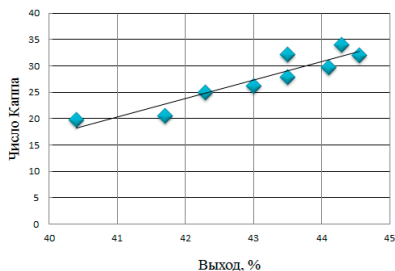


Рис. 3. Влияние числа Каппа на выход хвойной целлюлозы

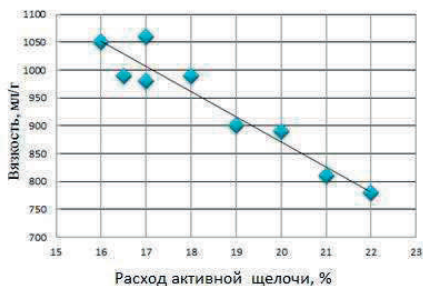


Рис. 4. Влияние расхода белого щелока на вязкость хвойной целлюлозы

При числе Каппа 30...35 единиц выход хвойной целлюлозы достигает 44...45 %, при снижении числа Каппа выход целлюлозы тоже снижается. Линейная зависимость (рис. 4) показывает зависимость расхода активной щелочи на вязкость хвойной целлюлозы. При увеличении расхода активной щелочи вязкость хвойной целлюлозы резко снижается.

Таблица 3. Результаты моделирования процесса варки по технологии Lo-Solids хвойной сульфатной целлюлозы

Параметры	Единицы измерения	Число Каппа: 20 - 25 ед.			Число Каппа: 26 - 32 ед.					
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9
Номер варки	-									
Расход белого щелока на варку	% к а.с.д.	22	21	20	19	18	17	17	16,5	16
Гидро модуль		3,0			3,5					
Расход белого щелока на 1 ступень варки	%	13,2	12,6	12,0	11,4	10,8	10,2	10,2	9,9	9,6
Расход белого щелока на 2 ступень варки	%	8,8	8,4	8,0	7,6	7,2	6,8	6,8	6,6	6,4
Н-фактор на 2 ступени	-	1 500	1 520	1 525	1 522	1 520	1 504	1 975	1 970	1 980
Число Каппа	ед.	19,8	20,5	25,0	26,2	32,2	34,0	27,9	29,7	32,0
Вязкость	мл/Г	780	810	890	900	990	1 060	980	990	1 050
Ост. активная щелочь в черном щелоке	г/л ед. Na <sub>2</sub> O	25,42	24,18	22,63	22,63	17,98	16,74	16,21	15,52	15,06



По результатам проведенного процесса варки хвойной целлюлозы были подготовлены образцы для физико-механических испытаний, которые представлены в табл. 4. Образцы подвергались размолу на мельнице Йокро до 30 и 60 °ШР, масса отливок составляла 75 г/м<sup>2</sup>.

Таблица 4. Результаты физико-механических испытаний

Число Каппа	Степень помола, °ШР	Показатели прочности		
		<i>L</i> , м	<i>R</i> , мН	<i>П</i> , кПа
34,0	30	8 300±5	560±7	480±9
31,5	60	9 200±5	550±7	425±9

Необходимо отметить, что по заданным режимам варки для получения образцов с оптимальными значениями числа Каппа (для хвойной – 32,0...34,0 ед.) использовались низкие расходы активной щелочи, следствием чего является невысокое содержание остаточной активной щелочи – 15...16 г/л в ед. Na<sub>2</sub>O. Данное значение остаточной активной щелочи в черном щелоке является пограничным при варки целлюлоз для отбелки, дальнейшее снижение может привести к ухудшению белимости целлюлозы, что связано с процессами конденсации лигнина.

Параметры лабораторных образцов хвойной сульфатной целлюлозы для проведения КЩО представлены в табл. 5.

Таблица 5. Показатели качества хвойной сульфатной целлюлозы

Число Каппа	ед.	31,2	31,5
Вязкость	мл/г	990	1 040
Остаточная акт. щелочь в ЧЩ	г/л ед. Na <sub>2</sub> O	15,5	15,3
pH	–	11,7	11,7
Непровар	%, не более	0	0

Результаты КЩО для ХСЦ представлены в табл. 6.



Таблица 6. Результаты моделирования процесса КЩО хвойной сульфатной целлюлозы

Стадия	Контрольный параметр	Диапазон предел значений параметра					
		1 вариант	2 вариант	3 вариант	Оху Трас <sup>TM</sup>	4 вариант (лаб. масса)	5 вариант (лаб. масса)
Исходная масса	Число Каппа	27,8	27,8	27,8	27,8	31,2	31,5
	Вязкость, мл/г	1 040	1 040	1 040	1 040	990	1 040
КЩО – 1 ступень	Расход NaOH, кг/т	20	30	30	30	37	25
	Расход H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , кг/т	0	0	0	0	0	4
	Температура обработки, °С	85	85	85	85	95	85
	τ, мин	10	10	10	25	10	10
	Расход O <sub>2</sub> (по давлению), МПа	0,6	0,6	0,8	0,7	0,6	0,8
КЩО – 2 ступень	Температура обработки, °С	110,0					
	τ, мин	60,0					
	Расход O <sub>2</sub> (по давлению), МПа	0,5	0,5	0,6	0,3	0,5	0,6
Масса после обработки	Остаточная щелочность, г/л ед. Na <sub>2</sub> O	5,8	13,0	10,0	14,4	15,1	5,0
	pH <sub>кон.</sub>	12,3	12,1	12,3	12,3	12,2	12,2
	Число Каппа	19,7	19,5	17,2	21,4	18,4	12,6
	Вязкость, мл/г	940	–	–	–	800	840
	Выход, %	97,5	97,6	97,6	98,0	96,8	96,8
Эффективность процесса, %	29,1	29,9	38,1	38,13	41,1	60,0	

При моделировании процесса КЩО по заданному предприятием режиму при расходе щелочи 37 кг/т эффективность обработки составила 41,1 %, при этом химические потери полуфабриката составили 3,2 %, а снижение вязкости полуфабриката – на 190 мл/г.

Повышение эффективности КЩО до 60,0 % для хвойной сульфатной целлюлозы без отрицательного влияния на вязкость полуфабриката может быть достигнуто путем подачи пероксида водорода в количестве 4 кг/т и понижением расхода щелочи до 25 кг/т и повышением давления на первой ступени до 0,8 мПа и на второй – до 0,6 мПа. При этом химические потери составили 3,2 %, а снижение вязкости полуфабриката – на 200 мл/г.



### Закключение:

1. При моделировании процесса варки хвойной целлюлозы по технологии Lo-Solids получены образцы в диапазоне числа Каппа от 19,8 до 34,0 единиц, при этом выход полуфабриката варьируется от 40,4 % до 44,6 %, вязкость полуфабриката изменяется в диапазоне от 780 до 1060 мг/г.

2. Оптимальными для введения в схему отбелки ступени кислородно-щелочной делигнификации является варочный режим с расходом активной щелочи – 16,5 %, числом Каппа – 29,7 единиц, вязкостью – 990 мг/л и выходом сортированной массы – 44,1 %.

3. Показатели механической прочности образцов хвойной и лиственной целлюлозы, полученных по заданным режимам варки, обеспечивают необходимый запас прочности для проведения КЩО.

4. Оптимальный режим процесса КЩО представлен в табл. 7.

Таблица 7. Оптимальный режим КЩО для хвойной сульфатной целлюлозы

Параметры	I ступень	II ступень
Давление, МПа	0,8	0,6
Расход акт.щелочи, кг/т	25	–
Температура, °С	85,0	110,0

5. При моделировании процесса КЩО на лабораторном образце хвойной целлюлозы при расходе щелочи 37 кг/т эффективность обработки составила 41,1 %, при этом химические потери полуфабриката составили 3,2 %, а снижение вязкости полуфабриката – на 190 мг/г. Повышение эффективности КЩО для хвойной сульфатной целлюлозы без отрицательного влияния на вязкость полуфабриката может быть достигнуто путем подачи пероксида водорода в количестве 4 кг/т при расходе щелочи до 25 кг/т и повышением давления на первой ступени до 0,8 МПа и на второй – до 0,6 МПа.

### Список литературы

1. Севастьянова Ю.В. Миловидова Л.А., Комарова Г.В. Влияние основных факторов варки на структуру остаточного лигнина лиственной сульфатной целлюлозы // Матер. Всеросс. конф. «Северные территории России: проблемы и перспективы развития», Архангельск. 23-26 июня. 2008. С.1182–1186.

## БУМАГООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ ИНТРОДУЦИРОВАННЫХ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР

А.А. Масленникова, Е.О. Окулова, Я.В. Казаков, Н.А. Бабич

*Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия*

*Работа посвящена изучению древесины интродуцированной сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm), с точки зрения возможности ее использования в целлюлозно-бумажной промышленности. Был подобран режим сульфатной варки, оценены структурно-морфологические, бумагообразующие и физико-механические характеристики образцов целлюлозы в сравнении с целлюлозой из сосны обыкновенной.*

### PAPERMAKING PROPERTIES OF PULP FROM WOOD OF INTRODUCED FOREST CROPS

A.A. Maslennikova, E.O. Okulova, Y.V. Kazakov, N.A. Babich

*Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia*

*The work is devoted to the study of introduced pine wood (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm), in terms of the possibility of its use in the pulp and paper industry. The mode of technological cooking was developed, the structural and morphological, paper-making and mechanical properties of pulp samples were studied.*

Выращивание древесины в искусственных условиях является перспективным способом повышения продуктивности лесов. Опираясь на опыт стран Северной Европы, в 1979 году в Архангельской области было начато интродукционное испытание североамериканской сосны скрученной (*Pinus contorta* var. *latifolia* Engelm), были проведены обширные исследования приживаемости и роста [1]. В настоящее время проводятся исследования химических свойств древесины и бумагообразующих свойств волокон их нее [2]. Все испытания проводятся параллельно с образцами сосны обыкновенной дикорастущей. Образцы древесины для исследований были отобраны на территории Архангельской области в одном регионе и имели сопоставимый диаметр ствола.

В результате проведенной работы был подобран режим сульфатной варки. Варку проводили на автоклавной системе CAS 420 одновременно в четырех автоклавах, из них две пробы сосны скрученной и две пробы сосны обыкновенной. Условия варки: гидромодуль 3, расход активной щелочи на варку 22 %; температура варки 170 °С. Результаты варки представлены в табл. 1 [3].





При одинаковых условиях варки древесина сосны скрученной и обыкновенной проварилась практически одинаково, однако число Каппа целлюлозы сосны скрученной получилось ниже, выход целлюлозы несколько больше, при меньшем содержании непровара.

Таблица 1. Результаты сульфатной варки сосны скрученной и обыкновенной

Параметр	Сосна скрученная		Сосна обыкновенная	
	1	2	3	4
Номер автоклава				
Выход а.с. целлюлозы, %	40,7	40,1	39,7	38,9
Количество непровара, %	0,3	0,2	0,5	2,5
Общий выход после варки, %	41,0	40,3	40,2	41,4
Число Каппа	27	26	28	28
Содержание сухих веществ в черном щелоке, г/л	266	272	285	270
Содержание а.щ. в черном щелоке, г/л Na <sub>2</sub> O	22,8	22,0	23,9	22,9

Для определения бумагообразующих свойств, образцы целлюлозы были подвергнуты роспуску и размолу в ЦРА [4]. На размол целлюлозы до степени помола 30 °ШР сосны скрученной потребовалось 50 минут, для целлюлозы сосны обыкновенной 54 минуты, то есть целлюлоза из индродуцированной сосны размалывается несколько легче.

На анализаторе L&W Fiber Tester были определены структурно-морфологические характеристики волокна до и после размола. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 1–3.

Таблица 2. Структурно-морфологические свойства волокон целлюлозы сосны скрученной и обыкновенной

Параметр	Целлюлоза сосны скрученной		Целлюлоза сосны обыкновенной	
	до размола	после размола	до размола	после размола
Средняя длина волокон, мм	2,098	1,773	2,064	1,792
Средняя ширина волокон, мкм	33,7	32,2	33,5	32,3
Средний фактор формы, %	88,0	85,5	86,4	85,1
Грубость, мг/м	220,9	74,3	208,0	75,3
Средний угол излома	55,7	61,2	55,9	59,7
Число изломов на мм	0,377	0,451	0,481	0,438
Число больших изломов на 1 мм	0,131	0,191	0,171	0,178
Число изломов на волокно	0,668	0,635	0,850	0,672
Число больших изломов на волокно	0,232	0,269	0,302	0,270
Средний индекс излома	0,995	1,258	1,272	1,205
Средняя длина сегмента, мм	1,620	1,286	1,496	1,396



По данным, представленным в табл. 2 видно, что волокна сосны скрученной более длинные и широкие, обладают большей грубостью. После размола, число изломов волокон сосны скрученной увеличивается сильнее, чем у волокон сосны обыкновенной. Вероятно, это связано с толщиной клеточной стенки, что говорит о большей хрупкости волокон сосны скрученной.

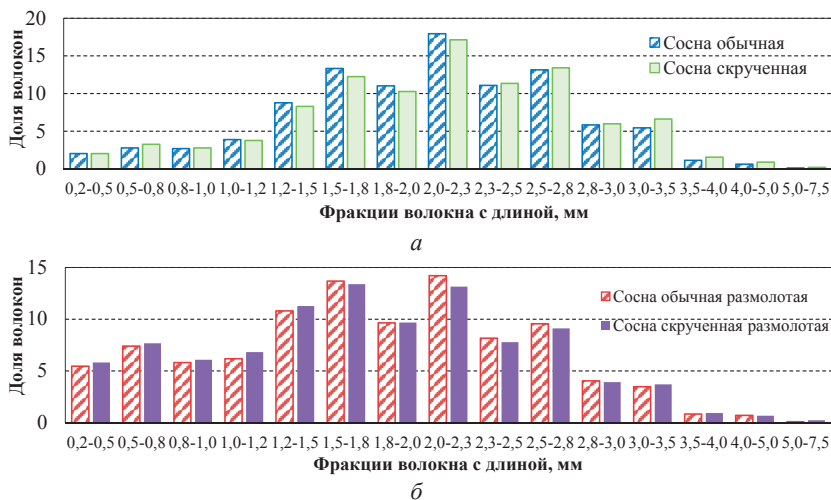


Рис. 1. Фракционный состав по длине волокна: *а* – до размола; *б* – после размола

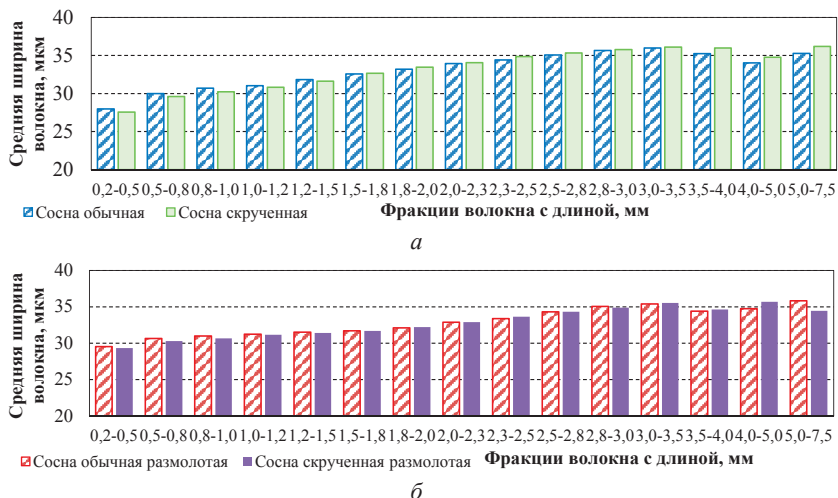
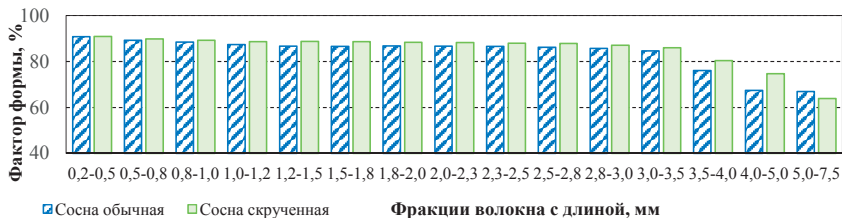


Рис. 2. Ширина волокна во фракциях: *а* – до размола; *б* – после размола

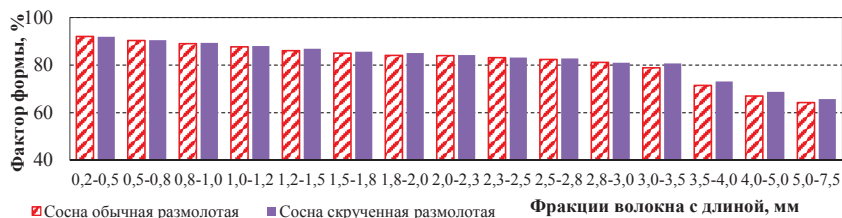


На рис. 1 видно, что волокна распределяются по классам длины неравномерно, но в каждой фракции, доля волокон сосны скрученной по величине практически равна доле волокон сосны обыкновенной. Большее значение имеет доля волокон с длиной 2,0...2,3 мм.

На рис. 2 представлено распределение величины средней ширины волокна по фракциям волокон различной длины. Ширина волокна незначительно увеличивается, с увеличением длины волокна. После размола, ширина волокна практически не меняется.



*a*



*б*

Рис. 3. Прямызна волокна во фракциях: *a* – до размола; *б* – после размола

С увеличением длины волокна, фактор формы образцов сосны скрученной и обыкновенной постепенно снижается. График представлен на рис. 3.

Полученные результаты свидетельствуют о большой схожести целлюлозы сосны скрученной и обыкновенной.

Механические свойства образцов были исследованы для лабораторных отливок, массой 75 г/м<sup>2</sup> для образцов после размола до степени помола 30 °ШР. Результаты представлены в табл. 3.

Образцы отливок из целлюлозы сосны скрученной имеют меньшую величину сопротивления продавливанию и раздиранию, деформационные характеристики имеют также меньшее значение по сравнению с результатами образцов сосны обыкновенной. Это связано с разной плотностью отливок.



Таблица 3. Механические характеристики отливок из целлюлозы сосны скрученной и обыкновенной (30 °ШР)

Характеристика	Целлюлоза из сосны	
	скрученной	обыкновенной
Средняя толщина образца, мкм	87,4	88,1
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,787	0,800
Сопrotивление продавливанию, кПа	443	481
Разрывная длина, м	8750	8740
Сопrotивление раздиранию, мН	520	546
Жесткость при растяжении, кН/м	470	470
Предел упругости, $\sigma_1$ , МПа	12,14	13,96
Разрушающее напряжение, $\sigma_p$ , МПа	68,7	69,9
Разрушающее усилие, $F_p$ , Н	90,0	92,4
Предел упругой деформации, $\epsilon_1$ , %	0,23	0,27
Деформация разрушения, $\epsilon_p$ , %	3,15	3,25
Работа разрушения, $A_p$ , мДж	191,1	203,2
Мгновенный модуль упругости, $E_1$ , МПа	5320	5310
Модуль упругости в области предразрушения, $E_2$ , МПа	860	870
Нулевая разрывная длина, $L_0$ , км	19,1	19,4

На рис. 4 представлен график зависимости «нагрузка–удлинение», для исследованных образцов, полученный при испытании на растяжение и обработанный с применением программного обеспечения [5].

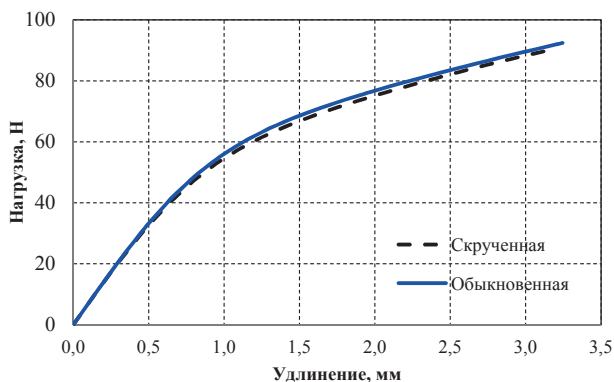


Рис. 4. График зависимости «нагрузка - удлинение»



Ход кривых на графике практически совпадает, это говорит о том, структура и механические свойства лабораторных образцов сосны скрученной и обыкновенной очень близки, и нет необходимости вносить существенные изменения в технологию переработки такой древесины.

Таким образом, установлено, что целлюлоза из волокон сосны скрученной, по своим бумагообразующим свойствам, очень похожа на целлюлозу из сосны обыкновенной, хоть и имеет некоторые отличия, связанные в первую очередь со скоростью роста древесины.

### Список литературы

1. Стафеев Б.Л. Северо-американская сосна скрученная – перспективная порода для интродукционного испытания в Архангельской области // Вопросы интродукции хозяйственно-ценных древесных пород на Европейский Север. Архангельск: АИЛиЛХ, 1989. С. 35–43.

2. Попов А.В., Казаков Я.В., Бабич Н.А. Особенности свойств древесины интродуцированной сосны для использования ее в ЦБП / В сб. «Леса России: политика, промышленность, наука, образование»: матер. второй междуна. научн.-технич. конфер. Том 3. / Под. ред. В.М. Гедьо. СПб.: СПбГЛТУ, 2017. С.220–222.

3. Миловидова Л.А., Комарова Г.В. Производство сульфатной целлюлозы: метод. указ. к выполнению лабораторных работ. Архангельск: изд-во АГТУ, 2001. 31 с.

4. Дубовый В.К. Лабораторный практикум по технологии бумаги и картона: Учебное пособие / В.К. Дубовый, А.В. Гурьев, Я.В. Казаков, В.И. Комаров; под ред. проф. проф. В.И. Комарова. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 230 с.

5. Свид. № 2001610526 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программное обеспечение лабораторного испытательного комплекса для оценки деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов (КОМПЛЕКС). / Я.В. Казаков, В.И. Комаров; заявитель и правообладатель ГОУ ВПО АГТУ (RU). № 2001610250; заявл. 11.03.2001; опубл. 10.05.2001, Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

## СРАВНЕНИЕ СКОРОСТЕЙ РАЗМОЛА СУЛЬФАТНОЙ ЛИСТВЕННОЙ И СУЛЬФАТНОЙ ХВОЙНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗ С ВЫСОКОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

**А.В. Кокшаров, Е.В. Белых**

*Филиал АО «Группа «Илим» в г.Коряжме*

*В данной работе представлены исследования по скорости размола и бумагообразующие свойства лиственной и сульфатной хвойной целлюлоз с высокой жесткостью.*

### COMPARISON OF GRINDING RATES OF KRAFT HARDWOOD AND SOFTWOOD PULP WITH HIGH LIGNIN CONTENT

**A.V. Koksharov, E.V. Belykh**

*Ilim Group, Koriazhma, Russia*

*This paper presents research on the grinding rates and the paper-forming properties of sulfate hardwood and sulfate softwood pulp with high hardness.*

В последнее время наметилась тенденция по замещению небеленой сульфатной хвойной целлюлозы в небеленых видах бумаги и картона небеленой лиственной целлюлозой. Несмотря на более низкую длину волокна лиственной целлюлозы ( $L_w=1...1,2$  мм) по сравнению с длиной волокна хвойной целлюлозы ( $L_w=2,8...2,9$  мм), лиственная целлюлоза обладает сравнимыми с хвойной физико-механическими показателями. Среди других преимуществ лиственной целлюлозы по сравнению с хвойной являются ее большая доступность, более быстрый рост, меньшая цена, более высокий выход по варке, большая плотность, более низкий расход химикатов и теплоты при варке.

Были исследованы скорости размола и бумагообразующие свойства лиственной и сульфатной хвойной целлюлоз с высокой жесткостью, сваренные лабораторным способом.

#### **Лабораторная варка**

– Сульфатная целлюлоза из 100 % березы с расходом белого щелока 10 % по активной щелочи к а.с. древесине. температура варки –165 °С, выход целлюлозы по варке 64,1 %, жесткость – 86,0 ед. Каппа

– Сульфатная хвойная целлюлоза из 80 % ели и 20 % сосны с расходом белого щелока 14% по активной щелочи к а.с. древесине, температура варки –165 °С, выход целлюлозы по варке 56,2 %, жесткость – 85,1 ед. Каппа

### Лабораторный размол

Лабораторный размол целлюлоз, полученных в ходе лабораторных варок, осуществлялся на лабораторной мельнице «Йокро» до разных степеней помола. Данные по размолу представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты размола сульфатных целлюлоз на лабораторной мельнице «Йокро».

Степень помола, °ШР	Продолжительность размола, мин	
	Сульфатная листовая небеленая целлюлоза	Сульфатная хвойная небеленая целлюлоза
18	6	40
25	14	80
30	22	88
35	26	100

Как видно из табл. 1, листовая целлюлоза с высокой жесткостью размалывается в 4-6,5 раз быстрее, чем хвойная. Следовательно, затраты энергии на размол будут меньше для листовой целлюлозы.

В табл. 2 представлены результаты физико-механических показателей сульфатной хвойной и сульфатной листовой целлюлоз высокой жесткости при разных степенях помола

Таблица 2. Результаты физико-механических показателей

Показатели/ вид целлюлозы	Листовая	Листовая	Хвойная	Хвойная
Помол	20	30	20	30
Разрывная длина, км	10,6	11,7	10,2	10,6
Сопротивление продавливанию, кПа	540	566	605	615
Сопротивление раздиранию, мН	529	492	690	670
Прочность на излом, ч.д.п.	1980	2505	167	217

Как видно из таблицы, хвойная и листовая целлюлозы имеют сравнимые прочностные показатели, кроме сопротивления излому.

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВАРКИ СУЛЬФАТНОЙ ХВОЙНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА ЕЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

**А.В. Кокшаров**

*Филиал АО «Группа «Илим» в г.Коряжме*

*В данной работе представлены лабораторные исследования по влиянию условий сульфатной варки ели на физико-механические показатели целлюлозы. Целлюлоза была сварена, примерно, до одинаковой жесткости при разных расходах белого щелока. Снижение расхода белого щелока на варку с одновременным увеличением температуры немного увеличивает разрывную длину целлюлозы.*

## INFLUENCE OF THE CONDITIONS OF PULPING SULPHATIC SOFT WOOD PULP ON ITS PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

**A.Koksharov**

*Ilim Group, Koriazhma, Russia*

*This paper presents laboratory studies on the effect of sulphate pulping conditions on spruce on the physico-mechanical properties of cellulose. Cellulose was welded to about the same stiffness at different costs of white liquor. Reducing the consumption of white liquor for cooking while increasing the temperature slightly increases the breaking length of the pulp.*

На современных крупных целлюлозно-бумажных предприятиях сульфатную небеленую целлюлозу для производства бумаги и картона получают в широком диапазоне жесткостей – от 30 до 80 единиц Каппа. Соответственно, условия получения варки целлюлозы также различные, расходы белого щелока изменяются от 13,5% до 20%, температура от 155 до 170°C. В тоже время физико-механические показатели небеленой сульфатной целлюлозы при одинаковых степенях помола находятся, практически, на одном уровне, на их колебания в большей степени влияют качество щепы, вариации породного состава, сезонный и человеческий факторы. На рис. 1 представлены данные по разрывной длине при помоле 60° ШР производственной сульфатной хвойной (смесь ели и сосны) целлюлозы в зависимости от жесткости.

Как видно из рис.1, при изменении жесткости от 40 до 80 единиц Каппа разрывная длина изменялась непредсказуемым образом. Такую же тенденцию имеют и другие физико-механические показатели. Обработка большого массива производственных данных (в течении полугода) также не



позволила выявить закономерностей, заметным образом влияющих на физико-механические показатели небеленой сульфатной целлюлозы.

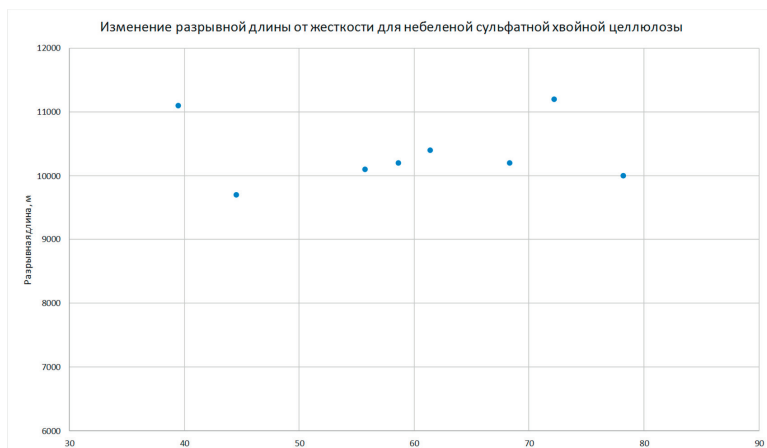


Рис. 1. Жесткость, ед.Каппа

Для того, чтобы выяснить, как условия варки могут повлиять на физико-механические показатели были проведены лабораторные варки хвойной целлюлозы сульфатным способом, примерно, до одинаковой жесткости. Чтобы исключить влияние фракционного и породного состава варки проводились из еловой щепы нормальной фракции. В табл. 1 представлены условия проведения варок и физико-механические показатели целлюлозы при помоле 60 °ШР.

Таблица 1. Условия проведения варок и физико-механические показатели целлюлозы

Расход акт.щелочи, %	Темпер., °С	Выход, %	Жесткость, ед.Каппа	Разр. длина, км	Сопр. прод-ю, кПа	Сопр. разд., мН	SCT, кН/м
20	164	49,6	53,3	10,1	617	778	2,86
19	166	50,9	48,6	10,2	651	754	2,93
18	168	50,1	51,3	10,2	607	777	2,99
17	170	50,9	49,5	10,6	642	743	2,95

Как видно из таблицы, снижение расхода белого щелока с 20 до 17 % на варку с одновременным повышением температуры немного увеличивает разрывную длину целлюлозы. Влияния условий варки на остальные показатели выявлено не было.

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ВАРКИ ПИХТЫ СУЛЬФАТНЫМ СПОСОБОМ

**А.В. Кокшаров, Е.В.Белых**

*Филиал АО «Группа «Илим» в г.Коряжме*

*В данной работе представлены лабораторные исследования по варке сульфатным способом щепы пихты. Для сравнения проводились варки смеси ели и сосны. Целлюлоза, полученная варкой пихтовой щепы, обладает меньшей длиной волокна, более низким выходом и разрывной длиной по сравнению с целлюлозой, полученной варкой смеси ели и сосны.*

### LABORATORY PULPING OF FIR BY SULPHATE METHOD

**A.Koksharov, E.V.Belykh**

*Ilim Group, Koriazhma, Russia*

*This paper presents laboratory studies on the pulping of sulphate fir chips. For comparison, boiling a mixture of spruce and pine was carried out. Cellulose obtained by cooking fir chips has a shorter fiber length, a lower yield and a breaking length compared to cellulose obtained by cooking a mixture of spruce and pine.*

В настоящее время лесосырьевую базу для получения хвойной целлюлозы в Северо-Западном регионе РФ составляют сосна и ель. Пихта присутствует в относительно небольших количествах в хвойной древесине, поступающей на варку, но ее присутствие отрицательно сказывается на проведении варочного процесса. Были проведены лабораторные варки пихтовой щепы и для сравнения варки смеси ели и сосны в соотношении, обычно используемом в производственном процессе. Для варки использовалась щепа нормальной фракции. Варки проводились в лабораторном автоклаве при температуре 165°C при расходах белого щелока 15 и 19% по отношению к абсолютно сухой древесине. В табл. 1 приведены основные характеристики используемой древесины.

Таблица 1. Основные характеристики древесины

Порода	Длина волокна, $L_w$ , мм	Базисная плотность, кг а.с.д./м <sup>3</sup>	Содержание экстрактивных веществ, %
Пихта, 100%	2,5	337	0,68
Ель 84%, сосна 16%	2,8	380	1,15



Как видно из табл. 1, древесина пихта меньшую длину волокна и базисную плотность по сравнению со смесью пород ели и сосны. Также содержание экстрактивных веществ в древесине пихты оказалось меньше, чем в древесине смеси сосны и ели, отобранной в период испытаний, хотя поверхность окоренного баланса пихты была липкой и обладала резким характерным запахом. Было измерено содержание экстрактивных веществ в коре пихты, оно составило 13,4 %.

В табл. 2 представлены данные по показателям целлюлозы после варки пихты и для сравнения ели и сосны в соотношении 84 на 16 %. Как видно из таблицы, физико-механические показатели у целлюлозы из пихты ниже, чем у целлюлозы из смеси ели и сосны. Также при одних и тех же условиях варки жесткость целлюлозы из пихты выше, чем у смеси ели и сосны.

Таблица 2. Показатели целлюлозы после варки

Порода, %	Акт. щелочь, %	Выход, %	Жест., ед. Каппа	Разр. длина, км	Инд.разр.ус, кН-м/кг	Сопр. прод., кПа	Сопр. разд., мН	SCT, кН/м	Белизна, %
Ель 84 %, сосна 16 %	19	47,5	49,9	9,63	94,4	502	841	2,75	16,8
Пихта, 100 %	19	46,1	51,9	8,84	86,6	521	825	2,73	16,1
Ель 84 %, сосна 16 %	15	50,9	83,5	9,23	90,5	497	760	2,66	14,1
Пихта, 100 %	15	54,4	90,9	8,1	79,4	469	768	2,46	13,6

#### Выводы:

1. Базисная плотность древесины пихты меньше, примерно, на 10 %, чем базисная плотность смеси ели и сосны ( $337 \text{ кг/м}^3$  против  $380 \text{ кг/м}^3$ ). В случае попадания большого количества щепы пихты в хвойную щепу, поступающую на варку, произойдет снижение производительности котлов по варке и увеличение удельной нормы щепы на варку.

2. Содержание экстрактивных веществ в древесине пихты невысокое, примерно в 2 раза меньше, чем в смеси ели и сосны, поступающей на варку. При этом кора пихты содержит большое количество экстрактивных веществ.

3. Длина волокна  $L_w$  сульфатной хвойной целлюлозы из пихты ниже, чем у хвойной сульфатной целлюлозы (84 % ели, 16 % сосны) – 2,5 мм против 2,8 мм

4. Механические показатели у целлюлозы из пихты ниже, чем у целлюлозы из смеси ели и сосны.

## ЛАБОРАТОРНЫЙ РАЗМОЛ СУЛЬФАТНОЙ НЕБЕЛЕННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ПРИ НИЗКОЙ И ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ МАССЫ

**А.В. Кокшаров**

Филиал АО «Группа «Илим» в г.Коряжме

*В данной работе представлены лабораторные исследования по размолу сульфатной хвойной целлюлозы на лабораторной мельнице PFI при высокой (27 %) и низкой концентрации (5 %) массы.*

### LABORATORY PULPING OF SULPHATE KRAFT PULP AT LOW AND HIGH CONCENTRATION OF WEIGHT

**A.Koksharov**

Ilim Group, Koriazhma, Russia

*This paper presents laboratory studies of pulping sulphate coniferous cellulose in a PFI laboratory mill with a high (27 %) and low concentration (5 %) mass.*

Лабораторный размол небеленой сульфатной целлюлозы, концентраций 5% (размол массы низкой концентрации) и 27,5 % (размол массы высокой концентрации), осуществлялся на лабораторной мельнице «PFI» (скорость 1400 об/мин.) до разных степеней помола, чтобы оценить влияние концентрации при размоле на физико-механические показатели целлюлозы. На рис. 1 показано влияние числа оборотов мельницы на степень помола целлюлозы.

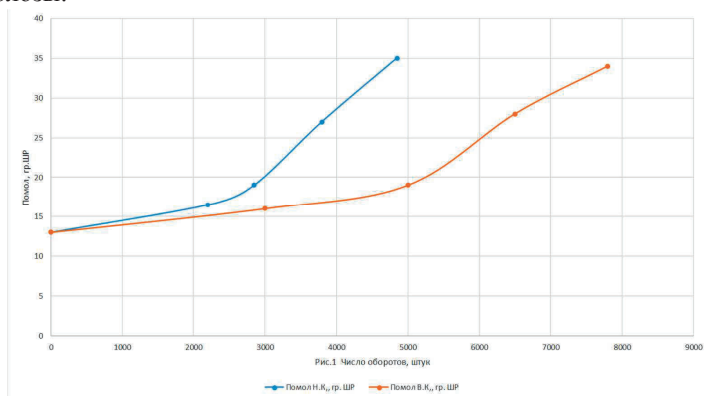


Рис. 1. Зависимость степени помола от числа оборотов мельницы при размоле при низкой (5 %) и высокой концентрации (27 %)



Как видно из рисунка, размол целлюлозы на мельнице PFI при низкой концентрации проходит значительно быстрее, чем при высокой.

На рис. 2 показана зависимость разрывной длины небеленой сульфатной целлюлозы от степени помола при размоле при низкой и высокой концентрации.

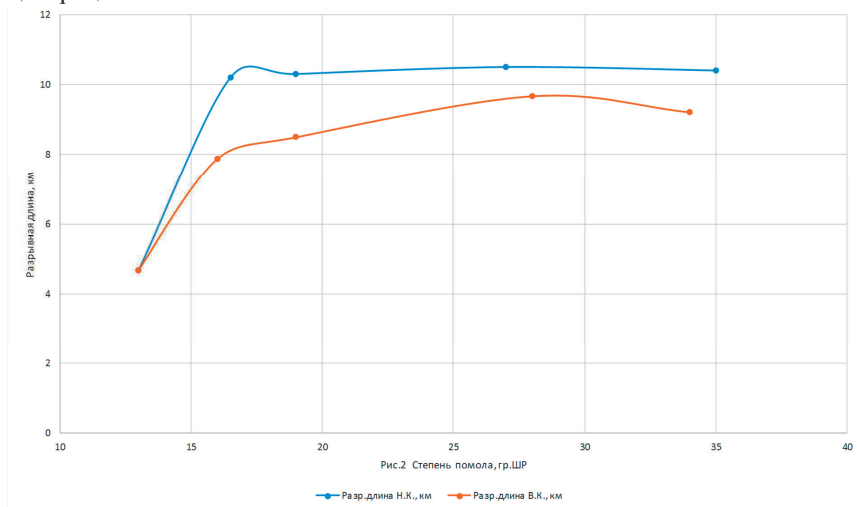


Рис. 2. Зависимость разрывной длины от степени помола при размоле при низкой (5 %) и высокой концентрации (27 %)

Как видно из рис. 2, размол при низкой концентрации дает более высокую разрывную длину целлюлозы при одинаковых степенях помола. Причем при размоле при низкой концентрации разрывная длина выходит на плато уже при помоле 16 градусусов ШР.

На рис. 3 показана зависимость относительного удлинения небеленой сульфатной целлюлозы от степени помола при размоле при низкой и высокой концентрации.

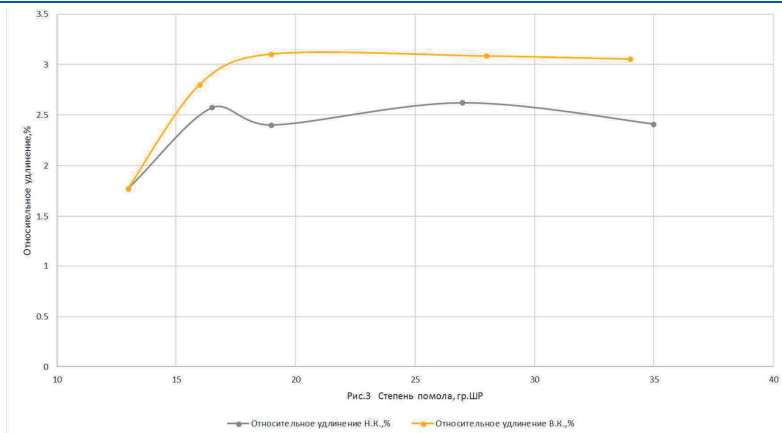


Рис. 3. Зависимость относительного удлинения от степени помола при размоле при низкой (5 %) и высокой концентрации (27 %)

Как видно из рис. 3, относительное удлинение больше в том случае, когда размол идет при высокой концентрации.

На рис. 4 показана зависимость длины волокна небеленой сульфатной целлюлозы от степени помола в случае размола при низкой и высокой концентрации.

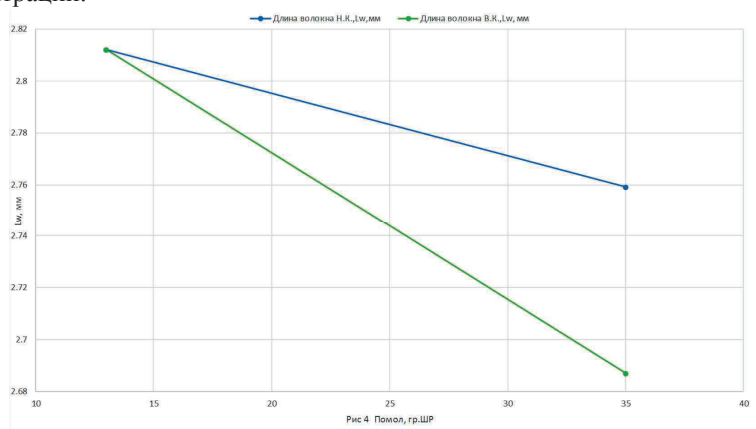


Рис. 4. Зависимость относительного удлинения от степени помола при размоле при низкой (5 %) и высокой концентрации (27 %)

Проведенные исследования показали, что размол при низкой концентрации дает большую длину волокна при одинаковых степенях помола по сравнению с размолом при высокой концентрации.

## СНИЖЕНИЕ ВАРИАбельНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ БДМ-2 КАРТОННО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА ФИЛИАЛА АО «ГРУППА «ИЛИМ» В Г. КОРЯЖМЕ

С.И. Третьяков<sup>1</sup>, С.С. Дементьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия

<sup>2</sup>Филиал АО «Группа Илим» в г. Коряжма, Коряжма, Россия

*Процессы производства целлюлозы, бумаги и картона являются многостадийными, поэтому качество продукции обуславливается большим числом различных взаимосвязанных факторов. Проведенный статистический анализ параметров процесса получения бумаги (вес 1 м<sup>2</sup> полотна бумаги, влажность бумажного полотна и pH бумажной массы в напорном ящике) привел к выводу о необходимости выполнения технических решений, а не только контроля процесса. Решено заменить напорный ящик.*

## REDUCTION OF VARIABILITY OF INDICATORS OF WORK PM-2 OF CARDBOARD-PAPER PRODUCTION THE BRANCH OF THE JSC "ILIM GROUP" IN KORYAZHMA

S.I. Tret'yakov<sup>1</sup>, S.S. Dement'ev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

<sup>2</sup>Branch of the JSC "ILIM GROUP" in Koryazhma, Russia

*Processes for the production of pulp, paper and cardboard are multistage, therefore, product quality is determined by a large number of various interrelated factors. A statistical analysis of the parameters for obtaining paper (weight 1 m<sup>2</sup> of paper, paper moisture and paper pulp pH in the headbox) led to the conclusion that it is necessary to implement technical solutions, and not only process control. It was decided to replace the headbox.*

Высокое качество продукции – важнейшее условие функционирования современного целлюлозно-бумажного предприятия. В условиях массового производства большое значение приобретают статистические методы контроля и управления качеством.

Необходимость применения статистических методов вызвана изменчивостью количественных характеристик изделий и процессов, а также данных, используемых на различных стадиях жизненного цикла продукции – от исследования рынка до сервисного обслуживания и окончательной утилизации.

Процессы производства целлюлозы, бумаги и картона являются многостадийными, поэтому качество продукции обуславливается большим числом различных взаимосвязанных факторов. Пассивный контроль производственного процесса (готовой продукции), при котором фиксируется отклонение от заданного параметра или идет разделение на годную и негодную



продукцию, не позволяет оперативно принимать решения по управлению производством. Часто требуется активное вмешательство в технологический процесс в целях предотвращения получения некачественной продукции. Статистическими методами можно рационально оценить отклонение качества продукции, обосновать его причины, то есть способствовать обеспечению высокой стабильности технологического процесса и повышению качества продукции.

Были выбраны показатели технического производства продукции на БДМ-2, значения которых нормированы в техническом регламенте БДМ-2 – масса  $1 \text{ м}^2$  полотна бумаги, влажность бумажного полотна и рН бумажной массы в напорном ящике. Значимость выбранных показателей обусловлена тем, что вес бумажного полотна определяет заказ, влажность является одним из наиболее существенных показателей качества бумаги, а рН бумажной массы влияет на обезвоживание и прочностные характеристики бумаги.

Стандарт ГОСТ Р ИСО 11462.2–2012 рекомендует к применению большое количество статистических методов и приемов. Из общего перечня статистических методов и приемов были выбраны контрольные карты по количественному признаку и гистограммы по следующим причинам:

$\bar{x}$ -карту и  $S$ -карту используют, когда сбор и обработка данных автоматизированы, для управления автоматизированными процессами с автокоррекцией на основе сигналов статистического контроля;

гистограммы используются при планировании, контроле и улучшении качества для получения распределения частот.

По итогам применения данных методов была сделана оценка протекания процесса производства бумаги и сделаны соответствующие выводы и даны рекомендации по совершенствованию процесса.

Для проведения статистического контроля, были взяты следующие показатели:

1) Масса  $1 \text{ м}^2$  полотна бумаги марок М-65 и М-100. Значения марки М-65 минимальные с контрольными пределами от 63 до 67 г и средним значением равным  $65 \text{ г/м}^2$  полотна бумаги; значения марки М-100 максимальные с контрольными пределами от 97 до 103 г и средним значением равным  $100 \text{ г/м}^2$  бумаги;

2) Влажность бумажного полотна, значения которой располагаются в контрольных пределах  $7 \dots 10 \%$ .





3) рН бумажной массы в напорном ящике с контрольными пределами рН 5,95...7,85.

Для выборки с минимальными значениями ( $65 \pm 2$ ) показателя веса  $1 \text{ м}^2$  полотна бумаги была проведена описательная статистика, результаты которой находятся в табл 1.

Исходя из представленной таблицы, можно сделать следующие выводы:

- Среднее значение указывает на разность между заданным и полученным средним значение показателя. Среднее значение, полученное по результатам описательной статистики, не на много отличается от заданного значения;

- Стандартное отклонение указывает на неширокий разброс значений. Данный параметр должен составлять 2...3% и меньше от среднего значения для хорошего результата;

- Эксцесс характеризует крутизну будущей гистограммы, чем выше эксцесс, тем круче частотные столбцы гистограммы. По данным результатам эксцесс отрицательный, что говорит о скосе гистограммы вправо к верхней границе;

- Ассиметричность указывает на разность между левой и правой половиной гистограммы. Так как данное значение асимметричности отрицательное, то столбцы будущей гистограмме в основном будут скомпанованы больше между центром и правой границей;

- Интервал говорит о небольшом разбросе значений.

Таблица 1. Результаты описательной статистики по минимальным значениям показателя измерений веса  $1 \text{ м}^2$  полотна бумаги

Статистическая характеристика	Величина
Среднее	65,744
Стандартная ошибка	0,0443
Медиана	65,9
Мода	66,39
Стандартное отклонение	0,7222
Дисперсия выборки	0,5216
Эксцесс	-0,198
Ассиметричность	-0,595
Интервал	3,66
Минимум	63,59
Максимум	67,25
Сумма	17422
Число измерений	265
Уровень надежности (95,0 %)	0,0873



Для выборки с минимальными значениями ( $65 \pm 2$ ) показателя массы  $1 \text{ м}^2$  полотна бумаги была построена гистограмма (рис. 1.) для визуальной оценки величины и оценки характера разброса данных.

На гистограмме наблюдается явное смещение столбцов к верхней контрольной границе, у нижней границы наблюдаются низкие частоты. Столбцы гистограммы локализируются между центральной линией и верхней границей. Гистограмма смещается к верхней контрольной границе, а к минимальному допустимому значению не подходит. Для исключения брака необходимо применять ручную регулировку процесса. Если вес бумаги получится меньше допустимого, то это означает брак. Такую бумагу придется перерабатывать заново, а это лишние затраты на производство бумаги. Вес бумаги стараются приблизить к верхней контрольной границе, так как, если полученная бумага будет весить больше положенного – ее можно отнести к следующей марке М-70. Аналогичные результаты получены и для бумаг с другими параметрами.

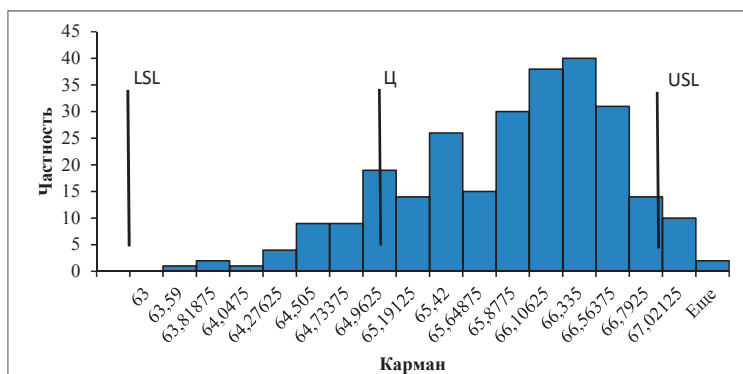


Рис. 1. Гистограмма по минимальным значениям показателя измерений массы  $1 \text{ м}^2$  полотна бумаги

Исходя из проведенного статистического анализа, можно сделать вывод о необходимости выполнения технических решений, а не только контроля процесса. В частности, для снижения вариабельности процесса принято решение о замене напорного ящика.

## ВОДОРАЗЛАГАЕМЫЕ ВИДЫ БУМАГИ И КАРТОНА

Е.А. Топтунов, А.М. Самухин, Н.В. Щербак,

Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия

*В статье сделан обзор областей использования водорастворимой бумаги. Представлен перечень химических веществ и волокнистого сырья, используемого для ее получения. Дана качественная характеристика водорастворимой бумаги в зависимости от области применения.*

## WATER SOLUBLE PAPER AND CARDBOARD

Е.А. Topunov, А.М. Samukhin, N.V. Shcherbak

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

*The article provides an overview of the use of water-soluble paper. There is a list of chemicals and fiber raw materials used to obtain it in the article. The qualitative characteristics of water-soluble paper, depending on the application, is given.*

**Актуальность.** Развитию целлюлозно-бумажной промышленности способствует разработка инновационных решений. К одному из них можно отнести водорастворимую бумагу, которая нашла применение в различных сферах деятельности.

В технических целях водорастворимая бумага используется как продувочная заглушка для удержания инертного газа во время аргонодуговой сварки стальных и алюминиевых нержавеющей труб. Это проверенное и экологически безопасное решение, позволяющее экономить дорогостоящий инертный газ во время сварки [1].

На рынке санитарно-гигиенических изделий из водорастворимой бумаги изготавливают сердечники для туалетной бумаги, бумажных полотенец и т.п., а также патронов аппликаторов тампонов. Различные тубы, втулки, гильзы и шпули из водорастворимой бумаги и картона могут использоваться для намотки всевозможных рулонных материалов, пленок, фольги и нитей.

Водорастворимая бумага пригодна для письма, цифровой печати, в том числе типографской, термопечати и фотокопирования. Ее можно ламинировать и формировать в термосвариваемые пакеты (мешочки) для краткосрочного хранения товаров, которые растворятся при попадании в воду. Водорастворимая бумага может выпускаться различной толщины, гладкая



и шероховатая, с покрытием и без покрытия. Все это определяет спектр ее использования [2,3].

Широко используется водорастворимая бумага в мыловарении для декорирования, печати схем при нанесении вышивки, которые исчезнут после стирки изделия. Водорастворимая карнавалльно-праздничная продукция – идеальное решение для проведения экологически грамотного празднования. Серпантин, конфетти, хлопушки убираются легко при смыве водой и не создают пожароопасных ситуаций. Водорастворимую бумагу удобно использовать для пакетов, применяемых при делении средств на дозы одноразового использования (стирального порошка, удобрений, средства для прочистки труб и т.д.). Получает распространение использование водорастворимой бумаги как имиджевого и рекламного носителя, например, на фасовочных пакетах. В отдельный сегмент выделяется бумага для билетов на культурные мероприятия или зон отдыха (аквапарки, стадионы, аттракционы и пр.), а также пригласительных билетов на торжественные и официальные мероприятия. Водорастворимые этикетки и наклейки удобны в использовании при маркировке тары как в промышленности, так и в домашних условиях. Все чаще можно встретить водорастворимую бумагу на ярлыках для одежды. Водорастворимая бумага для конфиденциальных целей позволяет уничтожать важную информацию, не оставляя никаких следов [2,3].

**Цель** – обзор по сферам использования водорастворимой бумаги.

**Объекты и методы исследования.**

Используемый здесь термин «водорастворимая» бумага подразумевает лист бумаги, распускающийся (диспергируемый) в воде на отдельные волокна без приложения значительных усилий, рис. 1.



Рис. 1. Наглядное представление водорастворимости бумаги [3]



Поиск информации, используемой в статье, осуществлялся в общедоступных патентных и непатентных базах данных.

**Результаты и их обсуждение.** Патентный поиск выявил несколько десятков свидетельств, выданных Российской федеральной службой по интеллектуальной собственности в области получения водорастворимых видов бумаги. Наиболее характерные по сферам использования водорастворимой бумаги патенты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Краткая характеристика патентов по водорастворимой бумаге

Номер патента	Область использования	Краткое описание
Семейство патентов на примере 2512357 [4]	Производство гигиенических изделий	Применяется при изготовлении бумажных рулонов. Сердечник для рулона бумаги выполнен путем винтовой намотки, по меньшей мере, одной ленты. Лента содержит целлюлозное волокно и водорастворимый материал, предназначенный для придания ленте жесткости и способности к дезинтеграции.
2648220 [5]	Производство гигиенических изделий	Чувствительный к воде аппликатор тампона, т.е. он теряет свою целостность с течением времени в присутствии воды. Аппликатор содержит формованную термопластичную композицию, содержащую производное целлюлозы, синтетический водорастворимый полимер и пластификатор.
2671752 [6]	Производство декоративных изделий	Водорастворимая бумага со схемой для вышивания. Изготавливают смесь из древесной целлюлозы и карбоксиметилцеллюлозы. Технический результат заключается в получении бумаги с хорошим показателем растворения в воде, без присутствия в готовой вышивке волокон целлюлозы между стежками и тканой основой.
2624301 [7]	Производство фильтрующих материалов	Быстроразрушающаяся в воде бумага для фильтра. Бумага используемая для фильтра в сигаретном фильтре по меньшей мере на 80 % образована из смеси длинноволокнистой и мерсеризованной целлюлозы. Бумага обладает свойством быстрого расщепления в воде и вследствие этого улучшает способность к биологическому разложению изготовленного из нее сигаретного фильтра.
2362791 [8]	Картонажная и бумажная промышленность	Получение растворимого в воде клея-расплава, используемого для проклеивания и каширования картона, а также для получения соединений не менее чем двух слоев бумаги, используемых для получения гигиенической бумаги.



Патентный поиск показал, что на рынке существуют современные виды дешевой и простой в изготовлении водорастворимой бумаги с хорошей способностью к диспергированию и с прочностными характеристиками, соответствующими области применения, а также безопасной для окружающей среды.

Для проклейки водорастворимой бумаги могут использоваться различные химикаты с высокой степенью растворимости в воде. Наибольшее распространение получили адгезивы на основе поливинилового спирта (полиол), полиэтиленгликоля, водорастворимых латексов и(или) неионных эфиров целлюлозы, например, гидроксипропилметилцеллюлозы или натрий-карбоксиметилцеллюлозы.

Наиболее массовым и дешевым водорастворимым проклеивающим агентом для водорастворимой бумаги является крахмал из различного сырья – пшеница, кукуруза, картофель, рис, тапиока, сорго и др.

Термин «Крахмал» в большинстве зарегистрированных патентов включает натуральный крахмал и его производные, претерпевшие физическую, физико-химическую или биологическую обработку, модифицированные крахмалы, такие как катионные, анионные, амфотерные, неионные или сшитые, а также продукты, получаемые при гидролизе крахмала, такие как декстринмальтозы. Укрупненная схема адгезивов на основе крахмала для водорастворимой бумаги представлена на рис. 2.

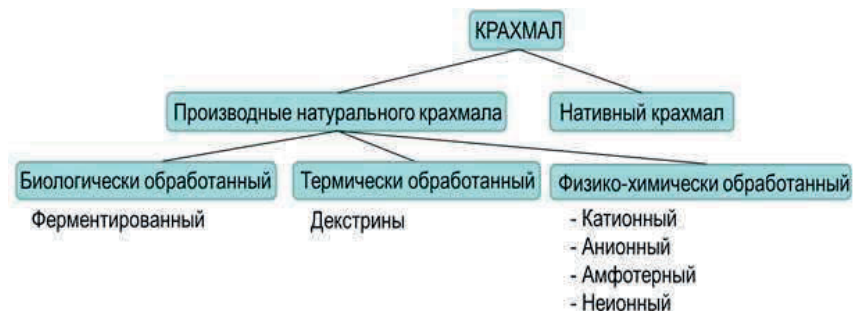


Рис. 2. Крахмал и его производные, как связующее для водорастворимой бумаги

В случае получения водорастворимой бумаги с поверхностным покрытием для покрытия чаще применяются этиленвинилацетат (EVA) или поливиниловый спирт (PVOH) [2,3].



В патентах предлагается в качестве волокнистого сырья для производства водорастворимой бумаги использовать целлюлозные и синтетические волокна или их смеси.

Синтетические волокна – нейлоны, полиэфиры и др.

Целлюлозные волокна – древесного (волокна лиственных и хвойных пород, первичные и вторичные) и недревесного происхождения (хлопок и его производные, манила, лен, солома и т.д.) нормального выхода и механические массы.

**Заключение.** Водорастворимая бумага является инновационным, экологичным материалом, используемым в различных сферах деятельности. Волокнистое сырье и водорастворимый адгезив подбираются исходя из требуемых потребительских характеристик. Одно- или многослойные бумаги могут изготавливаться в широком диапазоне толщины мокрым или сухим способом формования. Производству данных видов бумаги с сохранением прав интеллектуальной собственности и патентной чистоты должны предшествовать исследовательские разработки по поиску новых технологических решений.

#### Список литературы

1. Водорастворимая бумага и лента (пленка) Rusolvo. Режим доступа: [http://rusolvo.ru/catalog/vodorastvorimaya\\_bumaga/](http://rusolvo.ru/catalog/vodorastvorimaya_bumaga/) дата посещения (08.06.19).
2. Интернет-статья «Что такое водорастворимая бумага» Режим доступа: <https://adalik.livejournal.com/1631.html> дата посещения (08.06.19).
3. Водорастворимая бумага. Режим доступа: <http://argoasecurity.com.ua/index.php?route=product/category&path=25> дата посещения (08.06.19).
4. Патент RU 2512357 Опорный сердечник для бумажного рулона. Режим доступа: <http://www.freepatent.ru/patents/2512357> дата посещения (08.06.19).
5. Патент RU 2362791 Растворимый в воде клей-расплав, его применение, способ получения многослойного материала, способ получения бумаг, приобретающих клейкость при увлажнении, и способ получения многослойного текстильного материала: <http://www.freepatent.ru/patents/2362791> дата посещения (08.06.19).
6. Патент 2648220 РФ. Пригодный для смывания в канализацию аппликатор тампона / Ван Джеймс, Уайдман Грегори; заяв. и патентообладатель. Кимберли-Кларк Ворлдвайд, ИНК. – № 2016123930; заявл. 29.09.2014; опубл. 22.03.2018, Бюл. № 9.
7. Патент 2671752 РФ. Водорастворимая бумага со схемой вышивания и способ ее производства. [Текст] / Кац Борис Маркович; заяв. и патентообладатель ООО «Панна». – № 2017143790; заявл. 14.12.2017; опубл. 06.11.2018, Бюл. № 31.
8. Патент 2624301 Российская Федерация, МПК А24Д 3/10. Быстроразрушающаяся в воде бумага для фильтра. [Текст] / Бахманн Штефан, Фольггер Дитмар, Меринг Дитер и др.; заяв. и патентообладатель Делфортгрупп АГ; – № 2014148762; заявл. 14.05.2013; опубл. 20.09.2016, Бюл. № 26.

## ХИМИЧЕСКАЯ И БИОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

**А.В. Канарский, И.А. Хусаинов, Т.З. Ха, Л.А. Мингазова, З.А. Канарская, Е.Р. Якубов**

*ФГБОУВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия*

*Установлена возможность комплексной переработки биомассы лигноцеллюлозного сырья путем химических, физических, ферментативных и микробиологических методов с получением многофункциональных биопродуктов. Объектами исследования являлись биомасса сельскохозяйственных культур, рисовая шелуха, пшеничная солома, нейтрально-сульфитные щелока.*

### CHEMICAL AND BIOCATALYTIC CONVERSION OF SECONDARY RESOURCES OF VEGETABLE RAW MATERIALS

**A.V. Kanarsky, I.A. Khusainov, T.Z. Ha, L.A. Mingazova, Z.A. Kanarskaya, E.R. Yakubov**

*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia*

*The possibility of complex processing of biomass of lignocellulosic raw materials by chemical, physical, enzymatic and microbiological methods to obtain multifunctional bioproducts has been established. The objects of study were the biomass of agricultural crops, rice husks, wheat straw, and neutral sulfite liquor.*

Последние десятилетия вопросы переработки возобновляемых растительных источников сырья привлекают пристальное внимание исследователей в рамках проектов получения биотоплива и продуктов промышленной химии. Разрабатываются современные ферментные препараты, позволяющие проводить глубокую конверсию и трансформацию растительного сырья. Новые знания о биокатализе открывают широкие горизонты получения биопрепаратов и их использования в различных сферах деятельности человека.

Воспроизводимая человеком растительная биомасса обладает большим потенциалом для комплексной переработки в спектр биопродуктов. В качестве промышленного сырья перспективными являются многолетние быстрорастущие культуры, такие как мискантус, просо, сахарный тростник, сорго, кукуруза и другие представители группы C4 растений, а также вторичные продукты переработки растительного сырья.





Однако, внедрение этих технологий требует создания новых способов переработки растительной биомассы, органично сочетающих физические и биотехнологические методы воздействия.

Таким образом, разработка технологии глубокой конверсии и трансформации растительной биомассы в биопродукты и сегодня является актуальной и соответствует основным тенденциям и приоритетным направлениям в мировой и отечественной науке.

Цель: создание технологии комплексной переработки растительной биомассы методами химической и биокаталитической конверсии на биопродукты.

Объектами исследования являлись корнеплоды и биомасса сельскохозяйственных культур, рисовая шелуха, пшеничная солома, нейтрально-сульфитные щелока.

Проведенными исследованиями установлена возможность комплексной переработки биомассы сельскохозяйственных культур и вторичных ресурсов переработки растительного сырья путем химических, физических, ферментативных и микробиологических методов с получением многофункциональных биопродуктов.

Получены следующие основные результаты:

Установлено, что пульсационные методы воздействия при экстракции сахарозы из растительного сырья (сахарная свекла, кукуруза) позволяют интенсифицировать и сократить продолжительность экстракции на 20...80 мин.; исключить влияние степени измельчения сырья, как фактора эффективности экстракции; проводить процесс при низких температурах (20 °С); существенно упростить технологию, снизить металлоемкость экстракционного оборудования; получить экстракт высокой степени доброкачественности (85...93 %) и подготовить растительное сырье для последующей химической и биокаталитической конверсии.

– Показано, что щелочной и перекисно-щелочной способы обработки лигноцеллюлозной биомассы (пшеничной соломы, рисовой шелухи) в сочетании с пульсационным воздействием позволяют получать клетчатку для последующего ферментолиза.

– Установлено, что ферментолиз препаратами с целлюлазной и ксиланазной активностями (Accellerase 1500, Accellerase XC, Accellerase XY) позволяет конвертировать до 80 % углеводного субстрата в редуцирующие вещества. Показано, что полученный ферментолизат может быть использован в качестве питательной среды для культивирования микроорганизмов.



– Установлено, что культивирование бактерий *Leuconostoc mesenteroides* и *Paenibacillus mucilaginosus* на ферментализате из клетчатки обеспечивает выход биомассы бактерий до 50 % от начального содержания РВ. Выход внеклеточного растворимого полисахарида достигает 15 % от РВ.

– Доказано, что культивирование дрожжей рода *Lipomyces* на ферментализате обеспечивает выход биомассы дрожжей 56 % от РВ питательной среды, Выход внеклеточного полисахарида 7,1 г/л в культуральной жидкости, при начальной концентрации РВ в питательной среде 1,3 %, температуре культивирования 20 °С и продолжительности культивирования 170 ч.

– Установлено, что на ферментализатах нейтрально сульфитных щелоков возможно культивирование мицелиальных грибов *Rhizopus oryzae* с получением молочной кислоты.

#### Список литературы

1. Хусаинов И.А., Канарский А.В. Культивирование *Leuconostoc mesenteroides* на гидролизате биомассы кукурузы// Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 3. С. 205–212.

2. Хусаинов И.А., Якубов Е.Р., Канарская З.А., Канарский А.В., Максимова И.А., Качалкин А.В. Эффективность синтеза внеклеточных полисахаридов штаммами дрожжей *Lipomyces*// Вестник ВГУИТ. 2018. т.80. № 4. С. 269–277.

3. Ха Т.З., Канарский А.В., Щербаков А.В., Щербакова Е.Н. Влияние источника углерода на рост культуры *Paenibacillus mucilaginosus* // Актуальная биотехнология - 2018. № 1. С. 8–11.

4. Мингазова Л.А., Крякунова Е.В., Канарский А.В. Синтез молочной кислоты грибом *Rhizopus oryzae* на питательных средах из гидролизатов клетчатки // Вестник технологического университета. – 2017. Т.20. В.19. С.134–136.



## ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО КАРТОНА

**С.И. Басырова, М.Ф. Галиханов**

*ФГБОУВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия*

*В настоящей работе исследовано влияние модификации картона на комплекс его поверхностных свойств. Оценено влияние обработки картона полилактидным или крахмальным покрытиями на процессы их смачивания и впитываемости. Показана возможность изменения свойств целлюлозно-бумажных материалов с помощью униполярного коронного разряда.*

## SURFACE PROPERTIES OF MODIFIED CARDBOARD

**S.I. Basyrova, M.F. Galikhanov**

*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia*

*In the present work, the effect of cardboard modifications on the complex of its surface properties is investigated. Estimated effect of cardboard processing on the processes of their wetting and absorption. The possibility of changing the properties of pulp and paper materials using a unipolar corona discharge is shown.*

Известно, что эксплуатационные свойства материалов можно изменять при помощи физических полей различной природы, например, постоянного коронного разряда [1–3]. Особенно это актуально для материалов с низкими механическими, барьерными или иными свойствами.

Например, целлюлозно-бумажные материалы (ЦБМ) хорошо впитывают влагу, что ведет к снижению их прочностных характеристик [4]. Для устранения этого недостатка они комбинируются с полимерами. Но это ведет к другой проблеме – такие комбинированные материалы почти не поддаются вторичной переработке, а при захоронении имеют длительный срок разложения в окружающей среде [5,6]. Решением этой проблемы является создание экологически чистых материалов, которые будут обладать такими же прочностными характеристиками, что и синтетические материалы. Экологически чистые упаковочные материалы на основе картона или бумаги, можно комбинировать с природными биodeградируемыми крахмалом или полилактидом (ПЛА). Крахмал является полисахаридом и входит в объемный состав большинства видов бумаг и картонов. Полилактид получают из возобновляемого растительного сырья, и он перерабатывается в изделия всеми методами переработки пластмасс. Применение таких полимеров позволяет сохранить важное экологическое достоинство ЦБМ – их биоразлагаемость [7–9].

Однако по ряду характеристик крахмал и полилактид уступают традиционным синтетическим полимерам, используемым для ламинирования бумаги или картона. В ряде работ было показано, что обработка ЦБМ в поле отрицательного коронного разряда образцов приводит к улучшению их механических свойств благодаря упрочнению сил связи между волокнами [10,11]. К тому же, при модифицировании мешочной бумаги с полилактидным или крахмальным покрытиями и униполярным коронным разрядом улучшается биоразлагаемость, что связано с природой полимеров и частичной деструкцией макромолекул целлюлозы при действии коронного разряда.

Не ясен остается вопрос о влиянии униполярного коронного разряда на поверхностные свойства целлюлозно-бумажных материалов, ламинированных крахмалом или полилактидом. Это и явилось целью настоящей работы.

Объектами исследования являлись образцы картона (К) марки К-125. В качестве полимерных покрытий для модификации (ламинирования) картона-0 применяли клейстер, состоящий из кукурузного крахмала (ГОСТ 32159–2013), глицерина (ГОСТ 6824–96) и воды (К+КР), или 3 % раствор полилактида (фирмы «SigmaAldrich») в хлороформе (ГОСТ 20015–88) (К+ПЛА).

Измерение краевого угла смачивания  $\theta$  проводили на катетометре К-М8 с измерительной ячейкой методом сидящей капли, которую наносили при помощи микрошприца (рис. 1). Для воспроизводимости опытов на образцы картона наносили не менее 5 капель. Для расчета поверхностных свойств измеряли ширину основания  $l$  и высоту  $h$  капли. О свободной поверхностной энергии картона с полимерным покрытием судили по углу смачивания образцов шести жидкостей (вода, глицерин,  $K_2CO_3$  (раствор), формамид, ДМСО, этиленгликоль) по известной методике [12].

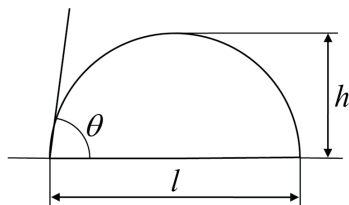


Рис. 1. Схема измерения краевого угла смачивания

Оценка влияния обработки картона полилактидным или крахмальным покрытиями на процессы впитываемости при полном погружении образцов проводили согласно ГОСТ 13648.5–78. Для этого образцы картона предварительно помещали в сушильный шкаф на 10 минут при 90 °С. Далее их помещали в ванну с водой и выдерживали в течение 1 минуты, затем образцы извлекались пинцетом и в течение одной минуты давали стечь лишней жидкости. Измеряли массу до и после погружения в воду. Далее производили расчет, согласно формуле:

$$G_{п.п.} = (m_2 - m_1)/m_1 \cdot 100 \% \quad (1)$$

где  $G_{п.п.}$  – впитываемость при полном погружении;  $m_1$  – масса воздушно-сухого образца, г;  $m_2$  – масса образца после извлечения из жидкости, г.

Влияние обработки картона полилактидным или крахмальным покрытиями на процессы впитываемости проводили капельным способом согласно ГОСТ 12603–67. Каплю жидкости нанесли на ламинированную и (или) обработанную коронным разрядом и засекали время, по истечению которого пропадал блеск от жидкости.

Обработку в поле униполярного (отрицательного) разряда (К+ЭЛ, К+КР+ЭЛ и К+ПЛА+ЭЛ). К проводили при помощи генератора высокого напряжения, присоединенного к ячейке, на коронирующий электрод которой подается напряжение 30 кВ отрицательной полярности (рис. 2). Образцы картона предварительно термостатировали при температуре 90–100 °С. Далее их помещали в коронирующую ячейку с электродом, где и проводилась поляризация. Расстояние между образцами и коронирующим электродом составляло 2 см.

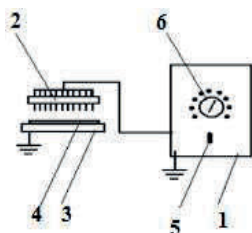


Рис 2. Схема коронирующей установки: 1 – генератор высокого напряжения; 2 – многоигольчатый коронирующий электрод; 3 – нижний электрод, 4 – образец, 5 – тумблер включения генератора, 6 – регулятор подаваемого напряжения



Измерения электретных характеристик (потенциал поверхности  $V_э$ , кВ; напряженность электростатического поля  $E$ , кВ/м; эффективная поверхностная плотность электрических зарядов  $\sigma_{эф}$ , мкКл/м<sup>2</sup>) проводили на приборе ИПЭП-1.

При исследовании краевого угла смачивания водой исходного и ламинированного картонов было обнаружено изменение  $\Theta$  с 85° для исходного картона до 56,2° для картона с крахмальным покрытием и до 117,7° для картона с полилактидным покрытием. Это может свидетельствовать о увеличении гидрофобности картона, модифицированного полилактидом и, как следствие, повышения защиты картона от влаги.

Влияние полимерных покрытий на поверхностные свойства картона оценивали по краевому углу смачивания. Краевой угол смачивания исходного картона и электретированного оценивали по 3-м жидкостям: вода, глицерин, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(раствор), поскольку остальные жидкости впитываются их поверхностью. При нанесении крахмального покрытия, значительных изменений не происходит, поскольку при производстве картона также используют крахмал. При использовании полилактидного покрытия дополнительно удерживаются на поверхности материала капли ДМСО, формамида, этиленгликоля.

Согласно расчетам выяснилось, что свободная поверхностная энергия картона  $\gamma_K = 120,4$  мН/м. При нанесении на него крахмального покрытия значительных изменений не происходит ( $\gamma_{K+Кр} = 124,6$  мН/м), поскольку при производстве картона также используют крахмал. При нанесении полилактидного покрытия свободная поверхностная энергия материала составила  $\gamma_{K+ПЛА} = 75,3$  мН/м. При обработке материалов в поле постоянного коронного разряда происходит уменьшение значений их поверхностной энергии на 20–25 %. Подобное действие униполярного коронного разряда наблюдали ранее для полимерных материалов [13].

Оценку стабильности сохранения заряда в целлюлозно-бумажных материалах проводили при помощи измерения параметров электростатического поля. Низкие значения электретных характеристик (табл.1) обусловлены проникновением носителей заряда в объем диэлектрика и его высвобождение из объема к поверхности диэлектрика в ходе релаксации.



Таблица 1. Электретные характеристики картона

Электретные характеристики	К+ЭЛ	К+КР+ЭЛ	К+ПЛА+ЭЛ
$V_3$ , кВт	0,162	0,046	0,414
$E$ , кВ/м	20,8	13,5	63,9
$\sigma_{эф}$ , мкКл/м <sup>2</sup>	0,169	0,110	0,565

Одними из способов оценки гидрофобности целлюлозно-бумажных материалов являются определение впитываемости при полном погружении и капельным способом (табл. 2). Результаты по исследованию впитываемости материалов, полученные капельным способом позволяют проанализировать влияние модификации картона на поверхность листа. Изучение впитываемости при полном погружении позволяет оценить влияние ламинирования на свойства материала в объеме.

Таблица 2. Результаты определения впитываемости модифицированного картона при полном погружении  $G_{п.п.}$  и при капельном способе

Образец	$G_{п.п.}$ (ср), %	Среднее время впитываемости, мин
Картон	83,6	31,0
К+ЭЛ	68,4	40,0
К+КР	89,0	21,8
К+КР+ЭЛ	72,8	28,4
К+ПЛА	49,3	Не впитывается
К+ПЛА+ЭЛ	47,9	Не впитывается

Видно (табл. 2), что впитываемость картона при полном погружении составила 83,6 %. При его обработке в униполярном коронном разряде происходит снижение впитываемости в ~1,2 раза. Это связано с экранированием заряда молекулами воды. При нанесении крахмального покрытия происходит ее незначительное увеличение до 89,0 %. Это обусловлено протеканием одновременно нескольких процессов: активного смачивания крахмальной поверхности водой и набуханию крахмальных зерен на поверхности. Обработка картона с крахмальным покрытием в коронном разряде также позволяет снизить впитываемость в ~1,2 раза.

При нанесении полилактидного покрытия происходит значительное снижение впитываемости исходного картона в ~1,7 раз, что указывает на гидрофобизацию поверхности. Это вполне логично, т.к. нанесение полилактила препятствует проникновению влаги в толщу листа. Действие корон-



ного разряда практически не изменяет впитываемость картона с полилактидным покрытием, т.к. ПЛА при данных условиях обработки практически не способен поляризоваться [14].

Измерения впитываемости исследуемых материалов капельным способом подтверждают результаты по впитываемости при полном погружении. Впитываемость исходного картона составляет 31 минуту, при нанесении крахмального покрытия снижается время впитываемости до 28,4 мин. Обработка коронным разрядом повышает время впитываемости картона и картона с крахмальным покрытием в  $\sim 1,3$  раза (табл. 2).

Полилактид не впитывает воду, поэтому ламинирования этим полимером предотвращает попадание влаги в целлюлозно-бумажный материал со стороны данного покрытия (табл. 2).

В ходе исследования картона было установлено, что при нанесении биоразлагаемых полимеров на картон происходит изменение свободной поверхностной энергии: при нанесении полилактидного покрытия она уменьшается на  $\sim 37\%$ , а при нанесении крахмального покрытия наблюдается его незначительное увеличение (на  $\sim 3\%$ ). При нанесении полилактидного покрытия впитываемость картона при полном погружении уменьшилась в  $\sim 1,7$  раз, нанесение крахмального покрытия незначительно увеличило эту характеристику картона на  $\sim 6\%$ . Аналогичные зависимости наблюдались при изучении капельной впитываемости картона: полилактидное покрытие предотвращало впитываемость капли воды, а время впитываемости картона при обработке крахмальным покрытием уменьшилось.

При обработке исследуемых картона и картона, модифицированного крахмалом или полилактидом, постоянным коронным разрядом происходит уменьшение значений поверхностной энергии в среднем на 20...25%. Это приводит к тому, что впитываемость модифицированного картона при полном погружении меньше, чем у исходного картона, а время впитываемости капли воды увеличивается в  $\sim 1,3$  раза.

#### Список литературы

1. Лущейкин, Г.А. Полимерные электреты. М.: Химия, 1984. 184 с.
2. Галиханов М.Ф., Дебердеев Р.Я. Полимерные короноэлектреты: традиционные и новые технологии и области применения // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 4. С. 45–57.
3. Пинчук Л.С., Гольдаде В.А. Электретные материалы в машиностроении. Гомель: Инфотрибо, 1998. 288 с.





4. Фляте Д.М. Свойства бумаги. Изд. 3-е, перераб. и дополн.. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 680 с.
5. Губанов Л.Н., Зверева А.Ю., Зверева В.И. Переработка и утилизация отходов упаковочных материалов: учебное пособие. Н. Новгород, ННГАСУ, 2015. 117 с.
6. Frostling H., Hoff A., Jacobsson S., Pfäffli P., Vainiotalo S. and Zitting A. Scandinavian journal of work, environment & health, 10, 163–169, 1984.
7. Карпунин И.И., Кузьмич В.В., Балабанова Т.Ф. Классификация биологически разлагаемых полимеров // Наука и техника. 2015. №5. С. 53–58
8. Васильева Н.Г. Биоразлагаемые полимеры // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №22. – С. 156–157
9. Ольхов, А.А. Биопластики на основе термопластов // Вестн. Волгогр. гос. ун-та. 2014. Сер. 10. №3. С. 84–92.
10. Perepelkina A.A., Galikhanov M.F., Musina L.R. Effect of unipolar corona discharges on properties of pulp-and-paper materials // Surface Engineering and Applied Electro-chemistry. 2015. Vol. 51. Issue 2. P. 138–142.
11. Мусина Л.Р., Галиханов М.Ф. Влияние электретирирования на сорбционные и фильтрующие свойства фильтровальной бумаги // Химия растительного сырья. 2017. №2. С. 155–161.
12. Старостина И.А., Стоянов О.В. Кислотно-основные взаимодействия и адгезия в металл-полимерных системах. Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2010. 200 с.
13. Vlaeva I., Yovcheva T., Viraneva A., Kitova S., Exner G., Galikhanov M., Guzhova A. Contact angle analysis of corona treated polypropylene films // Journal of Physics: Conference Series, 398 (1), 012054, 2012.
14. Муслимова А.А., Виранева А.П., Йовчева Т.А., Галиханов М.Ф. Изучение электретных свойств короноэлектретов на основе полилактида // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 10. С. 128–130.

## СВОЙСТВА ВТОРИЧНОГО ВОЛОКНА ИЗ ВЛАГОПРОЧНОЙ МАКУЛАТУРЫ С ПОЛИУРЕТАНОВЫМ ПОКРЫТИЕМ

Ю.Д. Алашкевич, Р.З. Пен, В.А. Кожухов, И.А. Воронин, Н.В. Каретникова,  
Л.В. Чендылова

*Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева,  
Красноярск, Россия*

*Влагопрочная бумага с полиуретановым покрытием удовлетворительно распушена после химической обработки раствором персульфата и гидроксида натрия. Прочностные свойства бумажных отливок соответствуют характеристикам, присущим вторичным волокнистым полуфабрикатам.*

## PROPERTIES OF THE SECONDARY FIBERS FROM WET-STRENGTH OF THE WASTE-PAPER WITH POLYURETHAN COVERING

Yu.D. Alashkevich, R.Z. Pen, V.A. Kozhukhov, I.A. Voronin, N.V. Karetnikova,  
L.V. Chendylova

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia*

*Wet-strength paper with polyurethan cover was satisfactorily broken-up after chemical processing by sodium persulfate and hydroxide solution. The papers strength corresponds with the properties, inherent of the secondary half-finished product.*

Объект исследования – бумага специального ассортимента из хлопкового волокна, на обе стороны которой нанесена полиуретановая дисперсия с поперечной сшивкой полиазиридином [5,7]. Сухие отходы производства этой бумаги – обрезки кромок, срывы полотна в сушильной части бумагоделательной машины – фактически представляют собой макулатуру с высокой влагопрочностью, трудно поддающуюся роспуску с целью получения вторичного волокна для возврата в основной поток. Особые приемы переработки такой макулатуры не вписываются в существующие, хорошо отлаженные и освоенные промышленностью, схемы переработки обычной макулатуры, однако из-за высокой стоимости исходного волокнистого сырья его рецикл оказывается экономически оправданным.

В схему подготовки макулатуры к роспуску часто включают термодисперсионную обработку [2,3,6,10], в частности, щелочным раствором пероксида водорода. Одним из возможных путей интенсификации этого процесса в случае переработки влагопрочной макулатуры является предварительное сухое измельчение, при котором используют принцип свободного



удара по взвешенному в воздухе материалу [12]. Этот принцип осуществляется в устройствах, аналогичных молотковым дробилкам. Макулатуру (чаще всего упаковочный материал типа «Тетрапак») измельчают до фрагментов размером от 1 до 5 см, после чего подают на дополнительный роспуск и дальнейшую обработку в водной среде, в соответствии с требованиями технологии.

Серьезные осложнения при переработке макулатуры, содержащей полимерные добавки, возникают из-за образования липких загрязнений в результате термохимического воздействия на материал [6]. На этот аспект проблемы приходится обращать внимание при разработке новых процессов переработки влагостойкой макулатуры.

Для роспуска обсуждаемого вида макулатуры может быть применена химическая обработка измельченного материала раствором, содержащим персульфат и гидроксид натрия, при повышенной температуре (далее в тексте – «варка»). В статье приведены результаты исследования эффективности этого способа переработки макулатуры.

Исследуемый материал представлял собой листы бумаги промышленной выработки. Основные характеристики бумаги, определенные стандартными методами, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика бумаги, использованной в экспериментах

Наименование свойств	Величины свойств в направлениях	
	продольное	поперечное
Разрывная длина, км	9,94	5,61
Удлинение при разрыве, %	6,10	10,2
Сопротивление: излому, ч. д. п.	596	450
Влагостойкость, %	51,0	49,2
Граммаж, г/м <sup>2</sup>	93,5	
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,813	

Бумажные листы с влажностью около 4 % разрезали гильотинной стопорезкой на «лепестки» размером 30×30 мм, измельчили в дисковой мельнице сухого помола (ударного типа) до размера частиц 3...8 мм и обрабатывали при температуре 70 °С водным раствором, содержащим персульфат и гидроксид натрия. Полученный материал диспергировали в дезинтеграторе системы ЦНИИБ при гидромодуле 30 в течение 10 минут и промывали теплой водой.



В ходе эксперимента варьировали продолжительность изотермической варки в диапазоне от 1 до 5 часов, расход (количество, заданное на варку) персульфата натрия – от 2 до 12 % и расход гидроксида натрия – от 0,5 до 3 % от массы бумаги.

Степень роспуска бумаги увеличивалась с ростом каждого из переменных факторов варки, достигая при их максимальных значениях (в пределах изученного факторного пространства) 82...84 %. При этом потери волокна возрастали с 12...13 до 14...15 % и в значительно меньшей степени зависели от условий варки.

Явления «липкости» вторичного волокна ни в одном из опытов отмечено не было.

Результаты измерения белизны вторичного волокна соответствовали известным закономерностям в области теории и технологии отбеливания целлюлозы. Увеличение расхода персульфата натрия, являющегося отбеливающим реагентом, при прочих равных условиях сопровождалось повышением белизны. Увеличение концентрации гидроксида натрия, напротив, приводило к снижению белизны. Диапазон изменения белизны, в пределах изученной области факторного пространства, весьма внушительный – от 84 до 92 %.

Размерные характеристики вторичных целлюлозных волокон измерены на приборе Fiber Tester. Общий вид распределений типичен для размолотых растительных волокон разного происхождения: из древесины и соломы; после сульфатной и пероксидной варок [4,8]. Для длины характерно логнормальное распределение, параметры которого не зависели от условий варок. Распределение ширины волокон близко к нормальному распределению Гаусса. Отмечено небольшое, но статистически значимое увеличение среднечисленной ширины волокон (в среднем на 7,5 %) по мере уменьшения кислотности варочного раствора от pH 2,5...3 (при максимальном расходе персульфата и минимальном – гидроксида) до pH 8...9 (минимум персульфата и максимум гидроксида).

Вторичное волокно изначально имеет худшие бумагообразующие свойства по сравнению с первичным целлюлозным волокном. В процессах производства бумаги размол первичного волокна уже приводит к уменьшению его размеров, а сушка на 20...40 % снижает способность целлюлозного волокна к набуханию из-за его необратимого ороговения. Частичное восстановление бумагообразующих свойств макулатурного волокна происходит при размоле за счет развития его внешней поверхности и фибрилляции [12].



Для сохранения длины волокон используют размалывающее оборудование с гидродинамическим (безножевым) воздействием [6,10].

В нашем исследовании для размола вторичного волокна использована установка типа «струя–преграда» [1]. Струю волокнистой суспензии с концентрацией волокна 1 % под давлением 12 МПа направляли через насадку диаметром 2 мм на преграду на расстоянии 0,1 м от насадки. В ходе эксперимента варьировали продолжительность обработки (отбирали пробы волокна через равные промежутки времени – 140, 280 и 420 с). Изготовление и определение свойств отливок выполнили стандартными методами.

В дополнение к общепринятым свойствам определяли «облачность просвета» отливок – характеристику их однородности. Неоднородная бумага имеет повышенную склонность к короблению, худшие прочностные и печатные свойства [11]. Фотографии отливок в проходящем свете анализировали с помощью программы Sorbfil (ЗАО «Сорбполимер»), предназначенной для денситометрии пятен в тонкослойной хроматографии. Программа производит сканирование изображения выделенного участка просвета бумаги в виде узкой полосы – трека, с построением кривой (в форме «пиков») отклонения оптической плотности пятен в треке от яркости фона. Размер пятна (площадь пика) и его оптическая плотность (высота пика) пропорциональны количеству вещества в пятне [9].

Результаты изучения свойств волокнистой массы и отливок при разной степени помола приведены в табл. 2. Наблюдаемые зависимости в целом соответствуют известной динамике изменения показателей в ходе размола.

Прочностные свойства бумажных отливок соответствуют характеристикам вторичных волокнистых полуфабрикатов из макулатуры, содержащей полимерные компоненты. Остатки полимеров на поверхности волокон препятствуют образованию достаточно прочных межволоконных связей в листе. Следствие этого – низкие показатели сопротивления разрыву, продавливанию и излому, при удовлетворительном сопротивлении раздиранию.

Облачность просвета отливок, изготовленных из вторичного волокна, полученного роспуском невлагостойкой макулатуры, составляла 190...250 единиц. Одной из причин повышенной облачности отливок в обсуждаемом исследовании является, вероятно, наряду с обычной флокуляцией, присутствие в волокнистой суспензии не полностью диспергированных пучков волокон. Косвенным подтверждением этого служит уменьшение показателя облачности по мере увеличения степени помола (табл. 2).



Таблица 2. Характеристики волокнистой массы и отливок из вторичного волокна

Продолжительность размола, с	Степень помола, °ШР	Разрывная длина, м	Сопротивление			Облачность просвета, условные единицы
			излому, ч. д. п.	продавливаю, кПа	раздираю, мН	
0	15	1540	0	48	340	455
140	54	3040	10	114	602	430
280	74	3470	19	135	575	421
420	84	4100	29	145	575	315

Поскольку на реальном предприятии доля вторичного волокна, возвращаемого в производственный поток, невелика (обычно не превышает 0,5 %), этот рецикл не окажет отрицательного влияния на качество производимой продукции, а дополнительные затраты на его реализацию окупятся снижением расхода дорогостоящего хлопкового сырья.

#### Список литературы

1. Алашкевич Ю.Д., Марченко Р.А., Решетова Н.С. Процесс безножевой обработки волокнистой суспензии в установке «струя–преграда» // Химия растительного сырья. 2009. № 2. С. 157163.
2. Ванчаков М.В., Кулешов А.В., Дубовой Е.В., Казаков Я.В., Дубовый В.К. Технология и оборудование переработки макулатуры. 3-е изд., испр. и доп. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2017. 322 с.
3. Ванчаков М.В., Смолин А.С., Канарский А.В. Интенсификация роспуска макулатуры в воде // Вестник Казанского технологического ун-та. 2017. Т. 20. № 16. С. 27–29.
4. Вшивкова И.А., Пен Р.З., Каретникова Н.В. Свойства пероксидной целлюлозы из однолетних растений. Размерные характеристики волокон из пшеничной соломы // Химия растительного сырья. 2013. № 2. С. 37–41.
5. Дубин Н. Бумага, которая защищает. Часть 1. Волокнистый материал для защиты бумаги от подделки. Бумага длительного использования // КомпьюАрт. 2014. № 3. URL: <https://compuart.ru/article/24511>.
6. Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И. Современное состояние и перспективы использования вторичного волокна из макулатуры в мировой и отечественной индустрии бумаги. Архангельск: Изд-во Арханг. технич. ун-та, 2007. 1118 с.
7. Куркова Е.В., Иванов Г.Е. Бумага с повышенной влагонепроницаемостью / В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов». Матер. 1-й Международн. научн.-технич. конф. (Архангельск, 13-17 сентября 2011 г.). Архангельск: ИД САФУ, 2011. С. 207–212.



8. Пен Р.З., Каретникова Н.В., Шапиро И.Л. Пероксидная целлюлоза. Делигнификация растительного сырья пероксосоединениями. Saarbrücken (Deutschland): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 241 с

9. Пен Р.З., Каретникова Н.В., Чендылова Л.В. Измерение облачности просвета бумаги / В сб. «Перспективы развития техники и технологии в целлюлозно-бумажной и лесоперерабатывающей промышленности». Матер. конф. (Пермь, 22–23 апреля 2019 г). Пермь, 2019.

10. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3-х т. Т. I. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 3. Производство полуфабрикатов. СПб.: Политехника, 2004. 316 с.

11. Фляте Д.М. Свойства бумаги. Изд. 5, стереотипное. М.: Экология, 2012. 381 с.

12. Черная И.И., Брянцева З.У. Влияние размола на изменение структуры макулатурных волокон // Целлюлоза. Бумага. Картон. 1993. № 8-9. С. 28–29.



## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ЗЛАКОВЫХ КУЛЬТУР, ПОЛУЧЕННЫХ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ОРГАНОСОЛЬВЕНТНЫМ СПОСОБОМ

**А.В. Вураско<sup>1</sup>, Е.И. Симонова<sup>1</sup>, А.Р. Минакова<sup>1</sup>, В.П. Сиваков<sup>1</sup>, Я.В. Казаков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия

*Приведены данные о структурно-размерных и прочностных характеристиках целлюлозы, выделенной из соломы риса, овса и гречихи окислительно-органо-сольвентной делигнификацией. Целлюлоза из соломы гречихи имеет более высокие прочностные характеристики по сравнению с древесной целлюлозой (сульфитной и сульфатной) и целлюлозой из соломы овса и риса.*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF CELLULITE-THE VINES OF CEREALS, OBTAINED BY THE OXIDATION-ORGANOSOLVENT WAY

**A.V. Vurasko<sup>1</sup>, E.I. Simonova<sup>1</sup>, A.R. Minakova<sup>1</sup>, V.P. Sivakov<sup>1</sup>, Y.V. Kazakov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Ural State Forestry University, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

*Structural-dimensional and strength characteristics of pulp isolated from rice straw, oats and buckwheat by oxidative-organosolvent delignification are given. Cellulose from buckwheat straw has higher strength characteristics in comparison with wood pulp (sulfite and sulfate) and cellulose from straw of oats and rice.*

В условиях истощения сырьевых ресурсов в виде хвойной и лиственной древесины перспективным является расширение сырьевой базы для целлюлозно-бумажной промышленности за счет недревесного растительного сырья в виде соломы. В связи с этим целью работы является сравнительный анализ физических и механических характеристик технической целлюлозы, полученной окислительно-органо-сольвентной делигнификацией из соломы риса, овса и гречихи. Задачи работы: определить фракционный состав и структурно-размерные характеристики целлюлозных волокон; провести микроскопические исследования волокон целлюлозы; определить прочностные характеристики образцов целлюлозы. Методология получения технической целлюлозы представлена в работе [1].

Фракционный состав образцов технической целлюлозы из соломы представлен на рис. 1. Из рис. 1 видно, что образцы характеризуются полидисперсным распределением волокон, причем максимум распределения



смещен в область коротких волокон, а по фракционному составу наблюдается единая закономерность в распределении.

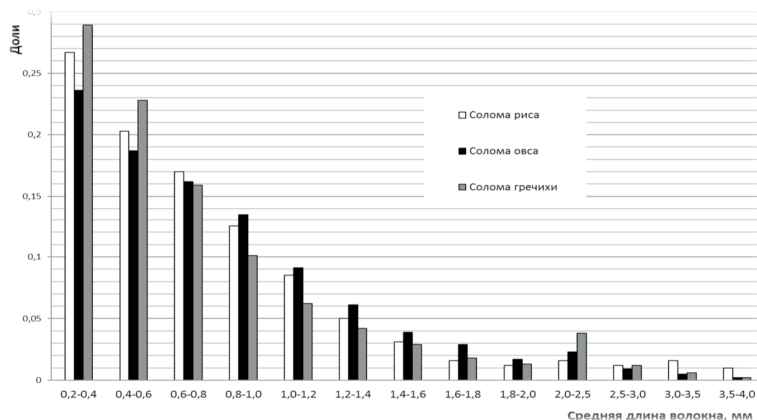


Рис. 1. Фракционный состав образцов технической целлюлозы из соломы

В табл. 1 представлены структурно-размерные характеристики волокон технической целлюлозы.

Таблица 1. Характеристики волокон технической целлюлозы из соломы

Характеристика	Техническая целлюлоза из соломы		
	риса	овса	гречихи
Средняя длина, мм	0,79±0,01	0,83±0,01	0,77±0,01
Средняя ширина, мкм	15,1±0,1	20,2±0,1	24,0±0,1
Средний фактор формы, %	84,7	87,0	87,7
Содержание мелочи, % (<0,2 мм)	37,1	15,4	12,9
Средний угол излома, °	55,6	53,6	51,7
Средняя длина сегмента, мм	0,37	0,66	0,67
Грубость, дГр	54,7	102,3	203,2
Сосудов на 100 000 волокон, шт.	136	732	633
Сосудов на грамм, шт.	14292	74798	30360
Площадь сосудов/объем волокна	0,572	2,407	0,994
Средняя площадь сосудов, мм <sup>2</sup>	0,072	0,093	0,055
Средняя длина сосудов, мм	0,234	0,228	0,204
Средняя ширина сосудов, мм	0,130	0,138	0,145

Согласно полученным данным длина волокон всех видов целлюлозы лежит в интервале 0,79...0,83±0,01 мм, что сопоставимо с длиной волокон лиственной беленой целлюлозы 0,75...0,80 мм [7]. Однако средняя ширина волокон целлюлозы соломы риса в 1,26...1,35 раз меньше, чем лиственной



беленой целлюлозы. Ширина волокон овса и гречихи сопоставимы с листовыми волокнами. Степень искривлённости волокон технической целлюлозы оценивали средним фактором формы [4]. Недеформированные распрямленные волокна характеризуется высоким фактором формы, однако при технологических операциях, таких как отбелка и кислородно-щелочная обработка фактор формы снижается до 83...84 [4]. В условиях поэтапной обработки средний фактор формы волокна технической целлюлозы из соломы риса близок по значениям белой сульфатной целлюлозе, а для целлюлозы из соломы овса и гречихи – к сульфатной небеленой. Средний угол излома (среднее значение всех измеренных изломов) не превышает  $60^\circ$  и соответствует 2 классу. При прочих равных условиях снижение грубости волокон приводит к увеличению прочности бумажного листа [4]. Исследуемые волокна, обладают меньшей грубостью по сравнению с гидротропной целлюлозой из мискантуса [3] и пероксидной целлюлозой из соломы пшеницы [2]. Самое большое количество мелочи содержится в целлюлозе из соломы риса – 37,1 %, затем следует целлюлоза из соломы овса 15,4 %, и меньше всего мелочи содержится в образце целлюлозы из соломы гречихи – 12,9 %. Анализ содержания и характеристик сосудов показывает, что самым большим содержанием сосудов на 100 000 волокон, сосудов на грамм волокон и отношением площади сосудов к объему волокна является целлюлоза из соломы овса, затем, целлюлоза из соломы гречихи. Самыми низкими значениями обладает целлюлоза из соломы риса.

Целлюлоза из соломы риса содержит длинные (0,234 мм) и узкие (0,130 мм) сосуды. Сосуды целлюлозы из соломы гречихи являются короткими (0,204 мм), но при этом широкими (0,145 мм). Целлюлоза из соломы овса имеет среднюю длину (0,228 мм) и ширину (0,138 мм) сосудов. При этом, средняя площадь сосудов наибольшая для целлюлозы из соломы овса (0,093 мм<sup>2</sup>), а наименьшая у целлюлозы из соломы гречихи (0,055 мм<sup>2</sup>), техническая целлюлозы из соломы риса по этому показателю занимает промежуточное значение (0,072 мм<sup>2</sup>).

Анатомические элементы полученной технической целлюлозы из соломы риса, овса и гречихи исследованы микроскопическим способом. Данные представлены на рис. 2–4.

Из представленного рис. 2 видно, что в целлюлозе из соломы риса наряду с тонкими и длинными лубяными волокнами, содержатся различные паренхимные клетки и незначительное количество сосудов. Эпителиальные клетки представлены двусторонними пилками различных размеров со сла-

бовыраженной пильчатостью. При натронной варке клетки эпидермиса делигнифицируются незначительно и увеличивают сорность технической целлюлозы по данным [7], а при органосольвентном способе делигнификации клетки такого типа успешно делигнифицируются и увеличивают выход.

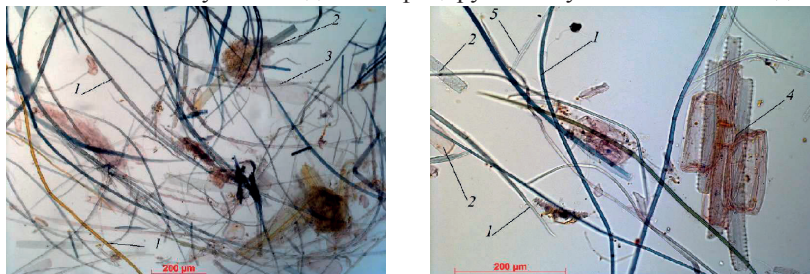


Рис. 2. Анатомические элементы технической целлюлозы из соломы риса:

1 – лубяные волокна; 2 – сетчатые сосуды; 3 – бочковидные паренхимные клетки; 4 – клетки эпидермиса; 5 – клетки эпидермиса в виде двусторонних пиллок со слабовыраженной пильчатостью

На рис. 3 представлены микрофотографии волокон целлюлозы из соломы овса.

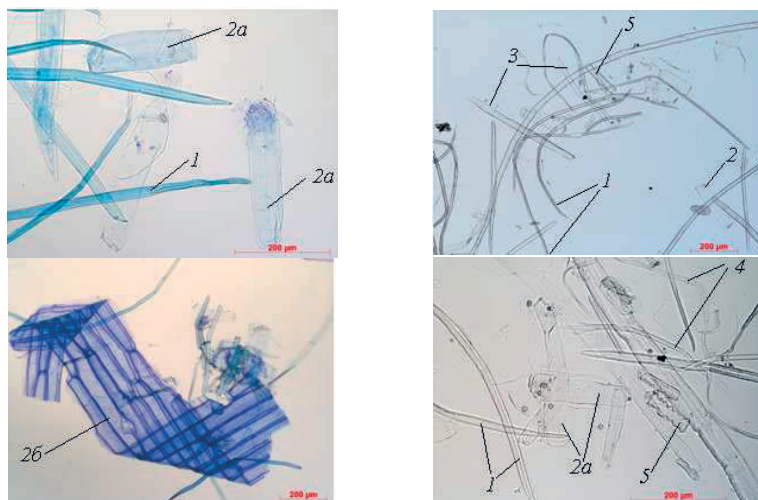


Рис. 3. Анатомические элементы технической целлюлозы из соломы овса:

1 – лубяные волокна; 2 – паренхимные клетки (а – бочковидные; б – длинные); 3 – сетчатые сосуды; 4 – спиральные сосуды; 5 – клетки эпидермиса в виде двусторонних пиллок

Целлюлозная масса (рис. 3) содержит хорошо делигнифицированные лубяные волокна, паренхимные клетки, сетчатые и спиральные сосуды. В небольшом количестве встречаются клетки эпидермиса.

На рис. 4 представлены микрофотографии целлюлозных волокон соломы гречихи.



Рис. 4. Микрофотографии анатомических элементов целлюлозы из соломы гречихи: 1 – лубяные волокна; 2 – паренхимные клетки (длинные); 3 – сосуды (а – спиральные, б – кольчатые); 4 – клетки эпидермиса

Установлено (рис. 4), что целлюлоза из соломы гречихи состоит из большого количества лубяных волокон различной длины и ширины, большого количества длинных паренхимных клеток (бочковидные встречаются в единичных случаях), и сосудов. Сосуды преимущественно спиральные, но встречаются также и кольцевые сосуды. В незначительных количествах обнаружены эпидермальные клетки в виде двусторонних коротких пилкок. В незначительных количествах длинные паренхимные клетки встречаются в виде не сепарированных, соединенных волокон.

Динамика размола целлюлозы до 60 °ШР в лабораторном ролле представлена на рис. 5.

Как следует из рис. 5 общая продолжительность размола до 60 °ШР для технической целлюлозы из соломы риса составляет 8...9 минут; для технической целлюлозы из соломы овса – 7...8 минут; для технической целлюлозы из соломы гречихи – 5...6 минут.

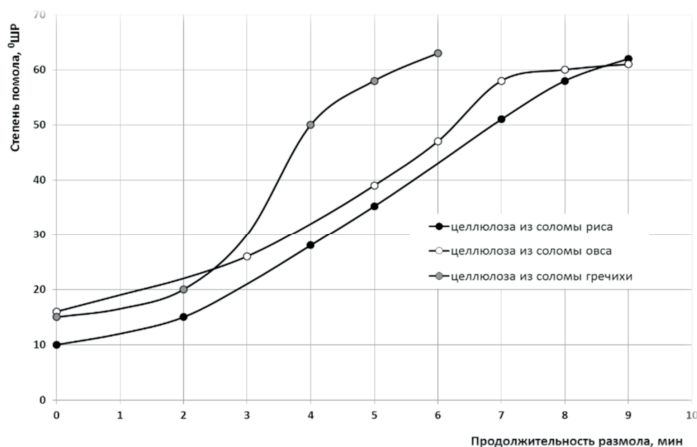


Рис. 5. Зависимость степени помола от продолжительности размола

Согласно литературным данным [7] продолжительность размола до 60 °ШР для целлюлозы из рисовой соломы, полученной натронным способом составляет – 20 минут, овсяной – 40 минут, а пшеничной – 60 минут. Продолжительность размола из соломы овса, полученной моносльфитно-нейтральным способом до 53 °ШР, составляет 20 минут [6]. Характерной особенностью целлюлозы из соломы овса является способность присоединять к себе воду и при размоле желатинизироваться, замедляя процесс размола [6]. При размоле целлюлозы, полученной окислительно-органосольвентным способом, подобных явлений не наблюдается.

Результаты испытаний прочностных характеристик представлены в табл. 2.

Из представленных в табл. 2 данных видно, что образцы технической целлюлозы из соломы риса и гречихи обладают более низкой плотностью по сравнению с сульфатной и сульфитной целлюлозой. Целлюлоза из соломы овса и гречихи имеет относительно высокий показатель разрывной длины, практически в 2...2,5 раза выше, чем у целлюлозы из соломы овса. По показателям сопротивление раздиранию и продавливанию видно, что прочность отдельных волокон выше у целлюлозы из соломы гречихи. Это обусловлено разницей в анатомическом и морфологическом строении (длина волокна, наличие разнообразных сосудов).



Таблица 2. Физические и прочностные свойства технической целлюлозы из соломы и древесины при степени помола 60 °ШР (отливки массой 75,0±2 г/м<sup>2</sup>)

Наименование показателя	Значения показателей целлюлозы				
	риса	овса	гречихи	ГОСТ 3914	ГОСТ 9571
Плотность г/см <sup>3</sup> *, ГОСТ 27015	0,65	0,91	0,76	0,90	0,92
Разрывная длина, м, ГОСТ 1924.1	4200*	8500*	10500*	6500	9000
Соппротивление*					
- раздиранию, мН, ГОСТ 13525.3	160	160	320	330	180
- продавливаню, кПа, ГОСТ 13525.8	160	80	480	–	110
Предел прочности при растяжении*, кгс/см <sup>2</sup>	30,0	80,0	80,0	–	–
Удлинение при растяжении*, %, ГОСТ 1924.1	1,8	3,1	3,2	–	3,0

\* - исследования выполнены в лабораторных условиях

Из полученных данных следует, что наибольшей прочностью обладают образцы целлюлозы из соломы гречихи и овса – по некоторым показателям они превосходят сульфитную и сульфатную целлюлозы.

#### Список литературы

1. Вураско А.В., Симонова Е.И., Минакова А.Р., Манойлович Д.Д. Изучение закономерностей влияния щелочной обработки на свойства органосольвентной целлюлозы из соломы риса // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2018. Вып. 223. С. 228–248.
2. Вшивкова И.А., Пен Р.З., Каретникова Н.В. Свойства пероксидной целлюлозы из однолетних растений. Размерные характеристики волокон из пшеничной соломы // Химия растительного сырья. № 2. 2013. С. 37–41.
3. Денисова М.Н., Сакович Г.В. Исследование физико-химических особенностей целлюлозы и структурно-размерных характеристик волокна, полученных гидротропным способом из легковозобновляемых видов недревесного сырья // В сб. «Материалы и технологии XXI века»: Доклады 4 Всерос. науч.-практич. конф. молодых ученых и специалистов. Бийск, 2015. С. 175–179.
4. Карлссон Х. Гид по волокну. Анализ волокна и его применение в ЦБП. Справочное руководство: пер. с англ. А.М. Кряжев, Lorentzen&Wettr. BOX 4, SE-16493, KISTA, Sweden. 2008. 133 с.
5. Король П.В. Использование соломы в целлюлозно-бумажной промышленности. Використання соломи в целлюлозно-паперовій промисловості // Ліс.ж. 1993. № 2. С. 39–41.
6. Кулев И.Г. Производство соломенной массы. М.: Гослестехиздат. 1933. 48 с.
7. Непенин Н.Н., Непенин Ю.Н. Технология целлюлозы. Т.3 Очистка, сушка и отбелка целлюлозы. Прочие способы получения целлюлозы. М.: Экология. 1994. 592 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАЗМОЛА ВОЛОКНИСТОЙ МАССЫ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГАРНИТУРЫ С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ФОРМОЙ НОЖЕЙ

**В.И. Шуркина, Р.А. Марченко, Ю.Д. Алашкевич**

*Сибирский государственный университет науки и технологии имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия.*

*Подобран оптимальный режим размол волокнистой массы при использовании гарнитуры с криволинейной формой ножей.*

## DETERMINATION OF THE OPTIMUM MODE OF FILM SUSPENSION SIZE WHEN USING THE HEADSET WITH THE CURVOLINEAR FORM OF KNIVES

**V.I. Shurkina, R.A. Marchenko, Yu.D. Alashkevich**

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia*

*Optimum mode of grinding of fibrous mass is selected when using a headset with a curved shape of knives.*

В лаборатории кафедры «Машины и аппараты промышленных технологий» Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева была проведена серия опытов [4]. Размолу подвергалась беленная сульфатная целлюлоза – полуфабрикат РОП ОАО «Группа «Илим» в г. Братске с начальным градусом помола 15 °ШР (Шоппер–Риглера), размол производился в дисковой полупромышленной мельнице.

Для исследования криволинейной гарнитуры при размоле волокнистой массы была спроектирована и изготовлена размольная гарнитура дисковой мельницы [1].

Для определения оптимального режима размол волокнистой массы при использовании гарнитуры криволинейной формы воспользовались универсальным математическим процессором MathCAD. MathCAD позволяет решить поставленную задачу численным методом.

В качестве параметров оптимизации процесса размол были выбраны следующие характеристики: водоудерживающая способность ( $Y_2$ ), среднеарифметическая длина волокна ( $Y_3$ ), разрывная длина ( $Y_5$ ), а также удельный расход электроэнергии ( $Y_7$ ).





Для оптимизации условий функционирования объекта использовались регрессионные модели, полученные в результате реализации многофакторных экспериментальных исследований [5]

Регрессионные модели дают информацию о влиянии варьируемых факторов на выходные величины. Имеется в виду отыскание таких значений варьируемых факторов в интервалах их варьирования, для которых значение выходной величины оказывается максимальным или минимальным [2,3].

Для решения задачи по определению оптимальных параметров процесса размола при использовании гарнитуры с криволинейной формы должны выполняться следующие условия:  $Y_2 \rightarrow \min$ ;  $Y_3 \rightarrow \max$ ;  $Y_5 \rightarrow \max$ ;  $Y_7 \rightarrow \min$ .

Для численного решения задачи поиска локального максимума и минимума в Mathcad имеются встроенные функции Minimize и Maximize. Эти функции реализуют процедуру поиска экстремума функций многих переменных как при наличии, так и при отсутствии ограничений на комбинации последних. В нашем случае, нужно найти максимальное или минимальное значение функции на некотором интервале, поэтому мы накладываем следующие ограничения области поиска в пространстве факторов:

$$\begin{cases} 3 \% \geq X_1 \geq 1 \% ; \\ 0,3 \text{ мм} \geq X_2 \geq 0,1 \text{ мм}; \\ 2000 \text{ об/мин} \geq X_3 \geq 1000 \text{ об/мин}; \\ X_4 = 60 \text{ }^\circ\text{ШР.} \end{cases}$$

В результате решения поставленной задачи были определены оптимальные значения варьируемых переменных для процесса размола волокнистой массы при использовании гарнитуры с криволинейной формой ножей:

- концентрация волокнистой массы  $X_1 = 3 \%$ ;
- зазор между ножами диска ротора и статора  $X_2 = 0,1 \text{ мм}$ ;
- частота вращения ротора  $X_3 = 2000 \text{ об/мин}$ ;
- степень помола волокнистой массы  $X_4 = 60 \text{ }^\circ\text{ШР}$ .

Подставив найденные значения входных факторов в уравнения регрессии получили соответствующие значения исследуемых параметров:

- водоудерживающая способность  $Y_2 = 331,802 \%$ ;
- средняя длина волокна  $Y_3 = 1,509 \text{ мм}$ ;
- разрывная длина  $Y_5 = 9259 \text{ м}$ ;
- удельный расход электроэнергии  $Y_7 = 1,045 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ .





Размол волокнистого материала, проведенный при оптимальных условиях, показал следующие результаты:

- водоудерживающая способность  $Y_2 = 333 \%$ ;
- средняя длина волокна  $Y_3 = 1,47$  мм;
- разрывная длина  $Y_5 = 9251$  м;
- удельный расход электроэнергии  $Y_7 = 1,05$  кВт·ч/т.

Таким образом, теоретические значения данных показателей, рассчитанные по уравнениям регрессии, хорошо согласуются с экспериментальными, что еще раз подтверждает адекватность полученной математической модели процесса размла при использовании гарнитуры с криволинейной формой ножей.

#### Список литературы

1. Пат. 2307883. Российская Федерация, МПК<sup>51</sup> D21D1/30, B02C 7/12. Размалывающая гарнитура / Алашкевич Ю. Д., Ковалев В. И., Харин В. Ф., Мухачев А. П.; заявитель и патентообладатель: Сибир. госуд. технолог. ун-т № 2006110647/12; заявл. 03.04.2006; опубл. 10.10.2007, Бюл. №28. 8 с.
2. Пижурин А.Н. Исследование процессов деревообработки. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 200 с.
3. Пижурин А. А. Оптимизация технологических процессов деревообработки. М.: Лесн. пром-сть, 1975. 312 с.
4. Шуркина В.И. Исследование бумагообразующих свойств волокнистой массы при использовании гарнитуры с криволинейной формой ножей / В.И. Шуркина, Р.А. Марченко, О.Н. Федорова, Ю.Д. Алашкевич/ Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Ч. 2. С. 326 – 327.
5. Шуркина, В.И. Совершенствование ножевого размла волокнистых растительных полимеров в целлюлозно-бумажном производстве: дис...канд. техн. наук: 05.21.03: защищена 30.06.16 / В.И. Шуркина. Красноярск, 2016. 145 с.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРОВ В ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

**Ю.Д. Алашкевич, М.С. Лурье, О.М. Лурье, А.С. Фролов**

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева, Красноярск, Россия*

*В работе рассматривается вопрос исследования формы поперечного сечения тела обтекания вихревых расходомеров, на основные измерительные характеристики приборов. Анализ выполнен с применением метода численного моделирования для тел обтекания, наиболее часто применяющихся в современных вихревых расходомерах.*

## OPTIMIZATION OF HYDRODYNAMIC MODES OF VORTEX FLOWMETERS IN PULP AND PAPER MANUFACTURE

**Yu.D. Alashkevich, M.S. Lurie, O.M. Lurie, A.S. Frolov**

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia*

*The paper deals with the issue of studying the cross-sectional shape of the body around a vortex flow meter, on the main measuring characteristics of the instruments. The analysis is carried out using the numerical simulation method for the flow bodies that are most often used in modern vortex flowmeters.*

Вихревые измерительные приборы (расходомеры) в настоящее время занимают значительную долю рынка всей выпускаемой расходоизмерительной аппаратуры. Данный вид приборов применяется для измерения расхода и объема жидкости в различных технологических операциях целлюлозно-бумажного производства (ЦБП) [1].

Наиболее распространены вихревые расходомеры с телом обтекания (ТО). При этом используемая заводом изготовителем форма ТО во многом определяет параметры расходомера, такие как диапазон работы, стабильность и точность показаний зависящие от числа Струхала ( $Sh$ ).

Поскольку форма ТО имеет большое значение для измерительных характеристик вихревого расходомера мы решили провести сравнительный анализ ТО с разным поперечным сечением (рис. 1) и одинаковыми характеристическими размерами.

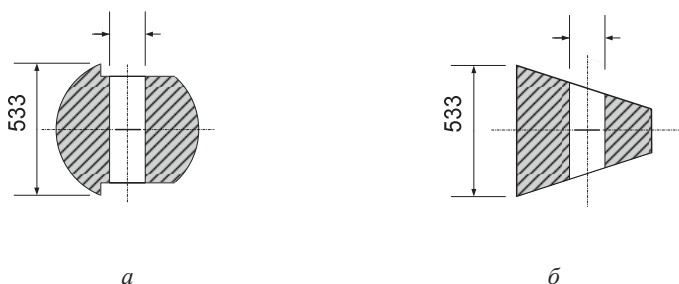


Рис. 1. «Поперечные сечения исследуемых тел обтекания»: *а* – ТО «Фотон»; *б* – ТО «Трапедия»

Для проведения сравнительного анализа ТО вихревых расходомеров выберем два их вида: один на основе цилиндра; другой – на основе трапеции. Характерные размер всех исследуемых тел были взяты одинаковыми ( $d = 26,533$  мм) с шириной канала обратной связи 10 мм. Канал обратной связи (КОС) стабилизирует вихреобразование [2].

Для выполнения исследования мы воспользовались методом численного моделирования с помощью программы Comsol Multiphysics. Это мощная интерактивная среда для моделирования и решения научных и технических проблем, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных поддерживающая конечно-элементную технологию вместе с адаптивным построением сетки и контролем ошибок при работе с различными численными решателями [3]. Данное программное обеспечение позволяет моделировать самые различные задачи гидродинамики, в том числе задачи о ламинарном и турбулентном течении различных жидкостей. Подобный подход к решению гидродинамических задач был описан в работе [4].

Все исследования ТО проводились с измерительным участком трубопровода диаметром  $D = 80$  мм при числах Рейнольдса ( $Re$ ) равных: 300; 600; 1200; 2500; 5000; 10000 и 20000.

Результатами постпроцессорной обработки данных численного эксперимента являлись:

- зависимость числа Струхалия ( $Sh$ ) для каждого ТО от числа  $Re$  в исследуемом диапазоне;
- величина отклонения  $Sh$  от его среднего значения для каждого ТО в рабочем диапазоне.



Для каждого значения числа  $Re$  определяем среднее значения периода вихреобразования  $T_{cp}$  на интервале усреднения, по которому согласно (1) находится число  $Sh$ .

$$Sh = \frac{d}{V \cdot T_{cp}} \quad (1)$$

где  $V$  средняя скорость потока в сечении трубопровода, в котором установлено тело обтекания, м/с.

Для каждого ТО находим среднее значение числа  $Sh_{cp}$  в рабочем диапазоне ( $5000 \leq Re \leq 20000$ ). Отклонение от среднего значения  $\Delta Sh, \%$  определяется из выражения (2). Данные расчетов приведены на рис. 2.

$$\Delta Sh, \% = \frac{Sh_{cp} - Sh}{Sh_{cp}} \quad (2)$$

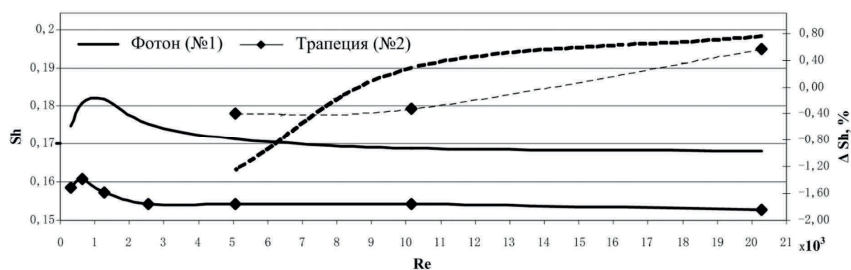


Рис. 2. График зависимости  $Sh = f(Re)$  и  $\Delta Sh, \% = f(Re)$

Из графиков рис. 2 следует, что характер изменения числа  $Sh$  имеет общий характер для всех форм ТО, в тоже время в рабочем диапазоне число  $Sh$  меняется наименьшим образом у ТО №2 (Трапеция). Данное особенность объясняется постоянством характеристического размера ТО, который определяется размером передней грани трапеции.

Для ТО № 1 из-за плавного обтекания участка предназначенного для срыва вихря, а также пониженного давления на входе в КОС, вихрь на малых скоростях начинает формироваться дальше по потоку, при этом эквивалентный характеристический размер ТО становится меньше геометрического. При увеличении скорости точка формирования вихря смещается вперед по потоку на острую грань ТО, при этом характеристический размер приближается к геометрическому размеру, что так же снижает число  $Sh$ .



Для ТО № 2 на малой скорости потока вихрь образуется рядом с острой входной гранью трапеции. При увеличении скорости, точку образования вихря сворачивания вихря выносит в стороны, за пределы передней грани ТО, что вызывает увеличение числа  $d$ , а следовательно снижение числа  $Sh$ . Поскольку данный эффект не большой, то изменение числа Струхаля для данного ТО самые незначительные.

Указанные выше особенности ТО говорят о том, что все их формы могут быть использованы на практике, а выявленные нами особенности позволяют более эффективно использовать рассматриваемые ТО, которые широко применяются в различных вихревых расходоизмерительных приборах на технологических линиях ЦБП.

#### Список литературы:

1. Алашкевич Ю.Д., Лурье М.С., Лурье О.М., Фролов А.С. Достоверность мониторинга оборотных вод целлюлозно-бумажного производства с помощью погружных вихревых расходомеров // Химия растительного сырья. 2017. №3. С. 185–191.
2. Лурье М.С., Лурье О.М. Тела обтекания вихревых расходомеров // Датчики и системы. 2008. №10. С. 21–23.
3. Шмелев В.Е. Femlab 2.3. Руководство пользователя. М.: Диалог-МИФИ, 1999. 442 с.
4. Богданов В.Д., Конюхов А.В., Кривоногов А.А., Сафонов Е.В., Дорохов В.А. Использование численных методов моделирования при разработке вихревых расходомеров // Датчики и системы. 2012. № 8(159). С. 40–43.



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ В КАЧЕСТВЕ СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ ВИДОВ БУМАГИ

**В.К. Дубовый, Н.А. Криницин, Г.А. Суслов**

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия*

*В данной статье рассматриваются вопросы использования минеральных волокнистых полуфабрикатов в качестве сырья для производства технических видов бумаги и композиционных материалов на их основе.*

## USE OF MINERAL FIBROUS SEMI-FINISHED PRODUCTS AS A RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF TECHNICAL TYPES OF PAPER

**V.K. Dubovy, N.A. Krinitsin, G.A. Suslov**

*Saint Petersburg State University of Technology and Design, Saint Petersburg, Russia*

*This article discusses the use of mineral fiber semi-finished products as a raw material for the production of technical types of paper and composite materials based on them.*

**Введение.** Современный уровень развития техники вызывает необходимость создания новых материалов, которые должны обладать особыми, не присущими природным материалам свойствами. Разработка наукоемких инновационных материалов на основе минеральных волокон и изделий из них является одной из приоритетных задач технологического и экономического развития России. Среди минеральных волокон особый интерес представляют стеклянные волокна и изделия из них. Стеклянные волокна находят все большее применение в различных отраслях промышленности [1]. Стекловолоконные композиты обладают такими ценными свойствами как – негорючесть, устойчивость к агрессивным средам, электро-, тепло- и звукоизоляционные свойства, стойкостью к биологическому воздействию. На основе данных волокон существует возможность получения композиционных материалов специального назначения.

**Экспериментальная часть.** В связи с большим количеством имеющихся у минеральных волокон свойств, области применения композитов на их основе так же охватывают различные виды промышленности и бытового применения. Материалы, изготовленные из микротонких и нанотонких стеклянных волокон марок НТВ 0,10, МТВ 0,25, МТВ 0,40, МТВ 0,60 обладают высокой капиллярной впитываемостью [2], что позволяет использовать



их в качестве основы для аппаратов охладительного типа [3]. Еще одним преимуществом минеральных волокон является устойчивость к биологическому воздействию и агрессивным средам. Этот фактор придает производимому материалу долговечность и возможность использования его в качестве фильтровального материала [4]. Так же при добавлении в композицию различных сорбентов, в качестве наполнителя они могут иметь применение в качестве сорбционных материалов, в частности для разделения воздушных систем, улавливания летучих органических соединений. Это связано с высокой термостойкостью производимого и, при использовании в качестве связующего полиядерных комплексов поливалентных металлов, высоким удержанием, что очень важно при добавлении в композицию в качестве сорбентов с частицами меньше микрометра. Так же полиядерные комплексы поливалентных металлов в качестве связующего придают материалу приемлемую технологическую прочность материалу [5], для использования в качестве сорбционного.

Механические свойства стеклянных и базальтовых волокон во многом определяют возможность их применения в качестве наполнителя для композитных материалов. Влияние отдельных компонентов на механические свойства изучено недостаточно.

Механические характеристики волокон определяют на основании эксперимента на разрыв. Разрывное напряжение ( $\sigma$ ) для элементарных нитей вычисляют по формуле

$$\sigma = \frac{4P \cdot 10^4}{\pi d^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – разрывное напряжение, МПа,  $P$  – разрывная нагрузка, сН,  $d$  — диаметр элементарной нити, мкм. Модуль упругости определяют на основе анализа кривой напряжение/деформация

Химический состав базальтов и температурные интервалы получения волокон некоторых месторождений (масс. %) представлен в табл. 1.

Достоверно известно, что диаметр волокна и длина рабочей базы влияют на абсолютное значение прочности волокна, рассчитанное на основании эксперимента.

Базальтовые волокна близки по своим свойствам к стеклянным волокнам на основе стекла Е, но заметно уступают высокопрочным стеклянным волокнам (S-стекло) и углеродным волокнам. На основании данных табл. 2



можно сделать вывод, что прочность базальтовых волокон уменьшается с увеличением длины базы.

Таблица 1. Механические свойства минеральных волокон

№	Месторождение	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	R <sub>2</sub> O
1	Берестовецкое	50,0	0,65	16,25	14,55	9,35	5,0	1,7
2	Хавчозерское	49,2	1,2	13,9	12,4	9,8	7,4	3,0
3	Марнеульское	52,1	0,9	15,07	10,45	6,56	10,42	1,4
4	Кировское	58,9	0,95	17,3	8,9	2,33	6,54	5,22
5	Сельцевское	55,6	0,66	19,4	7,5	3,84	7,91	3,42
6	Кривой Рог	54,6	0,2	13,3	10,9	5,56	4,44	3,4
7	Подгорнянское	52,8	1,17	18,14	10,4	3,72	8,44	3,61
8	Тальное	48,5	-	16,0	16,5	6,0	9,5	2,5
9	Исачковское	47,3	0,9	16,2	13,5	5,3	13,4	3,1
10	Камышевахское	46,1	3,9	13,9	13,0	5,1	6,2	5,9

№	Месторождение	T <sub>н.пл</sub>	T <sub>к.пл</sub>	T <sub>в.п.к.</sub>	Вязкость при температуре, °С					Интервал выработки °С
					1450	1400	1350	1300	1250	
1	Амфиболиты Кривого рога	1175	1350	1230	92	166	270	460	855	1340-1450
2	Диабазы Салтичия	1200	1450	1250	76	135	246	565	1150	1370-1450
3	Амфиболиты Степанцы	1180	1370	1250	96	165	300	530	1050	1360-1450
4	Амфиболиты Горিশнеплавнянское	1170	1350	1240	136	204	380	680	1230	1350-1450
5	Андезито-базальты Подгорнянское	1165	1375	1240	155	220	490	945	1800	1370-1450
6	Андезито-базальты Сельцевское	1165	1400	1230	150	275	500	1000	2000	1390-1450
7	Андезито-базальты	1150	1350	1240	100	170	305	620	1240	1360-1450

Механические свойства различных видов стеклянных волокон и углеродного волокна.





Таблица 2. Зависимость механических свойств базальтовых волокон от длины

	Базальт	Базальт	Е-стекло
Длина базы, мм	100	25	100
Модуль упругости, ГПа	$87,1 \pm 2,3$	$84,2 \pm 1,7$	$76,2 \pm 1,7$
Прочность, МПа	$1371,49 \pm 123,49$	$2245,3 \pm 126,8$	$1547,7 \pm 155,9$
	Базальт	Углеродное	S-стекло
Прочность, МПа	992,4	3528,1	1798,3
Модуль упругости, ГПа	76	-	-
Удлинение до разрыва, %	2.56	-	-

Механическая прочность базальтовых волокон в значительной степени сохраняется даже после термической обработки

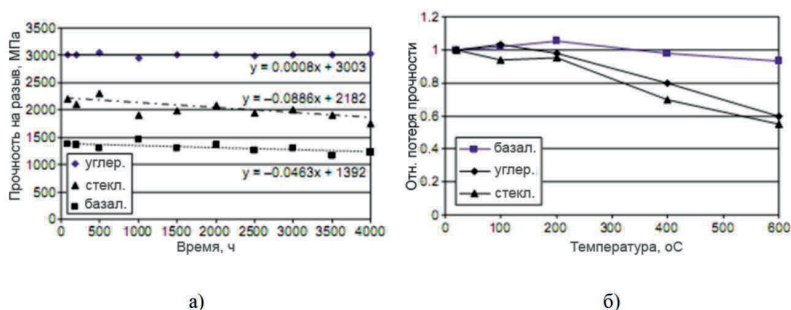


Рис. 1. Прочность волокон при их старении, потеря прочности после термической обработки в течение 2 часов: *а* – зависимость прочности на разрыв от времени, *б* – зависимость относительной потери прочности от температуры

Существует предположение о механизме разрушения волокон. Установлено, что характер разрушения волокна при растяжении определяют следующие факторы: – разрыв волокна реализуется на дефектах критического размера; – дефекты распределены случайным образом по всей длине волокна; – вероятности разрушения в различных местах волокна независимы.

#### Список литературы

1. Дубовый В.К. Стекланные волокна. Свойства и применение. СПб.: Нестор, 2003. 130 с.
2. Дубовый В.К. Бумагоподобные композиционные материалы на основе минеральных волокон: дис. д-ра техн. наук. СПб., 2006. 370 с.



3. Щербак Н.В., Дубовой Е.В., Лоренгель М.А., Смолин А.С. Моделирование композиции сепараторной бумаги из минерального и растительного сырья для повышения прочности и впитывающей способности // Лесн. журн. 2018. № 1. С. 120–129.

4. Дубовый, В. К. Фильтровальные материалы на основе минеральных волокон для сверхтонкой очистки газовоздушных сред // кандидатская диссертация – СПб.: СПбГЛТА, 1998 г.

5. Безлаковский А.И., Дубовый В.К., Сысоева Н.В., Коваленко В.В. Связеобразование в системе «минеральное волокно–минеральное связующее» // Материалы XIX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Волгоград, 2011. С. 32.



## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА ПОЛИЭЛЕКТРОЛИТНОГО КОМПЛЕКСА АЛЬГИНАТ НАТРИЯ – ХИТОЗАН НА ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК НА ЕГО ОСНОВЕ

Н.А. Горшкова<sup>1</sup>, О.С. Бровко<sup>1</sup>, К.Г. Боголицын<sup>1,2</sup>, И.А. Паламарчук<sup>1</sup>,  
Я.В. Казаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова РАН, Архангельск, Россия

<sup>2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия

*Получены пленочные материалы на основе интерполиэлектродитного комплекса альгинат натрия-хитозан с введением в композицию целлюлозы и без введения. Показано, что зависимость прочностных характеристик полученных пленок от молекулярной массы хитозана для обеих композиций носит экстремальный характер при 200 кДа. Предложен способ использования полученных мембран в качестве носителей лекарственных препаратов.*

## INFLUENCE OF SYNTHESIS CONDITIONS OF THE POLYELECTROLYTE COMPLEX ALGINATE-CHITOSAN ON THE DEFORMATION AND STRENGTH ATTRIBUTES OF THE FILMS ON ITS BASIS

A.N. Gorshkova<sup>1</sup>, O.S. Brovko<sup>1</sup>, K.G. Bogolitsyn<sup>1,2</sup>, I.A. Palamarchuk<sup>1</sup>, Y.V. Kazakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Arkhangelsk, Russia

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

*Film materials based on the interpolyelectrolyte complex alginate-chitosan both with and without cellulose were obtained. It was shown that the dependence of the strength characteristics of the films on the molecular weight of chitosan is of an extreme nature with maximum at 200 kDa. The method for using the obtained films as drug carriers is proposed.*

В последние годы в современных технологиях востребованы полимерные материалы нового поколения, которые обладают определенными физико-химическими свойствами. Особое внимание исследователей привлекают материалы на основе интерполиэлектродитных комплексов (ИПЭК), благодаря способности к изменению состава, структуры и свойств в зависимости от природы полиэлектродитов (ПЭ) [1], а также условий проведения интерполимерных реакций, что позволяет синтезировать на их основе материалы с заданными свойствами. Важную роль при этом играет направленный выбор соответствующих пар ПЭ для создания ИПЭК. Осо-



бый интерес в этом плане, благодаря таким свойствам как биосовместимость, физиологическая активность при отсутствии токсичности, доступность и возобновляемость сырьевых источников, биодеструкция, представляют природные полимеры, из которых предпочтение отдается полисахаридам альгинату натрия (АЛNa) и хитозану (ХТ).

Целью настоящей работы является изучение влияния условий синтеза ИПЭК АЛNa-ХТ на деформационно-прочностные характеристики пленок на его основе.

Для получения полимерных пленок применяли АЛNa с молекулярной массой (ММ) 70 кДа и ХТ с ММ 30, 50, 100, 200, 330, 500 кДа. Пленочные композиции получали смешением растворов АЛNa и ХТ с концентрацией 2,5 г/л при эквимолярном соотношении компонентов. Пленки готовили с введением целлюлозы в композицию и без добавления целлюлозы. Водную суспензию целлюлозы (концентрация 10 г/л), волокна которой обладают большой длиной и повышенной прочностью, вводили в количестве 45 %, как было установлено раньше, для улучшения механических характеристик пленок на основе ИПЭК АЛNa-ХТ [2]. Полимерную композицию перемешивали на магнитной мешалке и разливали в пластиковые формы. Сушку пленок проводили при постоянной влажности и комнатной температуре.

Изучение деформационно-прочностных свойств пленок проводили на лабораторном испытательном комплексе, включающем разрывную машину Тестсистема-101 (г. Иваново) и ПЭВМ, с получением индикаторной диаграммы нагрузка – удлинение ( $F-\Delta l$ ) при статических испытаниях на растяжение. Длина образцов составляла 50 мм, ширина – 25 мм, скорость испытания – 10 мм/мин.

Известно, что физико-химические характеристики и структура применяемых ПЭ могут оказывать существенное влияние на интерполимерную реакцию, и как следствие на параметры пленок, получаемых на их основе [3,4]. Комплексообразование между АЛNa и ХТ происходит по механизму электростатического взаимодействия между противоположно заряженными функциональными группами ПЭ, а свойства образующихся ИПЭК существенно зависят от зарядовой композиции смеси. Для создания пленок использовали ИПЭК эквимолярного состава, поскольку при таком соотношении образуется максимальное число ионных связей, и пленки, образованные на основе ИПЭК такого состава, обладают наибольшей прочностью [2,4,5]. При этом, ХТ оказывает структурирующее действие на формирование комплексов, и как следствие на упорядочение структуры комплексов. Поэтому

нами было изучено влияние ММ ХТ на прочностные свойства пленок. Результаты представлены на рис. 1.

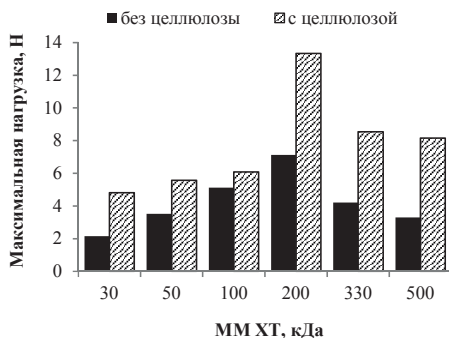


Рис. 1. Влияние ММ ХТ на растяжение образцов пленок АЛNa-ХТ

Пленки на основе низкомолекулярного ХТ (30...100 кДа) обладают низкими показателями прочности. Наиболее высокими прочностными свойствами обладают образцы пленок с ММ ХТ 200 кДа. Максимальная нагрузка для данных образцов в 3 раза выше по сравнению с образцами пленок с ХТ 30 кДа. При увеличении ММ ХТ до 500 кДа наблюдается незначительное снижение прочности образцов, что, возможно, связано с ассоциацией макромолекул ХТ в растворе.

При введении целлюлозы в композицию пленок АЛNa-ХТ наблюдается аналогичная зависимость. Кроме того, введение целлюлозы в композицию приводит к увеличению толщины пленок и соответственно к возрастанию прочности образцов пленок АЛNa-ХТ в два раза, что обусловлено образованием самостоятельной армирующей сетки из волокон целлюлозы (рис. 2).

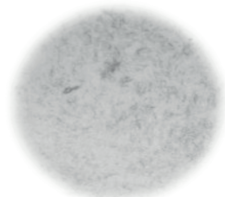


Рис. 2. ХТ Фотографии просвета пленок АЛNa-ХТ с целлюлозой

На рис. 3 приведены диаграммы нагрузка-удлинение, полученные при испытании пленок АЛNa-ХТ на растяжение.

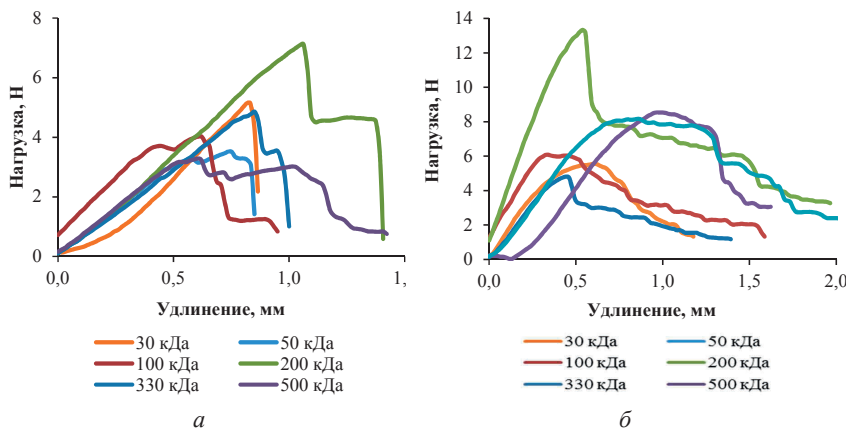


Рис. 3. Диаграммы нагрузка-удлинение, полученные при испытании на растяжение образцов пленок АЛNa-ХТ: *а* – без целлюлозы; *б* – с целлюлозой

Из представленных на рис. 3 данных видно, что для всех образцов пленок характерно хрупкое разрушение. При этом, для пленок АЛNa-ХТ с целлюлозой наблюдается снижение относительного удлинения при разрыве, что связано с высокой жесткостью пленок с целлюлозой.

Таким образом, показано, что зависимость прочностных характеристик пленок АЛNa-ХТ от ММ полимера ХТ имеет экстремальный характер при ММ ХТ 200 кДа. Введение целлюлозы в композицию приводит к увеличению толщины пленки, повышению прочности и снижению ее растяжимости. Необходимо отметить, что для максимальной эффективности использования полученных пленок, в зависимости от назначения путем варьирования состава композиции можно получить пленки с требуемыми характеристиками.

Благодаря удовлетворительным показателям эластичности и биосовместимости, полученные пленки АЛNa-ХТ могут быть использованы в качестве носителей лекарственных веществ для создания раневых покрытий.

В композицию пленки вводили антибиотик – левомицетин (ЛЦ) и проводили эксперимент по его десорбции из пленочного носителя (рис. 4).

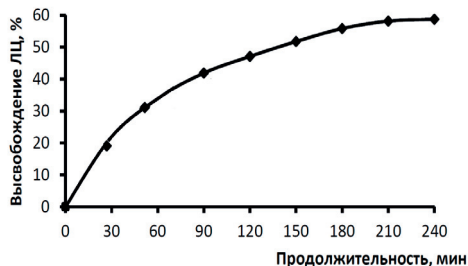


Рис. 4. Динамика высвобождения ЛЦ из пленки на основе ИПЭК АЛNa-ХТ

Для всех образцов происходит продолжительное высвобождение ЛЦ в течение 4 часов, которое составляет 60 %. Такая продолжительность высвобождения левомицетина из мембраны позволяет равномерно доставлять лекарство и открывает перспективы для использования полученных пленок на основе ИПЭК АЛ-ХТ для создания раневых повязок с пролонгированным дозированным выделением лекарственного вещества.

#### Список литературы

1. Brovko O.S., Palamarchuk I.A., Boitsova T.A., Bogolitsyn K. G., Valchuk N. A., Chukhchin D.G. Influence of the conformation of biopolyelectrolytes on the morphological structure of their interpolymer complexes // *Macromolecular Research*, 2015. Vol. 23. №. 11. P. 1059–1067.
2. Вальчук Н.А., Бровко О.С., Бойцова Т.А., Паламарчук И.А., Казаков Я.В., Боголицын К.Г. Физико-механические свойства пленочных материалов на основе альгината натрия и хитозана / В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов»: матер. IV Междунар. науч.-техн. конф. Архангельск: САФУ, 2017. С. 216–220.
3. Colten H., Berth G., Dautzenberg H. Hydrodynamic studies on chitosans in aqueous solutions // *Carbohydrate Polymers*. 2001. V.45. P. 373–383.
4. Brovko O., Palamarchuk I., Valchuk N., Bogolitsyn K., Chukhchin D., Boitsova T. Gels of sodium alginate-chitosan interpolyelectrolyte complexes // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2017. Vol. 91. №. 8. P. 1580–1585.
5. Бровко О.С., Паламарчук И.А., Вальчук Н.А., Чухчин Д.Г., Боголицын К.Г., Бойцова Т.А. Деформационно-прочностные свойства композиционных мембран на основе биополиэлектrolитных комплексов // *Химические волокна*. 2015. № 4. с. 45–52.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПЛОТНОСТИ БУМАГИ

**Е.В. Куркова, О.С. Мартянова, К.С. Архипов, Г.Е. Иванов**

*Научно-исследовательский институт – филиал Акционерного Общества «Гознак»,  
Москва, Россия*

*В последние годы получило развитие производство бумаги с низкой плотностью, так называемой «пухлой» бумаги. Отличительной особенностью данной бумаги является сохранение толщины и основных потребительских характеристик при пониженной плотности [1]. Сохранение толщины листа при снижении веса  $1 \text{ м}^2$  является важным экономическим показателем. Бумага сохраняет требуемую жесткость [2], а изделие из такой бумаги – необходимую функциональность при значительной экономии волокнистого сырья.*

### USING ORGANIC FILLERS TO REDUCE PAPER DENSITY

**E.V. Kurkova, O.S. Martyanova, K.S. Arkhipov, G.E. Ivanov**

*Research Institute – Branch of Goznak Joint-Stock Company, Moscow, Russia*

*In recent years, the production of low-density paper, the so-called “puffy” paper, has developed. A distinctive feature of this paper is the preservation of thickness and basic consumer properties at low density [1]. Preserving the thickness of the sheet while reducing the weight of  $1 \text{ m}^2$  is an important economic indicator. Paper retains the required rigidity [2], and a product made from such paper - the necessary functionality with significant savings in fibrous raw materials.*

В последние годы за рубежом получило развитие производство бумаги с низкой плотностью, так называемой «пухлой» бумаги. Её отличительной особенностью является сохранение толщины при пониженной массе  $1 \text{ м}^2$  (рис. 1), что позволяет сохранить жесткость бумаги на требуемом уровне [1], а изделию необходимую функциональность.

Снижение плотности бумаги возможно различными способами. Например, использованием определенного вида полуфабрикатов с пониженной способностью к связеобразованию (древесная масса, искусственные и синтетические волокна), либо соответствующим ведением технологического процесса размала полуфабрикатов [3]. Для получения бумаги с пониженной плотностью режим работы размалывающего оборудования с минимальным укорочением волокон. Чем больше длина волокон, тем более пухлой получается бумага. Увеличению пухлости бумаги будут способствовать





специальные добавки при размоле, которые частично блокируют гидроксильные группы целлюлозы, препятствуя образованию межволоконных связей [4]. Повысить пухлость бумаги также можно изменением режимов прессования и сушки на бумагоделательной машине. Отжатые валы прессовой части и форсированная сушка в первой сушильной группе обеспечивают разрыхление структуры бумажного полотна.

Однако вышеуказанные способы снижения плотности неприемлемы при изготовлении бумаги для документов. Особенности процесса подготовки бумажной массы для отлива бумаги с водяными знаками обуславливают получение бумажного полотна с повышенной плотностью и уменьшенной впитывающей способностью. При этом различие в плотности на разных участках бумажного листа приводит к неравномерному впитыванию красок и локальному отмарыванию изображений на оборотную сторону оттиска, особенно в месте расположения темных элементов водяного знака [5].

Регулирование впитывающих характеристик возможно за счет введения в композицию бумажной массы наполнителей. Помимо экономических предпосылок, наличие наполнителя в бумажной массе оптимизирует её пористость и сорбционные характеристики, что благоприятно для впитывания красок при печати в несколько прогонов [4]. Очень важно на данном этапе сохранение плоскостности и нейтрализация способности к скручиваемости, что также возможно при добавке минеральных наполнителей [6]. Однако частицы минерального наполнителя способствуют снижению физико-механических характеристик бумаги.

Среди инновационных продуктов фирмы Akzo Nobel следует выделить расширяющиеся при нагревании полимерные микросферы «Expancel®» (далее – микросферы), которые используются в производстве бумаги высокого качества в целях увеличения её объема и снижения веса продукции. Микросферы «Expancel®» очень малы по размеру, инертны и не принимают участия в связеобразовании бумажного листа, поэтому условно их можно назвать «органическими наполнителями». При введении в состав бумаги до 1 % микросфер, объем и толщина бумаги увеличиваются на 18 % [1,7]. Одновременно улучшаются условия отлива – ускоряется водоотдача, облегчается удаление влаги на стадии прессования и сушки – понижается энергоемкость отлива бумаги.

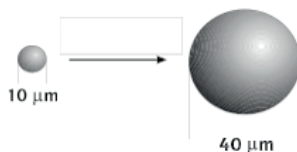


Рис. 1. Изменение диаметра полимерных микросфер «Expancel®» в процессе нагрева

Низкая плотность микросфер «Expancel®» даже в незначительной дозировке ведет к уменьшению веса продукции (рис. 1). Увеличение толщины позволяет повысить жесткость бумаги при постоянной массе  $1 \text{ м}^2$  и сохранить на более низком уровне эксплуатационные характеристики потенциального изделия.

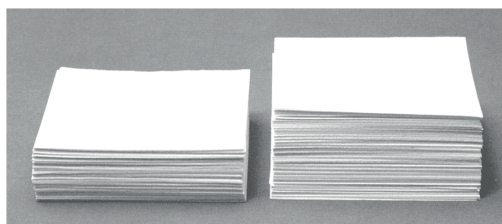


Рис. 2. Использование полимерных микросфер «Expancel®» для снижения плотности бумаги

Поэтому использование полимерных микросфер «Expancel®» для документной бумаги можно считать актуальным. Пример использования органических наполнителей – полимерных микросфер «Expancel®» в композиции бумаги для печати документов показан на рис. 3.

Для улучшения условий введения микросфер в волокнистую композицию бумаги для документов использовали добавку микрокристаллической целлюлозы (далее – МКЦ) торговой марки «Arbocell». Добавка микросфер с МКЦ увеличивают толщину бумаги на 20 % (рис. 3а).

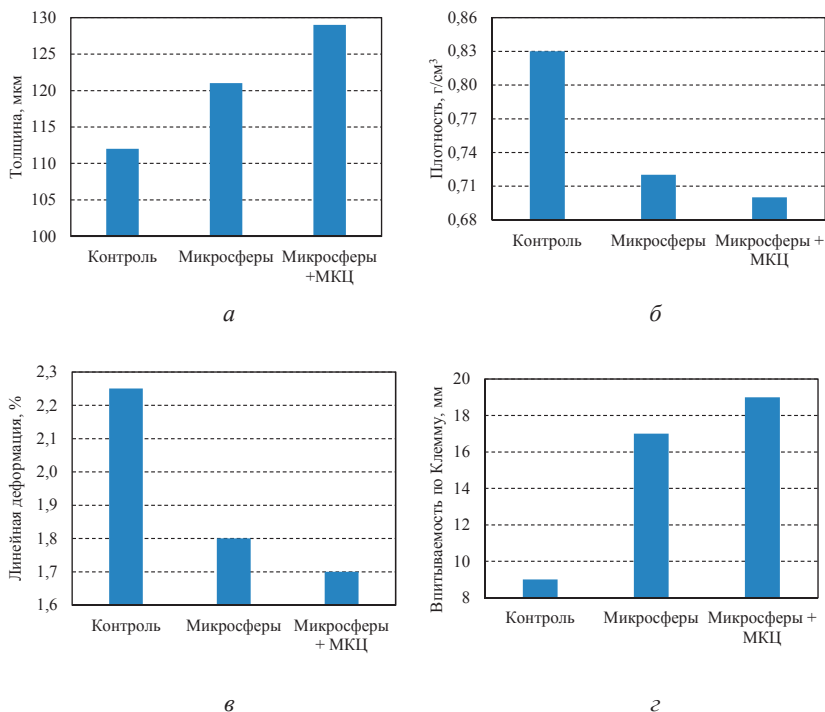


Рис. 3. Изменение качественных показателей бумаги при добавке микросфер «Expancel®» а – толщина, мкм; б – плотность, г/см<sup>3</sup>; в – линейная деформация, %; г – впитываемость по Клемму, мм

Одновременно изменились характеристики бумажного листа, зависящие от толщины, а именно: плотность; впитывающие свойства и деформационные характеристики (рис. 3б, 3в, 3г).

Следует отметить, что использование органических наполнителей в композиции бумаги (рис. 3в) способствует уменьшению линейной деформации бумаги, очень важном показателе для печати, влияющем на совмещение специальных защитных графических структур при многопроходной печати бланков ценных бумаг и документов.

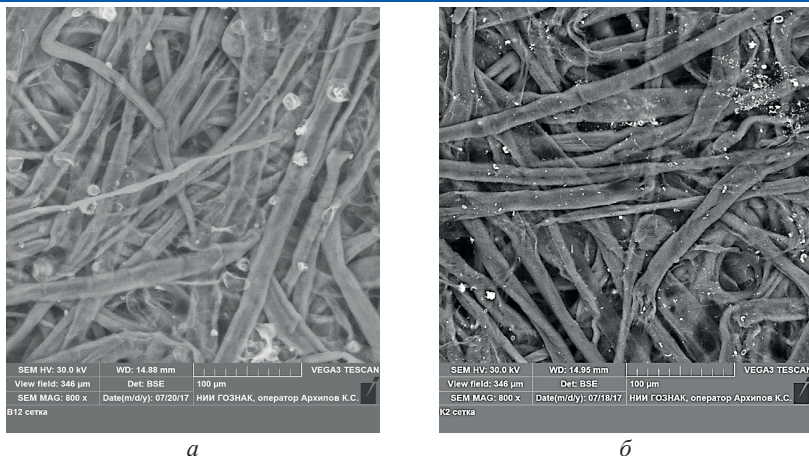


Рис. 4. Микрофотография поверхности бумажного полотна с добавками органических микросфер (а) и минеральным наполнителем (б)

Таким образом, добавка микросфер в композицию бумаги способствует снижению плотности бумаги, её деформации и увеличению впитывающих свойств. В качестве побочного положительного эффекта показана возможность увеличения детализации элементов рисунка водяных знаков для документной бумаги (рис. 5).



Контроль



С добавкой микросфер «Exrancel®»

Рис. 5. Негативные изображения водяного знака на бумаге с добавками органических наполнителей

Для обнаружения влияния органических наполнителей на жесткость бумаги были получены деформационные кривые на изгиб для образцов

в поперечном направлении. Жесткость определяли на приборе для определения сопротивления изгибу (модель К 416). Для оптимизации результатов проводили испытания на усилие изгиба (в Н) для документной бумаги с различным композиционным составом при различных углах изгиба (рис. 6).

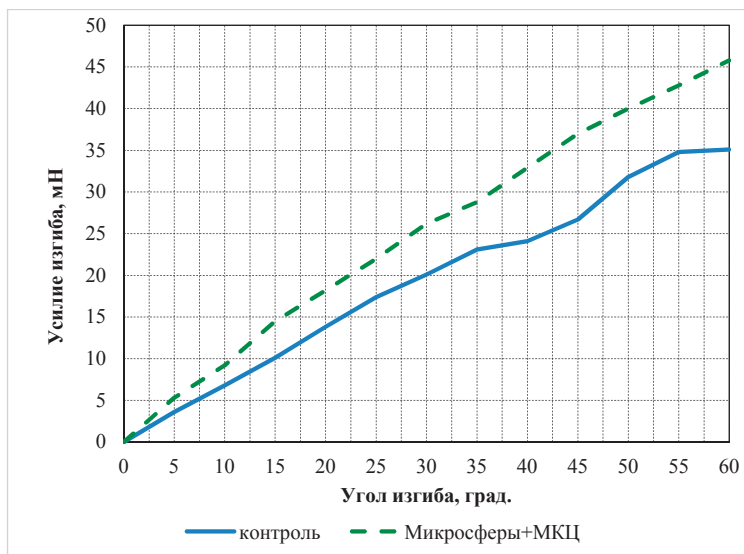


Рис. 6. Значения усилия изгиба при различных углах изгиба в поперечном направлении бумаги с добавками полимерных микросфер

Из полученных данных следует, что добавка полимерных микросфер «Exrapcel®» способствует увеличению усилия изгиба на 15...20 % по сравнению с контрольным вариантом (бумажное полотно без использования полимерных микросфер «Exrapcel®»). Фактическое увеличение жесткости бумажного полотна благоприятно влияет на эксплуатационные характеристики бланка документа, изготовленного на данной бумаге и позволит сохранить функциональные характеристики бумаги, в том числе толщину и жесткость при изгибе, при пониженной массе  $1 \text{ м}^2$ . Увеличение жесткости при изгибе и впитывающих свойств бумаги-основы оказывает положительное влияние на печатные и эксплуатационные свойства бумаги для документов, в том числе на сохранение формы бланков в процессе их запечатывания и обращения.



Таким образом, показана возможность использования полимерных микросфер «Expancel®» для уменьшения плотности бумаги для документов. Помимо реальной экономии волокнистого сырья и расширения сырьевой базы, получаем дополнительный эффект в повышении детализации элементов водяного знака и увеличения жесткости бумаги для документов.

#### Список литературы

1. Рекламные материалы компании «Akzo Nobel» за 2007, 2012, 2014 гг.
2. Казаков Я.В., Комаров В.И. «Математическая обработка кривых зависимости напряжение – деформация, полученных при испытании целлюлозно-бумажных материалов на растяжение». // Лесн. журн. 1995. № 1, С.109–114. (Изв. высш. учеб. заведений)
3. Патент RU 2330911 «Бумага с улучшенной жесткостью и пухлостью и способ для ее изготовления» (опубликован 10.08.2008)
4. Патент RU 2387752 «Бумага с улучшенной жесткостью и пухлостью и способ для ее изготовления» (опубликован 27.04.2011)
5. Иванов Г.Е., Куркова Е.В., Архипов К.С. «Оценка впитывающих свойств бумаги по ЕМТЕС HVL C 02». // В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов»: матер. II Междунар. научн.-технич. конфер., Архангельск, САФУ, 2013. С.76–80.
6. Фляте Д.М. Технология бумаги: учебник для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1988., 440 с.
7. Патент RU 2506363 «Бумажная или картонная основа, содержащая целлюлозные волокна и расширяемые микросферы, и упаковочная тара, содержащая эту основу» (опубликован 10.02.2014)



## СОЧЕТАНИЕ ФИЛЬТРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА С СОРБЕНТАМИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА В СРЕДСТВАХ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ

**М.В. Талипова, А.В. Лянг**

*АО «Сорбент», Пермь, Россия*

*Существуют фильтры: противоаэрозольные, состоящие из фильтрующего материала (ФМ), противогазовые с угольной шихтой и комбинированные, включающие противоаэрозольные и противогазовые. Но в промышленности необходима защита и от аэрозолей, и от невысоких концентраций газов и паров. Создание нового фильтра с единым противогазоаэрозольным элементом с низким сопротивлением потоку воздуха при дыхании, является актуальной задачей.*

## COMBINATION OF FILTER MATERIAL WITH SORBENTS FOR CLEANING AIR IN PERSONAL RESPIRATORY PROTECTIVE EQUIPMENT

**M.V. Talipova, A.V. Liang**

*“Sorbent” JSC, Perm, Russia*

*There are the following filters: particle filters consisting of filtering material (FM), gas filters with charcoal charge, and combined filters consisting of particle and gas filters. But industry needs protection from aerosols and from low concentrations of gases and vapors. Creating a new filter with a single gas-aerosol element with low resistance to air flow during breathing is an important task.*

Развитие техники и интенсивный рост промышленности современного общества способствует значительному ухудшению экологического состояния окружающей среды. В связи с этим ужесточаются требования к средствам защиты человека от воздействия вредных технологических факторов, в том числе и к средствам индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД).

В настоящее время существуют противоаэрозольные фильтры, ФМ которых состоят из целлюлозных, минеральных волокон и связующего. Также существуют противогазовые фильтры, в которых при формировании шихты используют углеродные сыпучие поглотители. Комбинированные фильтры состоят из противогазового и противоаэрозольного фильтров, обладают высокой эффективностью по защите как от аэрозолей, так и от газов и паров. Недостатком комбинированных фильтров является значительная масса, габариты и недостаточно низкое сопротивление дыханию. В настоя-



щее время в промышленности зачастую необходимы малогабаритные легкие фильтры, обладающие низким сопротивлением дыханию, с высокой эффективностью защиты от аэрозолей, газов и паров при их невысокой концентрации до 3 предельно-допустимых концентраций (ПДК) по ГОСТ 12.1.005–88. В этой связи создание нового фильтра с использованием ФМ, способного защищать как от аэрозолей, так и от газов и паров, является актуальной задачей.

Проведены исследования фильтрующих материалов с добавлением активного угля. Опробован противогазовый фильтрующий материал, имеющий угольную составляющую, дающий низкое сопротивление потоку воздуха при дыхании [1,2,3]. Однако этот материал не обладает достаточными прочностными механическими характеристиками. В процессе гофрирования совместно с противоаэрозольным материалом происходит разрыв противогазового фильтрующего материала.

Ранее на АО «Сорбент» были проведены исследования по изучению влияния вида волокон и способа их обработки на свойства фильтрующих противоаэрозольных материалов и по повышению механической прочности [4]. В связи с этим нам представляется наиболее целесообразным при создании нового ФМ для новых фильтров использовать противоаэрозольный ФМ с достигнутыми ранее характеристиками в [4].

В настоящее время проводятся поисковые работы по сочетанию такого ФМ с активными углями и углеродными материалами.

Готовы к сотрудничеству в создании нового ФМ с активными углями и углеродными материалами.

#### Список литературы

1. Патент РФ № 2006131799/12, 04.09.2006. Способ изготовления фильтросорбирующего материала для средства индивидуальной защиты органов дыхания // Патент России № 2327828. 27.06.2008. Бюл. № 18. / Иванова В.С., Попова Л.Н., Фатхудинов Р.Х. [и др.].
2. Патент РФ № 2004131329/15, 26.10.2004. Фильтросорбирующий материал для средств индивидуальной защиты органов дыхания // Патент России № 2281798. 20.08.2006. Бюл. № 23. / Иванова В.С., Попова Л.Н., Кузнецов Е.А. [и др.].
3. Патент РФ № 20071146105/15, 11.12.2007. Фильтросорбирующий материал // Патент России № 2372971. 20.11.2009. Бюл. № 32. / Шаталов Э.В., Алимов О.Н., Солошин С.В. [и др.].
4. Иванов А.Ю., Лянг А.В. Проект реализации адаптивного производства фильтровальных материалов (ФМ) для СИЗОД // В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов»: матер. III Междунар. научно-технич. конфер. (Архангельск, 9–11 сентября 2015 г.). Архангельск: САФУ, 2015. С. 64.



## ИССЛЕДОВАНИЕ И ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ ОФИСНЫХ ВИДОВ БУМАГИ

**В.Н. Селезнёв**

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург, Россия*

*Проведено исследование влияния снижения доли хвойной целлюлозы и увеличение доли лиственной целлюлозы в композиции на физико-механические свойства офисных видов бумаги, а также произведен подбор оптимальной композиции с целью получение экономической выгоды.*

### RESEARCH AND SELECTION OF THE OPTIMAL COMPOSITION OF OFFICE PAPER

**V.N. Seleznev**

*Saint-Petersburg State University of Industrial Technology, Sant Petersburg, Russia*

*The study of the effect of reducing the proportion of softwood pulp and increasing the proportion of hardwood pulp in the composition of the physical and mechanical properties of office paper, as well as the selection of the optimal composition in order to obtain economic benefits.*

В настоящее время трудно представить жизнь без офисной бумаги. Она используется везде: в любых организациях, предприятиях, офисах, учебных заведениях, а также у каждого человека дома для печати необходимых документов. Каждая сфера деятельности, в работе которой предполагается фиксация и передвижение какой-либо информации, ежедневно нуждается в этом виде канцелярского товара.

Офисная бумага – это сорт бумаги, который получают преимущественно, из технической целлюлозы (90...100 %), или с небольшим добавлением древесной массы. В составе такой бумаги присутствуют специальные химические вещества, придающие ей необходимые печатные и другие свойства. Общее содержание химических веществ (наполнителя) варьируется от 10...25 % [1]. Основными элементами офисной бумаги являются хвойная и лиственная целлюлоза, находящаяся в соотношении 20 к 80.

Применение хвойной целлюлозы позволяет сформировать каркас будущего листа бумаги, благодаря которому можно получить бумагу с высоким сопротивлением разрыву [3].



Благодаря морфологическим особенностям строения волокон целлюлозы лиственных пород древесины, наличие лиственной целлюлозы в композиции бумаги способствует улучшению печатных свойств бумаги.

Кроме того, повышается однородность полотна, за счет заполнения промежутков, образованных хвойной целлюлозой, гладкость поверхности и удержание наполнителей [2,4,5].

Цель работы – подобрать оптимальную композицию офисной бумаги при снижении доли хвойной целлюлозы в композиции с сохранением у нее прочностных характеристик.

Объектами исследования стали волокнистые полуфабрикаты беленой сульфатной целлюлозы хвойных и лиственных пород.

В ходе работы были проведены исследования морфологических особенностей объектов исследования с помощью прибора Morfi Compact.

Определение морфологических показателей волокна, необходимы, потому что будущие свойства бумаги во многом зависят от исходного волокна, используемого для получения бумажного полотна [2,3].

Кроме того, были составлены композиции с разным содержанием лиственной целлюлозы (табл.1) в соответствии с технологическими картами производства офисной бумаги и получены лабораторные образцы, которые в дальнейшем сравнивались с промышленным образцом офисной бумаги производства компании International Paper, Светогорск (бренда Svetocopy).

У лабораторных образцов определялись физико-механические показатели (разрывная длина, максимальное усилие, удлинение и индекс прочности при разрыве) (ISO 1924–2) на горизонтальной разрывной машине.

Для определения оптимальной композиции с экономической и технологической точки зрения был проведен расчет затрат на волокно и размол.

На рисунке 1 представлена динамика изменения индекса фибрилляции в зависимости от степени помола. Как видно из рис. 1, у образцов 2 и 3 – хвойной целлюлозы индекс фибрилляции значительно возрастает, а у образца 1 изменение в сторону увеличения не значительное.

В результате такая динамика изменения показателя способствует в дальнейшем повышению механической прочности листа бумаги [4].

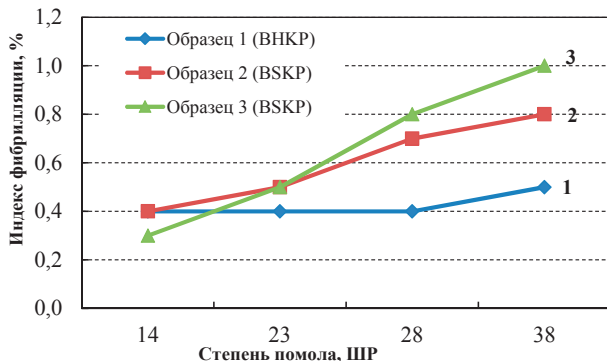


Рис.1. Зависимость индекса фибрилляции от степени помола

Результаты измерения физико-механических свойств лабораторных образцов бумаги с различным композиционным составом представлены на рис. 2. С увеличением доли хвойной целлюлозы в композиции бумаги наблюдается снижение всех физико-механических показателей при степени помола у лиственной целлюлозы – 21...23 °ШР и у хвойной целлюлозы – 23...25 °ШР: в частности разрывной длины и индекса сопротивления разрыву.

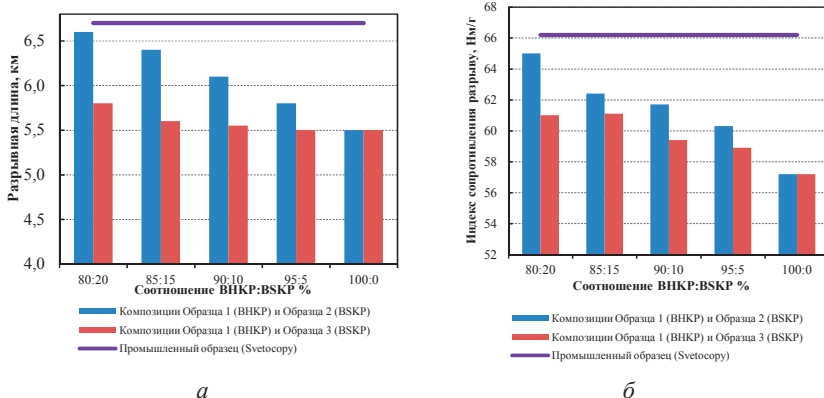


Рис. 2. Динамика изменения физико-механических свойств композиции с применением разных образцов хвойной целлюлозы: а – разрывная длина; б – индекс сопротивления разрыву



Единственная возможность, которая позволяет без введения химических вспомогательных веществ повысить физико-механические свойства – это повышение степени помола у целлюлозы.

Поэтому было предпринято решение в получении лабораторных образцов исследуемых композиций с различными комбинациями и определение у них физико-механических показателей.

Результаты определения физико-механических свойств, представлены на рис. 3,4.

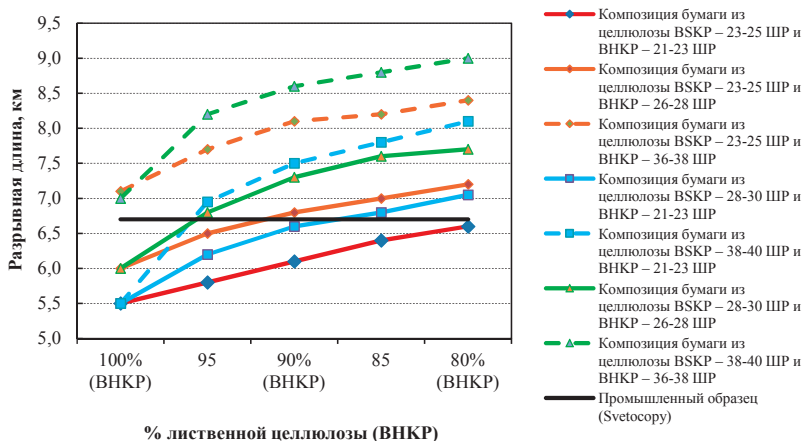


Рис. 3. Динамика изменения физико-механических свойств композиции с применением хвойной целлюлозы образца 2 и комбинации степени помола

Исходя из представленных рисунков 3 и 4 видно, что повышение степени помола только у лиственной, у хвойной или совместное повышение на 5 °ШР увеличивает значение разрывной длины выше значения разрывной длины промышленного образца у композиции, содержащие от 95 до 80 % лиственной целлюлозы. Дальнейшее повышение степени помола у образцов значительно превышает значение разрывной длины промышленного образца.

Для понимания экономического вклада в разработку нового композиционного состава были проведены расчеты затрат на волокно и размол.

Результаты расчета представлены в табл. 1,2.



Расчет затрат на волокно проводился при максимальной загрузке БДМ (400 тыс. тонн в год) и уровне цен за 2018 год. Расчет затрат на размол проводился на основании данных о энергии на размол, полученных при размоле на мельнице PFI.

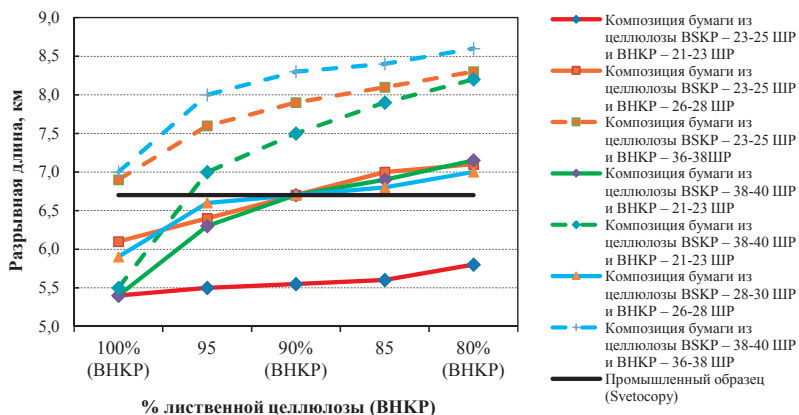


Рис. 4. Динамика изменения физико-механических свойств композиции с применением хвойной целлюлозы образца 3 и комбинации степени помола

Таблица 1. Сводная таблица затрат на волокно при разных композициях (и стоимости волокна) при использовании в качестве хвойной целлюлозы образца 2

Степень помола, °ШР	ВНКР	21–23	21–23	21–23		
	BSKP	23–25	28–30	38–40		
Соотношение ВНКР:BSKP	Образец 2 – хвойная целлюлоза					
	min	max	min	max	min	max
80/20	192,1	200,0	196,4	204,4	200,0	208,3
85/15	190,7	199,0	194,0	202,2	196,9	205,1
90/10	189,4	197,8	191,6	199,9	193,5	201,9
95/5	188,0	196,6	189,1	197,7	190,0	198,7
100/0	186,7	195,5	-	-	-	-

Вследствие того, что затраты на размол лиственной целлюлозы оказались высокими, от увеличения степени помола лиственной целлюлозы оказались. И в дальнейших расчетах эти варианты композиций с разным размол не принимались для определения оптимальной композиции.



При сравнении затрат на волокно и размол композиции с соотношением лиственной и хвойной целлюлозы 80:20 было выяснено, что наиболее оптимальными композициями оказались соотношения лиственной и хвойной целлюлозы 90:10 и 95:5 при степени помола хвойной целлюлозы 28...30 °ШР. Однако композиция с соотношением 95:5 имеет более низкие физико-механические показатели.

Таблица 2. Сводная таблица затрат на волокно при разных композициях (и стоимости волокна) при использовании в качестве хвойной целлюлозы образца 3

Степень помола, °ШР	ВНКР	21–23		21–23		21–23	
	BSKP	23–25		28–30		38–40	
Соотношение ВНКР:BSKP	Образец 3 – хвойная целлюлоза						
	min	max	min	max	min	max	
80/20	192,7	200,6	197,3	205,2	200,9	208,8	
85/15	191,2	199,3	194,6	202,8	197,3	206,0	
90/10	189,7	198,1	192,0	200,4	193,8	202,2	
95/5	188,2	196,8	189,4	198,0	190,2	198,8	
100/0	186,7	195,5	-	-	-	-	

**Закключение.** Таким образом, наиболее оптимальной композицией считается соотношение лиственной и хвойной целлюлозы 90:10 при степени помола лиственной целлюлозы 21...23 °ШР и хвойной целлюлозы 28...30 °ШР. Благодаря таким изменениям состава по волокну офисных видов бумаги можно получить экономическую выгоду до 700 тыс. долл. в год.

#### Список литературы

1. Hannu Paulapuro. Paper and Board Grades / Paulapuro H. Finland: Helsinki University of Technology, 2000. P. 87.
2. Фляте, Д.М. Бумагообразующие свойства волокнистых материалов. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 136 с.
3. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. II. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства и обработки бумаги и картона. СПб.: Политехника, 2005. 423 с.
4. Иванов С.Н. Технология бумаги, изд.3, М.: изд. «Школа бумаги». 2006.
5. Фляте Д.М. Технология бумаги: Учебник для вузов. 5-е изд., стер. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 440 с.



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОШКОВОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ВЫСОКОГО ВЫХОДА В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

**В.Н. Сунайт, Л.Г. Махотина**

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия*

*В работе изучена возможность применения порошковой целлюлозы из белёной термомеханической массы осины в качестве пластифицирующей добавки в строительный раствор; изучено влияние добавки порошковой целлюлозы на подвижность раствора и прочность бетона при сжатии и изгибе.*

### **BUILDING SECTOR APPLICATIONS OF POWDER CELLULOSE FROM WOOD PULP**

**V.N. Sunait, L.G. Machotina**

*Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia*

*The possibility of using powdered cellulose from bleached thermo-mechanical pulp of aspen as a plasticizing additive in mortar was studied in this article; the effect of powdered cellulose addition on the solution mobility and the strength of concrete under compression and bending was investigated.*

Производство и потребление порошковых целлюлозных материалов (ПЦМ) в мире стабильно растёт и составляет порядка 188 тыс. тонн производимой продукции в год [3–5]. В России этот рынок представлен компанией ЭВАЛАР, производящей микрокристаллическую целлюлозу (МКЦ), а также небольшими научно-производственными объединениями.

Для производства микрокристаллической целлюлозы в основном используют хлопковую и сульфатную целлюлозу для химической переработки. Использование таких дорогостоящих видов сырья объясняется тем, что порядка 70 % МКЦ и некоторых видов порошковой целлюлозы используют в пищевой и фармацевтической промышленности [6]. Порошковая целлюлоза также применяются в качестве кормовых добавок и в некоторых других областях. В связи с постоянным увеличением цены на хлопок и целлюлозу для химической переработки использование порошковых целлюлозных материалов для технических целей часто оказывается экономически нецелесообразным. Поэтому перспективным представляется в технических областях использовать порошковую целлюлозу, полученную из более деше-



вых волокнистых полуфабрикатов высокого выхода – древесной массы, выход которой из древесины составляет порядка 82...90%, а стоимость примерно на 20...30% ниже стоимости древесной целлюлозы и хлопка. В настоящее время на мировом рынке наблюдается увеличение их производства и потребления [7].

Для исследования этой возможности был использован порошок образец, полученный из блененной химико-термомеханической массы осины (БХТММ), полученной по технологии фирмы Metso. Порошковая целлюлоза (далее – ПЦ) содержит 57 % фракции менее 200 мкм, 43 % фракции имеют средневзвешенную длину 369 мкм. В образце содержится порядка 20...22% лигнина. Результаты данной работы опубликованы авторами в статьях [1,2].

В настоящей работе исследовалась возможность применения ПЦ из БХТММ осины в качестве пластификатора в бетонах. Работа проводилась на базе НИиПи транспортной инфраструктуры в Санкт-Петербурге.

Использовался строительный раствор следующего состава:

- Портландцемент по ГОСТ 31108-2003 – 30 % (по массе)
- Песок по ГОСТ 8736-93 – 70 % (по массе)

Для определения пластифицирующего эффекта порошковой целлюлозы были приготовлены составы с различным содержанием добавки сухого порошка целлюлозы по отношению к вяжущему. Была определена подвижность растворных смесей при постоянном водоцементном отношении В/Ц = 0,46. Подвижность растворных смесей определялась в соответствии с ГОСТ 5802-86 «Растворы строительные. Методы испытаний». Результаты оценивались в соответствии с ГОСТ 28013-98 «Растворы строительные. Общие технические условия» и ГОСТ 30459-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности».

Результаты полученных данных представлены в табл. 1.

Таблица 1. Повышение подвижности растворной смеси при введении добавки порошковой целлюлозы

Содержание ПЦ, % от массы вяжущего	0,0		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
Усадка конуса, см	3,7		3,9	4,8	5,7	6,3	6,2
Марка по подвижности	П <sub>к1</sub>		П <sub>к1</sub>	П <sub>к2</sub>	П <sub>к2</sub>	П <sub>к2</sub>	П <sub>к2</sub>

Результаты исследования свидетельствуют о пластифицирующем действии гидрофильной порошковой целлюлозы на растворную смесь. Такой эффект обусловлен «вклиниванием» частиц порошковой целлюлозы





между частицами цементного клинкера и зёрнами песка и уменьшением вязкости растворной смеси при постоянном водоцементном соотношении. При введении добавки порошковой целлюлозы в количестве 1,0...2,0 % от массы вяжущего удалось повысить марку по подвижности растворной смеси от Пк1 до Пк2.

Для определения прочности строительного раствора в присутствии добавки порошковой целлюлозы были сделаны замесы шести составов строительных растворов с различным содержанием добавки. Во всех замесах сохранялась равная подвижность (Пк2). При введении добавки порошковой целлюлозы в количестве 0,5 % от массы вяжущего и выше, для сохранения заданной подвижности количество воды затворения уменьшали.

После приготовления замесов были отформованы образцы – балочки, размером 40×40×160 мм. Образцы после набора разопалубочной прочности, но не ранее чем через 24 часа были извлечены из форм и помещены в камеру нормального твердения.

Твердение образцов осуществлялось при нормальных условиях:

- температура 20±3 °С;
- влажность 95±5 %;

Образцы-балочки испытывались в возрасте 7 и 28 суток с целью определения в различном возрасте прочности на растяжение при изгибе и прочности на сжатие. Результаты испытаний представлены в табл. 2,3.

Таблица 2. Прочность образцов бетона на растяжение при изгибе

Состав	Средняя прочность на растяжение при изгибе, МПа	
	7	28
Возраст образцов, сутки	7	28
Контрольный, В/Ц = 0,6	4,4	4,8
Состав №1 Содержание ПЦ – 0,5% от массы вяжущего, В/Ц = 0,59	4,7	5,1
Состав №2 Содержание ПЦ – 1,0% от массы вяжущего, В/Ц = 0,56	4,9	5,4
Состав №1 Содержание ПЦ – 1,5% от массы вяжущего, В/Ц = 0,54	5,0	5,5
Состав №4 Содержание ПЦ – 2,0% от массы вяжущего, В/Ц = 0,53	5,1	5,6
Состав №5 Содержание ПЦ – 2,5% от массы вяжущего, В/Ц = 0,54	4,9	5,5

Таблица 3. Прочность образцов бетона на сжатие

Состав	Средняя прочность на сжатие, МПа	
	7	28
Возраст образцов, сутки	7	28
Контрольный, В/Ц = 0,6	21,4	24,8
Состав №1 Содержание ПЦ – 0,5% от массы вяжущего, В/Ц = 0,59	22,1	25,6
Состав №2 Содержание ПЦ – 1,0% от массы вяжущего, В/Ц = 0,56	22,6	26,2
Состав №3 Содержание ПЦ – 1,5% от массы вяжущего, В/Ц = 0,55	23,2	26,9
Состав №4 Содержание ПЦ – 2,0% от массы вяжущего, В/Ц = 0,53	23,4	27,4
Состав №5 Содержание ПЦ – 2,5% от массы вяжущего, В/Ц = 0,54	23,3	27,0

Результаты испытания показали, что для растворных смесей, при дозировке добавки порошковой целлюлозы из БХТММ в количестве 1...2 % от массы вяжущего (при пересчете на сухое вещество) и снижении водоцементного отношения с 0,6 до 0,56...0,53 удалось повысить прочность раствора на растяжение при изгибе на 12,5...16,7 %, повысить прочность на сжатие на 5,6...10,5 %. Это так же связано с пластифицирующим эффектом порошковой целлюлозы, позволяющей снизить количество воды затворения, необходимое для процесса гидратации минералов вяжущего в бетоне. При снижении количества воды затворения уплотняется структура бетона, становясь менее пористой, что способствует увеличению прочностных свойств бетона.

### Выводы

1. При введении в бетонные и растворные смеси порошковая целлюлоза из БХТММ позволяет повысить подвижность и удобоукладываемость бетонных и растворных смесей, снизить водоцементное отношение при сохранении заданной марки по удобоукладываемости и повысить прочность раствора или бетона в проектном возрасте.

2. В соответствии с ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия» добавку порошковой целлюлозы из БХТММ следует отнести к пластифицирующей.

3. При сохранении постоянного водоцементного отношения для растворных смесей удалось повысить марку по подвижности: при дозировке



порошковой целлюлозы из БХММ в количестве 1 % от массы – от  $P_{к1}$  до  $P_{к2}$ , при снижении прочности раствора не более чем на 5 %.

### Список литературы

1. Иванова В.Н., Махотина Л.Г., Аким Э.Л. Получение порошковых целлюлозных материалов из древесных (механических) масс // В сб. «Леса России: политика, промышленность, наука, образование»: матер. IV научно-технич. конфер. 2019. С. 282–284.
2. Иванова В.Н., Уварова Д.Ю., Махотина Л.Г., Аким Э.Л. Переработка волокнистых полуфабрикатов высокого выхода // Лесн. журнал. 2017. №6. С.145–150. (Известия высш. учебн. заведений).
3. Allied Market Research Microcrystalline Cellulose (MCC) Market by Source Type and Application: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2018 – 2025
4. Cellulose Powder Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2018 – 2025.
5. Nanocellulose: Producers, Products and Applications – A Guide for End Users, TAPPI, 2017. Updated, Biobased Markets, Sept. 2018.
6. Future Market Insights, 2018.
7. Indufor analysis of Eurostat and Global Trade Atlas data 2015.

## ВОДА КАК ОДИН ИЗ ОСНОВНЫХ ПРЕКУРСОРОВ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОДУКЦИИ

Т.Е. Бойкова<sup>1</sup>, Н.И. Богданович<sup>2</sup>, С.Н. Долгобородова<sup>1</sup>, Т.С. Мауричева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИСМАРТ, Северный (Арктический) федеральный университет, Северодвинск, Россия

<sup>2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия

*Проанализировано влияние качества воды на продукцию ЦБК. Проведена оценка качества воды в источниках водоснабжения крупных ЦБК Архангельской области. Выполнен сравнительный анализ альтернативных реагентов между собой и с применяемым по стандартной схеме сернокислым алюминием. Определены оптимальные диапазоны дозировки для каждого коагулянта, выявлены эффективные современные реагенты для вод Северной Двины при низкой температуре 4...8 °С.*

## WATER AS ONE OF THE MAIN PRECURSORS OF INCREASE MECHANO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF PULP AND PAPER PRODUCTS

T.E. Boikova<sup>1</sup>, N.I. Bogdanovich<sup>2</sup>, S.N. Dolgoborodova<sup>1</sup>, T.S. Mauricheva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISMART, Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

*The influence of water quality on the production of pulp and paper mills is analyzed. An assessment of the quality of water in the water supply sources of large pulp and paper mills in the Arkhangelsk Region. A comparative analysis of alternative reagents with each other and with aluminum sulphate used according to the standard scheme was performed. Optimal dosage ranges for each coagulant were determined, effective modern reagents for the waters of the Northern Dvina were revealed at a low temperature of 4 ... 8 °C*

Целлюлозно-бумажная промышленность одна из самых водоемких отраслей, потребляет значительные количества воды для выпуска продукции. К составу воды предъявляют гораздо более высокие требования, чем для питьевой воды.

Источниками водоснабжения крупнейших предприятий целлюлозно-бумажной промышленности в Архангельской области (Котласского ЦБК в г.Коряжме и Архангельского ЦБК в г.Новодвинске) являются реки Вычегда и Северная Двина. Сочетание высокой цветности воды с малой мутностью и щелочностью при низкой температуре создает известные трудности при водоподготовке [1,4]. Процесс водоподготовки разделен на стадии и должен обеспечивать степень очистки в соответствии с отраслевыми требованиями [3] (табл.1).



При несоответствии качества воды требованиям по мутности у бумаги и целлюлозы может проявиться нежелательная оттеночность; также при получении пара для ТЭЦ ЦБК будет способствовать отложению накипи или пенообразованию. Кроме того, вода с повышенной мутностью забивает спрысковые системы бумаго- и картоноделательных машин, засоряет сукна и сетки, увеличивает их абразивный износ.

Несоблюдение требований по цветности снижает белизну бумаги, отрицательно сказывается на проклейке бумаги из-за снижения гидрофобизирующей способности клеевых веществ, вызывает отложения на стенках трубопроводов и аппаратов.

Если жесткость, обусловленная солями временной и постоянной жесткости, превышает 2,5...3,2 мг-экв/л, то это вызовет выпадение клеевых веществ в осадок. Также соли жесткости могут вызывать появление слоя накипи в теплообменных аппаратах и образование на поверхности бумаги белых включений, появляющихся из-за выпадения бикарбонатов кальция и магния в осадок при нагревании потока.

Использование воды, содержащей железо, марганец, в концентрациях выше установленных нормативов отрицательно сказывается на качестве, приведет к появлению нежелательной окраски и бурых пятен на бумаге.

Таблица 1. Влияние показателей качества воды на продукцию ЦБП

Показатель	Высоко- сортная бумага	Крафт-бумага		Бумага из древесной массы	Натронная целлюлоза и сульфитная целлюлоза
		белая	небе- лая		
Мутность, мг/л	10	40	100	50	25
Цветность, °ПКШ	5	25	100	30	5
Общая жесткость, моль-экв/л	2	2	4	4	2
Щелочность, ммоль/л	1,5	1,5	3,0	3,0	1,5
Железо общее, мг/л	0,1	0,2	1,0	0,3	0,1
Марганец, мг/л	0,05	0,1	0,5	0,1	0,05
Солесодержание, мг/л	200	300	500	500	250
Свободная угле- кислота, CO <sub>2</sub> , мг/л	10	10	10	10	10
Хлориды, мг/л	–	200	200	75	75

Солесодержание, обусловленное хлоридами, сульфатами, гидрокарбонатами кальция, натрия, магния, при повышенном содержании вызывает накипеобразование в системах производственного оборудования и его коррозию, усиливает пенообразование, препятствуют проведению процессов



проклейки и крашения бумаги. При производстве специальных видов бумаги, таких как электроизоляционная, хроматографическая и т.п. использование воды с повышенным содержанием солей совершенно исключается.

Таблица 2. Характеристика природной воды

Показатели речной воды*	Весенний паводок		Летний период		Осенний паводок		Зимний период	
	Вычегда	С. Двина	Вычегда	С. Двина	Вычегда	С. Двина	Вычегда	С. Двина
1 Температура, °С	$\frac{0,8}{16}$	$\frac{0,2}{8,5}$	$\frac{16}{22}$	$\frac{8,5}{20,9}$	$\frac{0,8}{16}$	$\frac{1,4}{12,7}$	$\frac{0,4}{0,8}$	$\frac{0,1}{0,2}$
2 Мутность, мг/дм <sup>3</sup>	$\frac{1,5}{15,0}$	$\frac{1,7}{24,1}$	$\frac{6,0}{13,0}$	$\frac{5,6}{8,7}$	$\frac{6,0}{13,0}$	$\frac{4,7}{9,3}$	$\frac{0,8}{2,0}$	$\frac{1,4}{2,2}$
3 Цветность, °ПКШ	$\frac{150}{230}$	$\frac{39}{126}$	$\frac{40}{100}$	$\frac{64}{98}$	$\frac{130}{180}$	$\frac{99}{153}$	$\frac{40}{100}$	$\frac{65}{155}$
4 Окисляемость перманг., мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	$\frac{20}{27}$	$\frac{6,9}{23,6}$	$\frac{10}{20}$	$\frac{12,8}{18,2}$	$\frac{15}{20}$	$\frac{9,2}{27,9}$	$\frac{6}{10}$	$\frac{11,8}{27,7}$
5 Щелочность, мг-экв/дм <sup>3</sup>	$\frac{0,2}{0,8}$	$\frac{0,7}{3,0}$	$\frac{0,8}{2,0}$	$\frac{1,3}{2,2}$	$\frac{0,7}{1,5}$	$\frac{1,2}{2,5}$	$\frac{2,0}{2,6}$	$\frac{1,3}{2,6}$
6 Жесткость, мг-экв/дм <sup>3</sup>	$\frac{0,4}{1,0}$	$\frac{1,0}{4,4}$	$\frac{0,8}{2,5}$	$\frac{1,7}{3,3}$	$\frac{1,4}{2,4}$	$\frac{1,9}{3,8}$	$\frac{2,7}{3,9}$	$\frac{2,1}{3,7}$
7 Железо общее, мг/дм <sup>3</sup>	$\frac{0,8}{1,3}$	$\frac{0,67}{2,60}$	$\frac{0,8}{1,2}$	$\frac{0,57}{1,10}$	$\frac{0,8}{1,5}$	$\frac{0,47}{1,33}$	$\frac{0,6}{1,0}$	$\frac{0,71}{0,86}$
8 рН	$\frac{6,8}{7,0}$	$\frac{7,2}{7,3}$	$\frac{7,0}{8,2}$	$\frac{7,7}{8,0}$	$\frac{6,8}{7,8}$	$\frac{7,6}{8,2}$	$\frac{7,0}{7,3}$	$\frac{7,3}{7,4}$

\* – в числителе и знаменателе указан диапазон от минимального до максимального значения показателя, по данным лаборатории ФОС ЦБП.

Как видно из табл. 2, качество воды в источнике не соответствует отраслевым требованиям. Воду очищают на первом этапе реагентными методами, обеспечивая снижение цветности преимущественно за счет устранения коллоидно-дисперсных примесей органического происхождения (гуминовых и фульвокислот), а затем проводят глубокое обессоливание на ионообменных фильтрах.



Реагентная обработка заключается в добавлении коагулянта серноокислого алюминия совместно с флокулянтom Праестол 650 TP, кальцинированной содой для подщелачивания и гипохлоритом натрия для первичного окисления органических соединений. При этом коллоидно-дисперсные примеси воды укрупняются, переводятся в форму грубодисперсных (взвешенные вещества) и осаждаются. В данной технологии обнаружены ряд недостатков [2], поэтому проведено исследование с целью определить возможность и целесообразность замены серноокислого алюминия на современные реагенты.

Процесс осаждения взвешенных веществ проводят в отстойниках фильтроочистных сооружений ЦБК, в условиях ламинарного потока (число Рейнольдса  $Re < 2$ ). Вся система агрегативно-неустойчива с большим диапазоном размеров частиц, которые в процессе объединяются, меняют плотность и размеры, а значит и скорость осаждения, поэтому кинетика процесса осветления не подчиняется закону Стокса и устанавливается опытным путем в лабораторных условиях.

В качестве альтернативы серноокислому алюминию рассматривались коагулянты: трехвалентное серноокисное железо Ferix-3 финской марки Кемира, полиоксихлориды алюминия различных производителей (российский ТМ Акваурат и его аналоги, представленные на рынке, UltraPac V1, V2, PAX XL 100, поставляемый в виде раствора). А также применяемые с ними совместно флокулянты для повышения эффективности, всего 24 наименования. Технологическое моделирование процесса осаждения по методике пробной коагуляции заключалось в определении в лабораторных условиях продолжительности отстаивания, обеспечивающей заданный эффект осветления природной воды рек Северная Двина и Вычегда. По полученным данным строили кривые осаждения.

Кроме того, на эффективность процесса коагуляции одновременно влияет множество факторов: дозы коагулянта и флокулянта, интенсивность перемешивания реагентов с потоком, pH и щелочной резерв воды, интервал времени между добавлением реагентов, температура воды. Поэтому для оценки совместного влияния факторов были реализованы планируемые эксперименты с реагентами, показавшими лучший результат – полиоксихлорид алюминия ТМ Акваурат и серноокисное железо Ferix-3 компании Кемира, получены адекватные уравнения регрессии. Считаем их математическими моделями процесса коагуляции.

В качестве варьируемых факторов выбраны  $x_1$  – доза коагулянта в диапазоне от 10 до 60 мг/л по активному веществу, согласно проведенным ис-



следованиям,  $x_2$ —доза флокулянта,  $x_3$ —температура от 1 до 18 °С. Выходными параметрами являлись цветность очищенной воды, концентрация остаточного железа для коагулянта Ferix-3. Для проверки на значимость квадратичных эффектов в уравнении поставлены опыты в центре плана. Проверка показала необходимость включения квадратичных членов. Для нахождения коэффициентов при квадратичных членах выполнен ротатабельный центральный композиционный план второго порядка. После расчета групп коэффициентов и исключения эффектов с незначимыми коэффициентами уравнение для ПОХА:

$$y = 0,053 - 0,052x_1 + 0,023x_1^2, F_{\text{расч.}}=3,9, F_{\text{табл.}}=4,7; \quad (1)$$

Уравнение для Ferix-3:

по цветности в единицах оптической плотности, соответствующей °ПКШ ( $F_{\text{расч.}}=0,47, F_{\text{табл.}}=4,7$ ):

$$\text{Ц} = 0,067 - 0,497x_1 - 0,143x_3 + 0,427x_1x_3 + 0,285x_1^2 + 0,079x_3^2, \quad (2)$$

по остаточному железу ( $F_{\text{расч.}}=4,42, F_{\text{табл.}}=4,7$ ):

$$\text{CFe} = 0,71 - 0,54x_1 - 0,13x_3 + 0,18x_1x_2 - 0,14x_3^2, \quad (3)$$

Анализируя уравнение (1), делаем выводы, что на снижение цветности воды влияет только доза коагулянта, что позволит вести процесс очистки природной воды и без флокулянта, а также, что очень важно в условиях Арктики, при пониженной температуре, т.е без дополнительного подогрева в зимний период. К достоинствам данного реагента следует отнести отсутствие необходимости подщелачивания, что также сокращает расходы на водоподготовку.

Как видно из уравнений (2) и (3), при очистке воды коагулянтом Ferix-3 совместно с флокулянтом Флопам 4115 производства Франция в диапазоне температур от 2 до 18 °С, наибольший вклад в снижение цветности вносит доза коагулянта, температура слабо влияет на обесцвечивание и на содержание остаточного железа. Во всех экспериментах эффективность очистки по ХПК также высокая, около 75 %, что говорит о достаточно полном устранении органических соединений, которые в основном и обуславливают цветность природной воды в Архангельской области.

Подводя общий итог сделанным в ходе проведенного исследования выводам, считаем, что полученные экспериментально закономерности процессов коагуляционно-флокуляционной очистки природных вод позволяют обоснованно перейти на современную реагентную систему очистки природной воды. При этом нет необходимости в реконструкции существующих очистных сооружений, упрощается схема очистки, т.к. можно отказаться





от узла нагрева потока воды и сократить (при использовании Ferix-3) или исключить (при использовании полиоксихлорида) подщелачивание. Наиболее перспективной считаем реагентную систему с применением коагулянта Ferix-3 совместно с альгинатом натрия в качестве флокулянта. Альгинат производится в Архангельской области на водорослевом комбинате из беломорской водоросли *Laminaria*, был протестирован наряду с промышленными флокулянтами и показал высокую эффективность: по цветности до 98% с достижением остаточной цветности 5 °ПКШ, по ХПК 60...70 %. Это перспективное направление так называемой «зеленой» химии, данная тенденция получает все большее развитие в мировой практике водоподготовки и водоочистки [5–7] и позволяет получать воду высокого качества без остаточных содержаний токсичных соединений, таких как ионы алюминия и синтетические полиакриламидные флокулянты.

#### Список литературы

1. Бойкова Т.Е., Богданович Н.И., Воронцов К.Б., Мауричева Т.С., Долгобородова С.Н., Короткий В.П. Применение коагулянта сернокислого железа (III) при водоподготовке в целлюлозно-бумажной промышленности // Экология и промышленность России. 2019. том 23 №2, С.30–35.
2. Драгинский В.Л., Алексеева А.П., Гетманцев С.В. Коагуляция в технологии очистки природных вод. Науч.изд. М., 2005. 576 с.
3. Комиссаренков А.А., Пругло Г.Ф., Федоров В.А., Федорова О.В. Основы водоподготовки в целлюлозно-бумажной промышленности и в теплоэнергетике. СПб., 2012. 98 с.
4. F. Xiao, J.-C. H. Huang, Zhang, C.-W. Cui. Effects of low temperature on coagulation kinetics and floc surface morphology using alum // Desalination, 2009. vol.237. p. 201–213.
5. J. Zhang, F. Zhang, Y. Luo, H. Yang, A preliminary study on cactus as coagulant in water treatment, Process. Biochem. 41. 2006. 730–733 p.
6. Mohammad Hadi Mehdinejad, Bijan Bina, Mahnaz Nikaeen and Hossein Movahedian Attar. Effectiveness of chitosan as natural coagulant aid in removal of turbidity and bacteria from turbid waters. Helsinki, Finland. Journal of Food, Agriculture & Environment. 2009. Vol. 7. p. 845–850.
7. Prasanna N.P, Sricharan.V., Iyankumar R., Vishnu P.D. A Novel Method of Algal Based Water Treatment by Natural Coagulant “Alginates”. International Journal of Science and Research (IJSR). 2017. Volume 6 Issue 9. p. 769–775.

## ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Е.В. Дернова, В.В. Гораздова**

*ООО «Управляющая Компания «Объединенные бумажные фабрики», Москва, Россия*

*Представлены результаты комплексных лабораторных исследований тарного картона, направленных на выявление причин растрескивания при воздействии на материал высоких температур.*

## THE INFLUENCE OF DRYING PROCESS ON THE FRACTURE TOUGHNESS OF PULP AND PAPER PRODUCTS

**E.V. Dernova, V.V. Gorazdova**

*LLC « Management Company «United paper mills», Moscow, Russia*

*The results of complex laboratory studies of container cardboard aimed at identifying the causes of cracking under the influence of high temperatures on the material are presented.*

В процессе сушки бумаги происходит дегидратация, или обратный процесс набухания волокон, сопровождающаяся падением их гидрофильных свойств. Это явление заключается в том, что свободные полярные гидроксильные группы целлюлозы на поверхности микрофибрилл волокон и в микропорах, освобожденные во время размола массы, взаимно насыщают друг друга после удаления адсорбированной воды и образуют прочные водородные связи. По этой причине набухание целлюлозы и бумаги, изготовленной из нее, после нагрева и сушки снижается, т.к. процесс дегидратации волокон при сушке обратим не полностью. Таким образом, в процессе сушки бумаги гидрофобизация происходит лишь до некоторой степени [1].

При сушке происходит усадка бумаги, которая способствует получению плотного и прочного листа, т.к. при этом межволоконные силы связи становятся наиболее прочными. Однако деформативность, и как следствие трещиностойкость материала под воздействием высоких температур и усилию при натяжении резко снижаются, что может приводить к обрывам полотна.

Проблематика растрескивания тарного картона особенно актуальна для производителей и переработчиков картона из полуфабрикатов высокого выхода, и в частности, из лиственной полуцеллюлозы. Волокна полуфабрикатов высокого выхода в структуре материала являются концентраторами напряжений, которые вызывают проблемы растрескивания тарного картона [2,3].



В рамках данного исследования была проведена оценка влияния режимов сушки на характеристики прочности, деформативности и трещиностойкости различных полуфабрикатов высокого выхода, широко используемых в композиции тарного картона на крупнейших отечественных комбинатах;

- листовая сульфатная полуцеллюлоза (ПЦ);
- листовая нейтрально-сульфитная полуцеллюлоза (НСПЦ).

Был произведен лабораторный размол вышеуказанных полуфабрикатов в аппарате Йокро до степени помола 20 °ШР. Выбор указанной степени помола обусловлен тем, что одним из важных свойств почти всех без исключения видов полуцеллюлозы является повышение прочности при малой степени помола (20... 22 °ШР). Высокая прочность при садком помоле обеспечивает легкое обезвоживание на сетке и позволяет применять высокие скорости бумаго- и картоноделательных машин при выработке бумаги и картона, содержащих в композиции полуцеллюлозу.

Для реализации эксперимента варьировали следующие параметры режима сушки образцов в сушильном шкафу:

- выдерживание образцов в течение двух минут при температуре 105 °С;
- выдерживание образцов в течение десяти минут при температуре 105 °С;
- выдерживание образцов в течение двух минут при температуре 105 °С, а затем в течение двух минут при температуре 180 °С;
- выдерживание образцов в течение десяти минут при температуре 105 °С, а затем в течение десяти минут при температуре 180 °С.

Исходный уровень физико-механических характеристик контрольных образцов полуфабрикатов высокого выхода ПЦ и НСПЦ массой 1 м<sup>2</sup> 125 г после кондиционирования в стандартных условиях представлен в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики контрольных образцов картона

Образец	$\sigma_p$ , МПа	$\epsilon_p$ , %	$L$ , м	$S_t$ , кН/м	$E_1$ , МПа	$A_p$ , мДж	$P_{ул}$ , Н	$TEA$ , Дж/м <sup>2</sup>	$FT$ , Дж/м
ПЦ	43,2	1,70	6650	820	4860	117	7,3	78,1	0,77
НСПЦ	47,6	1,50	7050	970	5400	115	8,5	77,1	0,69

Показано, что нейтрально-сульфитная полуцеллюлоза обладает более высоким исходным уровнем прочности и более низким уровнем деформативности и трещиностойкости, по сравнению с сульфатной полуцеллюлозой, что сопоставимо с результатами предыдущего этапа эксперимента.



Результаты физико-механических испытаний образцов, подвергнутых различным режимам сушки, представлены в табл. 2 в абсолютном и на рис. 1 в относительном выражении.

Таблица 2. Влияние различных режимов сушки на физико-механические характеристики образцов картона

Режим сушки	$\sigma_p$ , МПа	$\epsilon_p$ , %	$L$ , м	$S_t$ , кН/м	$E_1$ , МПа	$A_p$ , мДж	$P_{уд}$ , Н	$TEA_2$ , Дж/м <sup>2</sup>	$FT$ , Дж/м
ПЦ									
105 °С 2 мин.	45,1	1,54	7250	650	3740	101	7,9	67,0	0,43
105 °С 10 мин.	45,2	1,49	7400	690	3890	98	8,0	65,7	0,42
105 °С 2 мин. + 180 °С 2 мин.	48,6	1,59	7950	710	3890	116	8,8	77,2	0,40
105 °С 10 мин. + 180 °С 10 мин.	49,6	1,58	7950	690	3940	113	8,7	75,4	0,36
НСПЦ									
105 °С 2 мин.	52,8	1,50	7050	970	5400	115	8,5	77,1	0,41
105 °С 10 мин.	53,4	1,59	8150	760	4270	125	9,5	83,6	0,38
105 °С 2 мин. + 180 °С 2 мин.	47,6	1,31	7350	770	4290	91	8,6	60,5	0,34
105 °С 10 мин. + 180 °С 10 мин.	44,8	1,36	7050	650	4050	79	7,2	52,7	0,34

Максимальный уровень прочности отмечается у образцов нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы, выдержанных в течение 10 минут при 105 °С ( $\sigma_p = 53,4$  МПа,  $L = 8150$  м). Прирост значений прочности в этом случае относительно исходного уровня составил около 15 %. Деформация разрушения снижается во всем диапазоне изменения режима сушки на 9 %, также происходит снижение модуля упругости, жесткости и энергии поглощения при растяжении до 33 %.

Увеличение температуры и продолжительности сушки во всем диапазоне повышения указанных параметров относительно исходных значений образцов ПЦ в воздушно-сухом состоянии положительно сказывается на уровне таких физико-механических характеристик, как напряжение при разрушении и разрывная длина прирост составил 15 и 20 % соответственно. Происходит снижение показателей качества во всем диапазоне изменения режима сушки: деформации разрушения на 7 %, жесткости при растяжении на 16 % и модуля упругости на 19 %. Что касается работы и энергии поглощения при растяжении, то в данном случае видимых изменений не происходит, изменение этих показателей не превышает 5 %.

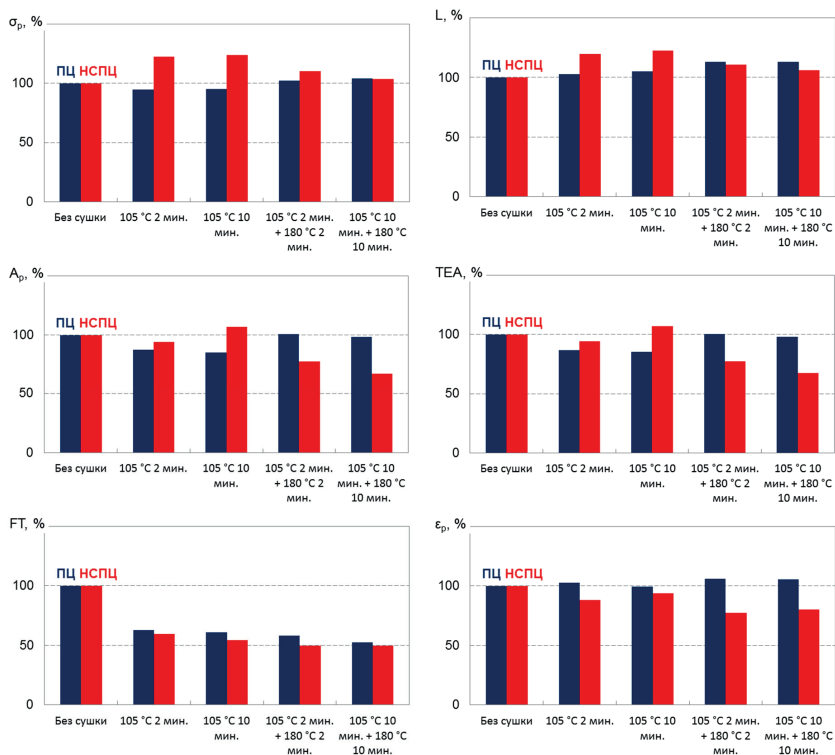


Рис 1. Влияние режима сушки и вида полуфабриката на физико-механические характеристики образцов в относительном выражении

Трещиностойкость образцов полуфабрикатов высокого выхода, изготовленных нейтрально-сульфитным и сульфатным способом варки, снижается в обоих случаях с увеличением продолжительности и температуры режима сушки. При температуре 180 °С, близкой к температуре, используемой на высокоскоростных гофроагрегатах, где зачастую наблюдается проблема растрескивания флютинга, происходит снижение трещиностойкости в два раза. Что обусловлено «охрупчиванием» материала в процессе воздействия высоких температур.

Если оценивать уровень характеристик качества в относительном выражении, то оба полуфабриката теряют трещиностойкость по показателю *FT*, но при этом у ПЦ даже при высокотемпературной обработке сохраняется сопоставимый с исходным уровнем деформативности, ТЕА и работы. А у НСПЦ эти характеристики существенно снижаются при уменьшении

влажности образцов. Уменьшение влажности и растяжимости приводит к растрескиванию. То есть в данном случае проблему низкой устойчивости структуры к растрескиванию можно наблюдать с помощью других комплексных показателей, а не с помощью показателя  $FT$ .

Дополнительным подтверждением вышесказанному являются кривые зависимости напряжение-деформация, представленные на рис. 2.

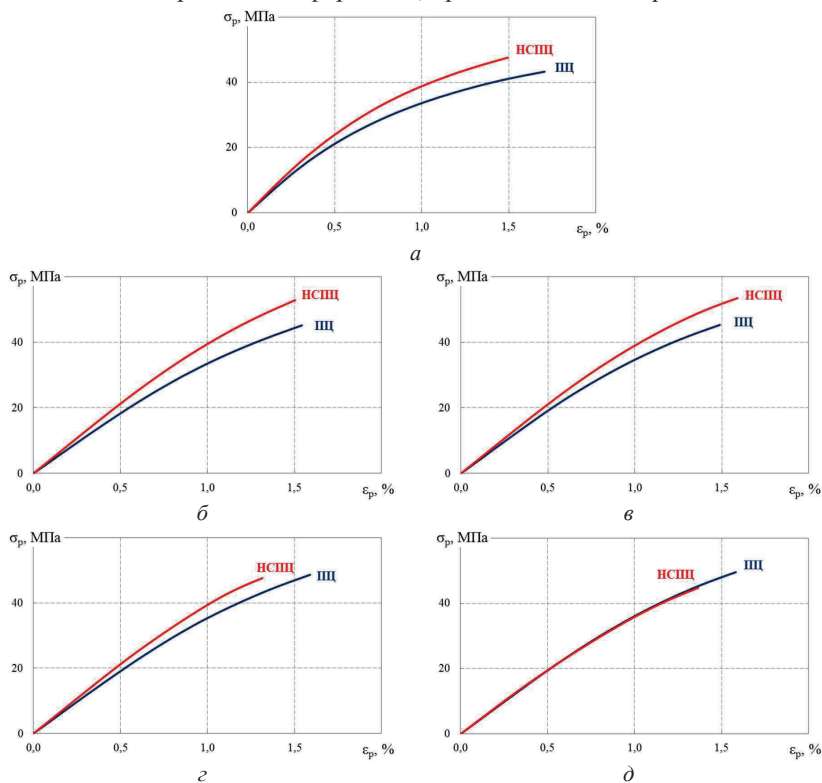


Рис. 2. Кривые зависимости напряжение-деформация при различных вариантах режима сушки: *а* – без сушки; *б* – 105 °С 2 минуты; *в* – 105 °С 10 минут; *г* – 105 °С 2 минуты + 180 °С 2 минуты; *д* – 105 °С 10 минут + 180 °С 10 минут

Отметим, что при невысоких значениях температуры (105 °С) прочность НСПЦ выше ПЦ, деформация практически на одном уровне, при высоких значениях температуры деформация разрушения у образцов ПЦ становится выше, чем у образцов НСПЦ, а прочность практически на одном



уровне. При самом жестком и длительном воздействии режима сушки наблюдается наложение кривых друг на друга.

По результатам эксперимента следует вывод о более прочных образцах, изготовленных из нейтрально-сульфитной полуцеллюлозы и более стойкой структуры к растрескиванию образцов, изготовленных из сульфатной полуцеллюлозы.

Таким образом, процесс сушки оказывает непосредственное влияние на отдельные группы свойств бумаги и картона, в особенности на характеристики деформативности и трещиностойкости. Следовательно, необходимо производить подбор сырья, используемого при производстве тарного картона, а также использовать такие режимы сушки, чтобы была возможность нивелирования воздействия слишком высоких температур на материал с целью минимизации низкокачественной продукции и проблем при производстве и переработке.

#### Список литературы

1. Лыков А.В. Теория сушки. Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1968. 472 с.
2. Галеева Н.А. Производство полуцеллюлозы и целлюлозы высокого выхода. М.: Лесн. пром-ть, 1970. 320 с.
3. Fellers C. Furniture foughness a new paper property // Paper Testing and Processes Optimization: Catalog / Lorentzen and Wettre. 1994. p. 92–98.

## СИСТЕМА СМЕШИВАНИЯ ХИМИКАТОВ TRUMPJET ДЛЯ КДМ/БДМ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

**К.А. Иванов**

*ООО «Макорус», г. Санкт-Петербург, Россия*

*Технология мгновенного смешивания химикатов TrumpJet Flash Mixing от компании Wetend Technologies Ltd. (Финляндия) позволяет снизить потребление химикатов мокрой части КДМ/БДМ на 20...60 % (и даже 100 %), сократить потребление свежей воды и повысить рентабельность производства.*

### TRUMPJET FLASH MIXING TECHNOLOGY FOR BM/PM AND EFFECT OF IT'S OPERATION

**К.А. Ivanov**

*Makorus Co. Ltd., St. Petersburg, Russia*

*TrumpJet Flash Mixing technology from Wetend Technologies Ltd. (Finland) allows to reduce consumption of wet end chemicals of the BM/PMs by 20 ... 60 % (and even 100 %), reduce fresh water consumption and increase the mill's profitability*

Одним из самых эффективных предложений для бумажных и картонных производств на сегодняшний день можно назвать революционную технологию смешивания химикатов *TrumpJet Flash Mixing* (далее *TrumpJet*) от компании *Wetend Technologies Ltd.* (Финляндия). На основе инновационных решений, инвестиций в НИОКР и тесного сотрудничества с заказчиками компания *Wetend* создала уникальную запатентованную технологию смешивания, которая со значительными экономическими преимуществами впрыскивает и мгновенно смешивает добавки и химикаты в технологических потоках. *Wetend* защитила свои продукты и методы более чем 100 патентами и патентными заявками по всему миру. В России технология *TrumpJet* была представлена впервые в 2012 г.

Основная сложность в дозировке химикатов заключается в недостаточной эффективности процесса их перемешивания с потоком массы. В традиционных методах удерживающие реагенты подаются в массу в виде очень малого потока через подающую или инъекционную трубку (скорость подачи потока химикатов 2...3 м/с). В результате в массовой трубе не создаётся турбулентный поток, добавки вытесняются к внутренней стенке трубы, где не происходит достаточного проникновения и смешивания добавок с во-



локнистой массой. По данным исследований *Wetend* максимальное удержание химикатов волокном происходит на 2...4 секунде после их введения в массу. Для каждого типа добавки компанией исследовано и подобрано своё время подачи и свои типы смесителей *TrumpJet* (рис. 1).

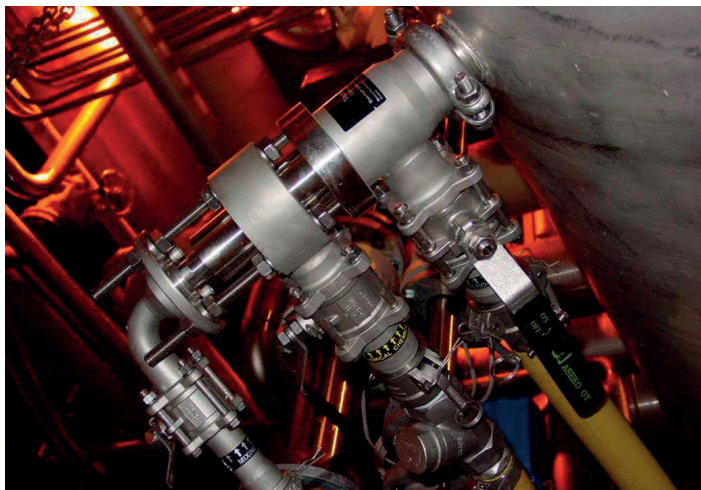


Рис 1. Смеситель *TrumpJet*

В смесителях *TrumpJet* поток химикатов подается в массный поток путем высокоскоростной инжекции со скоростью 25...30 м/с (в 10 раз выше в сравнении с традиционной системой смешивания). Добиться такой мощной инжекции позволяет инжекционный насос. Насос забирает часть бумажной массы с концентрацией 0,8...1,2 % и возвращает ее в смесители в качестве смесительного и инжекционного потока. В результате смешение химиката с потоком массы происходит быстро и однородно. Система *TrumpJet* позволяет добавлять в поток сразу несколько химикатов (отдельно катионных и анионных).

Поскольку система использует исходное сырье (массный поток) в качестве жидкости для инжекции, то необходимость использования свежей воды для дозировки химических веществ отпадает и, соответственно, уменьшаются затраты энергии на нагрев воды до рабочей температуры (рис. 2).

В совокупности система смешивания *TrumpJet* обеспечивает: 90 %-ое попадание добавок в напорный ящик и отсутствие их циркуляции по системе, контролируруемую корректировку подачи добавок, сокращение потребления химикатов на 20...60 % (и даже 100 %), улучшение качества бумаги и картона, формирования, профилей, что является актуальной задачей при повышении скорости БДМ/КДМ.

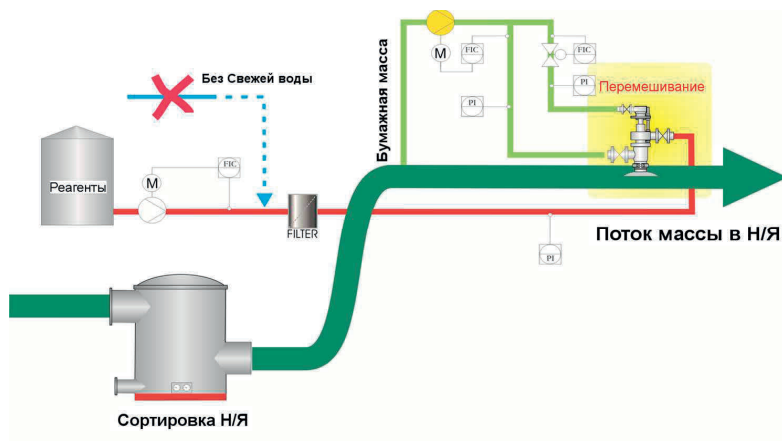


Рис. 2 Схема расположения смесителей *TrumpJet*

В результате тесного сотрудничества *Wetend* и *Sulzer* создан новый инновационный инжекционный насос, который делит поток массы на семь равных потоков, заменяя громоздкую разводку трубопроводов предыдущих версий установки (рис. 3,4).



Рис. 3. Инжекционный насос для системы *TrumpJet*

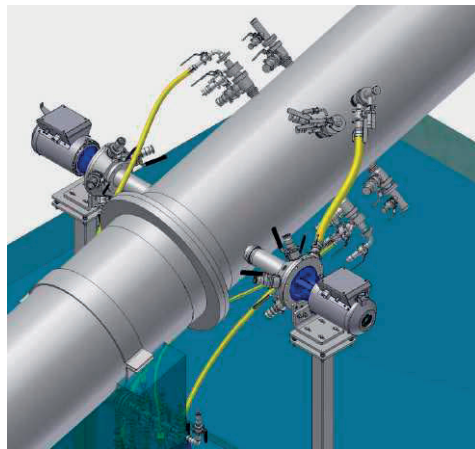


Рис. 4. Вид установленной станции *TrumJet*

За 18 лет присутствия на рынке было установлено более 525 систем смешивания более чем в двадцати странах мира (Европа, Северная Америка и Азия). Технология пользуется большим спросом в производстве широкого спектра бумаги и картонов.

Референции *TrumJet* в Российской Федерации и СНГ:

Пример № 1 – в 2013 г. были успешно реализованы две первые референции – обе на БДМ, производящих чисто-целлюлозную офисную бумагу.

Пример № 2 – БДМ для производства облицовочного и гофрированного картона из макулатуры производительностью 250 т/сут. (проект 2013 г.). Для работы системы потребовались две станции *TrumJet*. Результаты внедрения технологии:

Крахмал – снижение потребления более чем на 30 %.

АКД – снижение потребления на 10 %.

Удерживающий полимер – исключение на 100 %.

Необходимость использования удерживающего полимера была полностью устранена путем перемещения точки подачи крахмала ближе к напорному ящику БДМ. Крахмал начал функционировать в роли агента, повышающего прочность и удержание. Также следует отметить однородность структуры полотна. Использование свежей воды для разбавления было полностью устранено.



Пример № 3 – БДМ для производства легкомелованной бумаги (LWC) производительностью 200 т/сут. (проект 2017 г.). Целью модернизации системы подачи химикатов являлось снижение удельных расходов химикатов (полиакриламид, микрополимер, крахмал, клей АКД) с сохранением физико-механических характеристик легко-мелованной бумаги при условии нормального функционирования бумагоделательной машины. В результате была размещена система смешения химикатов *TrumpJet Forte/Chord*, которая позволила фактически снизить расходы следующих химикатов:

ПАА – 25 %.

Микрополимер – 10 %.

Катионный крахмал – 13 %.

АКД – 6,3 %.

Пример № 4 – в настоящее время ведется подготовка к пуско-наладочным работам и запуску системы *TrumpJet* на КДМ для производства картона для плоских слоев на предприятии в Украине.

Таким образом, результаты внедрения системы смешивания химикатов *TrumpJet* от *Wetend Technologies Ltd.*, полученные с более чем 525 промышленных установок, позволяют утверждать о высокой эффективности предлагаемой технологии для целлюлозно-бумажной промышленности. Средняя окупаемость проектов по внедрению технологии *TrumpJet* обычно составляет менее одного года.

*Компанию Wetend Technologies Ltd. и ее технологические решения на рынке Российской Федерации и стран СНГ представляет ООО «Макорус» (г. Санкт-Петербург, [www.makorus.com](http://www.makorus.com)). Команда специалистов компании прошла специальную подготовку и готова незамедлительно сопровождать любой проект на стадии переговоров, согласования, заказа, поставки, монтажа и пуска, а также гарантийного обслуживания.*

## ГОФРОКАРТОН. РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ ПРОЧНОСТИ СОСТАВЛЯЮЩИХ СЛОЁВ.

Е.А. Глезман<sup>1</sup>, А.М. Гурьянов<sup>1</sup>, В.А. Житнюк<sup>1</sup>, И.П. Рябов<sup>1</sup>, А.М. Идиатуллин<sup>2</sup>,  
Н.А. Тараканова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГП «ПЦБК», Пермь, Россия

<sup>2</sup>ООО «Технобум-2», Московская обл., Россия

*Образцы гофрокартона и составляющих его слоёв – картона для плоских слоёв и бумаги для гофрирования отбирали в процессе производства. Гофрокартон анализировали на показатель торцевого сжатия ECT, а составляющие слои на показатели сжатия CCT и SCT. Приводятся экспериментальные формулы зависимости прочности гофрокартона ECT от CCT и SCT.*

## CORRUGATED BOARD. CALCULATION OF THE COMPRESSIVE STRENGTH IN TERMS OF STRENGTH OF THE CONSTITUENT LAYERS

Е.А. Glezman<sup>1</sup>, А.М. Guryanov<sup>1</sup>, V.A. Zhitnyuk<sup>1</sup>, I.P. Ryabov<sup>1</sup>, А.М. Idiatullin<sup>2</sup>,  
N.A. Tarakanova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PermCBK, Perm, Russia,

<sup>2</sup>Moscow Region, Russia

*Samples of corrugated board and its constituent layers – test liner and fluting were taken during the production process. The corrugated board was analyzed for the ECT (edge crush test), and the constituent layers for the CCT and SCT indices. The experimental formulas for the dependence of the ECT strength of the corrugated board on the CCT and SCT indices are given.*

В статье рассматривается вопрос о взаимосвязи прочности гофрокартона, из которого изготавливается транспортная гофротара, и прочностных показателей исходных слоёв гофрокартона – картона для плоских слоёв и бумаги для гофрирования.

Известно, что в соответствии с ГОСТ 9142 «Ящики из гофрированного картона. Общие технические условия» усилие сопротивления гофроящиков сжатию (*BCT*) рассчитывается через показатель сопротивления торцевому сжатию гофрированного картона вдоль гофров (*ECT*). То есть, после того как будет выбрана нагрузка и форма ящика, прочность ящика на сжатие *BCT* рассчитывается через показатель *ECT* гофрокартона и далее выбирается гофрокартон соответствующей марки с нужным показателем *ECT*. Известно также, что прочность гофрокартона на сжатие по *ECT* зависит от прочности на сжатие исходных слоёв – картона (лайнера) для плоских



слоёв и бумаги для гофрирования. Эта зависимость  $ECT$  от показателей составляющий слоёв для трехслойного гофрокартона выражается формулой пропорциональности (1):

$$ECT \approx \text{Сжатие Лайнера 1} + \text{Сжатие Лайнера 2} + \text{Сжатие Бумаги} \times \text{Фактор гофрирования} \quad (1)$$

Под термином «Сжатие» понимается один из возможных показателей сопротивления сжатию исходных слоёв. А именно это могут быть известные показатели сжатия (в поперечном направлении):

- $CCT$  (сопротивление торцевому сжатию гофрированного образца);
- $SCT$  (сопротивление сжатию на коротком расстоянии);
- $RCT$  (сопротивление сжатию кольца).

Под фактором гофрирования имеется ввиду коэффициент гофрирования бумаги:

- для гофра «В» коэффициент гофрирования обычно 1,32...1,38;
- для гофра «С» коэффициент гофрирования обычно 1,42...1,46.

Учитывая сравнительную простоту формулы (1) и известность показателей  $CCT$ ,  $SCT$  и  $RCT$  можно было бы рассчитывать и прогнозировать показатель  $ECT$  гофрокартона исходя из показателей исходных слоёв. Однако, на практике показатель  $ECT$  не рассчитывают и не прогнозируют, а подбирают его опытным путем и формируют подборки слоёв гофрокартона по массе 1 м<sup>2</sup> гофрокартона без учета их конкретных показателей. В данной работе мы предлагаем восполнить этот пробел.

При производстве гофрокартона на ГП «ПЦБК» с гофроагрегатов были отобраны образцы гофрокартона и одновременно образцы исходных слоёв картона для плоских слоёв и бумаги. Были отобраны 26 образцов гофрокартона с первичными слоями. Из них 16 образцов с гофром «С» и 10 образцов с гофром «В».

Далее в лаборатории ООО «Технобум-2» были проведены испытания данных образцов: гофрокартон испытывали на показатель  $ECT$ , а образцы исходных слоёв на показатели  $CCT$  и  $SCT$ . Результаты испытаний представлены в табл. 1,2.

Обращаясь к общей формуле (1) и используя экспериментальные данные табл. 1,2 можно рассчитать конкретные коэффициенты и получить данную формулу уже не со знаком пропорциональности, а со знаком равенства. Для этого надо рассчитать коэффициенты пропорциональности для каждого из вариантов расчета:



Таблица 1. Первичные данные показателей *CCT* и *SCT* составляющих слоёв картона и бумаги и показателя *ECT* готового гофрокартона. Гофр «С»

№	Состав сбора	Тип гофр	<i>CCT</i> слоёв, кН/м			<i>SCT</i> слоёв, кН/м			<i>ECT</i> Факт.
			$K_{кл}$	Б	$K_{гф}$	$K_{кл}$	Б	$K_{гф}$	
1	120-120-120	T-22C	1,63	1,72	1,65	2,24	2,04	2,07	4,57
2	120-120-120	T-22C	1,71	1,74	1,74	2,14	2,03	1,95	4,72
3	120-120-120	T-22C	1,77	1,87	1,79	2,09	2,19	2,22	5,00
4	135-120-135	T-23C	1,65	1,58	1,74	1,87	1,74	1,98	4,32
5	135-112пц-135	T-23C	1,56	1,51	1,87	1,89	2,10	2,16	4,89
6	135-120-135	T-23C	1,99	1,67	2,01	2,45	2,08	2,37	5,23
7	135-120-135	T-23C	2,00	1,90	2,01	2,54	2,16	2,47	5,43
8	135-120-135	T-23C	1,95	1,81	1,93	2,19	2,12	2,09	5,24
9	135-120-135	T-23C	1,83	1,74	1,83	2,29	2,11	2,17	5,12
10	150-112пц-150	T-24C	2,07	1,70	2,03	2,33	2,13	2,33	4,86
11	150-112пц-150	T-24C	1,98	2,05	1,99	2,29	2,33	2,28	5,24
12	150-112пц-150	T-24C	2,13	1,73	2,12	2,37	2,03	2,41	5,19
13	150-112пц-150	T-24C	2,06	1,58	2,01	2,16	1,91	2,17	5,25
14	150-120-150	T-24C	1,98	1,77	1,98	2,26	2,13	2,32	5,44
15	175-125пц-175	T-25C	2,25	2,06	2,10	2,70	2,46	2,64	6,13
16	175-125пц-175	T-25C	2,41	2,10	2,52	2,69	2,60	2,81	6,39



Таблица 2. Первичные данные показателей  $CCT$  и  $SCT$  составляющих слоёв картона и бумаги и показателя  $ECT$  готового гофрокартона. Гофр «В».

№	Состав сбора	Марка гофрокартона	$CCT$ слоёв, кН/м			$SCT$ слоёв, кН/м			$ECT$ , факт кН/м
			$K_{кл}$	Б	$K_{гф}$	$K_{кл}$	Б	$K_{гф}$	
17	120-120-120	T-22 В	1,56	1,64	1,56	2,02	1,87	2,03	4,72
18	120-120-120	T-22В	1,63	1,87	1,68	1,88	2,19	1,98	5,08
19	120-120-150	T-22В	1,47	1,63	2,08	2,41	1,91	1,81	4,55
20	120-120-150	T-23В	1,61	1,57	1,97	2,16	1,85	1,87	4,86
21	135-112пц-132	T-23В	1,73	1,74	1,73	2,20	2,22	2,18	5,52
22	135-120-135	T-23В	1,71	1,68	1,75	1,98	1,87	1,93	5,28
23	135-112пц-135	T-23В	1,99	1,86	1,84	2,47	2,43	2,21	5,72
24	150-112пц-150	T-24В	1,82	1,62	1,95	2,29	2,36	2,20	5,65
25	150-112пц-150	T-24В	1,95	1,68	2,01	2,01	2,27	2,28	5,39
26	150-120-150	T-24В	2,10	1,95	1,99	2,41	2,26	2,49	5,98

для гофра «С» и зависимости  $ECT$  от  $CCT$  формула выглядит так:

$$ECT(C) = K_1 \times (CCT_1 + CCT_2 + 1,44 \times CCT_B) \quad (2)$$

для гофра «С» и зависимости  $ECT$  от  $SCT$  формула выглядит так:

$$ECT(C) = K_2 \times (SCT_1 + SCT_2 + 1,44 \times SCT_B) \quad (3)$$

для гофра «В» и зависимости  $ECT$  от  $CCT$  формула выглядит так:

$$ECT(B) = K_3 \times (CCT_1 + CCT_2 + 1,34 \times CCT_B) \quad (4)$$

для гофра «В» и зависимости  $ECT$  от  $SCT$  формула выглядит так:

$$ECT(B) = K_4 \times (SCT_1 + SCT_2 + 1,34 \times SCT_B) \quad (5)$$

где:  $K_1, K_2, K_3, K_4$  – искомые коэффициенты пропорциональности;  
 $CCT_1, CCT_2, SCT_1, SCT_2$  – показатели сжатия 1-го и 2-го слоя картона;  
 $CCT_B, SCT_B$  – показатели сжатия бумаги;

1,44 и 1,34 – Коэффициенты гофрирования для гофра «С» и для гофра «В».

В результате математических расчетов на базе экспериментальных данных были получены следующие значения коэффициентов и формулы в целом:

$$ECT(C) = 0,80(CCT_1 + CCT_2 + 1,44CCT_B) \quad (6)$$





$$ECT(B) = 0,89(CCT_1 + CCT_2 + 1,34CCT_b) \quad (7)$$

$$ECT(C) = 0,68(SCT_1 + SCT_2 + 1,44SCT_b) \quad (8)$$

$$ECT(B) = 0,74(SCT_1 + SCT_2 + 1,34SCT_b) \quad (9)$$

Далее мы рассчитали среднеквадратичные отклонения, используя соотношение расчетных и фактических значений  $ECT$  – это позволяет оценить точность формул. Среднеквадратичные отклонения оказались в пределах 4...7 % от указанного соотношения значений  $ECT$ . Это говорит о хорошем совпадении расчетных и фактических значений  $ECT$ .

Анализируя зависимость  $ECT$  от  $CCT$  в формулах (6) и (7) можно отметить, что коэффициенты  $K_1$ ,  $K_2$  меньше единицы. Это означает, что фактическое значение  $ECT$  меньше, чем сумма показателей  $CCT$  бумаги и картона. Хотя методы испытаний  $ECT$  и  $CCT$  фактически однотипны, если не сказать – идентичны (см. фото на рис.1...4). Кроме того, к сумме показателей  $CCT$  первичных слоёв в общую прочность показателя  $ECT$  гофрокартона должна добавляться и дополнительная прочность от крахмального клевого шва. Тем не менее фактическая прочность  $ECT$  гофрокартона получается меньше, чем сумма показателей  $CCT$  плюс прочность клевого шва. Этот результат можно объяснить тем фактом, что в процессе гофрирования происходит определенное разрушение структуры гофробумаги, а также некоторое разрушение структуры картона на гофропрессе, где происходит приклеивание первого слоя картона к гофробумаге.

Это обстоятельство нужно учитывать при производстве гофрокартона – излишнее сдавливание бумаги и картона на гофропрессе гофроагрегата, недостаточный прогрев и увлажнение бумаги перед гофропрессом (то есть не достижение бумагой состояния эластичности) приводит к разрушению структуры бумаги. Фактор частичного разрушения бумаги в процессе гофрирования говорит о том, что коэффициенты пропорциональности в формулах (6) – (9) могут меняться для разных гофроагрегатов и режимов гофрирования.

В формулах (6) – (9) перед показателями  $CCT$  и  $SCT$  для бумаги стоит повышающий коэффициент гофрирования. Однако, с учетом частичного разрушения бумаги в процессе гофрообразования логично было бы применить и понижающий коэффициент. Затратив определенное время на дополнительные математические расчеты, мы пришли к выводу, что точность указанных формул не страдает от того, учитывается ли коэффициент гофрирования для бумаги, или нет. В результате формулы (6)–(9) могут приобрести более простой вид:

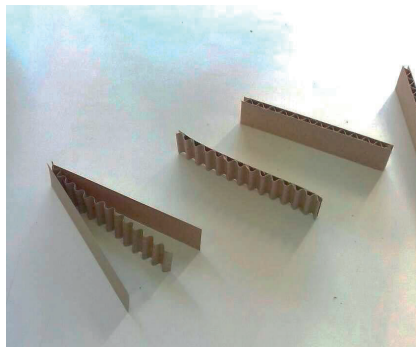


Рис. 1. Внешний вид составляющих слоёв картона и бумаги, дуплекса и трехслойного гофрокартона

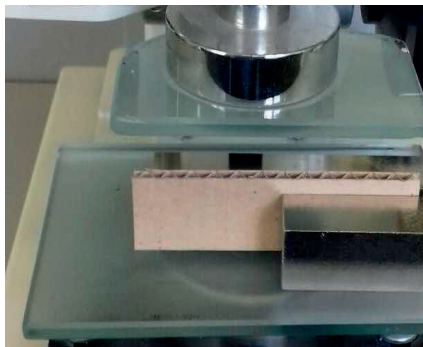


Рис. 2. Испытания гофрокартона на *ECT*: усилие сжатия прилагается сверху; по бокам поддерживающие бруски

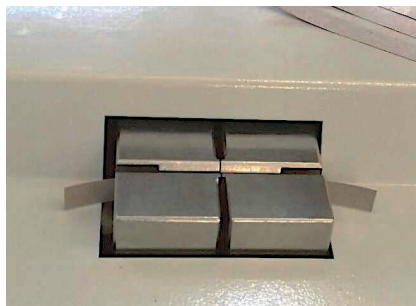


Рис. 3. Положение полоски картона, бумаги в зажимах прибора SCT – сжатие на коротком (0,7 мм) расстоянии

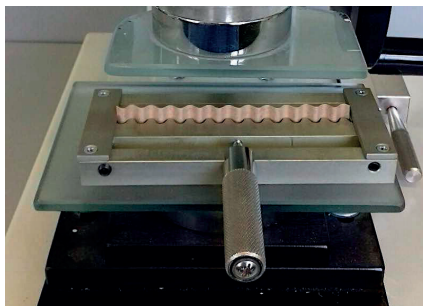


Рис.4. Испытание образца бумаги для гофрирования по методу SCT: гофрированный образец в специальном зажиме

$$ECT(C) = K_5 \times (CCT_1 + CCT_2 + CCT_B)$$

$$ECT(B) = K_6 \times (CCT_1 + CCT_2 + CCT_B)$$

$$ECT(C) = K_7 \times (SCT_1 + SCT_2 + SCT_B)$$

$$ECT(B) = K_8 \times (SCT_1 + SCT_2 + SCT_B).$$

После расчетов коэффициентов  $K_5 - K_8$  и замены выражений  $(CCT_1 + CCT_2 + CCT_B)$  на эквивалентное  $\Sigma CCT_i$  и  $(SCT_1 + SCT_2 + SCT_B) = \Sigma SCT_i$  наши формулы выражения *ECT* от *CCT* и *SCT* приобретают совсем простой вид:



$$ECT(C) = 0,914 \Sigma CCT_i \quad (10)$$

$$ECT(B) = 0,99 \Sigma CCT_i \quad (11)$$

$$ECT(C) = 0,775 \Sigma SCT_i \quad (12)$$

$$ECT(B) = 0,824 \Sigma SCT_i \quad (13)$$

Сравнивая формулы (10) и (11), а также (12) и (13) можно отметить еще один важный факт – показатель *ECT* гофрокартона при одинаковом составе слоёв получается выше для гофра «В», чем для гофра «С». Это отчасти парадоксальный факт. Известно, что гофроящички из гофра «В» при прочих равных условиях всегда слабее, чем гофроящички из гофра «С». И это несмотря на то, что показатель *ECT* для гофра «В» будет выше. Объяснить эти «несстыковки» можно следующим. Более высокий показатель *ECT* у гофра «В» можно объяснить тем, что при гофре «В» образуется более мелкая структурная ячейка, которую при вертикальном сдавливании труднее разрушить, чем более крупную ячейку с гофром «С». А прочность гофроящички с гофром «С» выше, чем с гофром «В» объясняется это тем, что толщина и жесткость на изгиб у гофрокартона «С» заметно выше, чем у гофрокартона «В», а реальные гофроящички в штабелях ломаются как правило, на изгиб, поэтому гофроящички с гофром «С» при прочих равных условиях прочнее, чем с гофром «В».

В табл. 3 приводятся результаты расчетов среднеквадратичного отклонения расчетных и фактических значений *ECT* в рамках проведенного эксперимента.

Таблица 3. Величина среднеквадратичного отклонения соотношения расчетных и фактических значений *ECT* при использовании различных формул расчета *ECT* для гофра «В», «С» и показателей *CCT* и *SCT* первичных слоёв

№	Вид гофра	Вид сжатия	Коэфф. гофрир.	Формула	Среднекв. откл., %
1	В	<i>CCT</i>	1,34	$ECT = 0,89(CCT_1 + CCT_2 + 1,34CCT_B)$	6,8
2	В	<i>CCT</i>	1,00	$ECT = 0,99(CCT_1 + CCT_2 + CCT_B)$	6,4
3	В	<i>SCT</i>	1,34	$ECT = 0,74(SCT_1 + SCT_2 + 1,34SCT_B)$	5,3
4	В	<i>SCT</i>	1,00	$ECT = 0,824(SCT_1 + SCT_2 + SCT_B)$	5,2
5	С	<i>CCT</i>	1,44	$ECT = 0,80(CCT_1 + CCT_2 + 1,44CCT_B)$	4,1
6	С	<i>CCT</i>	1,00	$ECT = 0,914(CCT_1 + CCT_2 + CCT_B)$	4,1
7	С	<i>SCT</i>	1,44	$ECT = 0,68(SCT_1 + SCT_2 + 1,44SCT_B)$	4,1
8	С	<i>SCT</i>	1,00	$ECT = 0,775(SCT_1 + SCT_2 + SCT_B)$	4,0



### Выводы:

1. Проведены исследования зависимости сопротивления торцевому сжатию гофрированного картона вдоль гофров ( $ECT$ ) от прочности на сжатие исходных слоёв бумаги и картона. Используются промышленные образцы гофрокартона марок Т-22 – Т-25 и составляющих его слоёв для гофрокартона с гофром «В» и «С». Анализ исходных слоёв картона и бумаги проводили по показателям  $CCT$  и  $SCT$ .

2. По результатам исследования предложены простые формулы, позволяющие рассчитывать прочность гофрокартона  $ECT$  от показателей  $CCT$  и  $SCT$ . Показано, что рассчитанные по формулам и фактические значения  $ECT$  отличаются в пределах 4,0...6,8 % по квадратичному отклонению. Установленные коэффициенты в формулах, однако, могут отличаться для различных условий гофрирования.

3. Показано, что прочность готового гофрокартона  $ECT$  несколько ниже, чем сумма прочности исходных слоёв по методу  $CCT$ , что может быть связано с частичным разрушением и снижением прочности бумаги в процессе гофрирования на гофроагрегате.

4. Показано, что прочность  $ECT$  гофрокартона с гофром «В» выше, чем прочность гофрокартона с гофром «С» при одинаковых исходных слоях, что может быть связано с большей прочностью на сжатие структурной ячейки с гофром «В», чем с гофром «С». Тем не менее прочность гофрощика с гофром «В» будет ниже, чем гофрощика с гофром «С».



## СМОЛЯНЫЕ ЗАТРУДНЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СУЛЬФАТНОЙ БЕЛЕННОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ИЗ СМЕСИ БЕРЕЗОВОЙ И ОСИНОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ

**А.А. Дряхлицын, Ю.В. Севастьянова**

*Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия*

*В ходе исследовательской работы проведено комплексное обследование производства беленой целлюлозы, установлено влияние накопления непроецесных элементов в щелочевой системе на образование смоляных затруднений при производстве лиственной сульфатной целлюлозы.*

## RESIN DIFFICULTY IN THE PRODUCTION OF BLEACHED KRAFT PULP FROM A MIXTURE OF BIRCH AND ASPEN WOOD

**A.A. Dryahlicin, Yu.V. Sevastyanova**

*Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia*

*In the course of the research, a comprehensive survey of bleached pulp production was conducted, the influence of accumulation of non-process elements in the liquor system on the formation of resin difficulties in the production of hardwood kraft pulp was established.*

Целью данной работы является исследование причин обострения смоляных затруднений при производстве беленой лиственной сульфатной целлюлозы применительно к условиям целлюлозно-бумажного комбината.

На одном из предприятий в период с 16 ноября по декабрь 2016 года на производстве беленой целлюлозы возникла проблема повышенного содержания экстрактивных веществ в целлюлозе. На первом этапе работ проведено обследование производственного потока – отобраны пробы щепы, целлюлозы, готовой продукции, фильтратов, производственных щелоков.

На данном предприятии используется следующая схема отбелки:

Ф<sub>0</sub>-Д<sub>0</sub>-Щ<sub>1</sub>-Д<sub>1</sub>-Щ<sub>2</sub>-Д<sub>2</sub>-К

В отобранных пробах технологической щепы и образцов целлюлозы по потоку производства проведен анализ содержания экстрактивных веществ, который проводился в соответствии с ГОСТ 6841-77 (экстрагент – хлористый метилен). Результаты представлены в табл. 1. В результате исследований в образцах целлюлоз был выявлен повышенный уровень содержания экстрактивных веществ.

Таблица 1. Содержание экстрактивных веществ в пробах лиственной целлюлозы

Дата	Точки отбора									
	В/К*	ПФ** № 2	ПФ № 3	В/ф*** № 1	В/ф № 2	В/ф № 3	В/ф № 4	В/ф № 5	В/ф № 6	ГП*
18.11	1,96	–	0,41	0,43	0,49	0,43	0,41	0,38	0,36	0,28
22.11	1,98	0,55	0,52	0,51	0,49	0,44	0,42	0,40	0,36	0,34
30.11	1,96	–	0,48	0,43	0,41	0,40	0,39	0,37	0,28	0,27
06.12	1,94	–	0,40	0,36	0,34	0,33	0,32	0,28	0,26	0,22

\*ПФ – промывной фильтр, В/ф – вакуум фильтр, ГП – готовая продукция

Для выявления причин повышенного содержания экстрактивных веществ в готовой продукции проведен микроскопический анализ. Результаты микроскопического анализа образцов целлюлозы и белого щелока представлены на рис. 1. В ходе микроскопического анализа образцов целлюлозы на волокнах обнаружены загрязнения неизвестного характера – при окрашивании Суданом IV загрязнения окрашиваются в черный цвет. Данные загрязнения обнаружены в пробах по всему потоку. Содержание экстрактивных веществ в пробе готовой продукции при экстрагировании хлористым метилом составило 0,26 %.

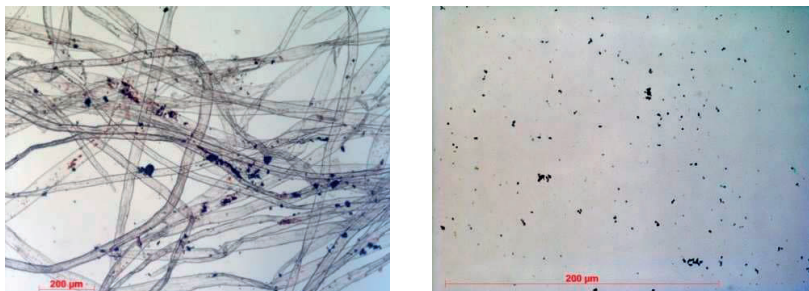


Рис. 1. Микрофотографии загрязнений в целлюлозе и белом щелоке

Для определения характера выявленных загрязнений был проведен микроскопический анализ проб целлюлозы после экстракции, установлено, что в ходе экстрагирования хлористым метилом загрязнения не растворяются до конца, их цвет становится более светлым, что свидетельствует о сильной взаимосвязи загрязнений с поверхностью волокна.

Обследование технологического потока показало наличие нерастворимых загрязнений на волокне в массе по всем стадиям производства,



при этом обнаруженные загрязнения сложно отнести к «вредной» смоле, поскольку не наблюдается отложений на оборудовании и БДМ, также не наблюдается увеличения сорности в готовой продукции. Не обнаружено увеличения загрязнений в отходах сортирования беленой целлюлозы. При этом обнаруженные загрязнения должным образом не удаляются на стадии промывки целлюлозы и в процессе отбелки. Микроскопический анализ массы после варки и на всех этапах производства целлюлозы показывает, что агломераты смолы в большей степени находятся не внутри волокна, а на его поверхности.

Вещества, образующие комплекс соединений со смолой на волокне, могут поступать в варочный котел как с древесиной, так и белым щелоком.

Таблица 2. Режим варки лиственной целлюлозы в котле непрерывного действия

Зоны котла	Длительность, мин	Температура, °С
Зона пропитки	60	114...116
Верхняя варочная зона	60	153...154
Нижняя варочная зона	90	159...160
Зона промывки	100	

Таблица 3. Результаты варки лиственной целлюлозы

Щелок	Расход диспергатора кг/т	Концентрация активной щелочи, г/л в ед. Na <sub>2</sub> O	Выход целлюлозы, %	Число Каппа	Содержание экстр. веществ, %
ЛЩ	–	107	52,4	24,4	1,00
	0,5		53,1	22,1	0,82
ПЩ	–	89	52,6	23,4	1,05
	0,5		53,6	21,6	0,93

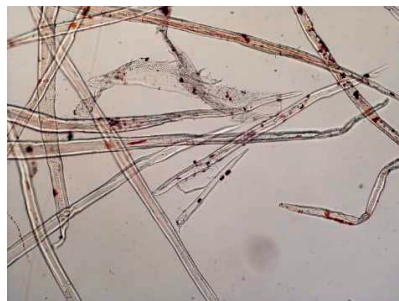
На основании полученных результатов было принято решение о проведении серии варок в условиях ИТЦ «СТПБС» с использованием модельного щелока (ЛЩ) (приготовленного в лабораторных условиях) и производственного щелока (ПЩ).

Условия варки: гидромодуль варки 3, расход активной щелочи 17,5 % от массы а.с. древесины в ед. Na<sub>2</sub>O, температурно-временной режим получения образцов лиственной целлюлозы представлены в табл. 2. Результаты варок представлены в табл. 3 по трем параллельным пробам образцов целлюлозы, сходимость по значению числа Каппа, для которых составляла не менее 95...98 %.

При проведении микроскопического анализа проб целлюлозы, выявлено, что на поверхности волокон, образцов целлюлозы полученных при использовании производственного щелока, имеются загрязнения в виде крупных черных включений. В образцах целлюлозы, полученных на щелоке, приготовленном в лабораторных условиях, подобные загрязнения на волокнах практически отсутствуют.



Производственный щелок



Лабораторный щелок

Рис. 2. Микрофотографии волокон лиственной сульфатной целлюлозы

Данные микроскопического анализа подтверждаются результатами определения экстрактивных веществ в образцах целлюлозы, – в пробах, полученных на модельном щелоке уровень содержания экстрактивных веществ ниже, чем в пробах целлюлозы, полученных на производственном щелоке.

Наличие на поверхности волокон целлюлозы микроскопических загрязнений при использовании производственного щелока свидетельствует о повышенном содержании непроцессных элементов в белом щелоке, что возможно приводит к повышению удельной поверхности раствора, при которой не происходит диспергирования загрязнений с поверхности волокон целлюлозы в варочный раствор и в фильтрат при промывке.

Для более полного количественного определения непроцессных элементов, находящихся в белом щелоке, проведен анализ веществ осажденных на целлюлозной папке при фильтрации 1 л производственного белого щелока, (концентрация активной щелочи 89 г/л в ед.  $\text{Na}_2\text{O}$ ), результаты представлены в табл. 4.





Таблица 4. Элементный состав целлюлозной папки и осадка на папке после фильтрации 1 л производственного белого щелока

Элемент	Фильтр	Фильтр с осадком	Δ
	мг элемента/кг фильтра	мг элемента/кг фильтра	
Na	43,6	65578,9	65535,3
S	11,2	2576,1	2564,9
Ca	42,9	111,6	68,7
Fe	10,2	60,5	50,3
K	5,4	655,6	650,2
Mg	42,0	23,3	-18,7
Al		9,8	9,8
B		2,5	2,5
Mn		9,6	9,6
Ni		2,8	2,8
V		2,3	2,3

Присутствие металлов переменной валентности приводит к образованию комплексных соединений приводящих к агломерации частиц смолы на поверхности целлюлозных волокон. Согласно технологии регенерации щелоков данные непроецессные элементы могут поступать в систему каустизации при некачественном удалении черного шлама из зеленого щелока, а также со свежим известняком. С целью выявления характера непроецессных проведено определение зольности (83,3 %) и количественный элементный анализ состава золы черного шлама, результаты представлены в табл. 5.

В золе шлама зеленого щелока в период возникновения смоляных затруднений определено высокое содержание Na, S, Ca и Mg, что является нормальным для данного вида отходов производства, также в состав минеральной части черного шлама входят Si (3,5 %), Mn (3,6 %) и Fe (1,4 %), содержание остальных элементов находится на уровне ниже 1,0 %. Для более конкретных выводов необходимо вести мониторинг состава черного шлама.

Таким образом, было установлено, что в производственных условиях в период возникновения смоляных затруднений наблюдается снижение показателей общей щелочности, а также сульфидности зеленого щелока, поступающего из СРК. Изменение этих показателей привело к снижению активности и сульфидности белого щелока, поступающего на варку. Недостаточная активность белого щелока приводит к снижению эффективности экстракции смолы на стадии варки.



Таблица 5. Рентгенофлуоресцентная спектроскопия (XRF-1800) золы шлама зеленого щелока (2016-шлам зеленого щелока 08.12.2016) (%)

Элементы	Количество, %
железо ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	1,3984
марганец ( $\text{MnO}$ )	3,6324
хром ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )	0,1561
кальций ( $\text{CaO}$ )	19,5618
сера ( $\text{SO}_3$ )	12,4902
фосфор ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	0,0381
кремний ( $\text{SiO}_2$ )	3,5269
алюминий ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	0,9071
магний ( $\text{MgO}$ )	8,3973
стронций ( $\text{SrO}$ )	0,0943
калий ( $\text{K}_2\text{O}$ )	1,5193
хлор ( $\text{Cl}$ )	0,1915
натрий ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	20,3013
цинк ( $\text{ZnO}$ )	0,8152
барий ( $\text{BaO}$ )	0,0743
медь ( $\text{CuO}$ )	0,0625
никель ( $\text{NiO}$ )	0,1105

Снижение сульфидности в зеленом щелоке приводит к накоплению инертных примесей в щелоках на всех стадиях регенерации, и как следствие в белом щелоке. К инертным примесям можно отнести: невосстановленный сульфат; сульфит и тиосульфат; силикаты, хроматы, алюминаты; силикаты и алюминаты кальция, магния, железа и сернистых соединений.

Для предотвращения возникновения подобных проблем при производстве лиственной сульфатной целлюлозы из смеси березовой и осиновой древесины необходимо вести строгий контроль состава зеленого и белого щелоков, черного шлама и извести, используемой для восполнения потерь.

#### Список литературы

1. Хренов Ф.А., Драчев А.А., Акишин Д.А., Севастьянова Ю.В., Молодцова М.А., Дряхлицын А.А. Возможность снижения расхода щелочи при варке сульфатной целлюлозы для отбелки // В сб. «Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов»: матер. IV Междун. научно-технич. конфер., посвящ. памяти профессора В.И. Комарова. (Архангельск, 14-16 сентября 2017 г.) Архангельск, САФУ. С. 201–204.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ТАРНОГО КАРТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Д.Н. Жирнов<sup>1</sup>, Е.В. Дернова<sup>2</sup>, Д.А. Дулькин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Сухонский КБК», Сокол, Россия

<sup>2</sup> ООО «УК «ОБФ», Москва, Россия

*В статье представлены практические результаты использования методов машинного обучения для прогнозирования качества тарного картона.*

## PREDICTION OF THE CARDBOARD PRODUCT QUALITY USING THE MACHINE LEARNING METHODS

D.N. Zhirnov<sup>1</sup>, E.V. Dernova<sup>2</sup>, D.A. Dulkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> LLC «Suhonsky BPM», Sokol, Russia

<sup>2</sup> LLC «Consolidated Paper Mill», Moscow, Russia

*This article is about the practical results of using machine learning methods for production cardboard quality.*

Эффективность работы любого предприятия является залогом конкурентоспособности и повышения качества готовой продукции. К большому сожалению, оценка эффективности работы оборудования происходит пост-фактум, т.е. событие уже произошло и на него не повлиять. Для снижения данного эффекта современные системы менеджмента качества используют целевой подход к управлению несоответствиями с разработкой корректирующих мероприятий для предотвращения появления данных проблем в будущем. Эффективность данных методик в значительной степени зависит от квалифицированности персонала в области выявления причин возникновения проблем с качеством готовой продукции. Типичный технологический процесс представляет собой многокомпонентную взаимосвязанную систему и персоналу крайне сложно выявить истинные причины проблем, которые могут носить «системный характер». К тому же, объем накопленных данных с использованием соответствующего уровня автоматизации, может быть приравнен к объему Big data [1].

Развитие современного общества не представляется возможным без передовых информационных технологий. Используя современные информационные технологии, в т.ч. поисковые системы типа «Яндекс», «Google»

и др., пользователь не замечает, что они основаны на довольно сложных механизмах, которые используют методы машинного обучения. Согласно определению, машинное обучение - класс методов искусственного интеллекта, характерной чертой которых является не прямое решение задачи, а обучение в процессе применения решений множества сходных задач. Для построения таких методов используются средства математической статистики, численных методов, методов оптимизации, теории вероятностей, теории графов, различные техники работы с данными в цифровой форме [2].

Таким образом, использование методов машинного обучения применительно к процессам производства тарного картона позволяет использовать их для выявления «системных» причин возникающих проблем. В частности, нейронные сети (рис. 1), исходя из названия, моделируют поведение человеческого мозга. Нейронная сеть состоит из множества нейронов, которые благодаря взаимодействию между собой получают способность к обучению. После обучения данные сети могут прогнозировать результат по входным параметрам. Таким образом, задачу с предсказанием возможных проблем с качеством готовой продукции можно решить используя нейронные сети, которые выявляют скрытые взаимосвязи и способны применить свой «опыт» к новым входным данным.

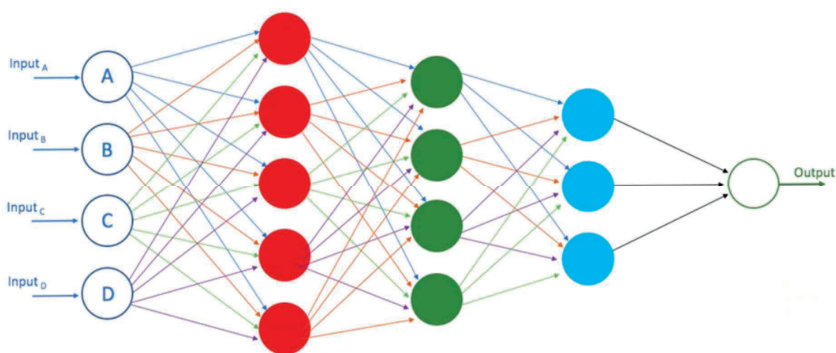


Рис. 1. Структура нейронной сети [3]

Необходимым условием правильного функционирования нейронной сети является определение ее архитектуры, с последующей установкой количества слоев и нейронов. Каждый нейрон в сети имеет свой вес. Обучение



состоит из отдельных эпох. В пределах каждой эпохи нейронная сеть изучает входные данные и ключевой результат и пытается прогнозировать ключевое значение. Затем, на основании целевой функции, происходит оптимизация весов каждого нейрона для увеличения точности предсказаний.

ООО «Сухонский КБК» проводит системные исследования в области применения нейронных сетей для прогнозирования качества готовой продукции. Для реализации этого выполняются следующие инструменты:

- Использование информационной базы 1С «Управление производственным предприятием» в качестве источника данных для создания обучающей и тестовой выборки. Средствами языка запросов 1С данные выравниваются по времени и единице оборудования.

- Полученные из 1С данные проходят процедуру «нормализации», которая является необходимым требованием для входных данных нейронной сети. Т.е. итоговый результат, который мы желаем спрогнозировать преобразуется в массив от 0 до 1, где 0 – минимальное значение, 1 – максимальное значение.

- Использование программной библиотеки Tensorflow для построения архитектуры нейронной сети, настройки ее параметров и проведения процедур обучения и прогнозирования.

В качестве входных данных используются следующие технологические параметры:

- Степень помола макулатурной массы в напорном ящике бумагоделательной машины (БДМ);

- рН макулатурной массы в напорном ящике;

- температура массы в напорном ящике;

- концентрация регистровой воды;

- средняя масса 1 м<sup>2</sup> готовой продукции;

В качестве целевого значения для предсказания используется значение показателя «Абсолютное сопротивление продавливанию».

В качестве обучающей выборки используется база из 800 значений, в качестве тестовой - 153 значений.

Результаты предсказаний нейронной сети представлены на рис. 2.

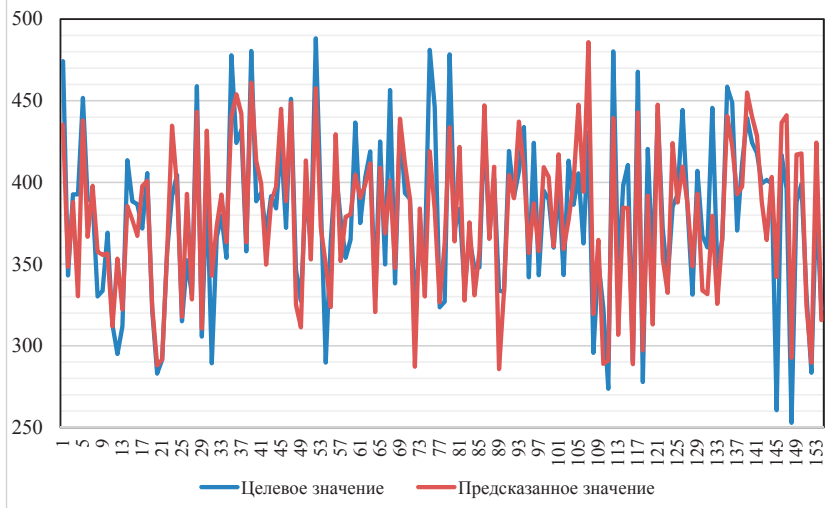


Рис. 2. Сравнение фактических и предсказанных значений показателя «Абсолютное сопротивление продавливанию» с использованием нейронной сети

В целом можно отметить хорошую сходимость между фактическими и предсказанными значениями, среднеквадратичная ошибка составила 0,0094.

На основании полученных данных была высчитана ошибка предсказания, а также ее градация.

Ошибка предсказания рассчитана по формуле:

$$O = \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \times 100 \%, \quad (1)$$

где  $O$  – ошибка предсказания, %;  $Y$  – фактическое значение, кПа;  $\hat{Y}$  – предсказанное значение, кПа;

Данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчет погрешности предсказанных значений

Ошибка, %	Количество значений, шт.	Количество значений, %	Максимальная ошибка предсказания, кПа
Менее 2	33	21,4	± 7,6
2-4	36	23,4	± 15,2
5-7	41	26,6	± 26,5
8-10	22	14,3	± 37,9
10 и более	22	14,3	



На основании данных табл. 1 можно сделать вывод о том, что большинство значений – 71,4 % лежит в пределах ошибки предсказания – до 7 %, при этом фактический разброс значений составляет 253...488 кПа. Более высокие значения ошибок (более 8 %) объясняются недостаточным объемом входных данных для адекватного предсказания значения.

#### **Основные выводы:**

1. Использование нейронных сетей позволяет довольно точно (ошибка предсказания не больше 7 % для 71,4 % предсказанных значений) предсказывать фактические значения отдельных физико-механических показателей.

2. Расширение списка входных технологических параметров для тренировки и тонкая настройка параметров самой нейронной сети способны в дальнейшем увеличить точность предсказаний.

3. Получение предсказанных значений on-line возможно при обеспечении достаточных вычислительных мощностей и автоматизации процесса выгрузки данных на вход нейронной сети посредством современных инструментов для работы с Big Data [1].

4. На основе анализа структуры нейронной сети предполагается разработка системы рекомендаций для технологического персонала для поддержания или увеличения физико-механических показателей продукции в зависимости от текущих параметров технологического режима.

#### **Список литературы**

1. Большие данные // ru.wikipedia.org: Википедия свободная энциклопедия: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Большие\\_данные](https://ru.wikipedia.org/wiki/Большие_данные) (дата обращения: 09.06.2019).

2. Машинное обучение // ru.wikipedia.org: Википедия свободная энциклопедия: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Машинное\\_обучение](https://ru.wikipedia.org/wiki/Машинное_обучение) (дата обращения: 09.06.2019).

3. Understanding, Building and Using Neural Network Machine Learning Models using Oracle 18c // developer.oracle.com: Developer Article: <https://developer.oracle.com/databases/neural-network-machine-learning.html> (дата обращения: 09.06.2019).

## СУПЕРСПИРАЛИЗАЦИЯ – ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ СВОЙСТВО БИОСИСТЕМ. ЦЕЛЛЮЛОЗНОЕ ВОЛОКНО

**М.Г. Михалева, Г.Г. Политенкова, А.С. Веденкин, Д.В. Зленко, С.Н. Никольский,  
С.В. Стовбун**

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,  
Москва, Россия*

*Процессы глубокой переработки целлюлозы подчиняются принципам, основанным на модели, объединяющей биологическую (структурную) и физическую модель волокна, которая включает наличие спиральных симметрий, иерархии масштабов хиральных фаз и кристалличность элементов, а также физические аспекты межмолекулярного взаимодействия и взаимной динамики фаз в растворителях и реакционных смесях.*

## SUPERSPIRALIZATION - FUNDAMENTAL PROPERTY OF BIOSYSTEMS. CELLULOSE FIBRE

**M.G. Mikhaleva, G.G. Politenkova, A.S. Vedenkin, D.V. Zlenko, S.N. Nikolsky,  
S.V. Stovbun**

*N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics RAS, Moscow*

*The processes of deep processing of cellulose obey the principles based on a model that combines biological (structural) and physical model of the fiber which includes the presence of helical symmetries, hierarchy of scale chiral phases and crystallinity of elements, as well as the physical aspects of intermolecular interactions and mutual phase dynamics in solvents and the reaction mixtures.*

Крупномасштабным и сложно организованным хиральным объектом является клеточная стенка высших растений. Теоретический анализ структуры целлюлозы, основанный на понимании принципов организации хиральных супеспирализованных структур, позволил предложить биофизическую модель процесса промышленного нитрования древесной целлюлозы. Понимание принципов супрамолекулярных взаимодействий в супеспирализованных структурах позволило выявить лимитирующую роль макроскопического процесса раскручивания суперспирализованных целлюлозных фибрилл в кинетике ее нитрования [1]. Поскольку фибриллы целлюлозы имеют суперспиральную структуру, сила трения отдельных элементов внутри фибриллы делает раскручивание единственным мыслимым механизмом, обеспечивающим доступ нитрующего агента внутрь микрокристаллических областей [2]. Полученный результат имеет большое практическое значение, так как позволяет оптимизировать процесс промышленного нитрования



прежде всего древесной целлюлозы. Таким образом, изучение структуры хиральных суперспирализованных систем имеет значительный потенциал как для понимания основных принципов структурной самоорганизации на начальных этапах добиологической эволюции, так и для построения моделей, позволяющих оптимизировать технологические процессы, такие как нитрование целлюлозы.

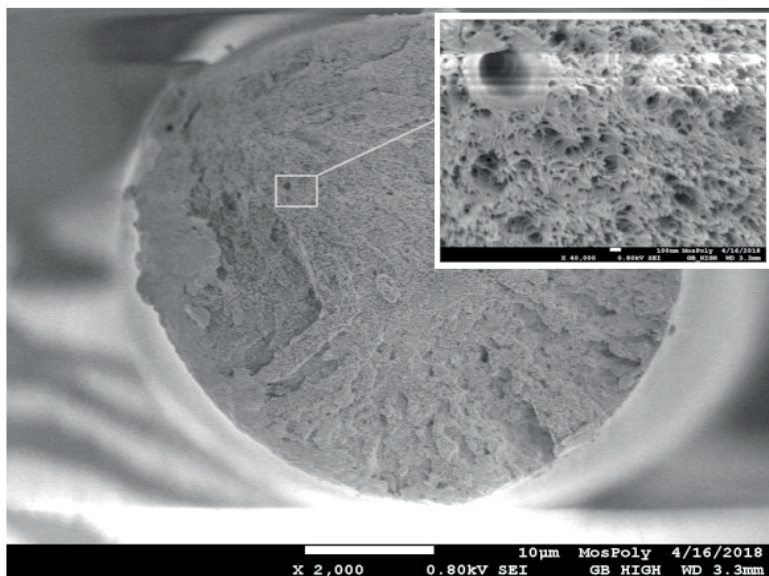


Рис. 1. Электронная микрофотография, на которой виден торец волокна; при увеличении видны упорядоченные структурные элементы

Далее правильное понимание механизмов, управляющих реакцией в целлюлозном волокне, позволило нам получить и другие материалы [3].

Принципиально новым и инновационным подходом к созданию материалов на основе целлюлозы являются попытки использовать естественную способность целлюлозы образовывать очень прочные и жесткие структуры, известные как наночибриллы (рис. 1). Разрывная прочность наночибрилл оценивается на уровне от 1 до 2 ГПа [4].

Для того, чтобы выделить и впоследствии правильно ориентировать наночибриллы в волокне без ухудшения их прочностных характеристик мы применяем метод прямого растворения целлюлозы в ионной жидкости.

Для экструзии нитей из растворов целлюлоз в ионных жидкостях нами создана лабораторная установка (рис. 2). В настоящее время получены образцы волокон, которые обладают прочностью на разрыв в пределе от 0,5 до 2 ГПа.

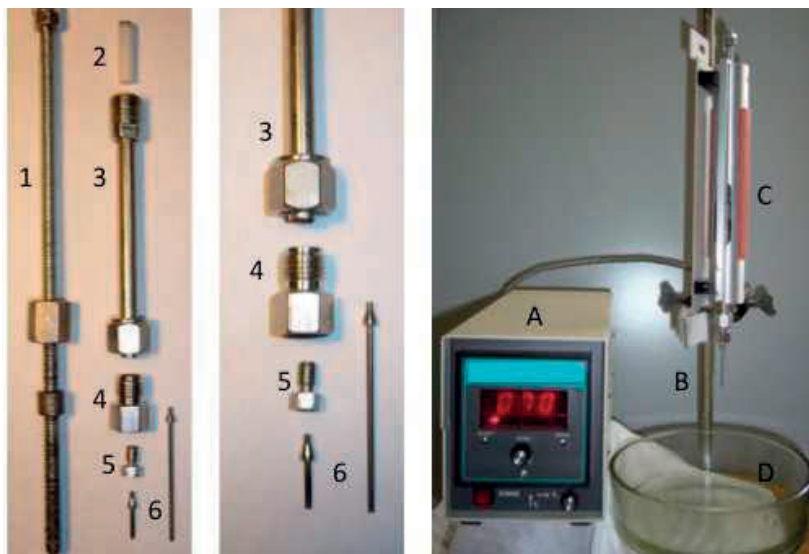


Рис. 2. Лабораторное устройство для экструдирования нитей; система подачи раствора: 1 – устройство для создания давления на поршень, 2 – поршень, 3 – стальная трубка с креплениями, 4 – держатель капилляра, прижимная гайка для крепления капилляра, 6 – стальные капилляры; устройство в сборе: А – блок контроля нагрева, В – штатив, С – нагревательный элемент с системой подачи раствора в сборе, D – ванна с осадительной жидкостью

Полнота растворения исходного сырья прямо отражается на свойствах волокон. Как показывают наши исследования, полнота растворения целлюлозы существенным образом зависит от способа ее предобработки.

Методика предобработки была разработана нами на основе модели, описывающей поведение отдельных структурных элементов в составе систем, обладающих свойством хиральности (асимметрии) [5]. Модельные процессы скручивания-раскручивания (рис. 3) в спирализованных системах достоверно описывают процессы в волокнах целлюлозы.

Предварительные результаты, полученные в настоящее время, показывают, что растворение предобработанной по нашей методике древесной

целлюлозы в ионных жидкостях проходит намного более полно, по сравнению с хлопковой целлюлозой.

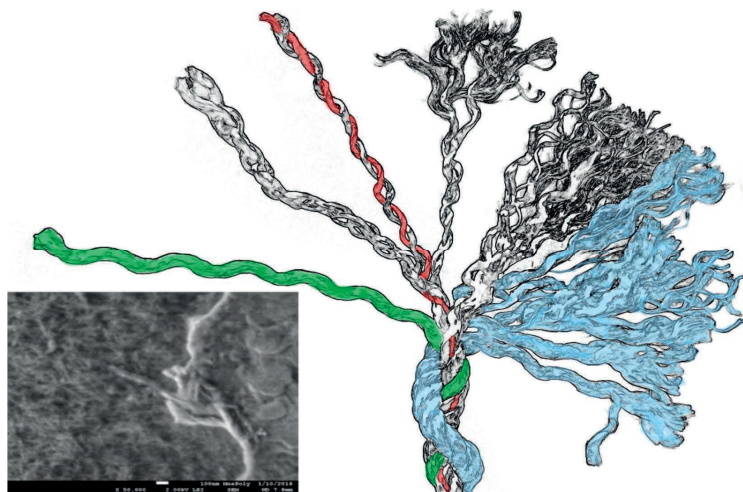


Рис. 3. Электронная микрофотография целлюлозного волокна сопоставлена со схематичной иллюстрацией процесса скручивания-раскручивания в спирализованных системах

### Список литературы

1. Стовбун С.В., Никольский С.Н., Мельников В.П., Михалева М.Г., Литвин Я.А., Щеголихин А.Н., Зленко Д.В., Твердислов В.А., Герасимов Д.С., Рогозин А.Д. Химическая физика нитрования целлюлозы // Химическая физика, 2016, том 35, № 4, С. 20–35
2. Nikolsky S.N., Zlenko D.V., Melnikov V.P., Stovbun S.V. The fibrils untwisting limits the rate of cellulose nitration process // Carbohydrate Polymers, 2019, 204, p. 232–237.
3. Zlenko D.V., Nikolsky S.N., Vedenkin A.S., Politenkova G.G., Skoblin A.A., Melnikov V.P., Mikhaleva M.G. and Stovbun S.V. Twisting of Fibers Balancing the Gel–Sol Transition in Cellulose Aqueous Suspensions // Polymers 2019, 11(5), p. 873
4. Gibson, L.J. The hierarchical structure and mechanics of plantmaterials // Journal of The Royal Society Interface 9, 2012. № 76 p. 2749–2766
5. Стовбун С.В., Скоблин А.А., Твердислов В.А. Экспериментальное наблюдение синергетической закономерности смены знака хиральности в иерархиях биомиметических структур // Биофизика. 2014, Т. 59. № 6. 1079 с.



## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ЛИГНИНА ИЗ ЧЕРНОГО ЩЕЛОКА

**О.В. Федорова, Э.Л. Аким**

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия*

*Выделение лигнина из черного щелока путем его подкисления целесообразно осуществлять по нуклеационному механизму; при этом целесообразно предварительно частично переосадить на волокно гемицеллюлозы для увеличения выхода и улучшения физико-механических свойств картонно-бумажных материалов.*

## PHYSICAL-MECHANICAL AND PHYSICO-CHEMICAL ASPECTS OF LIGNIN ISOLATION FROM BLACK LIQUID

**O.V. Fedorova, E.L. Akim**

*St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design. St. Petersburg, Russia*

*The selection of lignin from black liquor by acidification is advisable to carry out by the nucleation mechanism; however, it is advisable to partially pre-transplant on hemicellulose on fiber to increase the yield and improve the physico-mechanical properties of cardboard and paper materials.*

Получение лигнина из черных щелоков производства сульфатной целлюлозы может рассматриваться как одно из направлений биорефайнинга древесины [1–4], т. к. при сульфатной варке в раствор переходит около половины всей массы древесины. Наряду с лигнином и продуктами его деструкции в щелок переходят гемицеллюлозы, смоляные компоненты древесины и др. Существующие системы регенерации, основанные на сжигании органической части черного щелока, в настоящее время интенсивно изучаются как перспективный объект выделения ценных компонентов древесины [1–4].

Существуют разнообразные способы выделения лигноуглеводного комплекса из черного щелока. Наиболее распространенные из них - обработка черного щелока диоксидом углерода и/или серной кислотой. Подкисление черного щелока диоксидом углерода, содержащимся в дымовых газах известерегенерационных печей сульфат-целлюлозного производства, позволяет уменьшить «карбонный след» предприятия. Серная кислота, являясь сильной кислотой, в отличие от диоксида углерода позволяет более



полно осадить лигнин. Во всех случаях при подкислении черного щелока образуется суспензия органических соединений, в основном лигнина.

Непрерывная технология получения сульфатного лигнина включает следующие основные стадии: подкисление черного щелока с коагуляцией лигнина и отделением выделяющихся газов, отделение скоагулировавшегося лигнина от маточного раствора (или выделения лигнина из суспензии), промывки, сушки и измельчения. В необходимых случаях в лигнин вводятся добавки. Одной из основных проблем получения лигнинов, является не постоянство физико-химических характеристик получаемых продуктов, зависящих не только от исходного растительного сырья, места его произрастания но и от режимов выделения лигнина из черного щелока.

С позиций физикохимии полимеров черный щелок можно рассматривать как систему «полимер-растворитель» в области неограниченного смешения, в которой под словом «полимер» понимается как лигнин, так и гемицеллюлозы, перешедшие в раствор в процессе варки.

Взаимодействие лигнина и гемицеллюлозы с жидкостями в условиях их выделения из черного щелока рассмотрим на диаграмме состояний системы «полимер — растворитель» (рис. 1,2). Типичные диаграммы состояний таких систем подробно описаны в литературе [5–8]. Они включают (рис. 1) область неограниченного смешения II (полной смешиваемости) и области разделения фаз I и III (ограниченного смешения, нестабильных составов), разделяемые кривыми сосуществования (взаимного смешения).

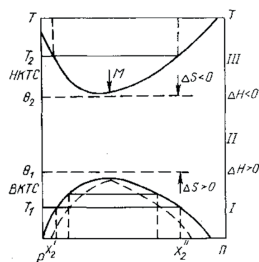


Рис. 1. Диаграмма состояний системы полимер — растворитель с двумя бинодалями

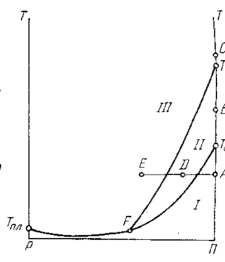


Рис. 2. Диаграмма релаксационных состояний бинарной системы полимер – растворитель в области неограниченного смешения

Нижняя кривая сосуществования (называемая также нижней бинодалью) имеет верхнюю критическую температуру смешения  $BKTC$ ; верхняя кривая сосуществования (верхняя бинодаль) имеет нижнюю критическую



температуру смешения – *НКТС*. (Иногда их называют системами с верхней и нижней критическими температурами растворения – ВКТР и НКТР).

В свою очередь, область распада на две фазы может быть разделена на область абсолютно нестабильных составов (ограниченную спинодалью — пунктирная кривая на рис. 1) и метастабильную область (между бинодалью и спинодалью), в которой возникают гетерофазные флуктуации [5–8]. Переход от концентрированных растворов полимеров к чистым полимерам может осуществляться двумя путями, разобранными, в частности, С.П. Папковым [7–8]. Соответственно рассматривают два возможных механизма выпадения полимера из раствора – **спинодальный** механизм и **нуклеационный** механизм. Проведенное рассмотрение фазовой диаграммы справедливо для равновесных состояний системы полимер – растворитель. Практически же состояние полимера в значительной степени определяется кинетикой процесса и чисто релаксационными процессами.

Одной из разновидностей системы полимер – растворитель являются студни, или гели, – бинарные системы, состоящие из образованной макромолекулами или их агрегатами пространственной сетки, в которой распределены молекулы низкомолекулярной жидкости. В отличие от растворов полимеров при деформировании студней наблюдаются большие обратимые деформации при практически полном отсутствии течения. Это обусловлено тем, что если в растворах пространственная сетка имеет флуктуационный характер, то в студнях – не флуктуационный [5–8]. Большая гидрофильность гемицеллюлоз приводит к тому, что их низкомолекулярные фракции и фракции со средней молекулярной массой в условиях сульфатной варки переходят в растворенное, т. е. в вязко текучее состояние. При этом особую роль играют процессы студнеобразования. Для лигнина, точнее, для продуктов его механо- или хемодеструкции, картина во многом аналогична.

Студни полимеров (наряду с растворами полимеров), как правило, являются промежуточными системами при формировании полимерных материалов и изделий из них. Большое значение процессы студнеобразования имеют как при получении бумаги, так и при использовании синтетических полимеров в бумажной промышленности.

В связи с тем, что лигнин и не целлюлозные углеводы (гемицеллюлозы) не являются полностью совместимыми полимерами, при выделении их из черного щелока принципиально возможно их раздельное высаживание. При изменении концентрации щелочи может происходить частичное высаживание ранее растворившихся, перешедших в раствор фракций гемицел-



люлоз. Пересаженные полисахариды откладываются на целлюлозных волокнах, внутри пор и т. д. [5]. На этом основаны процессы пересадения гемицеллюлоз при щелочных методах делигнификации. Известно, что в начальных стадиях щелочных варок гемицеллюлозы достаточно полно переходят в раствор. Осуществление тем или иным путем их осаждения на твердом целлюлозном материале на заключительных стадиях варки приводит не только к увеличению выхода технической целлюлозы, но и к улучшению ее бумагообразующих свойств.

Известно, что именно гемицеллюлозы (пентозаны и гексозаны), низкомолекулярные фракции целлюлозы фиксируют стянутую при сушке капиллярно-пористую структуру бумаги. Роль гемицеллюлоз в получении прочного бумажного листа известна бумажникам давно. При размоле целлюлозных материалов создаются благоприятные условия для извлечения из волокна низкомолекулярных фракций гемицеллюлоз, которые в воде частично переходят в вязкотекучее состояние, образуя на поверхности фибрилл тонкую пленку. Эти фракции играют особую роль при получении бумаги, обеспечивая увеличение площади межфибриллярных контактов в высыхающей бумаге и, как следствие, повышение ее прочности. При сушке бумаги в условиях значительных усадочных напряжений осуществляется вследствие удаления пластификатора (воды) перевод целлюлозы из высокоэластического, а ее низкомолекулярных фракций из вязкотекучего в стеклообразное состояние и межмолекулярными водородными связями фиксируется структура бумажного листа. Иная картина наблюдается при варке белимой целлюлозы, т. е. целлюлозы, проходящей после варки отбелку. В этом случае лигнин и гемицеллюлозы переводят в черный щелок более полно.

Таким образом, при получении не беленой целлюлозы для улучшения бумагообразующих свойств волокнистого полуфабриката и увеличения его выхода целесообразно осуществить тем или иным путем осаждения гемицеллюлоз на твердом целлюлозном материале. В этом и проявляются **физико-механические аспекты** выделения лигнина из черного щелока.

В тоже время **физико-химические аспекты** выделения лигнина из черного щелока сводятся прежде всего к проведению высаживания лигнина по **нуклеационному** механизму, позволяющему осуществлять более регулируемый процесс, чем процесс, идущий по **спинодальному** механизму.

При использовании способа, по которому сульфатный или натронный щелок с температурой 40...95 °С и концентрацией 7...40 % по сухому веществу обрабатывают под давлением 3,0...7,0 атм. жидкостью, насыщенной





диоксидом углерода [11]. в системе высаживание лигнина совмещается с процессом так называемой «напорной флотации». В этом случае, при которой пузырьки диаметром 30...100 мкм формируются снижением давления воды, предварительно насыщенной (в нашем случае) диоксидом углерода при давлении, выше атмосферного, эти пузырьки диаметром 30...100 мкм и могут рассматриваться как «нуклеаторы». Перенасыщенную воду подают через игольчатые клапаны или специальные сопла, формируется множество пузырьков диаметром 30...100 мкм непосредственно при сбросе давления. Дополнительно в качестве нуклеаторов могут применяться и высокодисперсные твердые вещества.

При выделении лигнина следует учитывать, что лигнин способен к взаимодействию с гемицеллюлозами, например, с арабиногалактаном [12].

Таким образом, для достаточно полного осаждения лигнина, минуя стадию студнеобразования, целесообразно перейти от самопроизвольного, не управляемого процесса фазового разделения, к управляемому процессу, идущему по нуклеационному механизму.

Если осуществлять выделение лигноуглеводного комплекса в несколько стадий, диоксидом углерода и/или серной кислотой [9–11] это позволит не только достаточно полно осадить лигнин, но и регулировать свойства получаемого продукта. сократить расходы на утилизацию побочных продуктов производства, а также диверсифицировать его., являясь сильной кислотой, в отличие позволяет более. При подкислении черного щелока серной кислотой образуется суспензия органических соединений, в основном лигнина.

#### Список литературы

1. Akim E. L. Biorefining of Wood // *Fibre Chemistry*, 2016. Vol. 48, No. 3, p. 181-190
2. Wertz J.-L., Deleu M., Coppee S., Richel A. «Hemicelluloses and Lignin in Biorefineries» Taylor & Francis Group, 2018.
3. Akim E.L. in Book: E. Hansen, R. Panwar, R. Vlosky. «The Global Forest Sector: Changes, Practices, and Prospects» Taylor & Francis Group, 2017, NY, 462 p., ISBN: 978-1-4398-7927-6.
4. Чудаков М. И. Промышленное использование лигнина. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 200 с.
5. Аким Э.Л. Взаимодействие целлюлозы и других полисахаридов с водными системами: в кн. «Научные основы химической технологии углеводов» / [А. Г. Захаров и др.]; М. Изд-во ЛКИ, 2008. 528 с.





6. Тагер А. А. Физикохимия полимеров. 4-е изд., перераб. М.: Научный мир, 2007. 576 с.
7. Ориентационные явления в растворах и расплавах полимеров/Под ред. А. Я. Малкина и С. П. Папкова. М.: Химия, 1980. 280 с.
8. Папков С. П., Файнберг Э. З. Взаимодействие целлюлозы и целлюлозных материалов с водой. М.: Химия, 1976. 232 с.
9. Федорова О. В., Аким Э. Л. Физико-химические аспекты частичного осаждения лигнина из черного щелока как одного из направлений биорефайнинга древесины // В сб. «Физикохимия растительных полимеров»: матер. VIII междунар. конфер. (01-05 июля 2019 г.). Архангельск: САФУ. С. 134–138.
10. Аким Э. Л. Релаксационное состояние растительных полимеров – в природе и при их биорефайнинге // В сб. «Физикохимия растительных полимеров»: матер. VIII междунар. конфер. (01-05 июля 2019 г.). Архангельск: САФУ. С. 9–13.
11. Пат. №2338821 РФ. Мандре Ю.Г., Смирнов М.Н., Калчев Р., Аким Э.Л. Способ получения щелочного лигнина / Оpubл. 20.11.2008. Бюлл. №32.
12. Карпов И.А., Сергеев А.Д., Коваленко М.В., Аким Э.Л. Выделение смесей арабиногалактана и сульфатного лигнина из черного щелока // В сб. «Физикохимия растительных полимеров»: матер. VIII междунар. конфер. (01-05 июля 2019 г.). Архангельск: САФУ. С. 66–67.

## ИЗУЧЕНИЕ УПРУГО-РЕЛАКСАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ ЛИСТВЕННИЦЫ И ИХ РОЛИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ДРЕВЕСНЫХ БРИКЕТОВ

**А.А. Пекарец, О.А. Ерохина, В.В. Новожилов, С. В. Хоробрых, А.В. Таразанов,  
Ю.Г. Мандре, Э.Л. Аким**

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия*

*Для древесины лиственницы установлена взаимосвязь между нагрузкой, временем её действия и величиной остаточной деформации и определены условия, при которых происходит полное восстановление формы образца. Показано, что снятие псевдопластических деформаций возможно после воздействия воды.*

## THE STUDY OF ELASTIC-RELAXATION PROPERTIES OF LARCH WOOD AND THEIR ROLE WHEN OBTAINING WOOD BRIQUETTES

**A.A. Pekarets, O.A. Erokhina, V.V. Novozhilov, S.V. Khorobrykh, A.V. Tarazanov,  
Yu.G. Mandre, E.L. Akim**

*St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design, St. Petersburg, Russia*

*For larch wood, the relationship between the load, the time of its action and the residual strain value was established, and the conditions under which the full recovery of the sample shape was determined. It is shown that the removal of pseudoplastic deformations is possible after exposure to water.*

Одним из динамично развивающихся направлений биорефайнинга древесины [1–4] является производство биотоплива второго поколения – древесных пеллет и брикетов. Среди всех методов их производства особое место занимает создание биотоплива нового поколения – остеклованных брикетов и пеллет, а также карбонизированных брикет и пеллет на их основе. Инновационная технология получения топливных древесных и угольных брикетов из опилок древесины (в том числе лиственницы) базируется на направленном изменении релаксационного состояния полимерных компонентов древесины – лигнина, целлюлозы и гемицеллюлоз [5].

В настоящее время наиболее перспективным методом переработки опилок древесины лиственницы является получение древесно-угольных брикетов на их основе [6]. Механизм процессов, происходящих при осуществлении инновационной технологии получения из опилок древесины топливных древесных и угольных брикетов [7–8] с позиций структурной физикохимии древесины рассматривался в предыдущих статьях. В них было

показано, что формирование структуры древесных брикетов на различных стадиях технологического процесса сопровождается рядом релаксационных процессов. В связи с этим в данной работе для изучения упруго-релаксационных свойств древесины лиственницы использовали метод одноосного сжатия [9–11].

В исследовании использовались модельные кубики древесины лиственницы, древесные и древесно-угольные брикеты из опилок древесины лиственницы размером 20×20×20 мм. Процессы сжатия древесины лиственницы в условиях получения древесных брикетов были смоделированы путем длительной нагрузки модельных кубиков в режиме одноосного сжатия в диапазоне нагрузок  $P = 1500 \dots 4500$  Н на универсальной испытательной установке «ИНСТРОН-1121» при постоянной скорости деформирования  $V = 100$  мм/мин.

На рис.1 представлена типичная кривая сжатия-разгрузки образца древесины лиственницы в радиальном направлении. Кривую сжатия можно разделить на 3 характерные области: 1 – упругую, 2 – эластическую, 3 – вынужденно-эластическую.

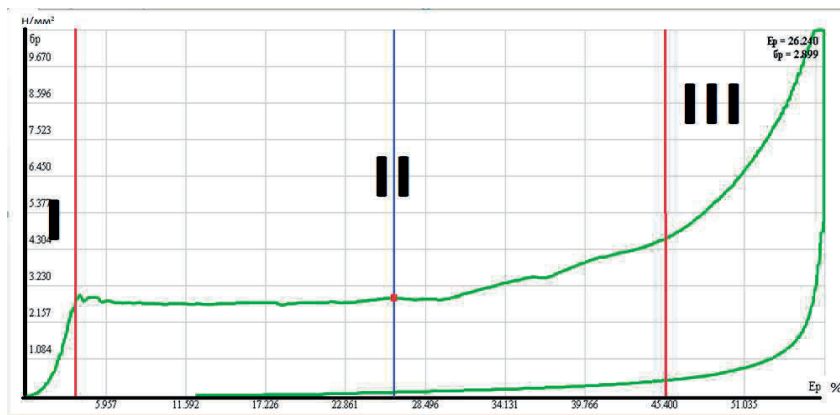


Рис. 1. Диаграмма сжатия-разгрузки до 4500 Н образца древесины лиственницы

На рис. 1 видно, что при сжатии образца происходит переход материала из упругого в высокоэластическое состояние, о чем свидетельствует первый пик на кривой сжатия, отображающий релевантную (значимую) нагрузку необходимую для деформирования образца. Экспериментально было установлено, что этот пик связан с началом выделения жидкого экстракта из древесины лиственницы (рис.1). При дальнейшем сжатии образца



с увеличением деформации происходит незначительное изменение нагрузки (II участок кривой). Это характерно для образцов древесины лиственницы – заболони с высокой влажностью ( $W=40\%$ ) при сжатии в радиальном направлении и связано, вероятно, со сложением слоев и выделением жидкого экстракта. На третьем участке кривой наблюдается значительный подъем напряжения с увеличением деформации, что характерно при значительном накоплении необратимых деформаций (может характеризовать область пред разрушения).

Релаксационные свойства образцов древесины лиственницы исследовали в режиме одноосного сжатия с последующим эластическим восстановлением формы образца в диапазоне нагрузок  $P=1500\text{ Н}, 2500\text{ Н}, 3500\text{ Н}, 4500\text{ Н}$  и времени действия нагрузки  $t=1\text{ мин}, 10\text{ мин}, 100\text{ мин}, 1000\text{ мин}$ . Остаточную деформацию измеряли в режиме восстановления формы образца. Время восстановления образца подбиралось экспериментально от 10 до 1000 минут.

На рис.2 представлены кривые релаксации напряжений во времени образцов древесины лиственницы при различных деформациях. Из рис.2,3 видно, что с увеличением задаваемой деформации возрастает величина релаксационного напряжения, скорость релаксационного процесса и значения остаточной компоненты деформации. Это связано с тем, что под действием нагрузки и времени ее действия наблюдается ряд процессов, влияющих на изменение структуры: послойное сжатие волокон древесины лиственницы с выделением жидкой фракции, накопление вынужденно-эластической(остаточной) компоненты деформации и десорбции воды из жидкой фракции во времени. В результате экстраполяции зависимости  $E_{ост}$  на ось времени получим точку  $t_{кр}$  "Критическое время  $t_{кр}$ " – это время, при котором в образце древесины лиственницы начинают накапливаться необратимые компоненты деформации.

Измерения показали, что после действия на образец древесины лиственницы задаваемой деформации в течение времени до  $t_{кр}$  происходит полное восстановление формы образца. Вынужденно-эластические деформации в данных условиях действия нагрузки полностью обратимы (рис. 4). При действии длительных нагрузок при времени  $t > t_{кр}$  – развиваются псевдопластические деформации, которые при  $T = 20^\circ\text{C}$  на воздухе не восстанавливаются (рис. 4), однако восстановление происходит при погружении образца в воду на сутки.

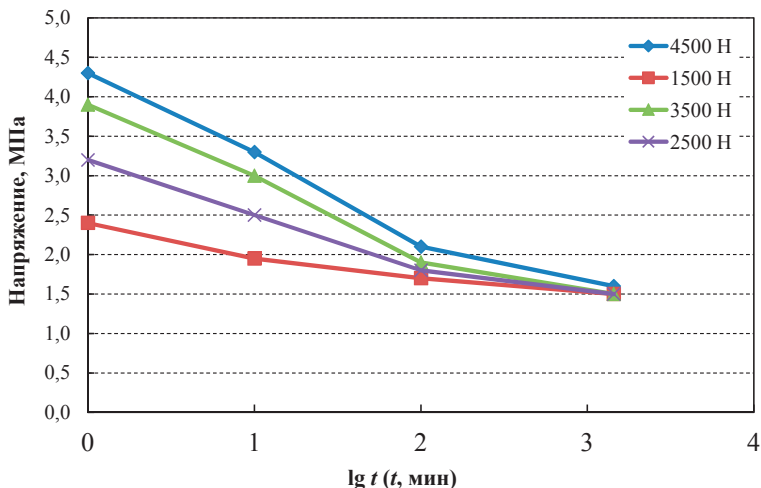


Рис. 2. Релаксация напряжения во времени у образцов древесины лиственницы

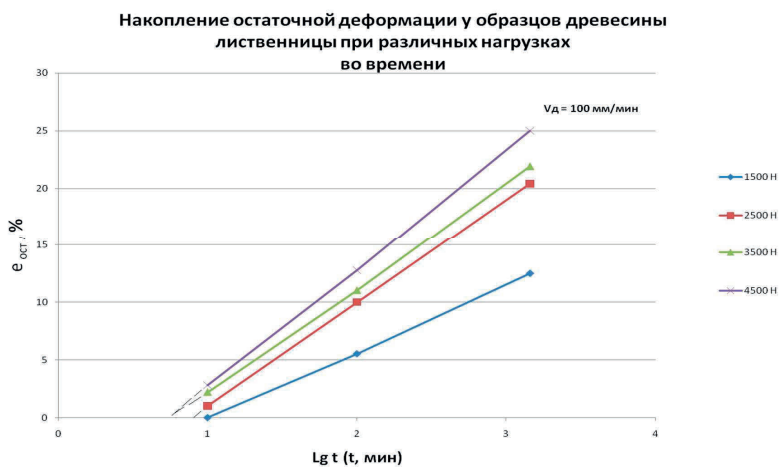


Рис. 3. Накопление остаточной деформации у образцов древесины лиственницы при различных нагрузках во времени



Рис. 4. Восстановление образцов древесины лиственницы после деформирования (до 4500 Н) и снятия нагрузки и отсутствие восстановления образца древесины лиственницы после длительной нагрузки

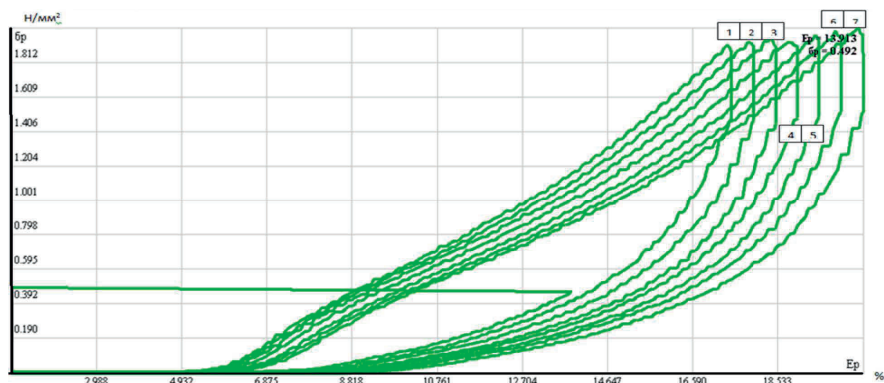


Рис.5. Диаграмма сжатия-разгрузки модельных кубиков древесины лиственницы (1 – 0,1 мм; 2 – 0,2 мм; 3 – 0,3 мм; 4 – 0,4 мм; 5 – 0,5 мм; 6 – 0,6 мм; 7 – 0,7 мм)

На рис.5 представлены кривые сжатия-разгрузки при различных деформациях. Из представленного на рис. 5 графика видно, что образцы древесины лиственницы в радиальном направлении обладают высокими упругими и эластическими свойствами, о чем свидетельствует незначительное увеличение нагрузки с увеличением деформации.

В результате проведенных для древесины лиственницы исследований установлена взаимосвязь между нагрузкой, временем её действия и величиной остаточной деформации, определены условия, при которых происходит полное восстановление формы образца, установлено, что снятие псевдопластических деформаций возможно после воздействия воды.



### Список литературы

1. E.L. Akim in Book: E. Hansen, R. Panwar, R. Vlosky. «The Global Forest Sector: Changes, Practices, and Prospects» Taylor & Francis Group, 2017, NY, 462 p., ISBN: 978-1-4398-7927-6.
2. E. L. Akim. Biorefining of Wood // *Fibre Chemistry*, 2016. Vol. 48, No. 3, p. 181-190
3. J.-L. Wertz, M. Deleu, S. Coppee, A. Richel «Hemicelluloses and Lignin in Biorefineries» Taylor & Francis Group, 2018.
4. Wood Energy in the ECE Region Data, trends and outlook in Europe, the Commonwealth of Independent States and North America, UNECE/FAO 2018.
5. Аким Э. Л. Взаимодействие целлюлозы и других полисахаридов с водными системами; в кн. «Научные основы химической технологии углеводов» / [Захаров А. Г. и др.]; М. Изд-во ЛКИ, 2008. 528 с.
6. Пекарец А. А. Патенты РФ RU 2628602; RU 2596683; RU 2653513; RU 2678089.
7. Мандре Ю. Г., Пекарец А. А., Аким Э. Л. Карбонизация и торрефикация древесины // «Леса России: политика, промышленность, наука, образование», СПбГТЛУ им. Кирова. Материалы конференции. 2018. т. 2 с. 109–111. ISBN 978-5-9239-1037-7.
8. Pekaretz A., Mandre Y., Vinogradov N., Akim E. Bio refining of larch sawdust producing wood and wood-charcoal briquettes: scientific and technological aspects. EUBCE 2019, Lisbon 27-30 May 2019.
9. Виноградов Н.В. Компрессионные свойства древесины лиственницы как основа отжимной технологии извлечения арабиногалактана: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2019, 16 с.
10. Аким Э. Л., Коваленко М. В., Рассказова Н. Я., Васильев В. В., Ерохина О. А., Бучельникова Я. В. Проект Лиственница. Программно-аппаратный комплекс для изучения свойств древесины лиственницы // *Целлюлоза, Бумага, Картон*, 2011, №5. С.24–28.
11. Романов В. А., Бондаренко Е. А., Аким Э. Л. Влияние пластифицирующей газовой среды на температуру стеклования природных и синтетических бумагообразующих полимеров. // Тезисы докладов VI Всесоюзной конференции. Минск, 1990, с. 271.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БЕЛЕНОГО ПОЛУФАБРИКАТА ИЗ МИСКАНТУСА

И.А. Шаньязов<sup>1</sup>, Ю.А. Гисматулина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск, Россия

*Разработана технология получения белого полуфабриката из мискантуса *Miscanthus sacchariflorus* в соответствии с наилучшими существующими технологиями, которая может быть использована для получения аналога лиственной сульфатной целлюлозы при производстве различных видов бумаг*

## TECHNOLOGY OF OBTAINING WHITE-HEMI-FINISHED PRODUCT FROM MISCANTUS

I.A. Shanyazov<sup>1</sup>, Yu.A. Gismatulina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

<sup>2</sup>Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russia

*A technology has been developed to produce bleached semi-finished product from miscanthus *Miscanthus sacchariflorus* in accordance with the best existing technologies, which can be used to produce an analog of hardwood sulphate pulp in the production of various types of paper.*

На сегодняшний день получение волокнистых полуфабрикатов из недревесного растительного сырья представляет все больший интерес [1, 2].

Целью данной работы являлась разработка технологии получения белого полуфабриката из мискантуса традиционным сульфатным способом. Для достижения данной цели исследования были определены следующие задачи:

- 1) отработка режима сульфатной варки целлюлозы из мискантуса;
- 2) отработка режима отбеливания целлюлозы из мискантуса;
- 3) проведение сравнения характеристик полуфабриката из мискантуса

с характеристиками белой сульфатной целлюлозы из лиственных пород древесины.

В качестве сырья был использован *Miscanthus sacchariflorus*. Беленую целлюлозу получали следующим образом: сульфатная варка, хелатная обработка, кислородно-щелочная делигнификация и отбеливание.





На первом этапе стояла задача разработать режимы варки целлюлозы из мискантуса, пригодной для дальнейшей отбелки. Полуфабрикат для отбелки получили сульфатным способом при этом были заданы следующие условия: ГМ=5,0; конечная температура варки – 170 °С; продолжительность стоянки на конечной температуре – 50 минут; расход щелочи – 10...16 %; в качестве варочного раствора использовался белый щелок (концентрация активной щелочи 115 г/л в ед. Na<sub>2</sub>O). Результаты отработанных режимов варки представлены в табл. 1. При этом получен полуфабрикат, который легко разделяется на волокна на стадии промывки и не требует стадии горячего размола. Число Каппа целлюлозы находится в диапазоне от 20 до 30 единиц, выход полуфабриката составляет 47...48 %. Данная технология позволила получить полуфабрикат для дальнейшей отбелки.

Таблица 1. Условия и результаты варки сульфатной целлюлозы из мискантуса

Номер образца	Условия варки			Результаты варки		
	Расход АЩ, %	Температура, °С	Продолжительность, мин	Выход п/ф, %	Число Каппа, ед.	pH
1	10	170	50	48,7	27,5	11,0
2	12			47,5	25,0	11,2
3	14			47,6	20,0	11,2
4	16			48,2	22,4	11,3

На следующем этапе эксперимента стояла задача отработки технологического режима получения беленого полуфабриката из мискантуса. Учитывая специфику сырья – повышенная зольность (4,0 %) перед отработкой технологии отбелки была проведена обработка целлюлозы хелатом ЭДТА для снижения зольности и предотвращения ее негативного воздействия на отбеливающие реагенты. Условия обработки ЭДТА были следующие: температура – 60 °С; концентрация массы – 5 %; продолжительность – 2 часа; расход хелата – 10 кг/т; pH – 4...4,5. В результате удалось снизить зольность целлюлозы до 0,4 %.

Для снижения числа Каппа перед отбелкой и соответственно снижения расхода белящих реагентов в соответствии с современными схемами отбелки, сохранив прочностные показатели целлюлозы, была проведена кислородно-щелочная обработка по классическому режиму Охутрак для лиственной целлюлозы.



Условия кислородно-щелочной обработки:

- 1 ступень: температура – 85 °С; концентрация массы – 10 %; давление – 0,7 МПа; продолжительность – 30 мин;
- 2 ступень: температура – 100 °С; концентрация массы – 10%; давление – 0,3 МПа; продолжительность – 60 мин;
- расход  $H_2O_2$  – 2 кг/т, NaOH – 20 кг/т.

В результате удалось снизить число Каппа с 23 до 10 единиц. Эффективность КЩО для целлюлозы из мискантуса составила 57 %.

Отбелку проводили по схеме  $D_0$  – ЩП –  $D_1$  –  $D_2$ . В качестве делигнифицирующего реагента использовали диоксид хлора, так как он является наиболее мягким и избирательным хлорсодержащим реагентом. Условия отбелки представлены в табл. 2.

Таблица 2. Условия отбелки целлюлозы из мискантуса

Условия	Степень отбелки			
	$D_0$	ЩП	$D_1$	$D_2$
Расход $ClO_2$ , в единицах $Cl_2$ , кг/т	20	–	14	6
Расход $H_2O_2$ , кг/т	–	2,0	–	–
Расход NaOH, кг/т	–	10,0	–	–
Температура, °С	70	70	70	70
Продолжительность, мин	60	60	180	180
Концентрация массы, %	8	8	8	8
pH	2,1/1,8	11,1	4,0/3,0	4,0/3,0

В табл. 3 представлены результаты отбелки целлюлозы из мискантуса на делигнифицирующих ступенях отбелки.

Таблица 3. Результаты отбелки целлюлозы из мискантуса на делигнифицирующих ступенях отбелки

Степень отбелки	Число Каппа	Белизна, %
$D_0$	3,7	–
ЩП	1,9	71,9
$D_1$	–	86,2
$D_2$	–	87,3

Используя традиционную современную схему отбелки, расход диоксида хлора составил 4,0 кг на единицу Каппа.

Для сравнения беленой целлюлозой из мискантуса с беленой целлюлозой из смеси лиственных пород были определены основные показатели качества, нормируемые в ГОСТ 28172–89.



Размол образца целлюлозы проводили в центробежном размалывающем аппарате (ЦРА) Jokro Mill при концентрации 6 % в течении 50 минут до степени помола 60 °ШР. Изготовление лабораторных образцов бумаги массой 75 г/м<sup>2</sup> производили на листоотливном аппарате системы «Rapid-Köthen», процесс размол контролировали путем определения степени помола массы.

Оценка физико-механических характеристик проводилась по основным характеристикам прочности беленой целлюлозы из смеси лиственных пород: разрывная длина, абсолютное сопротивление раздиранию, прочность на излом. Результаты испытаний, а также сравнительная характеристика с целлюлозой марки ЛС-0 (высший сорт) представлена в табл. 4.

Таблица 4. Показатели качества целлюлозы из мискантуса (степень помола 60 °ШР) и целлюлозы марки ЛС-0 (высший сорт)

Наименование показателя	Значение	
	Целлюлоза из мискантуса	ЛС-0 (высший сорт) [5]
Механическая прочность:		
разрывная длина, км	8,6	7,5
абсолютное сопротивление раздиранию, сН	48	47
прочность на излом, число двойных перегибов	900	300
Белизна, %	87,3	89,0

Также было проведено исследование бумагообразующих свойств целлюлозы нормального выхода из мискантуса: средняя длина волокна составила – 0,99 мм; ширина – 16,8 мкм, собственная прочность волокна; полученная на приборе The Pulmac Zero Span Tensile Tester, Model ZS1000–B3 составляет – 90,4 Н/см; межволоконные силы связи – 1,51 МПа.

На рис. 1 представлен фракционный состав целлюлозы нормального выхода из мискантуса, а также в качестве сравнения – фракционный состав товарной лиственной беленой целлюлозы

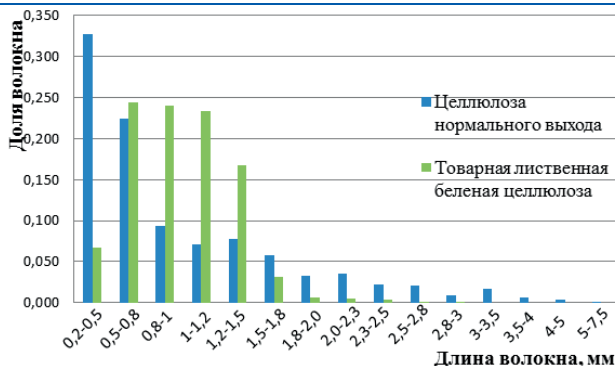


Рис. 1. Фракционный состав по длине волокна

### Закключение:

1) Отработана технология получения целлюлозы нормального выхода из мискантуса для дальнейшей отбелки в соответствии с наилучшими существующими технологиями. Условия получения следующие: расход активной щелочи – 10 %, температура – 170 °С, продолжительность – 50 минут, гидромодуль варки – 5.

2) Эффективность процесса КЦО по технологии Охуtrak целлюлозы из мискантуса нормального выхода составила 56...57 %.

3) Отработан технологический режим отбелки целлюлозы из мискантуса по укороченной схеме  $D_0 - ЩП - D_1 - D_2$  с расходом диоксида хлора 4,0 кг/единицу Каппа, белизна образца составила 87,0...88,0 %.

4) Беленая целлюлоза из мискантуса обладает высокими показателями механической прочности: разрывная длина – 8,6 км, абсолютное сопротивление раздираанию – 48 сН, прочность на излом – 900 двойных перегибов.

5) В соответствии с полученными результатами можно сделать вывод о том, что мискантус может быть использован для получения аналога лиственной сульфатной целлюлозы для применения в композиции различных видов бумаг.

### Список литературы

1. Gonzalo A., Bimbela F., Sanchez J.L., Labidi J., Marín F., Arauzo J. Evaluation of different agricultural residues as raw materials for pulpand paper production using a semichemical process // Journal of Cleaner Production. 2017. № 156. P.184–193.
2. Bousios S., Worrell E. Towards a Multiple Input-Multiple Output paper mill: Opportunities for alternative raw materials and sidestream valorisation in the paper and board industry // Resources, Conservation & Recycling. 2017. № 125. P. 218–232.

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ ВЫСОКОГО ВЫХОДА ИЗ МИСКАНТУСА

И.А. Шаньязов<sup>1</sup>, Ю.А. Гисматулина<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск, Россия

*Разработана технология получения сульфатной ЦВВ из мискантуса *Miscanthus sacchariflorus*. Полученный полуфабрикат обладает достаточными характеристиками прочности и деформативности для использования в композиции компонентов тарного картона.*

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF RECEIVING CELLULOSE OF THE HIGH EXIT FROM MISCANTUS

I.A. Shanyazov<sup>1</sup>, Yu.A. Gismatulina<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

<sup>2</sup>Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russia

*A technology has been developed for producing sulfate CVV from miscanthus *Miscanthus sacchariflorus*. The resulting semi-finished product has sufficient strength and deformability characteristics for use in the composition of the components of containerboard.*

Тароупаковка на сегодняшний день является самой востребованной продукцией целлюлозно-бумажной отрасли. Отказ от полимерной упаковки вызвал особый рост спроса на целлюлозу высокого выхода (ЦВВ). В связи с этим возникает вопрос о расширении сырьевой базы [1, 2]. Частично эту задачу можно решить путем использования ежегодно возобновляемого источника сырья, такого как мискантус (*Miscanthus sacchariflorus*).

Целью данной работы являлась разработка технологии получения полуфабриката из мискантуса для использования в композиции компонентов тарного картона (флютинг). Для достижения данной цели исследования были определены следующие задачи:

- 1) разработка технологии получения ЦВВ сульфатным способом из мискантуса;
- 2) анализ прочностных и деформационных свойств ЦВВ из мискантуса;
- 3) составление композиций ЦВВ из мискантуса с макулатурой и сравнительная характеристика полуфабриката с макулатурой марки МС-5Б.



В качестве сырья был использован предварительно измельченный *Miscanthus sacchariflorus*. В соответствии с наилучшими достигнутыми технологиями был выбран режим варки ЦВВ. Для получения полуфабриката, который может быть использован в композиции компонентов тарного картона (флотинг), режим варки был отработан следующий: ГМ=5,0; конечная температура варки – 160 °С; продолжительность стоянки на конечной температуре – 50 минут; расход щелочи – от 4 до 8 %; в качестве варочного раствора использовался белый щелок (концентрация активной щелочи 100 г/л в ед. Na<sub>2</sub>O). После варки масса подвергалась горячему размолу в ЦПА продолжительностью 3 минуты. Условия варки и полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты сульфатной варки ЦВВ из мискантуса

Номер образца	Условия варки			Результаты варки		
	Расход АЩ, %	Температура, °С	Продолжительность, мин	Выход п/ф, %	Число Каппа, ед.	pH
1	4	160	50	51,8	69,0	8,0
2	6			51,0	39,8	8,8
3	8			50,5	30,7	9,8

Размол образца целлюлозы проводили в центробежном размалывающем аппарате (ЦПА) Jokro Mill при концентрации 6 % до степени помола 30 °ШР. Изготовление лабораторных образцов бумаги массой 100 г/м<sup>2</sup> производили на листоотливном аппарате системы «Rapid-Köthen», процесс размола контролировали путем определения степени помола массы.

Оценка физико-механических характеристик образца ЦВВ мискантуса, полученного с расходом щелочи 4 %, проведена по основным характеристикам прочности – разрывной длине (L), сопротивлению продавливанию (П), разрушающему усилию при сжатии кольца (RCT), сопротивлению сжатию на коротком расстоянии (SCT) (Табл. 2), и показателям деформативности – деформации и напряжения, определяемым в точке разрушения образца (табл. 3).

Таблица 2. Прочностные характеристики ЦВВ из мискантуса

Расход АЩ, %.	Число Каппа	Масса отливки, г/м <sup>2</sup>	L, м	П, кПа	RCT, Н	SCT, кН/м
4,0	69,0	100	8350	410	195	2,92



Таблица 3. Деформационные характеристики ЦВВ из мискантуса

Расход АЩ, %	Число Каппа	Характеристики образцов		Деформационные свойства			
		Плотность, г/см <sup>3</sup>	δ, мкм	St, кН/м	ТЕА, Дж/м <sup>2</sup>	σ <sub>p</sub> , МПа	ε <sub>p</sub> , %
4,0	69,0	0,625	145,0	618,6	139,1	52,2	2,89

На следующем этапе стояла задача исследовать свойства лабораторного флютинга на основе композиций макулатуры марки МС-5Б и ЦВВ из мискантуса в различном соотношении. Макулатурное сырье (марка МС-5Б) после предварительного замачивания в течение 40 минут размалывалось в мельнице PFI до степени помола 24 °ШР при концентрации массы 10 %, количество оборотов – 500. ЦВВ из мискантуса размалывалась в центробежном размалывающем аппарате (ЦРА) Jokko Mill при концентрации 6 % до степени помола 30 °ШР. Композиция лабораторного флютинга составлялась перед отливом в различном соотношении.

В лабораторных образцах флютинга массой 1 м<sup>2</sup> 125 г определялись показатели механической прочности (табл. 4) и деформационные характеристики (табл. 5).

Таблица 4. Прочностные показатели лабораторных образцов флютинга на основе композиций макулатуры марки МС-5Б и ЦВВ из мискантуса

Состав композиции, % макулатура/ ЦВВ из мискантуса	Показатели образцов		Прочностные показатели					
	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Толщина, мкм	RCT, Н	CCT, кН/м	CMT, Н	SCT, кН/м	П, кПа	L, км (кН/м)
100/0	0,615	182	130	1,46	145	3,3	300	4,8(5,3)
75/25	0,629	189	220	1,69	200	3,0	405	5,7(6,8)
50/50	0,630	185	245	2,06	215	3,5	445	6,9(8,1)
25/75	0,613	183	240	2,14	210	3,5	465	6,8(7,7)
0/100	0,620	182	240	2,33	235	3,7	525	7,5(8,5)

Таблица 5. Деформационные характеристики лабораторных образцов флютинга на основе композиций макулатуры марки МС-5Б и ЦВВ из мискантуса

Состав композиции, % макулатура/ ЦВВ	Показатели образцов		Деформационные характеристики			
	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Толщина, мкм	St, кН/м	ТЕА, Дж/м <sup>2</sup>	σ, МПа	ε, %
100/0	0,615	182	543,0	75,5	29,3	2,13
75/25	0,629	189	656,2	94,6	35,9	2,16
50/50	0,630	185	716,3	133,9	43,5	2,54
25/75	0,613	183	617,9	142,3	41,9	2,85
0/100	0,620	182	670,4	154,9	46,4	2,85



По показателям качества бумага для гофрирования должна соответствовать требованиям, указанным в ГОСТ Р 53206-2008. По показателям прочности: сопротивление продавливанию – 525 кПа, удельное сопротивление разрыву – 8,5 кН/м лабораторный флютинг из 100 % ЦВВ из мискантуса соответствует бумаге для гофрирования марки Б-0. По жесткостным показателям: ССТ – 2,33 кН/м и СМТ – 235 Н лабораторный флютинг из мискантуса соответствует бумаге для гофрирования марки Б-2.

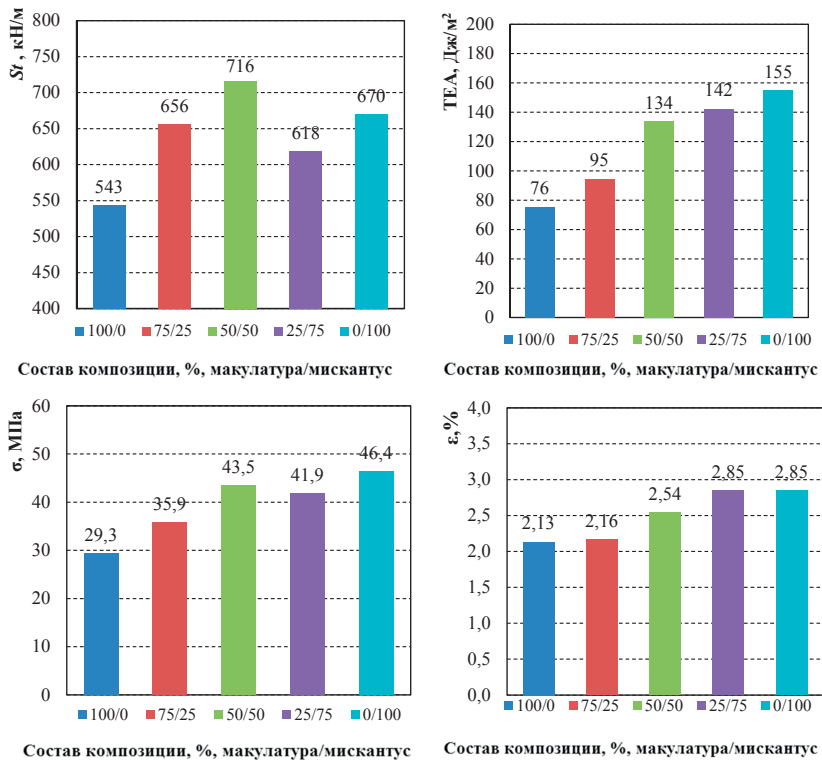


Рис. 1. Влияние композиции на деформационные характеристики лабораторного флютинга



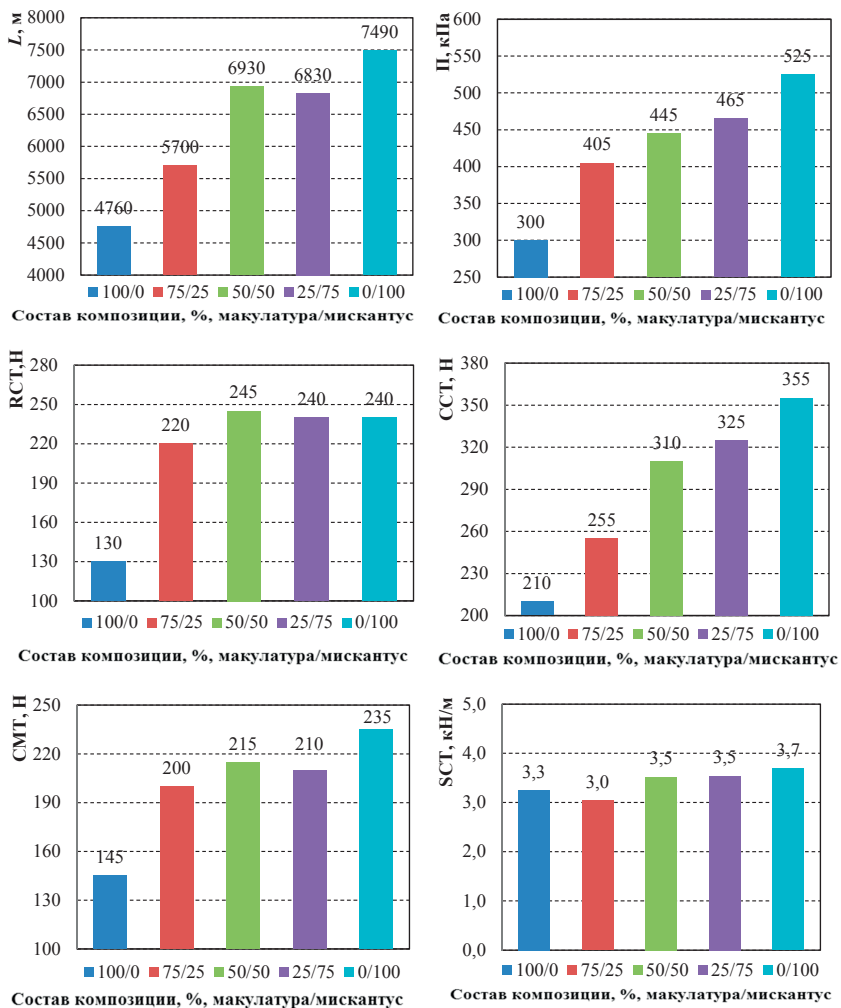


Рис. 2. Влияние композиции на прочностные характеристики лабораторного флютинга

На основании данных, представленных в табл. 4 и 5, полученных при испытании лабораторных образцов флютинга на основе макулатуры марки МС-5Б и ЦВВ разработаны графические зависимости, которые показаны на



рис. 1 и 2. На основании данных установлено, что максимальными механическими и прочностными характеристиками обладает флютинг без добавления в его композицию макулатуры.

**Заключение:**

1) Отработана технология получения целлюлозы высокого выхода сульфатным способом из мискантуса, пригодная для использования в композиции компонентов тарного картона. Условия получения следующие: расход активной щелочи – 4 %, температура – 160 °С, продолжительность – 50 минут, гидромодуль варки – 5, продолжительность горячего размола 3 минуты.

2) Полученные образцы обладают следующими физико-механическими характеристиками: сопротивлению продавливанию – 410 кПа, разрывная длина – 8350 м, разрушающему усилию при сжатию кольца (*RCT*) – 195 Н, сопротивлению сжатию на коротком расстоянии (*SCT*) – 2,92 кН/м. Лабораторные образцы ЦВВ из мискантуса также обладают высокими характеристиками деформативности.

3) На основании данных установлено, что максимальными механическими и прочностными характеристиками обладает флютинг без добавления в его композицию макулатуры. По показателям прочности флютинг из мискантуса соответствует бумаге для гофрирования марки Б-0. По жесткостным показателям флютинг из мискантуса соответствует бумаге для гофрирования марки Б-2.

4) На основании данных можно сделать вывод о возможности использования целлюлозы высокого выхода из мискантуса в композиции компонентов тарного картона.

**Список литературы**

1. Gonzalo A., Bimbela F., Sanchez J.L., Labidi J., Marín F., Arauzo J. Evaluation of different agricultural residues as raw materials for pulpan paper production using a semichemical process // *Journal of Cleaner Production*. 2017. № 156. P.184–193.
2. Bousios S., Worrell E. Towards a Multiple Input-Multiple Output paper mill: Opportunities for alternative raw materials and sidestream valorisation in the paper and board industry // *Resources, Conservation & Recycling*. 2017. № 125. P. 218–232.

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БУМАГООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ

В.В. Коптяев<sup>1</sup>, Ю.В. Севастьянова<sup>1</sup> Н.Ю. Поташева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия

<sup>2</sup>ООО «РК-Гранд», Питкяранта, Республика Карелия

*Представлены современные методы определения бумагообразующих свойств волокнистых полуфабрикатов обоснована актуальность определения бумагообразующих свойств.*

## MODERN METHODS OF DETERMINING THE PAPER-FORMING PROPERTIES OF FIBROUS SEMI-FINISHED PRODUCTS

V.V. Koptyaev<sup>1</sup>, Yu.V. Sevastyanova<sup>1</sup>, N.Yu. Potasheva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

<sup>2</sup>LLC «RK-Grand», Pitkyaranta, Republic of Karelia

*Modern methods for determining the paper-forming properties of fiber semi-finished products are presented, the relevance of the definition of paper-forming properties is grounded.*

При выборе желаемого вида волокнистого материала следует учитывать его бумагообразующие свойства, которые в совокупности определяют достижение требуемого качества изготавливаемой бумаги. При этом имеется в виду как поведение материала в технологических процессах, так и его влияние на свойства получаемой бумажной массы и готовой бумаги. В настоящее время для описания основных бумагообразующих свойств используется классификация Джоржа Кларка [1], согласно которой к основным относятся шесть фундаментальных свойств волокон: средняя длина волокна; способность к уплотнению во влажном состоянии; собственная прочность волокна; когезионная способность; грубость волокон; способность к размолу.

*Средняя длина волокна*

Важной характеристикой волокнистого полуфабриката является фракционный состав по длине волокна. При таком анализе подсчитывают количество волокон, попадающих по длине в пределы каждого класса, и выводят процентное соотношение волокон в каждом классе. Результат представляют в виде таблицы или гистограммы.

Среднюю длину волокна рассчитывают по следующим формулам:

$$\text{Среднеарифметическая длина } l_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=0}^m (n_i \cdot l_i)}{\sum_{i=0}^m n_i}, \quad (1)$$

$$\text{Средневзвешенная по длине } l_{\text{ср.в}} = \frac{\sum_{i=0}^m (n_i \cdot l_i^2)}{\sum_{i=0}^m (n_i \cdot l_i)}, \quad (2)$$



$$\text{Средневзвешенная по массе } l_{\text{ср.м}} = \frac{\sum_{i=0}^m (n_i \cdot l_i^3)}{\sum_{i=0}^m (n_i \cdot l_i^2)} \quad (3)$$

где  $n_i$  – количество волокон внутри класса  $i$ ;  $l_i$  – средняя длина волокон класса  $i$ ;  $m$  – количество классов волокон.

Длина, оцененная по массе волокна, представляет собой абсолютную меру в отличие от среднечисловой длины волокна, которая является лишь относительной мерой, но, к сожалению, очень часто приводится в литературе. Если  $N$  – число волокон в образце, а  $W$  и  $L$  – соответственно масса и длина отдельных волокон, то среднемассовая длина волокна будет равна  $\sum WL^2 / \sum WL$ . Поскольку среднеарифметическая длина равна  $\sum L / N$ , включение в расчет очень коротких волокон, представляющих собой главным образом обрывки волокон, увеличивает  $N$ , но почти не сказывается на  $\sum L$ . Поэтому сообщаемые в литературе значения среднечисловой длины волокна колеблются, например, для черной ели от 0,74 до 3,48 мм.

Среднюю длину волокна  $\sum L^2 / \sum L$  можно быстро определить с использованием метода, составившего основу метода TAPPI T232.

Измерение длины и ширины волокон может проводиться либо при помощи микроскопа с окулярной микролинейкой, либо на специализированных приборах. В настоящее время для определения структурно-морфологических характеристик волокон бумажной массы используется прибор Fiber Tester, который позволяет провести расширенный анализ свойств целлюлозных волокон. Прибор состоит из устройства для анализа вместе с ПК, который управляет тестированием образца, обрабатывает данные и генерирует отчет по показаниям.

На вращающийся столик (карусель) для образцов можно размещать до 6 стаканов с дезинтегрированной массой с концентрацией 0,5 %. ПК запоминает идентификацию (ID) каждого образца, после чего образец всасывается в прибор и разбавляется до требуемой для измерения концентрации. Суспензия волокон прокачивается через измерительную ячейку, где она фотографируется. Изображения затем обрабатываются с помощью программы для анализа изображений. Могут быть также заказаны следующие опции – изломы и сосуды: компьютерная программа для анализа местных деформаций волокна и количества сосудов. С помощью анализатора Fiber Tester оценивают следующие характеристики волокон:

- средняя ширина волокон в образце, мкм;
- средний фактор формы волокон в образце
- доля волокон в классах длины, мм: 0,2-0,5; 0,5-1,5; 1,5-3,0; 3,0-4,5; 4,5-7,5;



- доля мелочи (по длине) в образце (процент волокон с длиной меньше 0,2 мм относительно числа волокон с длиной более 0,2 мм);
- средняя грубость волокон, мг;
- средний угол излома (среднее значение всех измеренных изломов), °;
- среднее число всех изломов на 1 мм длины волокна;
- число больших изломов (больше 60°) на 1 мм;
- среднее число всех изломов на одно волокно;
- средняя длина одного сегмента, мм.

Для того чтобы исследуемый объект классифицировать как «волокно» он должен иметь длину, как минимум в 4 раза превышающую его ширину, и объект должен быть более 5 пикселей по размеру (1 пиксель примерно 10×10 мкм). Объекты, не отвечающие данному определению, классифицируются как «круглые», если они более 5 пикселей. Объекты размером 2–5 пикселей классифицируются как «5-пиксельные».

Объекты размером 0,2 мм или менее классифицируются как «мелочь». Мелочь представляется в отчете в %, выраженных как доля мелочи к числу волокон.

Узлы (изломы) можно определить как единичное изменение направления волокна под достаточным углом, который рассчитывается на ограниченной длине целлюлозного волокна. Волокно на рис. 1 имеет два излома и состоит из трех сегментов.



Рис. 1. Углы изломов и сегменты волокна

Излом в данном случае рассматривают как меру деформации целлюлозных волокон, и он является дополнительной информацией к фактору формы. В стандартный отчет включается следующая информация: средний угол излома, число изломов на мм, число больших изломов (> 60°) на мм, число изломов на волокно, средний индекс по изломам и средняя длина сегмента.

#### *Способность к уплотнению во влажном состоянии*

Это свойство волокон позволяет им сжиматься в компактную массу при превращении в бумагу и давать плотный лист. Оно в значительной мере



зависит от природы и толщины клеточных стенок. Его можно определить измерением плотности или обратного ей значения – кажущегося удельного объема пробных листов целлюлозы в соответствии со стандартными методами TAPPI T 205 и T 220.

Способность к уплотнению во влажном состоянии находится в прямой корреляции с трудностью удаления воды из полотна влажной целлюлозы при формовании бумаги на сетке бумагоделательной машины. В настоящее время наилучшей мерой этого свойства, по-видимому, является стандартный удельный объем пробных листов. Этот показатель более совершенен, чем измерение садкости (степени помола) бумажной массы или графическое изображение результатов испытаний целлюлозы после размола.

#### *Собственная прочность волокна*

Этот показатель лучше всего характеризуется с помощью определения нулевой разрывной длины волокна по методу TAPPI T 231 sm-96, в котором представлены различные методы определения собственной прочности волокон. Определение сопротивления разрыву при нулевом зазоре выполняются на приборе The Pulmac Zero Span Tensile Tester, Model ZS1000-B3

Прибор The Pulmac Zero Span Tester использует постоянную среднюю скорость нагружения образца до достижения разрушения. Диапазон стандартных скоростей составляет 24...26 Н/см/с.

При иницировании цикла тестирования вначале развивается давление в прижимных цилиндрах, вызывая нагрузку в рычагах, расположенных сверху зажимов. Это вызывает опускание зажимов, пока тестируемая полоска не будет должным образом прижата к упорам с предварительно установленным давлением прижима. Разрывное усилие прикладывается, когда пневматический нагруженный контур открыт, и давление развивается в рабочем цилиндре. Это приводит в движение поршень, который прикладывает силу к «качающемуся» зажиму. В свою очередь это вызывает растягивающую нагрузку на тестовую полоску. При разрыве образца вращение вызывает падение давления. Точка разрыва регистрируется в момент прохода «качающимся» зажимом датчика дистанции при 1,4 мм деления. Пик давления затем считывается, переводится в Н/см и выводится на дисплей. Сброс давления в пневматических контурах позволяют зажимам вернуться в исходное положение.

#### *Когезионная способность*

Когезионная способность волокон характеризует способность волокон образовывать межволоконные силы связи. Величину межволоконных сил связи принято определять по методу С.Н. Иванова путем измерения

внешнего усилия, необходимого для сдвига в плоскости соприкосновения слоев двухслойных отливок с массой  $1 \text{ м}^2$  каждого слоя 100 г. Данный показатель – мера интенсивности сил когезии между волокнами, подвергнутыми натяжению в плоскости листа бумаги. Она включает в себя не только собственную когезионную способность целлюлозы, но и истинную эффективную площадь зон контакта между смежными волокнами и поэтому в значительной степени зависит от укладки волокон. Когезионная способность, таким образом, возрастает с увеличением способности волокон к уплотнению во влажном состоянии. Наилучшим определением когезионной способности служит способ, заключающийся в приготовлении двухслойного стандартного пробного листа, его сушке и определении сопротивления усилию сдвига или отслаиванию вдоль плоскости, разделяющей два листа. Отношение нормальной разрывной длины к нулевой, которое очень легко определяется, полезно только для качественной характеристики когезионной способности. Количественное его значение не очень надежно [2].

Для испытания изготавливают двойные отливки, между которыми на определенном расстоянии располагают нитки (рис. 2). Из отливок вырезают образцы размером  $50 \times 15 \text{ мм}$  (рис. 3), из образцов с помощью препаративной иглы удаляют нитки. После этого образцы кондиционировались. Перед испытанием каждый образцы конденсируется, в них определяют толщину и массу, затем расслаивают, закрепляя середину образцов при помощи специализированного пинцета в плоской площадкой необходимой ширины. Ширину участка образца, соединяющего два слоя, измеряют при помощи лупы с линейкой (рис. 4).

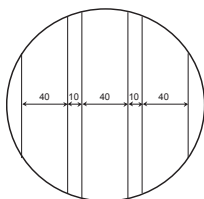


Рис.4. Расположение ниток на отливке

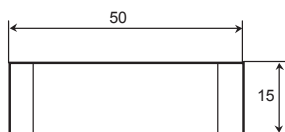


Рис.5. Образцы для испытаний на силы связи

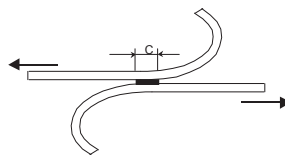


Рис. 6. Проведение испытаний на силы связи

Испытание проводится на разрывной машине, расстояние между зажимами – 50 мм, а скорость растяжения 50 мм/мин. Величину межволоконных сил связи, МПа, определяют по формуле:



$$F_{св} = \frac{P_p}{l \cdot b}, \quad (4)$$

где  $P_p$  – разрушающее усилие, Н;  $l$  – ширина образца, мм;  $b$  – ширина площадки контакта, мм.

Для учёта пористости материала величина межволоконных сил связи  $F_{св}$  делится на коэффициент  $\rho_1/\rho_2$ , где  $\rho_1$  – плотность двухслойной отливки,  $\rho_2$  – плотность целлюлозного вещества, принимается  $1,54 \text{ г/см}^3$ . Для определения когезионной способности по Дж. Кларку ( $\tau_{fu}$ ) сила, необходимая для сдвига образцов ( $F_{св}$ , МПа) умножается на удельный объём двухслойного листа ( $V$ ,  $\text{см}^3/\text{г}$ ).

#### *Грубость волокон*

Грубость волокон – масса в миллиграммах ста метров волокна. Этот показатель ранее обозначился через единицу измерения – деци-грекс, поскольку единицу измерения – грекс, иногда используют для обозначения массы в граммах 10 000 м текстильных волокон наряду с более часто употребляемой единицей денье, которая обозначает массу в граммах 9000 м.

Грубость волокон определяют в соответствии со стандартным методом TAPPI T 234. Для этого известное количество (несколько миллиграммов) окрашенных волокон наносят на влагопрочную фильтровальную бумагу (на площадь  $200 \text{ см}^2$ ) в стандартном листоотливном аппарате (TAPPI или английском) и подсчитывают число пересечений (несколько сотен) волокон с линией известной длины (около 5 см). Затем рассчитывают децигрекс в соответствии с законом вероятности. Чем меньше пересечений дают волокна, тем крупнее (грубее) они будут.

#### *Способность к размолу*

Это главное свойство не относится к числу фундаментальных, так как его можно более или менее точно установить на основе пяти других свойств. Проводят определение способности целлюлозы к размолу на мельнице PFI при концентрации массы 10 %. Результаты представляют в виде кривой, либо в виде таблицы (табл. 1).

Таблица 1. Пример определения способности целлюлозы к размолу

Число оборотов PFI	1300	2400	4300	6300	7500
Энергия размола, кВт	6	10	18	25	28
Степень помола, °ШР	14	15	18	26	30

Однако, если построить график зависимости прочности на разрыв пробных листов от логарифма степени помола массы, то получается прямая





линия. Наклон этой прямой возрастает с увеличением способности к размолю. В соответствии с этим для определения способности к размолю предложен простой метод: увеличивают в полтора-два раза степень помола целлюлозы по сравнению с применяющейся в заводской практике, и определяют прочность на разрыв.

В настоящее время, в целлюлозно-бумажной промышленности недостаточно внимания уделяется определению бумагообразующих свойств волокнистых полуфабрикатов, используя на практике лишь показатели механической прочности, которые в свою очередь, не всегда отражают истинную способность волокон к связеобразованию.

#### Список литературы

- 1 Дж. Кларк, Технология целлюлозы, перевод с английского А.В. Оболенская, Г.А. Пазухина. М: Лесн. пром-сть, 1983. 456 с.
- 2 Аpsит С.О., Килипенко А.В. Бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов. М.: Лесн. пром-сть, 1972. 88 с.

## СОЗДАНИЕ ФИЛЬТРОВАЛЬНОЙ БУМАГИ ДЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ С ДОБАВКОЙ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

А.А. Гилязова<sup>1</sup>, Е.К. Гладышева<sup>2</sup>, Ю.В. Севастьянова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет, г. Архангельск, Россия

<sup>2</sup>ФГБ УН «Институт проблем химико-энергетических технологий» Сибирского отделения Российской академии наук, Бийск

*В работе рассмотрены методы создания фильтровальной бумаги на основе смеси бактериальной и растительной целлюлоз и проведено исследование фильтрующей способности согласно ГОСТ 7584–77, исследование РЭМ и ИК-спектроскопии*

## THE CREATION OF FILTER PAPER FOR BIOLOGICAL FLUIDS WITH THE ADDITION OF BACTERIAL CELLULOSE

A.A. Gilyazova<sup>1</sup>, E.K. Gladysheva<sup>2</sup>, Yu.V. Sevastyanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

<sup>2</sup>Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk

*The paper considers methods of creating filter paper based on a mixture of bacterial and plant cellulose and conducted a study of the filtering capacity according, the study IR spectroscopy*

В современном мире становятся актуальными вопросы многоцелевого использования растительной целлюлозы. Фильтрующие свойства бумаги известны давно и применяются во многих отраслях производства. Новым применением фильтрационных свойств целлюлозы является использование в медицине, как фильтров для биологических жидкостей. Создание данных фильтров актуально тем, что они полностью состоят из природного сырья. При утилизации данных фильтров не наносится ущерб природе, что важно в современном мире.

Цель работы заключалась в сознании новых материалов на основе смеси бактериальной и растительных целлюлоз.

Для создания новых материалов были использованы целлюлозы:

Бактериальная целлюлоза (БЦ) с влажностью 99 % созданная сотрудниками лаборатории биоконверсии ФГБУН института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии



наук города Бийск – к.х.н., доцент Будаева В.В., к.т.н., доцент Скиба Е.А., к.х.н. Гладышева Е.К., к.х.н. Гисматулина Ю.А.;

Беленая растительная целлюлоза была предоставлена крупными ведущими заводами: сульфатная беленая листовая целлюлоза (БЛЦ) производства АО АЦБК г. Новодвинск, сульфатная хвойная беленая целлюлоза (БХЦ) производства АО «Филиал группы «ИЛИМ» г. Корьяма».

На основе литературных данных [1,2] были разработаны различные методы создания фильтровальных материалов на основе растительной и бактериальной целлюлозы:

**Метод № 1 «по традиционной технологии»**

Дезинтеграция бактериальной целлюлозы;

Составление композиции из целлюлозных волокон и дезинтегрированной БЦ;

Отлив смеси целлюлоз на листоотливном аппарате системы Репид-Кеттен.

При использовании традиционной технологии бактериальная целлюлоза практически не задерживается на сетках листоотливного аппарата и практически не задерживается в массе.

**Метод № 2 «самоорганизация волокон»**

Дезинтеграция бактериальной целлюлозы;

– Составление композиции из целлюлозных волокон и дезинтегрированной БЦ;

– Выращивание смеси растительной целлюлозы и БЦ при температуре 20...25 °С.

Технология выращивания смеси растительной и бактериальной целлюлозы позволяет получить образцы новых материалов.

**Метод № 3 «выдерживание бумажной суспензии»**

– Дезинтеграция БЦ;

– Составление композиции из целлюлозных волокон и дезинтегрированной БЦ;

– Выдерживание смеси растительной целлюлозы и БЦ;

– Отлив образцов традиционным способом.

Технология «Выдерживания бумажной суспензии» позволяет получить образцы визуально не отличающиеся от образцов, полученных по традиционной технологии.

**Метод № 4 «поверхностное нанесение бактериальной целлюлозы»**

– Дезинтеграция БЦ;

– Нанесение дезинтегрированной БЦ на сухой целлюлозный образец.



Визуально поверхность образцов, обработанная суспензией бактериальной целлюлозы, отличается существенной гладкостью.

Исследование свойств полученных образцов проводили по изменению фильтрующей способности, которую оценивали в соответствии с ГОСТ 7584–77. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Добавление бактериальной целлюлозы в образцы, полученные по традиционной технологии, не изменяет скорость фильтрации, это свидетельствует о том, что продолжительность взаимодействия бактериальной и растительной целлюлозы слишком мала, при этом бактериальная целлюлоза не успевает провзаимодействовать с растительной целлюлозой и не успевает установить связи с волокнами растительной целлюлозы.

Таблица 1. Скорость фильтрации образцов

Метод создания образцов	Вид образца	*Продолжительность фильтрации, с
По традиционной технологии	100 % ХЦ	345,8
	БЦ + ХЦ	338,2
Самоорганизации волокон	30 БЦ / 70 ХВ	13,27
	50 БЦ / 50 ХВ	158,45
	60 БЦ / 40 ХВ	248,06
	70БЦ / 30 ХВ	557,15
Выдерживание бумажной суспензии	100 % ХЦ	345,8
	БЦ + ХЦ	516,4
	100 % ЛЦ	391,6
	БЦ + ЛЦ	480,0
Поверхностное нанесение БЦ	100 % ХЦ	345,8
	БЦ + ХЦ	1215,6

\* – продолжительность фильтрации рассчитана по 5 образцам и указана в среднем значении

В результате исследования фильтрующей способности образцов, полученных методом «самоорганизации волокон» установлено, что добавка бактериальной целлюлозы существенно замедляет скорость фильтрации образцов, что свидетельствует о возможном образовании связей бактериальной целлюлозы с волокнами растительной целлюлозы.

Исследование фильтрующей способности образцов, полученных методом «выдерживание бумажной массы» показало, что хвойная целлюлоза обладает большей скоростью фильтрации по сравнению с лиственной целлюлозой, добавка бактериальной целлюлозы в количестве 0,001 % к массе приводит повышению фильтрующей способности хвойной целлюлозы на 50 %, а лиственной – на 22...25 %. Данный фактор свидетельствует о том,

что в процессе выдерживания бактериальная целлюлоза способна самоорганизовываться на волокнах растительной целлюлозы, изменяя структуру материала, получаемого в дальнейшем.

Исследование фильтрующей способности образцов, полученных методом поверхностного нанесения бактериальной целлюлозы показало, что поверхностное нанесение БЦ на целлюлозный образец замедляет скорость фильтрования в 3 раза, что может быть обусловлено созданием сетчатой структуры на поверхности образца и дополнительной способностью БЦ к впитываемости.

Подтвердить создание возникновения связеобразования между бактериальной и растительной целлюлозами возможно с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ). Исследование РЭМ проводилось в ИПХЭТ СО РАН с целью изучения морфологии поверхности волокон образцов изучаемых образцов и результаты представлены на рис. 1.

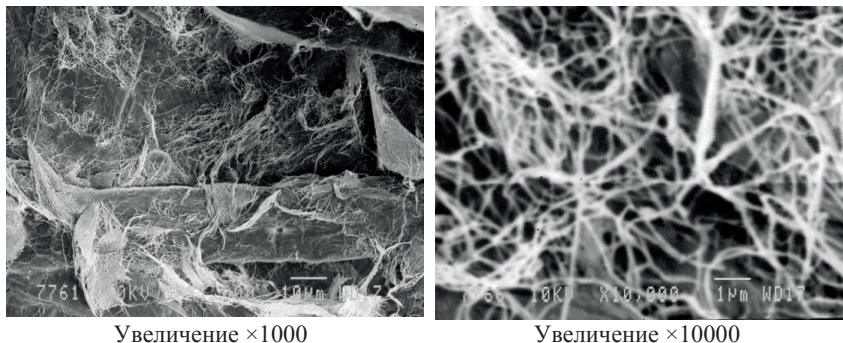


Рис. 1. РЭМ полученных образцов

Исследование РЭМ проведено при увеличении от 200 до 10000 раз.

Установлено, что структуру БЦ можно увидеть только при увеличении не менее 1000 раз. На всех фотографиях при увеличении в 1000 раз видны крупные волокна БХЦ шириной от 20 до 140 мкм и сеть ультратонких (толщиной менее 1 мкм) волокон БЦ. На фотографиях с увеличением в 10 000 раз видна только сеть ультратонких волокон БЦ.

На следующем этапе эксперимента в условиях ЦКП «Арктика» имени М.В. Ломоносова была проведена ИК-спектроскопия полученных образцов. Установлено, что рассчитанное значение степени кристалличности белой хвойной целлюлозы составило 13,4 % (индекс кристалличности 6,32),

что близко к 11,5 % (индекс кристалличности 5,46) – значению, рассчитанному для микрокристаллической целлюлозы из хлопка (Sigma-Aldrich) (рис. 2).

Для образцов из смеси бактериальной и хвойной целлюлоз значение данного параметра составило 13,3 % (индекс кристалличности 6,30), что также близко к значению МКЦ из хлопка (Sigma-Aldrich) 11,5 % (рис. 3). Для бактериальной целлюлозы степень кристалличности составила 15,5 % (индекс кристалличности 7,31) (рис. 4).

Дифрактограммы всех образцов соответствуют дифрактограмме МКЦ (Sigma-Aldrich), то есть представляют собой смесь целлюлозы Ia и целлюлозы Ib.

Поиск соответствия в базе данных PDF-2 (Powder Diffraction File™ PDF-2 Release 2010, International Centre for Diffraction Data) также показал, что кристаллическими компонентами проб являются целлюлоза Ia и целлюлоза Ib.

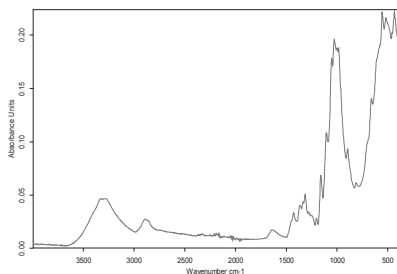


Рис. 2 ИК-спектроскопия белой хвойной целлюлозы

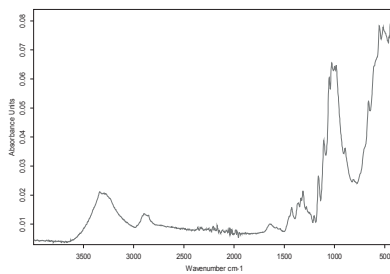


Рис. 3. ИК-спектроскопия бактериальная целлюлоза + хвойная белая целлюлоза

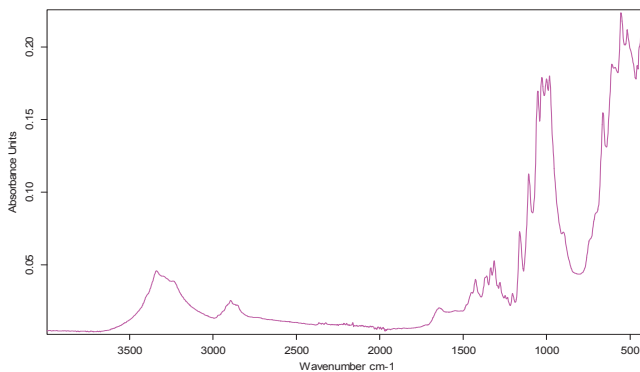


Рис. 4. ИК-спектроскопия бактериальной целлюлозы



### ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

1) В работе реализованы различные методы изготовления образцов на основе смеси растительных беленных целлюлоз и бактериальной целлюлозы.

2) Выявлена способность бактериальной целлюлозы к самоорганизации после ее гомогенизации.

3) Установлено, что при изготовлении образцов на основе хвойной беленной и бактериальной целлюлозы выдерживание в течении суток суспензии перед отливом позволяет создать структуру волокон, что подтверждается повышением времени фильтрации.

4) Использование метода «самоорганизации волокон» при изготовлении образцов на основе хвойной беленной и бактериальной целлюлозы позволяет создать уникальную структуру на поверхности волокон растительной целлюлозы, что подтверждено данными растровой микроскопии образцов.

5) При изучении ИК-спектров образцов хвойной и лиственной целлюлозы от различные производителей, установлены отличия в спектрах, которые обусловлены химическим составом и строением микрокристаллической структуры волокна, которая в свою очередь зависит от способа производства.

6) При исследовании и сравнении ИК-спектров растительной, бактериальной целлюлоз и образцов на основе их смеси установлены различия в областях от 300 до 700  $\text{см}^{-1}$ , от 2000 до 3000  $\text{см}^{-1}$ .

### Список источников

1. Гладышева Е.К. Исследование физико-химических свойств бактериальной целлюлозы, продуцируемой культурой *Medusomyces Gisevii* // Фундаментальные исследования. 2015. № 5-1. С. 53–57.

2. Болотова К.С., Чухин Д.Г., Майер Л.В., Гурьянова А.А. Морфологические особенности фибриллярной структуры растительной и бактериальной целлюлозы // Лесн. журнал. 2016, № 6, С. 153–165 (Известия высш. учебн. заведений).



## ОКРАШЕННЫЙ МОДИФИЦИРОВАННЫЙ НИТРОН КАК СТЕПЕНЬ ЗАЩИТЫ БУМАГИ

**У.Ж. Ешбаева, А.А. Джалилов**

*Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, г. Ташкент, Узбекистан*

*В статье излагаются результаты экспериментального исследования введения окрашенного нитрона в бумажную массу в целях защиты. Защитные свойства бумаги формируются уже на этапе производства. При этом бумага приобретает признаки, которые, с одной стороны, позволяют отличать ее от бумаг иного назначения, с другой – затрудняют несанкционированное изготовление.*

### COLORED MODIFIED NITRON AS A POWER PROTECTION OF PAPER

**U.Dj. Eshbaeva, A.A. Djalilov**

*Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Tashkent, Uzbekistan*

*The article presents the results of an experimental study of the introduction of colored Nitron into paper pulp for protection. The protective properties of paper are formed at the production stage. At the same time, the paper acquires features that, on the one hand, make it possible to distinguish it from other-purpose papers, on the other hand, make unauthorized manufacturing difficult.*

В настоящее время на отечественном и мировом рынках находятся в обращении тысячи видов разнообразных ценных бумаг и документов. Развитие и широкое распространение в обществе и производстве полиграфических технологий стимулирует увеличение количества подделок.

Все государства мира уделяют значительное внимание разработке новых средств защиты, основанных на последних достижениях науки и техники. В мировой практике используются многоуровневые системы защиты, включающие такой комплекс методов и средств, который обеспечивает целесообразность подделки ценных бумаг [4].

Эффективным средством защиты бумажной основы документов являются синтетические волокна, которые позволяют реализовать одновременно несколько элементов защиты. Носителем основного элемента защиты являются цвет волокна и его люминесцентные свойства, дополнительными элементами защиты выступают особая форма поперечного сечения волокна, ферромагнитные свойства и др [4].





Для использования в качестве защитного элемента модифицированных ПАН-волокна окрашены активными красителями. Крашение модифицированного нитрона проводилось по технологии крашения активными красителями фирмы «Kimsoline» «Германия», при концентрации красителя 3 % от массы; модуль ванны 1:30;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 55 г/л;  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  – 20 г/л. Сорбцию красителей определяли колориметрированием растворов до и после крашения [7,3,6].

Проведены исследования физико-механических свойств полученных экспериментальных бумаг. Результаты исследований приведены в табл.1.

Таблица 1. Механические свойства экспериментальных бумаг от состава бумаги

№ п/п	Композиционный состав, %		Зольность, %	Разрывная длина, м	Излом, ч.д.п.
	ХЦЛ	ОАКМОН			
1	100	0	4,3	3100	46
2	95	5	4,8	3060	58
3	90	10	4,6	3010	64
4	80	15	4,9	2944	56
5	70	20	4,8	2866	45

Анализ исследований показывает, что при увеличении содержания, окрашенных активным красителем модифицированных отходов нитрона (ОАКМОН) межволоконные связи незначительно, но уменьшаются.

При добавлении ОАКМОН в количестве 15 % от массы прочность уменьшается на 5 %. Как следует из полученных данных, с каждым последующим циклом переработки наблюдается снижение, как собственной прочности волокна, так и сил связи.

Величина межволоконных сил связей определяется площадью контакта между волокнами и концентрацией связей на ней или удельной силой связи на единицу поверхности. При увеличении содержания ОАКМОН площадь контакта между волокнами хлопковой целлюлозы уменьшается и соответственно ослабляются межволоконные связи и в целом прочность бумаги. При введении в бумажную композицию ОАКМОН в количестве 20 % от волокнистой массы прочность снижается на 8 %.

Все же, снижение прочностных свойств образцов бумаги с введением ОАКМОН незначительно, что позволяет значительно расширить ассортимент бумажной продукции и придать различным видам бумаги разнообразные свойства. Для ценных бумаг самыми важными являются излом, измеря-



емый числом двойных перегибов [1–2]. Как видно из данных табл. 1, с добавлением в бумажную композицию ОАКМОН в количестве 10 % разрывная длина уменьшается на 3 %, а излом увеличивается на 26 %.

Для качественной оценки равномерности и плотности распределения текстильных отходов в составе бумаги использован микроскопический метод анализа.

Анализ микрофотографий показывает, что введение в состав бумажной массы ОАКМОН можно заметить при небольшом увеличении и обеспечивает высокую защищенность при одновременном использовании с ХЦЛ (рис. 1).

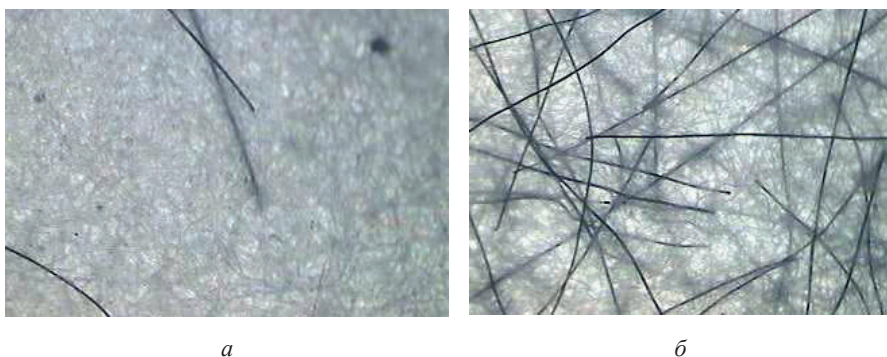


Рис. 1. Микрофотографии полученных бумаг с добавлением ОАКМН (увеличение в 200 раз). *а* – ХЦЛ-95 %, 5 % ОАКМН. *б* – ХЦЛ-80 %, 20 % ОАКМОН

Потребительские свойства защитных модифицированных ПАН-волокон, прежде всего, специфичность и надежность окраски, формируются в процессе их изготовления, при этом решающее значение имеют выбор красителя и технологии крашения волокна. Принцип защиты заключается в том, что бумага содержит основной волокнистый материал и дополнительно модифицированные окрашенные волокна.

Показано, что интенсивность и цвет свечения модифицированных ПАН волокон существенно зависят от вида и концентрации красителя. Наибольшую интенсивность свечения среди всех видов исследованных волокон показали волокна, окрашенные яркочерным цветом. Исследованные образцы имеют более четкую интенсивность их свечения – от оранжевого до красного.

Одновременное введение различных волокнистых материалов в бумажную массу позволяет придать различным видам бумаги разнообразные



свойства и значительно расширить ассортимент бумажной продукции. С целью повышения и регулирования степени защиты от подделки предложено комбинирование модифицированных ПАН–волокон с окрашенными волокнами. Полученные экспериментальные образцы бумаг на основе ХЦЛ, содержащих ОАКМОН и ООНШ или МОН, при различном соотношении компонентов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Составы образцов экспериментальных защитных бумаг

Волокнистые компоненты	Массовая доля компонента, % (виды бумаги)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ХЦЛ	100	95	90	80	70	95	90	80	70
ООНШ	–	2,5	5	10	15	2,5	5	10	15
ОАКМОН	–	2,5	5	10	15	–	–	–	–
МОН	–	–	–	–	–	2,5	5	10	15

Исследованы некоторые физико-механические свойства экспериментальных бумаг (рис. 2,3). Разрывная длина связана с величиной межволоконных сил связи, которая определяется площадью контакта между волокнами и концентрацией связей на ней или удельной силой связи на единицу поверхности [5].

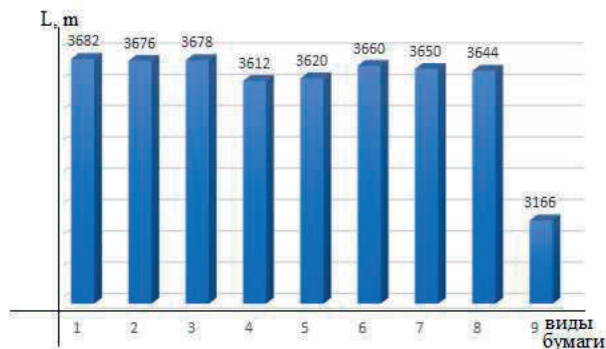


Рис. 2. Диаграмма разрывной длины экспериментальных образцов от состава бумаги

Комбинированное введение ОАКМОН и ООНШ или МОН приводит к увеличению прочности бумаги (рис. 2). Гидроксильные и аминогруппы натурального шелка образуют новые межмолекулярные водородные связи, так как в белковой макромолекуле шелка имеются многочисленные функциональные группы.

Показатель излома бумаги (рис. 3) связан с силами межволоконных связей, а определяется, прежде всего, свойствами индивидуальных волокон. ОАКМОН, МОН и особенно волокна ООИШ более эластичны и устойчивы к изгибающим усилиям. Отсюда следует, что при увеличении содержания ООИШ показатель излома бумаги увеличивается на 17 %.

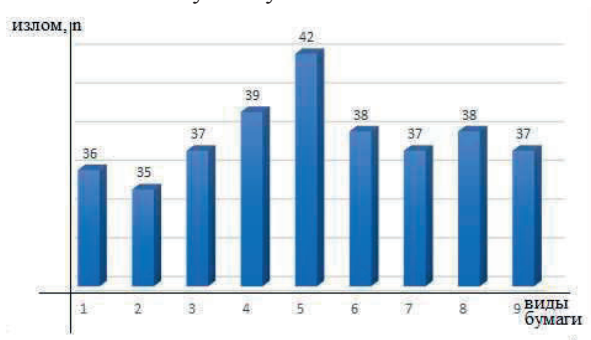


Рис. 3. Диаграмма излома экспериментальных образцов от состава бумаги

Бумага очень гигроскопична, поэтому она отличается большой адсорбционной способностью и при изменении атмосферных условий легко поглощает влагу. Изменение влажности бумаги всегда сопровождается ее деформацией. В результате деформации происходит изменение линейных размеров листа. В полиграфии деформация бумаги вызывает искажение контура изображения, смещение граней рисунка и изменение цветового тона при многокрасочной печати. Относительная деформация при увлажнении в поперечном направлении не должна превышать 2,3 %.

Наиболее распространенным стандартным методом определения деформации бумаги при увлажнении является измерение линейных размеров образца бумаги при помощи контрольной измерительной линейки до и после получасового замачивания её в дистиллированной воде, а также после сушки образца в сушильном шкафу в течение 30 минут.

В табл. 3. приводятся изменения линейных размеров некоторых экспериментальных образцов бумаг после намокания и высушивания. Как видно из таблицы, наибольшей деформацией после увлажнения подвержены образцы бумаг в поперечном направлении, в машинном направлении деформация незначительна.



Таблица 3. Деформация бумаг после их увлажнения и высушивания

Виды бумаги	Относительная деформация по направлениям печати, %			
	после увлажнения		после высушивания	
	машинное	поперечное	машинное	поперечное
1	0,59	2,2	-0,79	-1,00
2	0,19	1,9	-1,28	-1,28
3	0,79	1,3	-1,18	-0,87
7	0,59	1,6	-0,50	-0,89

Таким образом, ОАКМОН, особенно при совместном использовании с ООИШ, придают бумаге новые прозрачные защитные свойства. Причем защитные свойства бумаги формируются уже на этапе производства. При этом бумага приобретает признаки, которые, с одной стороны, позволяют отличать ее от бумаг иного назначения, с другой – затрудняют несанкционированное изготовление.

На основе проведенных исследований разработана технология изготовления ценных бумаг и документов с соответствующим уровнем защиты на бумажном носителе. Композиционная бумага на основе ХЦЛ, ООИШ и ОАКМОН рекомендована для использования при изготовлении ценных бумаг, банков документов и т.д.

#### Список литературы

1. Акбаров Д.Н. Патент. UZ 677, D 01 F11/04, 6/18, опуб. 30.03.1994, Бюл. №1.
2. Ешбаева У.Ж., Рафиков А.С. и др. Электропроводящие волокна – защитный элемент ценных бумаг. // М.: Полиграфия, 2014. №3. С 48–50.
3. Ешбаева У.Ж. Защита ценных бумаг с введением окрашенного модифицированного нитрона. // Доклады АН РУз. Ташкент, 2015. №6. С. 38–40.
4. Коншин, А.А. Защита полиграфической продукции от фальсификации. М.: ООО Синус, 1999. 160 с.
5. Клушев А.В и др. Изменение основных характеристик целлюлозных волокон при их циклическом использовании // Целлюлоза. Бумаги, Картон. 2008. №3. С. 48–50.
6. Фролов М.В. Современные методы защиты от фальсификации // Известия ВУЗ ов. Проблемы полиграфии и издательского дела. Москва. МГУП, 2004. №3. С. 72–83.
7. Хасанова М.Ш. Совершенствование технологии подготовки к крашению смесовых трикотажных полотен: Дисс. .... канд. тех. наук. Ташкент. ТИГЛП, 2009. 125 с.

## БУМАГА С ДОБАВЛЕНИЕМ ОТХОДА ПРОИЗВОДСТВА

**З.К. Галимова, М.М. Абдуназаров, Х.А. Бабаханова**

*Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, г. Ташкент, Узбекистан*

*В статье исследуется влияние вводимого в хлопковый состав солодковой целлюлозы на физико-механические и оптические свойства исследуемых бумаг. Выявлено, что свойства бумаги нового состава идентичны свойствам стандартной печатной бумаге №1, для повышения же прочности поверхности бумагу рекомендуется изменить вид проклеивающего вещества или добавить поверхность проклейку.*

## PAPER WITH ADDITION OF PRODUCTION WASTE

**Z.K. Galimova, M.M. Abdunazarov, X.A. Babaxanova**

*Tashkent Institute of Textile and Light Industry, Tashkent, Uzbekistan*

*The article examines the effect of the licorice pulp introduced into the cotton composition on the physicomachanical and optical properties of the papers under study. It was revealed that the paper properties of the new composition are identical to those of standard printing paper No. 1, in order to increase the surface strength of the paper, it is recommended to change the type of sizing agent or add surface sizing.*

В условиях рыночной экономики развитие полиграфической отрасли диктует требования к целлюлозно-бумажной промышленности, к основным из которых относится увеличить ассортимент и номенклатуру бумаги и бумажной продукции в целях обеспечения потребностей полиграфических предприятий, использующих как традиционные, так и современные способы печати. Теперь нужна не просто бумага, а бумага свойства которой должны обеспечить получения четких и насыщенных оттисков, то есть обладать конкретными свойствами, что возможно достигнуть при изменении используемого основного сырья или же при регулировании различного композиционного состава бумажной массы.

Используемые для производства бумаги первичные целлюлозные волокна это волокна, полученные из древесины (природная целлюлоза), процент их использования составляет в глобальном масштабе – 71 %. Вторичные волокна (рециклированные) получают путем переработки макулатуры, при оптимизации фракционирования вторичного волокна и совершенствовании процесса размола, или из отходов производства [1].



Замена древесины, пусть не полностью, а частично, на недревесные альтернативные материалы для изготовления волокнистых полуфабрикатов является одной из реальных возможностей увеличить ассортимент и при этом сохранить лесные запасы и экологию природной среды. Наука отрасли готова, со своей стороны, предложить пути решения проблемы обеспечения бумажной промышленности собственными волокнистыми полуфабрикатами из недревесного сырья.

Древесина в зависимости от породы дерева, его возраста, условий произрастания содержит 35...45 % целлюлозы, хлопковые волокна, имеющиеся в большом количестве в Республике Узбекистан, до 90 %.

Известно, что хлопковые волокна успешно применяют для изготовления тонкой высококачественной бумаги, для изготовления долговечных видов бумаги, фильтровальной, промокательной, нотной бумаги, основы для пергамента и для диазоскопки, чертежной прозрачной бумаги и для ценных видов бумаг. Бумага из хлопковой целлюлозы высокой белизны за счет гигроскопичности хлопка обладает высокой впитывающей способностью, что отрицательно сказывается при печати одно- и многокрасочной продукции.

В Республике Узбекистан имеются два производства хлопковой целлюлозы Ферганский химический завод фурановых соединений (ФХЗФС) и Янгиюльская целлюлозно-бумажная фабрика. Эти предприятия построены с учётом последних достижений в области производства хлопковой целлюлозы с применением высококачественного европейского технологического оборудования. К примеру, Янгиюльская целлюлозно-бумажная фабрика, мощностью 20 тысяч тон бумаги в год, возводилась с участием французской компании Clextral.

На базе ФХЗФС освоено производство хлопковой целлюлозы, полностью оснащенное немецким оборудованием, проектная мощность которого составляет 30 тысяч тон в год.

Однако существует ряд проблем, которые препятствуют экспорту хлопковой целлюлозы и достижению проектной мощности на вышеуказанных предприятиях. Одной из основных проблем в экспорте этой продукции является несоответствие некоторых технических параметров международным стандартам.

Для доведения свойств хлопковой целлюлозы к стандартным и снижения себестоимости бумажной продукции прорабатывается вопрос налаживания производства бумаги за счет добавки целлюлозы из местного недревесного сырья.



В ташкентском институте текстильной и легкой промышленности на протяжении многих десятилетий проводятся исследования по применению имеющихся местных волокнистых полуфабрикатов для производства различных видов целлюлозно-бумажной продукции и накоплен значительный практический опыт по их переработке. Изучены специфические особенности морфологического строения, химического состава и использования волокнистых полуфабрикатов из наиболее перспективных видов недревесного сырья для производства различных видов бумаги и картона того или иного назначения [2–7].

Как показывают результаты этих исследований, анализ различных информационных источников и опыт производителей волокнистых полуфабрикатов в других странах, для расширения сырьевой базы бумажной отрасли Узбекистана можно успешно использовать однолетние растения — солому злаковых культур, кенаф, отходы солодкового корня, которые наиболее полно отвечают основным критериям пригодности для промышленной переработки, в том числе для получения высококачественной бумажной и картонной продукции. Ресурсы недревесных ежегодно возобновляемых видов сырья, достаточно велики, но в настоящее время для производства целлюлозы и других волокнистых полуфабрикатов не используются.

Исходя из этого, одним из реальных источников решения проблемы сырьевой базы в Узбекистане, является широкое использование отходов производства для получения бумаги с необходимыми печатными свойствами.

Культивируемая на территории республики солодка используется более чем в 20 отраслях промышленности. Её корень применяется в медицинских целях и в пищевой промышленности (как пряность и как пенообразователь в пивных напитках), табачной промышленности и металлургии.

Целью данной работы является определение степени влияния вводимого в бумажный состав солодковой целлюлозы на физико-механические и оптические свойства бумаги и возможности использования бумаги на основе хлопковой целлюлозы (ХЦ) с добавлением целлюлозы из отходов солодкового корня (СЦ) для печатания в полиграфической отрасли.

Для этой цели были выполнены отливки из 100 % хлопковой целлюлозы и 100 % целлюлозы из отходов солодкового корня, также отливки с различным процентным составом отходов от 10 до 50 %.

При отливе в качестве наполнителя использовали каолин, для проклейки канифольный клей и глинозем.

Результаты определения физико-механических и оптических свойств опытных отливок бумаги приведены в табл. 1.





Таблица 1. Свойства исследуемой бумаги на основе хлопковой целлюлозы (ХЦ) с добавлением солодковой целлюлозы (СЦ)

Бумага с добавками ХЦ:СЦ	Толщина мм	Масса 1 м <sup>2</sup> , г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Зольность, %	Влажность, %	Разрывная длина, м	Белизна, %
100%ХЦ	0,19	76	0,50	12,7	4,1	2292	83,14
90:10	0,16	76	0,48	8,7	4,2	2081	82,34
80:20	0,18	88	0,49	10,8	4,0	2169	81,33
70:30	0,16	88	0,60	11,0	4,3	2192	80,66
60:40	0,19	88	0,50	11,0	4,1	2210	79,84
50:50	0,18	88	0,60	11,3	4,2	1992	78,41
100% СЦ	0,22	95	0,50	11,0	4,0	2254	83,41

Известно, что для достижения высокой четкости изображения бумага должна быть более плотной, менее пористой. Значения плотности, определившие структуру бумаги, колеблются в пределах от 0,5 до 0,6 г/см<sup>3</sup> и характеризуют рыхлость и пористость, что в дальнейшем обеспечит впитывающую способность, в результате чего пигмент и связующее печатной краски проникнут в поры бумаги, оттиски получатся менее контрастными, менее насыщенными. Использование каолина не повлияло на пористость волокнистого материала, так как их частицы имели размер меньший, чем диаметр пор волокнистого материала.

По значениям зольности, характеризующих содержание наполнителя, образцы бумаг можно отнести к матовой бумаге №3 (10...14 %), предназначенных для печатания массовых брошюр, отрывных календарей.

Чтобы бумага в процессе печатания не рвалась она должна быть и прочной, и мягкой, а это обеспечивается при содержании количества влаги от 4,5 до 8 % в зависимости от вида и назначения. Как видно из табл. 1, влажность исследуемых бумаг не приведёт к изменению многих её рабочих свойств и не вызовет осложнения в процессе печатания.

В процессе печатания главным критерием является прочность бумаги, обеспечивающая нормальные условия печати, продолжительное использование печатной продукции без заметного разрушения и зависящее от её состава и структуры. Более толстая бумага оказывается более прочной. По ГОСТу прочность бумаги на разрыв определяют разрывной длиной. На практике возможны случаи, когда менее прочная, но склонная к большому растяжению бумага оказывается не поврежденной и, наоборот, более прочная, но жесткая бумага рвется в бумагопроводящей системе печатной машины. Разрывная длина испытуемых бумаг находятся в пределах от 1900 до 2200 м, которая соответствует типографской (листовой) бумаге.



Высокая степень белизны печатной бумаги весьма желательна, так как четкость, удобочитаемость издания зависят от контрастности запечатанных и пробельных участков оттисков. При многокрасочной печати факсимильность, точность тональности изображения, её соответствие тональности оригинала возможны только при печатании на достаточно белой бумаге. Белизна используемой солодковой целлюлозы характеризовала белизну исследуемой бумаги и составила в среднем 81 %, идентичной белизне чистоцеллюлозной печатной бумаге №1.

**Выводы:** физико-механические и оптические исследования опытных отливок подтверждают, что введение в состав бумаги целлюлозы из отходов корня солодкового корня, даёт возможность получения бумаги иного состава, что способствует увеличению ассортимента и номенклатуре, обеспечению бумажной промышленности дополнительным альтернативным сырьём. Свойства бумаги нового состава идентичны свойствам стандартной печатной бумаге №1, для повышения же прочности поверхности бумагу рекомендуется изменить вид проклеивающего вещества или добавить поверхностную проклейку, в результате на поверхности образуется прочная, гибкая плёнка, что не даст проникновению вслед за связующим пигмента печатной краски в поры бумаги и тем самым обеспечит получение насыщенных оттисков.

#### Список литературы

1. Дулькин Д.А. Развитие научных основ и совершенствование процессов технологии бумаги и картона из макулатуры: Дисс. ... докт. техн. наук. Архангельск.: АГТУ, 2008. 200 с.
2. Гулямов А.Э. Разработка технологии подготовки отходов шелка для производства бумаги: Дис. ... канд. техн. наук. Т., 1997. 134 с.
3. Алимова Х.А. Основы безотходной технологии переработки натурального шелка: Дис. докт. техн. наук. Т., 1994. 264 с.
4. А. Усманов, Д.Б. Худойбердиева Изучение возможностей получения целлюлозы из однолетних растений //Проблемы текстиля. Ташкент. №2. 2010. С. 80.
5. А.К. Буланов, Х.Д. Азизова Печатно-технические свойства бумаги из различных компонентов сырья // Проблемы текстиля. Ташкент. №3. 2010. С. 60.
6. С.Р. Камалова, У.Ж. Ешбаева, С.Д. Камилова Разработка оптимальных условий подготовки отходов кокономотального производства для изготовления бумаги // Проблемы текстиля. Ташкент. №3. 2010. С. 66.
7. У.Ж. Ешбаева, С.Р. Камалова. Ацетилцеллюлоза тола чикиндилари киритиб коғоз олиш // Проблемы текстиля. Ташкент. №1. 2010. С. 49.

## ТЕНДЕНЦИИ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

Э.Л. Алимпиев

ОАО «Архангельский ЦБК», Архангельск, Россия

*Основной тенденцией автоматизации крупных промышленных объектов в условиях стабильной экономической ситуации становится комплексный подход, подразумевающий обновление АСУТП как часть проекта реконструкции основного технологического оборудования.*

### TRENDS IN INTEGRATED AUTOMATION

E.L. Alimpiev

Arkhangelsk PPM, Arkhangelsk, Russia

*The main trend of automation of large industrial facilities in a stable economic situation is an integrated approach, involving the update of APCS (Automated Process Control System) as part of the project of reconstruction of the main technological equipment.*

Период появления и наиболее интенсивного развития компьютерных технологий, а следовательно, и массовое их внедрения в сферу автоматизации процессов и производств для России совпал с переходным периодом развития экономики. Изначальная ограниченность предложений на рынке высокотехнологичного оборудования для автоматизации обуславливала ценовую политику фирм-производителей как в области оборудования/аппаратных средств – (HW), так и программного обеспечения – (SW).

По мере развития электронной промышленности возможности реализации автоматизированных систем стали намного шире – рынок «качнулся» в сторону потребителя – с одной стороны. С другой – специфика производства целлюлозно-бумажной продукции, а именно, уникальность технологии и оборудования в каждом конкретном случае предопределила формирование специфичной архитектуры АСУТП для выпуска конечной продукции из волокнистой массы. По сложившимся понятиям – система управления качеством (QCS), выполняет задачи управления технологическими параметрами непосредственно влияющими на потребительские свойства выпускаемой продукции и, так называемая, распределенная система управления (DCS), обеспечивающая управление. Помимо этого для автоматизации предприятий целлюлозно-бумажной промышленности до сих пор характерными являются случаи, когда не только отдельные цеха но даже сегменты технологических цепочек могут быть оборудованы средствами автоматизации



(в том числе и системами АСУТП) от различных производителей, что, безусловно, создает проблемы при эксплуатации и обслуживании управляемых объектов. Несмотря на то, что «разнородные» АСУТП, при необходимости, как правило, снабжаются средствами взаимного обмена данными, сложности – это необходимость технической поддержки иногда принципиально различающегося программного обеспечения и необходимость кратной комплектации резервными аппаратными средствами. Одновременно с этим на уровне менеджмента предприятия приходится решать организационно-кадровые вопросы, связанные либо с дополнительным обучением обслуживающего персонала, либо с созданием смежных подразделений соответствующей специализации (по фирме-производителю).

Поэтому при реализации масштабных решений становится очевидной необходимость централизованного проектирования.

Централизованное проектирование, в свою очередь, может быть реализовано различными путями. Наиболее распространенные это либо координационное управление проектными работами различных отраслевых организаций, либо объединение в одном исполнителе работ всех (или почти всех) необходимых направлений основного проекта. Пример такого способа реализации крупного проекта – реконструкция КДМ-2 на архангельском ЦБК, где в качестве основного исполнителя – финский концерн VALMET, обеспечивающий реконструкцию как технологического оборудования КДМ-2, так и монтаж средств автоматизации с заменой системы АСУТП.

Такой способ централизованной реализации проекта подразумевает выгоду от использования неких преимуществ, к которым можно отнести исходную согласованность аппаратного уровня управления АСУТП и исполнительской части управляющих механизмов, возможность принятия технически оптимальных решений на стадии постановки задач автоматизации. При этом стоимость новой АСУТП с работами по вводу в эксплуатацию существенно меньше затрат на технологическое оборудование, что в общем, является благоприятным фактором для внедрения новых разработок в области автоматизации.

Однако, замена АСУТП, как правило, не обходится гладко и несет некоторые проблемы, связанные в том числе с необходимостью адаптации оперативного персонала к новому интерфейсу.

По своим возможностям управления, оснащенности необходимыми средствами контроля и анализа ситуаций системы АСУТП от разных производителей также не могут быть идентичными.



Для QCS, осуществляющих управление бумаго- и картоноделательными машинами основными выходными характеристиками (контролируемыми параметрами) являются масса квадратного метра и влажность продукции на накате. Задача QCS – поддержание заданных значений основных контролируемых параметров с минимальными разбросами в продольном (машинном) – МН и поперечном – ПН направлениях.

До реконструкции КДМ-2 управлялась системой DaVinci (Honeywell-Measurex год установки 2001). Сопоставить различные АСУТП можно исходя из показателей, связанных с их метрологическими характеристиками. Точность и достоверность измерений основных контролируемых параметров напрямую зависит от точности позиционирования соответствующих датчиков и скорости обработки поступающей информации, эти характеристики определяются техническими возможностями сканирующего устройства.

DaVinci:

- 2000 Гц частота обработки сигнала
- 16 бит Аналого-Цифровое разрешение
- 5 мм возможность просмотра и разрешения в ПН
- 5 мм точность фиксации кромки листа
- 350 мм/с скорость сканирования (реальные измерения)

Заявленные возможности системы DaVinci - позиционирование измерительных датчиков (данные о сканере):

- до 600 мм/с скорость сканирования
- быстрое разрешения профиля
- цифровое управление приводом головок
- двигатель переменного тока – упрощает обслуживание привода
- высокое разрешение тахометра
- 0.1 мм точность позиционирования

Paper IQ (VALMET) данные сканера КДМ-2:

- точность позиционирования головок < 1 мм
- 250 мм/с скорость сканирования (реальные измерения)

Заявленные возможности системы валмет (данные о сканере):

- до 1000 мм/с скорость сканирования
- точность позиционирования головок < 1 мм

Характеристики QSC-датчиков

Датчик массы 1м<sup>2</sup>

DaVinci:



- Тип источника Kг-85
- Воздушный зазор измерительной платформы 10 мм
- Диапазон измерений 10...1000 г/м<sup>2</sup>
- Допустимая зольность 2... 20 %
- Стабильность 2σ 0,05 %
- Точность 0,25 % или 0,1 г/м<sup>2</sup>
- Диаметр «пятна датчика» 15 мм
- Разрешающая способность выше чем 0,01 г/м<sup>2</sup>

#### Рарег IQ:

- Тип источника Kг-85
- Диапазон измерений 10... 850 г/м<sup>2</sup>
- Стабильность 0,08 %
- Точность 0,08 % или 0,12 г/м<sup>2</sup>
- Разрешение профиля 5 мм

#### Датчик влажности полотна

##### DaVinci:

- Воздушный зазор измерительной платформы 10 мм
- Диапазон измерений влажности 0... 30 %
- Диапазон массы 1м<sup>2</sup> 0... 400
- Допустимая зольность любая – (не влияет на измерения)
- Стабильность 2σ 0,05 % – при использовании внутреннего оптического стандарта; 0,1 % на образцах продукции с использованием акларовых пакетов

- Точность 0,25 %
- Диаметр «пятна датчика» в ПН 10 мм
- Требуются измерения массы 1 м<sup>2</sup>

##### Рарег IQ:

- Диапазон измерений влажности 0... 30 г/м<sup>2</sup>
- Диапазон массы 1м<sup>2</sup> 10... 500
- Допустимая зольность любая – (не влияет на измерения)
- Стабильность 0,05 %
- Точность 0,1 %
- Диаметр «пятна датчика» 5 мм
- Разрешение профиля 5 мм
- Не требуются измерения массы 1 м<sup>2</sup>



Значимой разницы в технических возможностях измерительных комплексов АСУТП DaVinci (Honeywell-Measurex 2001г.) и Paper IQ (VALMET 2019г.) нет.

Преимущества «проектной» стадии реконструкции, о которых говорилось выше, безусловно, сыграли свою роль. А «эксплуатационные» преимущества, ожидаемые от реконструкции КДМ-2 (повышение производительности и расширение диапазона выпускаемой продукции) во многом определяются обновленным оборудованием машины:

- двухсеточная конструкция отливного стола;
- система кондиционирования массы перед напорными ящиками;
- напорные ящики с регулированием профиля концентрации в ПН путем разбавления и т.д.

#### Список литературы

1. Предложение фирмы VALMET по реконструкции КДМ-2 ОАО «Архангельский ЦБК», 2016 г.
2. Предложение фирмы Honeywell-Measurex по автоматизации производства картона и бумаги ОАО «Архангельский ЦБК», 1998 г.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОРНОСТИ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

**М.В. Захаров, Д.А. Вяткин**

*Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия*

*В статье приводится обоснование и описание метода определения сорности целлюлозы, основанного на анализе видеопотока с применением компьютерного зрения. В статье описан алгоритм работы разработанного метода, его отличительные особенности и преимущества внедрения.*

### PULP DIRT COUNT BASED ON IMAGE PROCESSING

**M.V. Zakharov, D.A. Vyatkin**

*Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia*

*The article provides a rationale and a description of the method for determining cellulose weediness based on the analysis of a video stream using computer vision. The article describes the work algorithm of the developed method, its distinctive features and advantages of introduction.*

Для стабильного получения высококачественной продукции требуется вести оперативный контроль и наблюдение за параметрами процесса производства. Одним из таких параметров для производства целлюлозно-бумажной продукции является сорность целлюлозы.

В настоящее время на одной из очередей Архангельского целлюлозно-бумажного комбината контроль качества целлюлозы реализован в лабораторных условиях и в цехе, на этапе промывки целлюлозы.

Проверка качества в лабораторных условиях позволяет оценить качество продукции по многим параметрам с высокой точностью. Однако оценка качеств образцов готовой продукции не позволяет оперативно, в реальном времени, реагировать на изменение параметров целлюлозы.

Оценивание непосредственно в цехе, на месте производства, производится оператором. Оператор периодически наблюдает за качеством обрабатываемой целлюлозы и записывает данные наблюдений. Такой метод измерения параметров целлюлозы, в том числе сорности, позволяет быстро реагировать на изменение параметров, но только во время наблюдения оператором. Однако имеются временные периоды, когда наблюдение не производится, что является минусом данного метода. Также на результаты показаний может повлиять человеческий фактор.





Автоматизация контроля параметров обрабатываемой целлюлозы с применением метода определения сорности целлюлозы, основанного на анализе видеопотока с применением компьютерного зрения, позволит непрерывно контролировать параметры процесса производства и оперативно реагировать на их изменения.

В статье описан алгоритм работы метода определения сорности целлюлозы, основанного на анализе видеопотока с применением компьютерного зрения, отличительные особенности и преимущества внедрения данного метода.

Ниже приведена схема алгоритм работы метода определения сорности целлюлозы, основанного на анализе видеопотока с применением компьютерного зрения (рис. 1) и описание его работы.



Рис. 1. Алгоритм определения сорности целлюлозы

Для реализации данного метода требуется камера с защитой от влаги, направленная на анализируемую целлюлозную массу, сервер, на котором будет выполняться программа для анализа данных с камеры.

С камеры, направленной на обрабатываемую целлюлозную массу на этапе промывки, поступает видеопоток.



Кадр видеопотока захватывается сервером, устанавливается зона слежения. Из выбранной зоны слежения создается изображение для дальнейшего анализа и производится его предварительная обработка сглаживающими фильтрами для устранения слабых шумов от камеры на изображении для корректного функционирования следующего этапа.

После предварительной обработки кадра производится вычитание фона. Вычитание фона выбрано как оптимальный алгоритм поиска отклонений в целлюлозе, поскольку камера неподвижна и после этапа предварительной обработки изображения, целлюлоза без вкраплений сора представляет собой однородную массу. При вычитании фона сравниваются пиксели двух изображений друг относительно друга. В результате появляется возможность определить участки изображения целлюлозы, которые могут содержать сор. Результатом работы данного этапа является бинарное изображение, где указано вероятное местоположение сора.

На этапе морфологической фильтрации применяется функция закрытия контуров, т.е. функция дилатации, за которой следует эрозия. Данный фильтр позволяет закрыть раскрытые контуры, тем самым уменьшив количество предполагаемых мест расположения сора, объединив близкорасположенные, на расстоянии несколько пикселей, вероятные места расположения сора.

На этапе удаления шумов производится удаление объектов меньше заранее заднего размера, полученных в результате морфологической обработки. В результате получаем бинарное изображение, содержащее вероятное положение сора и прочих дефектов в целлюлозной массе.

На этапе сегментации изображений, путем наложений изображения после фильтрации шумов на исходное изображение целлюлозы, производится разделение исходного изображения на отдельные зоны вероятного положения сора.

Анализ обнаруженных отклонений на основе полученных на предыдущих этапах данных, позволяет произвести классификацию вероятных отклонений, вероятного положения сора. На данном этапе, в течении нескольких циклов, запоминается предыдущее расположение ранее найденного отклонения. Затем оно сравнивается с текущим кадром, и, если: отклонение имеет траекторию движения, соответствующую сору; цветовую гамму, существенно отличающуюся от целлюлозной массы; во время движения не меняет активно свою бинарную маску; имеет соответствующие форму, размеры, то такое отклонение считается сором.

Информация об обнаруженных отклонениях и соре выводится оператору и записывается в журнал работы программы. В спорных случаях, когда определение автоматическое затруднено, кадр сохраняется и предлагается для классификации оператору.

На рис. 2 представлен результат работы реализации данного алгоритма.

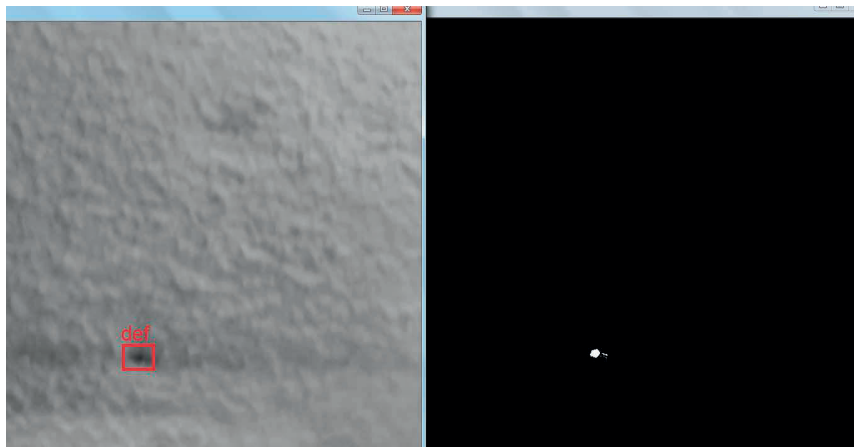


Рис.2. Результат работы алгоритма определения сорности целлюлозы

В правой части рис. 2 расположена бинарная маска, полученная после обработки алгоритмом. В левой части показано изображение, выводящееся оператору с указанием обнаруженных отклонений.

Программная реализация алгоритмов разрабатывалась с применением библиотеки OpenCV на языке программирования C++.

Метод контроля сорности целлюлозы, основанный на данном алгоритме, может вести непрерывное наблюдение за целлюлозной массой, определять количество сора, также других отклонений в целлюлозной массе и быстро реагировать на изменение данных параметров.

#### Список литературы

1. Хорошев Н.И., Мубаракзянов Н.Р. Автоматизация распознавания сорности газетной бумаги // Вестник ПНИПУ. 2014. № 12. С. 31–41.

## НАКИПЬ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ ЦБП. СОВРЕМЕННЫЙ МЕТОД ПОДБОРА ИНГИБИТОРОВ ОБРАЗОВАНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

М.Е. Романов<sup>1</sup>, У. Цибульский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>БКТ-Сервис, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>BIM Finland OY, Коувола, Финляндия

*Образование минеральных отложений на стенках технологического оборудования в целлюлозно-бумажной отрасли является серьезной проблемой и требует тщательного подхода к ее решению. В работе рассмотрен современный метод подбора наиболее эффективных ингибиторов с применением современного лабораторного оборудования.*

### SCALE IN PULP AND PAPER INDUSTRY. ADVANCED TECHNIQUE OF SELECTION OF MINERAL DEPOSITS FORMATION INHIBITORS

M.E. Romanov<sup>1</sup>, Udo Zibulski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>BKT-Service, Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>BIM Finland OY, Kouvola, Finland

*The formation of mineral deposits on the walls of the process equipment in the pulp and paper industry is a serious problem and requires a careful approach to its solution. The paper considers an advanced approach to the selection of the most effective inhibitors using modern laboratory equipment.*

В настоящее время повышение производительности предприятий ЦБП без существенных капитальных вложений актуально для отрасли. Однако увеличение производительности предприятий достигается не только за счет модернизаций, установки нового оборудования и внедрений современных технологий, но и за счет снижения технологических простоев, в т.ч. связанных с промывкой оборудования от минеральных отложений.

Образование накипи или минеральных отложений происходит в тех случаях, когда концентрация растворенного минерала превышает его предельную растворимость, что приводит к осаждению минерала. Наиболее простым примером является образование накипи, когда индекс Ланжелье или индекс стабильности показывают состояние перенасыщения  $\text{CaCO}_3$  [1].

В целлюлозно-бумажной промышленности основными источниками ионов кальция является древесина и производственная вода. В табл. 1 представлено содержание некоторых элементов для хвойной древесины.

Таблица 1. Содержание некоторых элементов в хвойной древесине.

Элемент	Концентрация, г/т
Ca	500-800
K	400-600
Mg	50-200
Mn	50-200
Na	5-40
Ba	2-15
Fe	1-15

На одном из предприятий российской отрасли лабораторией отдела главного технолога была проведена работа по расчету количества кальция, поступающего в систему с белым щелоком и щепой. В табл. 2 приведены производственные данные и расчет количества кальция, поступающего в систему. Содержание CaO в белом щелоке составляет 2,7 кг/м<sup>3</sup> (среднее значение за год, по данным 2000–2004 гг). Содержание CaO в щепе около 0,2 %.

Таблица 2. Расчет поступающего кальция в систему

Год	БЩ на варку, м <sup>3</sup> /мес	CaO с БЩ, т/мес	Кальций со щепой, т/мес	Кальций со щепой и щелоком, т/мес
2001	78780,0	212,7	81,0	293,7
2002	79727,0	215,3	81,0	296,3
2003	86738,1	234,2	86,1	320,3
2004	89782,3	242,4	87,9	330,3
2005	92147,2	248,8	90,4	339,2
2006	89703,7	242,2	94,8	337,0

На рис. 1 графически отображены результаты расчетов, приведенных в табл. 2.

Дополнительно в некоторых регионах проблемы с накипью могут сильно зависеть от сезонности. На рис. 2 приведен пример изменения жесткости речной воды в течение года.



Рис. 1. Количество кальция, поступающего в систему

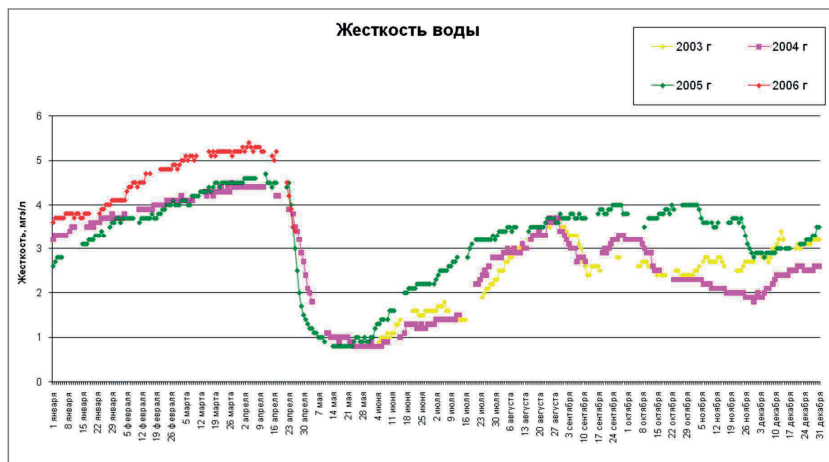


Рис. 2. Изменение жесткости речной воды в течение календарного года

Образование накипи на поверхностях технологического оборудования является серьезной проблемой и требует тщательного подхода к ее решению.

На сегодняшний день известно много способов по контролю образования минеральных отложений на предприятиях водоподготовки: контроль

pH, контроль и выдерживание параметров работы теплообменников, скорость потока, умягчение воды и пр. На предприятиях целлюлозно-бумажной отрасли часто не представляется возможным использования вышеописанных методов контроля минеральных отложений. Возникает вопрос о применении диспергаторов и/или ингибиторов образования накипи.

Минеральные отложения в ЦБП состоят в основном из карбоната кальция, оксалата кальция, сульфата бария, сульфата кальция и др. Видов ингибиторов достаточно много и механизмы ингибирования хорошо изучены.

Компанией «Bim Finland» OY разработана программа по удалению и контролю минеральных отложений – «BIMs scale control program» [2]. Для подбора наиболее эффективного вида ингибитора и его дозировки разработана установка по моделированию образования накипи в лаборатории применительно к условиям конкретного производства – BPG (BIM Pressure Grid). Фото установки представлено на рис. 3.



Рис. 3. Установка для моделирования накипеобразования (BPG)

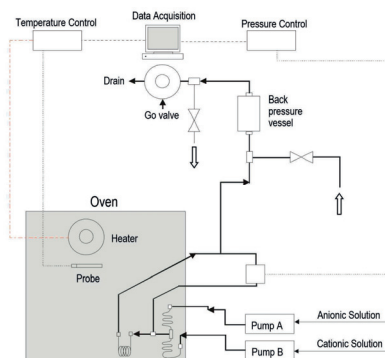


Рис. 4. Схема установки по моделированию образования накипи

Для решения поставленной задачи специалисты компании BIM Finland отбирают раствор среды в проблемном месте (фильтрат, щелок и др.) и в лаборатории определяют количество катионов кальция (бария) и анионов карбоната (оксалата, сульфата). На рис. 4 представлена схема установки BPG.

Установка представляет из себя контур с рабочим капилляром, который помещен в печь. В контур вмонтирован датчик по контролю давления. Таким образом, возможно моделирование любого технологического процесса: отбелки или варки целлюлозы, выпарки щелоков. В случае модели-



рования варки создается необходимый рН и температура и начинается циркуляция среды в контуре. Далее добавляется требуемое количество катионов и анионов, полученных на основании анализа исследуемой среды (черного шелока). При этом в капилляре начинает образовываться накипь, что приводит к постепенному забиванию последнего. При забивании капилляра начинает расти давление в контуре, которое фиксируется датчиком. Далее возможно добавлять в контур различные виды ингибиторов, а также подбирать дозировки. Результат моделирования представляется в виде графика изменения давления в контуре во времени (рис. 5).

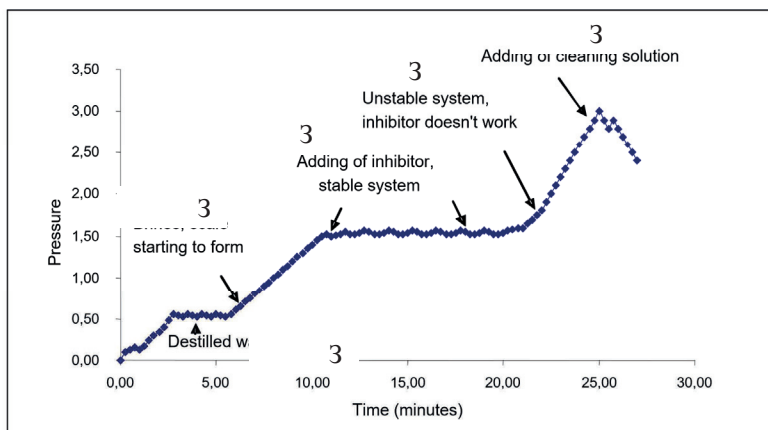


Рис. 5. График роста давления при моделировании процесса. 1 – зона циркуляции дистиллированной воды; 2 – зона роста давления; 3 – зона стабилизации давления; 4 – зона роста давления; 5 – зона падения давления

График роста давления в капилляре (рис. 5) состоит из нескольких зон: зона циркуляции дистиллированной воды (зона 1), зона роста давления в капилляре вследствие образования накипи после добавления ионов (зона 2), зона стабилизации давления в капилляре после добавления ингибитора (зона 3), зона роста давления после прекращения работы ингибитора (зона 4), зона падения давления в капилляре после добавления моющего раствора (зона 5).

На рис. 6 представлены результаты моделирования образования накипи в условиях процесса варки. Из графика видно, что продукт BIM SI 1260 при наименьшей дозировке поддерживал капилляр в открытом состоянии максимально долго. Данным образом возможно моделировать любые условия технологического процесса. На рис. 7 представлена реальная работа



ингибитора на одном из предприятий после 7 месяцев работы варочного котла без останова. До подбора правильного ингибитора котел останавливали на чистку сит отбора раз в 1,5–2,0 месяца.

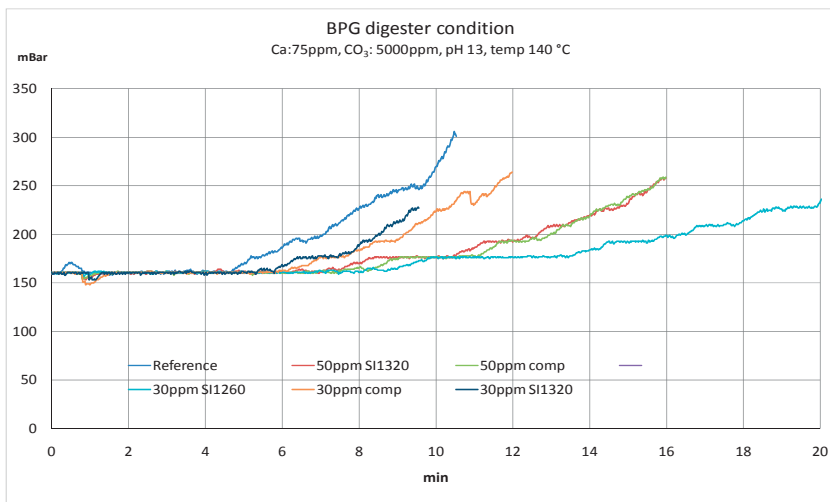


Рис. 6. Графики роста давления при моделировании процесса варки с применением различных дозировок и видов ингибиторов



Рис. 7. Состояние сит отбора варочного котла после 7 месяцев работы без останова на чистку



Применение предлагаемого метода подбора ингибиторов позволяет:

1. Подобрать наиболее эффективный ингибитор образования минеральных отложений применительно к конкретным условиям технологического процесса;
2. Значительно снизить годовые простои оборудования на чистку и/или промывку от минеральных отложений;
3. Достичь быстрых сроков окупаемости затрат на применение наиболее эффективных ингибиторов.

#### Список литературы

1. Kurita Water Industries LTD. Kurita handbook of water treatment. Second English Edition. 1999. 302 p. 6–21.
2. Материалы и презентации компании «BIM Finland» OY.

## СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НОВЫХ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕСИ БАКТЕРИАЛЬНОЙ И РАСТИТЕЛЬНЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗ

**С.В. Булыгина, Ю.В. Севастьянова**

*Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия*

*В ходе исследовательской работы представлены методы создания новых материалов на основе смеси бактериальной и растительных целлюлоз, проведено исследование фильтрующей способности согласно ГОСТ 7584–77*

### THE CREATION AND STUDY OF PROPERTIES OF NEW MATERIALS BASED ON A MIXTURE OF BACTERIAL AND VEGETABLE CELLULOSE

**S.V. Bulygina, Yu.V. Sevastyanova**

*Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia*

*In the course of research the methods of creating new materials based on a mixture of bacterial and plant cellulose, a study of the filtering capacity according to GOST 7584-77*

Молекулярная формула и полимерная структура бактериальной целлюлозы, соответствует целлюлозе, выделенной из растительного сырья, но при этом бактериальная целлюлоза обладает более высокой кристаллическостью, модулем прочности на разрыв, водопоглащающей способностью, пластичностью, а также характеризуется биосовместимостью и биоразлагаемостью [1].

Целью данной работы является создание новых фильтровальных материалов на основе смеси бактериальной и древесных целлюлоз. Для достижения данной цели исследования были определены следующие задачи:

- изучение диспергирования гель-пленки бактериальной целлюлозы;
- разработка различных методов создания образцов из смеси бактериальной и растительной целлюлоз;
- исследование свойств новых материалов.

Для создания новых материалов были использованы целлюлозы:

Бактериальная целлюлоза (БЦ) с влажностью 99 % созданная сотрудниками лаборатории биоконверсии ФГБУН института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук города Бийск – к.х.н., доцент Будаева В.В., к.т.н., доцент Скиба Е.А., к.х.н. Гладышева Е.К., к.х.н. Гисматулина Ю.А.;



Беленая растительная целлюлоза была предоставлена крупными ведущими заводами: сульфатная беленая листовая целлюлоза (БЛЦ) производства АО АЦБК г. Новодвинск, сульфатная хвойная беленая целлюлоза (БХЦ) производства АО «Филиал группы «ИЛИМ» г. Коряжма».

На основе литературных данных [2,3] были разработаны различные методы создания фильтровальных материалов на основе растительной и бактериальной целлюлозы:

**Метод № 1 «по традиционной технологии»**

- 1) Дезинтеграция бактериальной целлюлозы;
- 2) Составление композиции из целлюлозных волокон и дезинтегрированной БЦ;
- 3) Отлив смеси целлюлоз на листоотливном аппарате системы Репид-Кеттен.

При использовании традиционной технологии бактериальная целлюлоза практически не задерживается на сетках листоотливного аппарата и практически не задерживается в массе.

**Метод № 2 «самоорганизация волокон»**

- 1) Дезинтеграция бактериальной целлюлозы;
- 2) Составление композиции из целлюлозных волокон и дезинтегрированной БЦ;
- 3) Выращивание смеси растительной целлюлозы и БЦ при температуре 20...25 °С.

Технология выращивания смеси растительной и бактериальной целлюлозы позволяет получить образцы новых материалов.

**Метод № 3 «выдерживание бумажной суспензии»**

- 1) Дезинтеграция БЦ;
- 2) Составление композиции из целлюлозных волокон и дезинтегрированной БЦ;
- 3) Выдерживание смеси растительной целлюлозы и БЦ;
- 4) Отлив образцов традиционным способом.

Технология «Выдерживания бумажной суспензии» позволяет получить образцы, визуально не отличающиеся от образцов, полученных по традиционной технологии.



#### Метод № 4 «поверхностное нанесение бактериальной целлюлозы»

1) Дезинтеграция БЦ;

2) Нанесение дезинтегрированной БЦ на сухой целлюлозный образец.

Визуально поверхность образцов, обработанная суспензией бактериальной целлюлозы, отличается существенной гладкостью.

Исследование свойств полученных образцов проводили по изменению фильтрующей способности, которую оценивали в соответствии с ГОСТ 7584-77. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1. Скорость фильтрации образцов

Метод создания образцов	Вид образца	*Продолжительность фильтрации, с
По традиционной технологии	100 % ХЦ	345,8
	БЦ + ХЦ	338,2
Самоорганизации волокон	30 БЦ / 70 ХВ	13,27
	50 БЦ / 50 ХВ	158,45
	60 БЦ / 40 ХВ	248,06
	70БЦ / 30 ХВ	557,15
Выдерживание бумажной суспензии	100 % ХЦ	345,8
	БЦ + ХЦ	516,4
	100 % ЛЦ	391,6
	БЦ + ЛЦ	480,0
Поверхностное нанесение БЦ	100 % ХЦ	345,8
	БЦ + ХЦ	1215,6

\* – продолжительность фильтрации рассчитана по 5 образцам и указана в среднем значении

Добавление бактериальной целлюлозы в образцы, полученные по традиционной технологии, не изменяет скорость фильтрации, это свидетельствует о том, что продолжительность взаимодействия бактериальной и растительной целлюлозы слишком мала, при этом бактериальная целлюлоза не успевает провзаимодействовать с растительной целлюлозой и установить связи с волокнами растительной целлюлозы.

В результате исследования фильтрующей способности образцов, полученных методом «самоорганизации волокон» установлено, что добавка бактериальной целлюлозы существенно замедляет скорость фильтрации образцов, что свидетельствует о возможном образовании связей бактериальной целлюлозы с волокнами растительной целлюлозы.

Исследование фильтрующей способности образцов, полученных методом «выдерживание бумажной массы» показало, что хвойная целлюлоза



обладает большей скоростью фильтрации по сравнению с лиственной целлюлозой, добавка бактериальной целлюлозы в количестве 0,001 % к массе приводит повышению фильтрующей способности хвойной целлюлозы на 50 %, а лиственной – на 22...25 %. Данный фактор свидетельствует о том, что в процессе выдерживания бактериальная целлюлоза способна самоорганизовываться на волокнах растительной целлюлозы, изменяя структуру материала, получаемого в дальнейшем.

Исследование фильтрующей способности образцов, полученных методом «поверхностного нанесения бактериальной целлюлозы» показало, что поверхностное нанесение БЦ на целлюлозный образец замедляет скорость фильтрования в 3 раза, что может быть обусловлено созданием сетчатой структуры на поверхности образца и дополнительной способностью БЦ к впитываемости.

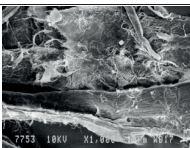
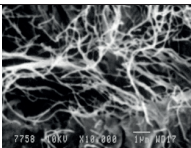
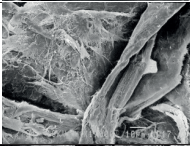
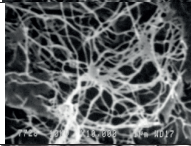
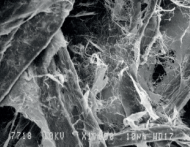
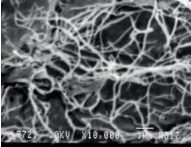
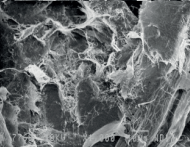
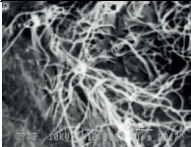
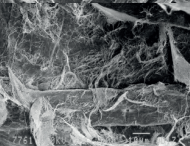
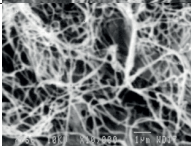
Подтвердить создание возникновения связеобразования между бактериальной и растительной целлюлозами возможно с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ). Исследование РЭМ проводилось в ИПХЭТ СО РАН с целью изучения морфологии поверхности волокон образцов изучаемых образцов и результаты представлены в табл. 3.

В табл. 2 представлены пропорции смешения суспензий БЦ с БХЦ и нумерация образцов бумажных фильтров, полученных в САФУ им. М.В. Ломоносова.

Таблица 2. Пропорции смешения суспензий БЦ с БХЦ и нумерация образцов бумажных фильтров, полученных в САФУ им. М.В. Ломоносова

№ образца	Пропорции смешения суспензий		Примечание: массовая доля БЦ в образце, %
	БЦ	БХЦ	
1	30	70	0,78
2	70	30	3,93
3	60	40	2,54
4	50	50	1,75
5	50	50	1,75

Таблица 3. Фотография РЭМ образцов фильтров (метод «самоорганизация»)

№ образца БЦ/БХЦ	Увеличение ×1000	Увеличение ×10000
1 (30:70)		
5 (50:50)		
4 (50:50)		
3 (60:40)		
2 (70:30)		

Исследование РЭМ проведено при увеличении от 200 до 10000 раз.

Установлено, что структуру БЦ можно увидеть только при увеличении не менее 1000 раз. На всех фотографиях при увеличении в 1000 раз видны крупные волокна БХЦ шириной от 20 до 140 мкм и сеть ультратонких (толщиной менее 1 мкм) волокон БЦ. На фотографиях с увеличением в 10 000 раз видна только сеть ультратонких волокон БЦ.

#### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ:**

1) В работе реализованы различные методы изготовления образцов на основе смеси растительных беленых целлюлоз и бактериальной целлюлозы.

2) Выявлена способность бактериальной целлюлозы к самоорганизации после ее гомогенизации.



3) Установлено, что при изготовлении образцов на основе хвойной беленной и бактериальной целлюлозы выдерживание в течении суток суспензии перед отливом позволяет создать структуру волокон, что подтверждается повышением времени фильтрации.

4) Использование метода «самоорганизации волокон» при изготовлении образцов на основе хвойной беленной и бактериальной целлюлозы позволяет создать уникальную структуру на поверхности волокон растительной целлюлозы, что подтверждено данными растровой микроскопии образцов, а также существенным замедлением скорости фильтрации образцов.

#### Список источников

1. Heinze T., El Seoud O.A., Koschella A. Cellulose derivatives. Synthesis, structure, and properties. Switzerland: Springer, 2018. 552 p.

2. Гладышева Е.К. Исследование физико-химических свойств бактериальной целлюлозы, продуцируемой культурой *Medusomyces Gisevii* // Фундаментальные исследования. 2015. № 5-1. С. 53–57.

3. Болотова К.С., Чухин Д.Г., Майер Л.В., Гурьянова А.А. Морфологические особенности фибриллярной структуры растительной и бактериальной целлюлозы. // Лесн. журнал. 2016, № 6, С. 153–165. (Известия высш. учебн. заведений)



## КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА РИСОВОЙ ШЕЛУХИ С ПОЛУЧЕНИЕМ ВОЛОКНИСТЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ

**В.В. Коптяев<sup>1</sup>, Ю.В. Севастьянова<sup>1</sup>, Д.А.Дулькин<sup>1</sup>, А.В. Канарский<sup>2</sup>, Т.З. Ха<sup>2</sup>  
З.А.Канарская<sup>2</sup>, Е.Р.Якубов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань, Россия

*Разработан натронный способ получения волокнистого полуфабриката из рисовой шелухи, пригодного для использования в тарном картоне до 20 %. Установлена целесообразность применения щелока в микробиотехнологии*

## COMPLEX PROCESSING OF RICE HUSK TO PRODUCE FIBROUS SEMI-FINISHED PRODUCTS

**V.V. Koptyaev<sup>1</sup>, Yu.V. Sevastyanova<sup>1</sup>, D.A. Dulkin<sup>1</sup>, A.V. Kanarsky<sup>2</sup>, T.D. Na<sup>2</sup>,  
Z.A.Kanarskay<sup>2</sup>, E.R.Yakubov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia

<sup>2</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

*A soda ash method has been developed to produce a fibrous semi-finished product from rice husk, suitable for use in tare cardboard up to 20%. The feasibility of using liquor in microbiotechnology is established.*

В мире ежегодно в результате обмола образуется огромное количество рисовой шелухи – в процессе переработки 1 млн. т риса образуется около 200 тыс. т рисовой шелухи. Однако, в основном рисовая шелуха сжигается в печах либо подвергается захоронению, требующему привлечения больших земельных угодий. Следует отметить, что рисовая шелуха очень медленно деградирует в почве ввиду наличия в ней диоксида кремния. При сжигании рисовой шелухи выделяются вещества, способные негативно влиять на природу и здоровье человека. Утилизация рисовой шелухи представляет собой актуальную проблему в странах, где воспроизводится рис и является основным злаковым продуктом в питании (Китай, Индия, Египет, Южная Корея, страны Африки и частично Россия, Узбекистан). Следует отметить, что в состав рисовой шелухи входит клетчатка и кремний, использование которых может способствовать развитию экономики государств, выращивающих рис, в том числе и России. В этой связи актуальны исследования, направленные на разработку технологий комплексного использования шелухи риса в целлюлозно-бумажной, химической и биотехнологической промышленности.



В ИТЦ СТПБС Северного (Арктического) федерального университета совместно с коллегами из Казанского национального технологического университета ведутся исследования по комплексной переработки рисовой шелухи. Предусматривается получение волокнистого полуфабриката для бумаги и картона и углеводов для питательной среды в микробиотехнологии.

Целью настоящей работы является определение возможности получения из рисовой шелухи волокнистого полуфабриката для тарного картона.

Для достижения данной цели исследования были определены следующие задачи:

– Выбрать вид варки и подобрать условия горячего размола натронной рисовой полуцеллюлозы с целью получения полуфабриката для использования в композиции флютинга.

– Провести комплексное исследование бумагообразующих свойств натронной полуцеллюлозы из рисовой шелухи с различным гидромодулем и расходом щелочи.

– При исследовании свойств флютинга на основе композиций макулатуры марки МС-Б и натронной ПЦ из рисовой шелухи в различном соотношении.

При исследовании установлен рациональный режим получения натронной полуцеллюлозы из рисовой шелухи для использования в композиции компонентов тарного картона. Параметры режима варки рисовой шелухи: натронная варка, гидромодуль варки 8,0:1,0; расход щелочи 20 %; конечная температура – 160 °С; продолжительность стоянки на конечной температуре 60 минут, отделение щелока с последующим горячим размолом в течение 5 минут при концентрации 15 %.

Основной технологической задачей при переработке рисовой шелухи с получением полуфабриката высокого выхода является подбор условий горячего размола, сортирование массы после размола и подбор условий вторичного размола. На основании результатов исследований пришли к выводу: что получения волокнистого полуфабриката для флютинга рисовую шелуху целесообразно варить натронным способом по технологии полуцеллюлозы. Концентрация массы при размоле должна быть не менее 15 %. Показатели механической прочности тарного картона на основе композиции макулатуры марки МС-Б и натронной ПЦ из рисовой шелухи сохраняются при содержании полуфабриката до 20 %. Полученные при варке щелока содержали органические вещества, которые использованы в исследованиях с получением микробиологических удобрений и кормового белка.



## СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛЕТОЧНОЙ СТЕНКИ РАСТИТЕЛЬНОГО ВОЛОКНА В ПРОЦЕССЕ ФЕРМЕНТАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

К.С. Болотова<sup>1</sup>, Д.Г. Чухчин<sup>1</sup>, А.А. Гурьянова<sup>2</sup>, И.В. Тышкунова<sup>3</sup>, Е.В. Новожилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия

<sup>2</sup>ГУПАО Фармация, Архангельск, Россия

<sup>3</sup>ЗАОр «Народное Предприятие «Архангельскхлеб», Архангельск, Россия

*Основные изменения структуры растительных волокон при ферментативном гидролизе целлюлазным комплексом связаны с их разрушением в поперечном направлении и образованием коротких фрагментов волокон (мелочи), что обеспечивает увеличение доступности слоев вторичной клеточной стенки для действия целлюлаз.*

## STRUCTURAL CHANGES IN CELL WALLS OF PLANT FIBER IN THE PROCESS OF ENZYMATIC TREATMENT

K.S. Bolotova<sup>1</sup>, D.G. Chukhchin<sup>1</sup>, A.A. Guryanova<sup>2</sup>, O.A. Yunitsyna<sup>3</sup>, E.V. Novozhilov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Northern (Arctic) Federal University

<sup>2</sup>GUPCO Pharmacy

<sup>3</sup>ZAO People's Enterprise «Arkhangelsk bread»

*The main changes in the structure of plant fibers in the enzymatic hydrolysis by cellulase complex are associated with their destruction in the transverse direction and the formation of short fragments of fibers (fines), which increases the availability of layers of the secondary cell wall for the action of cellulases.*

Ферментативная деструкция целлюлозы широко изучается с 50-х годов XX века. Биотехнологические методы находят все большее применение в процессах получения и переработки целлюлозных полуфабрикатов. Известно, что обработка целлюлолитическими ферментами может изменить саму структуру волокна или поверхностные свойства волокон [1]. Для получения новых знаний о целлюлозных волокнах растительного происхождения было проведено исследование микроструктурных изменений, происходящих с клеточной стенкой волокна в процессе ферментативного воздействия, а также изучена взаимосвязь этих изменений со свойствами целлюлозных волокон.

Целью работы является исследование микроструктурных изменений и топохимических особенностей ферментативного гидролиза растительных волокон ферментами целлюлазного комплекса.

Использовали промышленные образцы хвойной и лиственной небеленой сульфатной целлюлозы. Исследование проводили на сканирующем электронном микроскопе ZEISS «SIGMA VP». Для улучшения качества



снимков образцы покрывали слоем платино-палладиевого 80:20 сплава толщиной до 5 нм с помощью напылительной установки Q150T ES (Quorum).

Биоконверсию сульфатной целлюлозы осуществляли смесью препаратов *P.verruculosum* В1 и рекомбинантного ферментного препарата *P.verruculosum* F10 в соотношении 3:1. Препарат В1 – многокомпонентный препарат широкого спектра действия. Этот препарат содержит комплекс целлюлаз и обладает также ксиланазной и другими минорными активностями. Предпочтительный температурный интервал действия препарата 40...50 °С (оптимум 42 °С) при рН среды 5,0...5,5 [2]. Отличительной особенностью комплекса В1 является почти полное отсутствие β-глюкозидазы (целлобиазы). Добавление препарата F10 позволяет сбалансировать ферментный препарат по целлобиазе, что обеспечивает уменьшение накопления промежуточных продуктов гидролиза и позволяет достичь более высокой степени конверсии субстратов при ферментативном гидролизе.

Определение характеристик целлюлозных волокон проводили на анализаторе L&W Fiber Tester. Целлюлозную пробу после лиофильного высушивания разводили в 400 мл дистиллированной воды, перемешивали, выдерживали 15–30 мин для набухания волокон, после чего 200 мл суспензии выливали в стакан для образца. Для каждой пробы проводили два параллельных испытания.

Было определено, что снижение средней длины волокон (от 0,5 до 1 мм) наиболее быстро происходит в первые 1–2 часа ферментативного гидролиза (ФГ). Волокна хвойной сульфатной целлюлозы разрушались медленнее, чем волокна лиственной целлюлозы. За счет деструкции длинных волокон наблюдалось увеличение количества коротких и очень коротких волокон. При этом пропорционально возрастала общая доля «мелочи», то есть волокон с длиной, попадающей под интервал от 0,001 до 0,1 мм. Это происходило практически пропорционально уменьшению фракций средних и длинных волокон. Через 1...1,5 ч ФГ резко снижалось сопротивление перемешиванию волокнистой суспензии. Это происходило при средней длине волокна 0,3...0,5 мм.

Одновременно с укорочением волокон происходило увеличение их ширины, что свидетельствует о набухании самого массивного слоя  $S_2$  вторичной клеточной стенки. Этому способствовало разрушение поверхностных слоев волокон, которое происходило под действием не только целлюлаз, но и ксиланаз комплекса *P. verruculosum*, так как на поверхности сульфат-целлюлозных волокон имеется высокая концентрация ксилана. Особенно интенсивно набухание происходило у лиственных волокон, быстро

наблюдалось увеличение их средней ширины с 21,7 мкм до 24,2 мкм (на 12 %), однако при дальнейшем ФГ значения средней ширины практически не менялись. У волокон сульфатной хвойной целлюлозы слои клеточной стенки более устойчивы к ферментативной деструкции, набухание развивалось постепенно, даже через 5 часов от начала процесса ФГ увеличение средней ширины волокна составляло всего около 3 %.

Целлюлоза может быть гидролизована до глюкозы под действием комплекса ферментов [3]. В настоящее время термин «целлюлазы» или, более точно, «целлюлазные системы» применяется к разнообразным внеклеточным ферментам или к целым ферментным кластерам, способным совместно разлагать целлюлозу путем гидролиза ее  $\beta$ -1,4-глюкозидных связей. Совместное действие разных типов ферментов, участвующих в деградации целлюлозы: эндоглюканаза (ЭГ) разрушает аморфную структуру микрофибрилл целлюлозы и готовит субстрат для действия целлобиогидролазы (ЦБГ), которая разрушает кристаллическую часть целлюлозы; образующаяся целлобиоза под действием  $\beta$ -глюкозидазы (целлобиазы) гидролизуется до глюкозы [4].

Действие целлюлаз *P. verruculosum* на клеточную стенку волокон уже в самом начале ФГ приводит к существенным изменениям в морфологической структуре волокон (рис. 1). Разрыв волокон в поперечном направлении в результате деструкции эндоглюканазами приводит к увеличению доступности слоев вторичной клеточной стенки для действия целлобиогидролаз. После 4 часов ФГ небеленой хвойной сульфатной целлюлозы хорошо видна структура среднего слоя  $S_2$ , микрофибриллы которого частично гидролизованы целлобиогидролазами. После 48 часов ФГ волокна сульфатной целлюлозы практически полностью разрушены, однако остаются трудногидролизуемые фрагменты волокон.

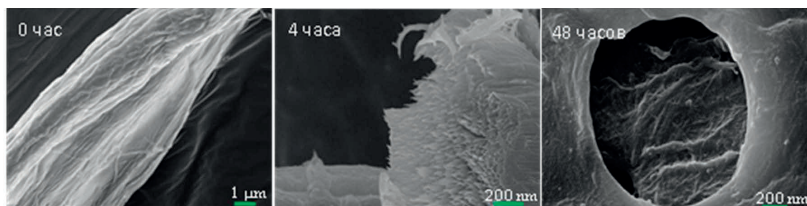


Рис. 1. Изменение структуры сульфат-целлюлозных волокон в процессе ферментативного гидролиза: образец небеленой хвойной целлюлозы



Одним из значимых свойств целлюлозы, определяющих ее доступность к ФГ, является степень кристалличности. В процессе ФГ изменение кристалличности целлюлозы проходит через максимум (рис. 2): на первых стадиях гидролиза происходит увеличение степени кристалличности, что связано с деструкцией аморфных участков целлюлозы и удалением поверхностно расположенного ксилана. На более поздних стадиях происходит снижение степени кристалличности вследствие разрушения целлобиогидролазами кристаллических областей целлюлозы. Для лиственной целлюлозы кристалличность на всех стадиях процесса ниже, чем у хвойной, из-за более высокого содержания аморфной составляющей в виде ксилана.

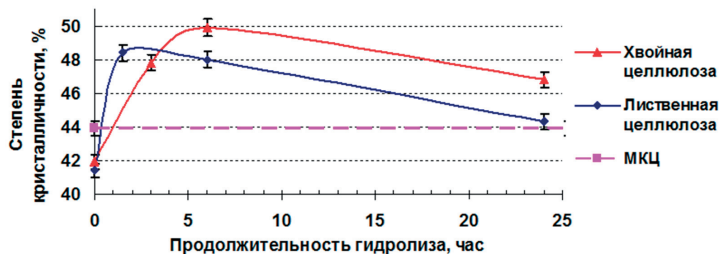


Рис.2. Изменение степени кристалличности сульфатной целлюлозы в процессе ферментативного гидролиза

После ФГ сульфат-целлюлозных волокон остается негидролизуемый остаток, который состоит из сильно разрушенных остатков целлюлозных волокон и их фрагментов, которые отличаются по форме от волокон и представляют собой структуры в виде обрывков пленки. В составе пленки обнаружены хаотично расположенные целлюлозные микрофибриллы. Такое расположение микрофибрилл характерно для первичных стенок сосудов и волокон. Первичная стенка Р в небеленой сульфатной целлюлозе, частично сохранившаяся на поверхности волокон, является относительно устойчивой к ферментативному воздействию. Возможно, что это связано с присутствием в ее составе полисахарида ксилоглоукана, образующего поперечные связи между микрофибриллами целлюлозы.

Деструкция слоев вторичной клеточной стенки в процессе ФГ клеточной стенки сульфат-целлюлозного волокна представлена на рис. 3.

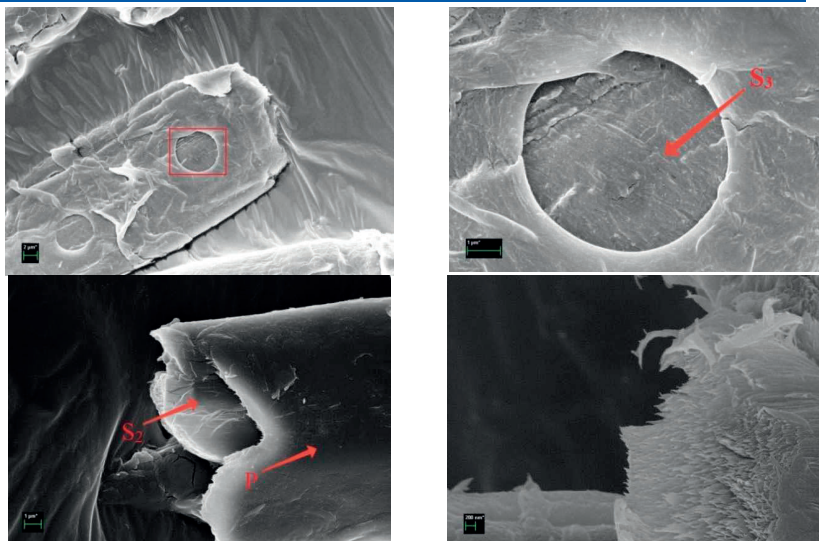


Рис. 3. Целлюлозные волокна на разных этапах ферментативного гидролиза (масштабная линейка: а – 2 мкм; б, в – 1 мкм; г – 200 нм)  
 1а, 1б – трахеида с порами после ферментативного гидролиза с поверхностью слоя  $S_3$ ; 1в – трахеида после ферментативного гидролиза, с обозначенными слоями  $S_2$  и  $P$ ; 1г - однонаправленные фибриллы слоя  $S_2$

Известна высокая устойчивость слоя  $S_3$  к действию химических реагентов [5]. Это может объясняться наличием образующихся при отмирании протопласта биологических отложений, которые покрывают поверхность этого слоя. По этой причине деструкция микрофибрилл слоя  $S_3$  в процессе ФГ затруднена по сравнению с гидролизом слоя  $S_2$ .

В лиственной целлюлозе сосуды более устойчивы к ферментативному гидролизу, чем волокна либриформа, поскольку их относительная доля в ходе процесса увеличивается примерно в 3 раза (рис. 4).

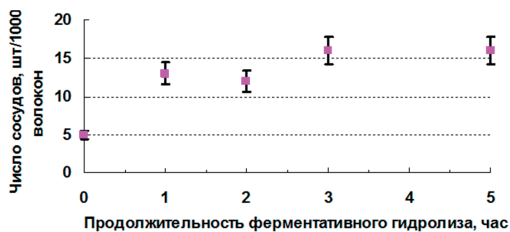


Рис. 4. Изменение доли сосудов в сульфатной лиственной целлюлозе от продолжительности ферментативного гидролиза





Причиной этого может являться наличие на поверхности сосудов веществ, препятствующих проникновению целлюлаз к субстрату. По литературным данным известно [6], что внутренняя поверхность сосудов покрыта слоем каллозы.

Таким образом, установлено, что даже при продолжительном ферментативном гидролизе и большом расходе ферментов не удается достигнуть полной деструкции целлюлозных волокон. Остаются неразрушенными фрагменты первичных стенок сосудов и волокон и фракция сильно разрушенных, но не полностью гидролизованных волокон.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-33-00855 «Надмолекулярная организация целлюлозных микрофибрилл растительного и бактериального происхождения»*

#### Список литературы

1. Новожилов Е.В. Биотехнологии в производстве целлюлозы для химической переработки / Е.В. Новожилов, Д.Н. Пошина // Химия растительного сырья. 2011. № 3. С. 15–32.
2. Чекушина А.В. Целлюлолитические ферментные препараты на основе грибов *Trichoderma*, *Penicillium* и *Myceliophthora* с увеличенной гидролитической активностью: автореф. дисс. канд. тех. наук, Институт биохимии им. А.Н. Баха РАН, Москва, 2013. 23 с.
3. Yang B. Enzymatic hydrolysis of cellulosic biomass / B. Yang, Z. Dai, S-Y Ding, CE. Wyman // Biofuels. 2011. Vol. 2(4). P. 421–450.
4. Andersen N. Enzymatic hydrolysis of cellulose – Experimental and modelling studies. PhD thesis, BioCentrum. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark. 2007. P. 151.
5. Бейнарт И.И. Клеточная стенка древесины и ее изменения при химическом воздействии. Рига: Зинатне, 1972. 501 с.
6. Горшкова Т.А. Биогенез растительных волокон. Учреждение Российской академ. наук Казанский ин-т биохимии и биофизики КазНЦ РАН. Москва: Наука, 2009. 263 с.



## ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА НПВО ИК-СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ АНАЛИЗА ПОРОДНОГО СОСТАВА ЛИСТВЕННЫХ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ

**Е.О. Окулова, А.В. Гурьев, Д.Г. Чухчин**

*Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия*

*Проанализирована возможность определения породного состава целлюлозных полуфабрикатов, содержащих осину и берёзу в различных соотношениях при помощи метода НПВО ИК-спектроскопии.*

## EVALUATION OF APPLICATION FTIR-SPECTROSCOPY METHOD FOR ANALYSIS OF THE BREED COMPOSITION OF THE HARDWOOD CELLULOSE SEMI-FINISHED PRODUCTS

**E.O. Okulova, A.V. Guriev, D.G. Chuhchin**

*Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia*

*Analyzing the possibility of using the FTIR-spectroscopy method for determination the wood species composition of cellulose semi-finished products containing aspen and birch in different ratios.*

Растительные волокна, используемые для производства лиственных полуфабрикатов, являются разнородными по составу и структуре, по сути представляя собой совокупность органических соединений. В свою очередь известно, что органические соединения включают в себя различные функциональные группы, фундаментальные вибрации которых наблюдаются при инфракрасном излучении. Поскольку они самые интенсивные и самые простые, то анализируя инфракрасные спектры, можно определить молекулярную структуру органических материалов

В настоящее время метод инфракрасной спектроскопии применяют для прямого анализа поверхности древесных материалов и материалов на основе волокон целлюлозы [1]. Данный метод является точным, простым, неразрушающим и значимым аналитическим инструментом, поэтому является перспективным.

В данной работе инфракрасные спектры снимали с помощью спектрофотометра Vertex 70V в инфракрасном диапазоне  $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$  с разрешением  $4 \text{ см}^{-1}$ . Для получения спектров поглощения образцы из лабораторных

отливок, содержащих смесь волокон осины и берёзы, размещали на приставке нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) GladiATR производства фирмы Pike Tech., США. Материал кристалла НПВО – искусственный алмаз. При этом проводили 128 параллельных сканирований каждого образца.

В качестве объектов исследования использовали лабораторные образцы из смесей полуфабрикатов волокон осины и берёзы при весовых соотношениях: 0/100; 20/80; 40/60; 60/40; 80/20; 100/0. Каждую пробу предварительно размалывали в мельнице ЦРА до степени помола 20 °ШР и далее изготовляли отливки массой 1 м<sup>2</sup> 60 г. Лабораторные образцы для эксперимента готовили из следующих полуфабрикатов: 1 – целлюлоза сульфатная листовая небелёная из древесины осины и берёзы; 2 – целлюлоза сульфатная листовая белёная; 3 – полуцеллюлоза, полученная при варке с зелёным щёлком (ПЦЗЩ); 4 – полуцеллюлоза нейтрально-сульфитная (НСПЦ). Для каждого образца целлюлозного полуфабриката спектры поглощения снимали 4...6 раз.

Пример графиков средних спектральных кривых предоставлен на рис. 1.

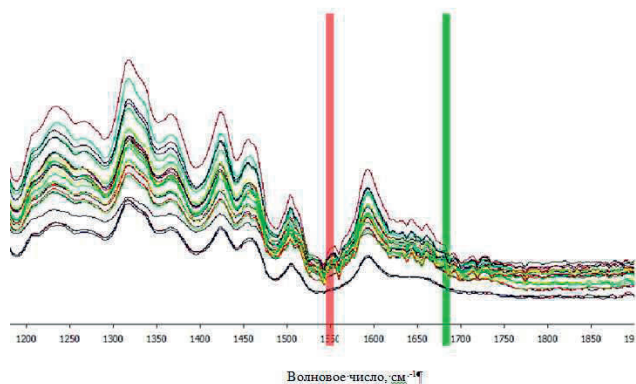


Рис. 1. ИК-спектры целлюлозных образцов с различным породным составом

Обнаружено, что в целом полосы основных колебаний макромолекул в спектрах образцов волокон осины и берёзы лежат в диапазоне частот от 3000 до 3700 см<sup>-1</sup> и отвечают за валентные колебания ОН-групп целлюлозы. Вероятно, некоторый вклад в эту полосу вносят колебания воды, находящиеся как внутри волокон, так и адсорбированной на поверхности целлюлозы.



Интенсивность и форма этих полос позволяет получить прямую информацию о состоянии водородных связей и о состоянии гидроксильных групп в исследуемых образцах. Диапазон от 2800 до 3000  $\text{см}^{-1}$  содержит полосы поглощения, которые отвечают за асимметричные валентные колебания С–Н связей в метиленовых группах (С–Н– и  $\text{CH}_2$ -валентные колебания). Обнаружено, что в области частот 2250-2450  $\text{см}^{-1}$  наблюдаются колебания только у образцов из волокон древесины осины. В диапазоне волн 400-1200  $\text{см}^{-1}$  расположены сильные полосы поглощения валентных колебаний С–С и С–О групп пиранозного кольца целлюлозы, а также различные деформационные колебания пиранозного кольца и глюкозидной связи.

Возможность решения задачи нахождения соотношения породного состава волокон в образцах оценивали на основе использования соотношений разных значений волновых чисел. Корреляционный анализ показал, что у всех исследованных образцов целлюлозы и полуцеллюлозы четких зависимостей между заданными значениями соотношений осины и березы с характеристическими пиками С–Н и О–Н не обнаружено. На рис. 2 предоставлен калибровочный график между пиками в диапазоне длин волн 1548 – 1683  $\text{см}^{-1}$  применительно к образцам НСПЦ.

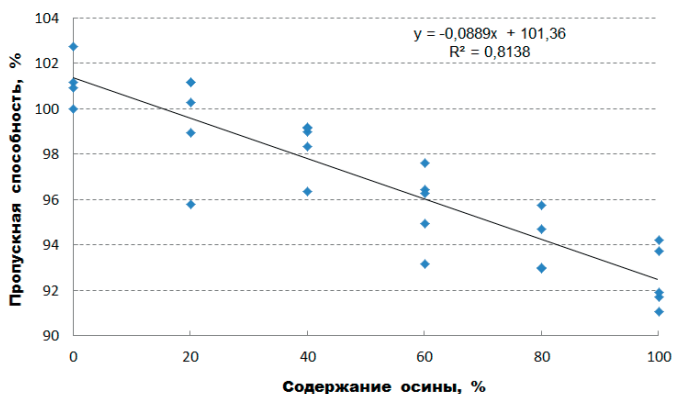


Рис. 2. Калибровочный график в диапазоне длин волн 1548 - 1683  $\text{см}^{-1}$  для образцов НСПЦ

Наибольший коэффициент аппроксимации получен для образцов белёной целлюлозы – 0,850. Для образцов НСПЦ, ПЦЗЦ образцов белёной целлюлозы коэффициенты составили 0,812; 0,761 и 0,713 соответственно. Для обработки спектров использовали специализированное программное обеспечение [2] и MS Excel.

Подробные результаты спектроскопии представлены в таблице.

Таблица. Зависимость пропускания полос поглощения в ИК-спектрах смесей различных образцов

Основные полосы поглощения	Содержание осины в образце, %					
	0	20	40	60	80	100
небеленая сульфатная целлюлоза						
3200-3500	39	38	40	40	39	40
2750-3200	26	24	26	26	25	26
1630-1650	18	18	19	19	19	21
1435-1420	28	27	28	28	28	29
1365-1375	32	31	32	32	32	33
1250-1260	27	27	27	27	27	27
1058-1062	100	100	100	100	100	100
1066-1074	85	85	84	85	84	84
беленая сульфатная целлюлоза						
3200-3500	35	36	38	35	35	36
2750-3200	23	23	25	23	22	24
1630-1650	15	15	16	15	14	16
1435-1420	23	23	25	23	23	24
1365-1375	27	28	29	27	27	28
1250-1260	22	23	23	22	22	23
1058-1062	100	100	100	100	100	100
1066-1074	82	83	82	82	82	82
НСПЦ						
3200-3500	34	36	35	35	37	33
2750-3200	24	25	24	24	27	23
1630-1650	18	19	18	19	20	18
1435-1420	31	32	33	33	34	31
1365-1375	31	32	31	32	33	30
1250-1260	31	31	33	32	32	30
1058-1062	100	100	100	100	100	100
1066-1074	84	83	85	85	84	84
ПЦЗЦ						
3200-3500	35	34	36	35	34	30
2750-3200	25	24	25	25	24	21
1630-1650	18	18	19	19	18	17
1435-1420	32	31	31	32	32	30
1365-1375	32	31	31	32	31	29
1250-1260	31	31	31	31	31	29
1058-1062	100	100	100	100	100	100
1066-1074	87	87	87	86	86	87



Анализируя полученные данные можно отметить, что четких зависимостей между образцами не проявляется, то есть отклики функциональных групп фиксируется примерно на одном уровне, наблюдаются лишь небольшие колебания. Вместе с тем, показано, что в образцах двух видов полуцеллюлозы содержание гидроксиллов (в области частот  $3200-3500\text{ см}^{-1}$ ) меньше, чем в сульфатной целлюлозе нормального выхода. Это связано с тем, что полуцеллюлоза содержит существенно больше остаточного лигнина, чем сульфатная целлюлоза. Таким образом, соотношение волокон осины и березы в целлюлозном полуфабрикате практически не влияет на изменение функционального состава углеводной части клеточной стенки, но, в то же время, на функциональный состав влияет наличие и количество остаточного лигнина.

Заключение.

1. Метод НПВО ИК-спектроскопии поверхности лабораторных образцов волокнистых полуфабрикатов после дополнительных исследований может в перспективе рассматриваться как метод оперативного контроля породного состава различных листовых волокнистых полуфабрикатов и материалов на их основе.

2. Для целлюлозных полуфабрикатов из смеси осины и березы, полученных различными способами, корреляционные зависимости следует находить при использовании для анализа различных соотношений длин волн из ИК-спектра.

*Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП НО «Арктика» и ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера» (САФУ) при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.*

#### Список литературы

1. Романова А.Н. Чухчин Д.Г., Казаков Я.В. Изучение анизотропии целлюлозосодержащих материалов методом НПВО ИК-спектроскопии // В сб. «Физико-химия растительных полимеров» Матер. VIII междуна. конфер. Архангельск: САФУ. 2019. С. 118–121.

2. Свид. № 2018661852. Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа для корреляционного анализа серий ИК-спектров / Д.Г. Чухчин: заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО САФУ (RU). № 2018616255 заявл. 19.06.2018. опублик. 20.08.2018. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.



### Алфавитный указатель

- Berger R. 32  
Czibula C. 60  
Ganser C. 60  
Harter T. 75  
Hirn U. 60,75  
Seidlhofer T. 60  
Teichert C. 60  
Абдуназаров М.М. 314  
Аким Э.Л. 17, 272, 278  
Алашкевич Ю.Д. 81, 87, 115, 132, 182, 195, 198  
Алимпиев Э.Л. 319  
Архипов К.С. 212  
Бабаханова Х.А. 314  
Бабич Н.А. 148  
Басырова С.И. 175  
Белых Е.В. 154, 158  
Богданович Н.И. 232  
Боголицын К.Г. 207  
Бойкова Т.Е. 232  
Болотова К.С. 47, 343  
Бровко О.С. 207  
Булыгина С.В. 335  
Васильева Д.Ю. 81  
Веденкин А.С. 268  
Вишняков Г.А. 121  
Воронин И.А. 115, 182  
Втюрина Д.Н. 54  
Вураско А.В. 188  
Вяткин Д.А. 324  
Галимова З.К. 314  
Галиханов М.Ф. 175  
Герман Н.А. 54  
Гилязова А.А. 302  
Гисматулина Ю.А. 284, 289  
Гладышева Е.К. 302  
Глезман Е.А. 249  
Гораздова В.В. 238  
Горшкова Н.А. 207  
Гурьев А.В. 349  
Гурьянов А.М. 249  
Гурьянова А.А. 343  
Дементьев С.С. 163  
Дернова Е.В. 238, 263  
Джалилов А.А. 308  
Долгобородова С.Н. 232  
Дряхлицын А.А. 105, 141, 257  
Дубовый В.К. 202  
Дулькин Д.А. 263, 341  
Дуплякова К.С. 141  
Ерохина О.А. 278  
Ешбаева У.Ж. 308  
Жирнов Д.Н. 263  
Житнюк В.А. 249  
Жолнерович Н.В. 54  
Захаров М.В. 324  
Зленко Д.В. 268  
Иванов Г.Е. 212  
Иванов К.А. 244  
Идиатуллин А.М. 249  
Иконникова М.А. 105  
Казаков Я.В. 23, 65, 68, 136, 148, 188, 207  
Канарская З.А. 172, 341  
Канарский А.В. 172, 341  
Каплёв Е.В. 87  
Каретникова Н.В. 182  
Кожухов В.А. 132, 182  
Кокшаров А.В. 154, 156, 158, 160  
Коптяев В.В. 295, 314



Королева Т.А. 105	Романова А.Н. 68
Криницин Н.А. 202	Рябов И.П. 249
Куркова Е.В. 212	Самухин А.М. 167
Куров В.С. 65	Сарвадий С.Ю. 54
Кхоа Х.М. 136	Севастьянова Ю.В. 141, 257, 295, 302, 335, 341
Ломов М.В. 121	Селезнёв В.Н. 221
Лурье М.С. 198	Сиваков В.П. 188
Лурье О.М. 198	Симонова Е.И. 188
Лянг А.В. 219	Смолин А.С. 39, 65, 93
Макаров М.И. 136	Стовбун С.В. 54, 99, 268
Малков А.В. 68	Сунайт В.Н. 227
Малютина Д.И. 93	Суслов Г.А. 202
Мандре Ю.Г. 278	Талипова М.В. 219
Мартьянова О.С. 212	Таразанов А.В. 278
Марченко Р.А. 195	Тараканова Н.А. 249
Масленникова А.А. 148	Тихонов И.С. 132
Мауричева Т.С. 232	Топтунов Е.А. 167
Махотина Л.Г. 127, 227	Третьяков С.И. 163
Медведев В.В. 105	Тышкунова И.В. 343
Мидуков Н.П. 65	Федорова О.В. 272
Миловидова Л.А. 105	Фролов А.С. 198
Минакова А.Р. 188	Ха Т.З. 172, 341
Мингазова Л.А. 172	Хейнман С. 65
Михалева М.Г. 54, 99, 268	Хоробрых С.В. 278
Николайчик И.В. 54	Хусаинов И.А. 172
Никольский С.Н. 54, 99, 268	Цибульски У. 328
Новожилов В.В. 278	Чендылова Л.В. 185
Новожилов Е.В. 47, 343	Чухчин Д.Г. 47, 343, 349
Окулова Е.О. 136, 148, 349	Шаньязов И.А. 284, 289
Паламарчук И.А. 207	Шуркина В.И. 195
Пекарец А.А. 278	Щербак Н.В. 167
Пен Р.З. 182	Юртаева Л.В. 81, 88
Политенкова Г.Г. 54, 99, 268	Яворский И.А. 121
Поташева Н.Ю. 295	Якубов Е.Р. 172, 341
Решетова Н.С. 115	
Романов М.Е. 328	

## Организаторы конференции



Министерство образования и науки  
Российской Федерации



Северный (Арктический) федеральный университет  
имени М.В. Ломоносова

## Конференция проводится при поддержке



АО «Архангельский ЦБК»



ООО «Управляющая компания  
«Объединенные бумажные фабрики»



АО «Кемира ХИМ»



ООО «БКТ-Сервис»



АО «Группа «Илим»



VIM-Finland OY



Научный журнал «Известия высших учебных заведений.  
Лесной журнал»



Россия, 164900,  
Архангельская область,  
г. Новодвинск, ул. Мельникова, 1  
Тел. +7 (818-52) 6-35-00  
Факс +7 (818-52) 6-32-31  
[www.appm.ru](http://www.appm.ru)



АРХАНГЕЛЬСКИЙ ЦБК

### ПРОИЗВОДСТВО КАРТОНА

Картон для плоских слоев гофрокартона  
Бумага для гофрирования  
Картон универсальный  
Гофрокартон  
Ящики из гофрированного картона

### ПРОИЗВОДСТВО ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Целлюлоза лиственная сульфатная беленая  
Целлюлоза хвойная сульфатная беленая

### ПРОИЗВОДСТВО БУМАГИ И ТЕТРАДЕЙ

Бумага писчая, оберточная,  
обложечная тетрадная  
Тетради ученические, общие

### ПРОИЗВОДСТВО ДВП

Плиты древесно-волоконистые твердые





**ОБФ**

Объединенные  
бумажные  
фабрики



**«Объединенные бумажные фабрики»**  
**(Компания ОБФ)** – группа предприятий  
 целлюлозно-бумажной промышленности.  
 Образована в 2003 году. Выручка  
 в 2016 году составила 8,9 млрд рублей.

Основной вид деятельности — производство  
 макулатурного тарного картона  
 (сырья для производства гофротары).

*«Мы задаем стандарт высокотехнологичного  
 тарного картона, совершенствующего  
 потребительские свойства гофроупаковки»*

**Компания ОБФ** также производит твердые  
 древесноволокнистые плиты, переплетный  
 и коробочный многослойный картон,  
 бумажно-беловые изделия.



**СКБК**

Сухолинский  
целлюлозно-бумажный  
комбинат



**ПЗБМ**

Полытинско-Ямская  
бумажная  
мануфактура



**БКФ**

Балаганская  
картонная  
фабрика



**ФОРМАТ**

Торговый Дом

+7 (495) 514-03-24

ukobf@ukobf.com

www.ukobf.com



## Value built in paper

Kemira's roots are in the pulp and paper industry and we are here to stay. Working closely together with customers, we continue to invest in R&D to create value through improved process efficiency, productivity and end-product quality. Our leading portfolio and best-in-class application expertise covers the whole process from pulping to coating.

Let's work together to build value into paper.

[www.kemira.com](http://www.kemira.com)

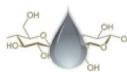
**kemira**  
Where water  
meets chemistry™



### О КОМПАНИИ:

Компания «БКТ-Сервис» успешно работает на российском рынке целлюлозно-бумажной промышленности с 1999 года. За это время компания заработала себе имя на рынке, а также репутацию надежного, открытого бизнес-партнера, а ее специалисты ценятся на целлюлозно-бумажных комбинатах не только России, но и других стран.

### НАШИ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ:



Химические технологии



Одежда машин



Оборудование для производства целлюлозы, бумаги и картона



Проектирование оборудования и технологических процессов

### ОБ ОТДЕЛЕ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ:

Отдел химических технологий успешно реализует проекты с использованием продуктов компании BIM Finland OY по следующим направлениям:

- улучшение процесса варки и отбеливания целлюлозы
- увеличение физико-механических показателей вырабатываемой продукции
- решение вопроса с «липкими» при использовании макулатуры
- контроль микробиологической зараженности/слизи на БДМ и КДМ
- консервация волокна, крахмала и наполнителей
- кондиционирование одежды бумагоделательных машин
- улучшение печатных свойств бумаги и картона
- придание барьерных свойств бумаге и картону
- контроль минеральных отложений
- пеногашение и деаэрация
- контроль смолы

### СВЯЖИТЕСЬ С НАМИ: ПОДРОБНЕЕ О НАС:

[BKT@BKTSERVICE.RU](mailto:BKT@BKTSERVICE.RU)

[WWW.BKTSERVICE.RU](http://WWW.BKTSERVICE.RU)

8 (812) 347 88 51

ЛУЧШИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
 ДЛЯ ЛУЧШЕЙ БУМАГИ!





**ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МОЩНОСТИ ФИЛИАЛА В КОРЯЖМЕ**

Собственный энергетический комплекс (электрическая мощность станций комбината – 353 мегаватта, тепловая – 1248 Гигакалорий в час).

Пять бумагоделательных комплексов (производительность - 630 тыс. тонн в год)

Два картоноделательные комплекса (295 тыс. тонн в год)

Комплекс по выпуску сульфатной беленой лиственной целлюлозы (165 тыс. тонн в год)

Два комплекса по выпуску сульфатной небеленой хвойной целлюлозы (120 тыс. тонн в год)

**ПРОДУКТОВАЯ ЛИНЕЙКА ФИЛИАЛА В КОРЯЖМЕ**

- Мелованная бумага
- Офисная бумага
- Офсетная бумага
- Картон
- Флютинг
- Крафтлайнер
- Мешочная бумага
- Упаковочная бумага
- Бумага для лент ККМ
- Сульфатная небеленая хвойная целлюлоза
- Сульфатная беленая лиственная целлюлоза
- Продукты лесохимии



Дирекция по связям с общественностью  
 +7 (812) 718-41-07  
 pr@ilimgroup.ru

Дирекция по развитию персонала  
 +8 (812) 718-41-50  
 careers@ilimgroup.ru

Отдел закупок  
 +7 (812) 332-27-27  
 zakupki\_office@ilimgroup.ru



ФГАУ ВО «Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Инновационно-технологический центр

«Современные технологии переработки биоресурсов Севера»

**ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ:**

- гофротара
- гофрированный картон
- флютинг
- картон-лайнр
- бумага
- волокнистые полуфабрикаты



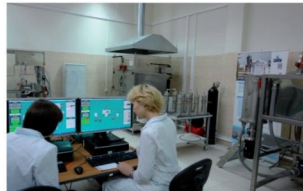
**ИССЛЕДУЕМЫЕ СВОЙСТВА:**

- оптические
- деформационные
- прочностные



**В состав Инновационно-технологического центра входят следующие лаборатории:**

- моделирования и исследования композиции бумаги и картона;
- исследования макро- и микроструктуры целлюлозно-бумажных материалов;
- контроля и исследования свойств целлюлозы, бумаги и картона
- моделирования процессов получения волокнистых полуфабрикатов;
- мембранных и фильтровальных материалов;
- органического синтеза;
- окислительных методов делигнификации;
- микроскопического исследования волокнистых полуфабрикатов.



- Комплексный анализ качества целлюлозы, бумаги и картона современными стандартными методами контроля
- Исследование структурно-морфологических параметров волокон полуфабрикатов и анализ их влияния на свойства бумаги и картона.
- Совершенствование технологий и оптимизация качества продукции.
- Повышение трещиностойкости тарного картона при переработке.
- Мобильный анализ электрокинетических и ретенционных параметров бумажной массы в технологических потоках.
- Оптимизация режимов получения целлюлозы и полуцеллюлозы из лиственных и хвойных пород древесины с целью снижения затрат и обеспечения заданного уровня показателей.
- Анализ, моделирование и оптимизация режимов отбелки целлюлозы с целью снижения расхода химикатов и поддержания стабильной белизны.
- Предотвращение смоляных затруднений при производстве белой целлюлозы, оценка эффективности работы промышленного оборудования, схем сортирования и очистки целлюлозных потоков.
- Разработка программ для расчетов материальных балансов воды, волокна для действующих, реконструируемых и проектируемых технологических потоков производства целлюлозы, БДМ и КДМ.
- Разработка технологии нетканых фильтровальных и сепарационных материалов на основе минеральных и растительных волокон.

ИТЦ «Современные технологии переработки биоресурсов Севера»

Наб. Северной Двины, д.17, Архангельск, 163002  
Тел. 8-8182-65-0092; 8-8182-21-8995;  
[a.guriev@narfu.ru](mailto:a.guriev@narfu.ru), [i.sevastyanova@narfu.ru](mailto:i.sevastyanova@narfu.ru),  
[a.potashev@narfu.ru](mailto:a.potashev@narfu.ru)





## ВЫСШАЯ ШКОЛА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

### 1 СОПРОВОЖДЕНИЕ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Сопровождение разработки, внедрения, тестирования систем автоматизации на основе программируемых логических контроллеров (ПЛК) Simatic, OVEN, RIO, Alpha или подобных. Имеется необходимое оборудование и программное обеспечение.

### 2 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Разработка и модернизация как программного обеспечения для решения прикладных задач, так и ПО для программируемых логических контроллеров (ПЛК).

### 3 ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ УСЛУГИ

Оказание образовательных услуги по обучению: программирование ПЛК, разработка или настройка программного обеспечения для компьютеров, технические средства автоматизации, SCADA, робототехника, анализ данных.

### 4 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Построение математических моделей и применение различных форм математического моделирования технических систем для решения прикладных задач.

### 5 РАЗРАБОТКА СИСТЕМ

Разработка новых, нестандартных измерительных систем или систем автоматизации.



### 6 СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Применение статистических методов обработки данных.

### 7 SCADA-СИСТЕМЫ

Разработка и настройка SCADA-систем.

### 8 ЦИФРОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Разработка цифровых электронных устройств различного функционала.

Адрес  
163002 г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17

Директорат  
г. Архангельск, ул. Урицкого 68, корп.3

Сайт  
<http://narfu.ru/hsitas>

Электронная почта  
[i.mayorov@narfu.ru](mailto:i.mayorov@narfu.ru)

Министерство образования и науки Российской Федерации  
 федеральное государственное образовательное учреждение  
 высшего профессионального образования  
 «Северный (Арктический) федеральный университет  
 имени М. В. Ломоносова»

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
**„ЛЕСНОЙ ЖУРНАЛ“**



Подписка на „Лесной журнал“ (индекс 70368) принимается  
 по каталогу Агентства „Роспечать“ „Газеты. Журналы.“  
 серия „Известия высших учебных заведений“.

*Адрес редакции: 163002, Россия,  
 г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17.  
 Тел./факс (812-2) 28-76-18  
 E-mail: forest@narfu.ru*





**V Международная научно-техническая конференция  
«ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ»  
г. Архангельск, 11-14 сентября 2019 г.**

---





**V Международная научно-техническая конференция  
«ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ»  
г. Архангельск, 11-14 сентября 2019 г.**

---





**V Международная научно-техническая конференция  
«ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ»  
г. Архангельск, 11-14 сентября 2019 г.**

---





# **ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Материалы V Международной  
научно-технической конференции,  
посвященной памяти профессора В.И.Комарова*

11 – 14 сентября 2019 г.