

УДК 676.1.012.43

С. А. Дашкевич, С. А. Гордейко, Н. А. Герман

Белорусский государственный технологический университет

ВЛИЯНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА БУМАЖНЫХ МАСС ПО ВОЛОКНУ И УСЛОВИЙ ИХ ПРОКЛЕЙКИ НА КАЧЕСТВО ОБРАЗЦОВ БУМАГИ

Исследовано влияние вида волокнистого полуфабриката (макулатуры, целлюлозы хвойной и из лиственных пород древесины) при увеличении его содержания от 0,00 до 1,00 доли ед. на качество образцов бумаги. В роли проклеивающих веществ использовали разработанный высокосмоляной модифицированный канифольный продукт (МКП) и импортный нейтральный аналог ТМ. Дополнительно были изготовлены образцы бумаги без химических веществ и испытаны на гидрофобность (A_i), прочность (B_i) и влаговлажность (C_i).

Были определены межволоконные силы связи по Скотту (D_i) в зависимости от композиционного состава бумажных масс по волокну и условий их проклейки. Свойства образцов бумаги свидетельствуют об улучшении гидрофобности, прочности и влаговлажности при использовании разработанного высокосмоляного МКП вместо импортного аналога ТМ. Гидрофобность (A_i) снижается от $A_3 = (24,2–49,3)$ г/м² до $A_2 = (18,6–39,8)$ г/м². Прочность (разрывная длина (B_i)) повышается от $B_3 = (5085–8720)$ м до $B_2 = (4560–8990)$ м. Влаговлажность (C_i) возрастает от $C_3 = (8,4–16,9)\%$ до $C_2 = (7,1–17,9)\%$. Улучшение качества образцов бумаги можно объяснить повышением межволоконных сил связи (D_i) в их структуре за счет смещения процесса проклейки из традиционного режима гомокоагуляции (существующая технология при использовании импортного аналога ТМ) в более эффективный режим гетероадагуляции (предлагаемая технология при использовании разработанного высокосмоляного МКП). Подтверждением этому является увеличение межволоконных сил связи по Скотту (D_i) от $D_3 = (198,4–366,5)$ Дж/м² до $D_2 = (177,3–410,1)$ Дж/м².

Ключевые слова: целлюлоза, макулатура, прочность, межволоконные связи, проклейка, гидрофобность.

Для цитирования: Дашкевич С. А., Гордейко С. А., Герман Н. А. Влияние композиционного состава бумажных масс по волокну и условий их проклейки на качество образцов бумаги // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 2 (295). С. 145–153. DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-18.

S. A. Dashkevich, S. A. Gordeyko, N. A. Herman

Belarusian State Technological University

THE INFLUENCE OF THE COMPOSITE COMPOSITION OF PAPER PULP ON FIBER AND THE CONDITIONS OF THEIR GLUING ON THE QUALITY OF PAPER SAMPLES

The influence of the type of fibrous semi-finished product (softwood, hardwood, waste paper pulp) and the conditions of paper pulp sizing on the quality of paper samples was studied. The developed high-resin modified rosin products and imported neutral analogue TM were used as sizing agents. In addition, paper samples without chemicals were manufactured and tested. The quality of paper samples was characterized by hydrophobicity (A_i), strength (B_i), and moisture resistance (C_i).

For the first time, interfiber bonding forces according to Scott (D_i) in the structure of paper samples were determined depending on their composite composition by fiber and sizing conditions. The properties of the paper samples indicate an improvement in hydrophobicity, strength and moisture resistance when using the developed high-resin MCPs instead of the imported TM analogue. Hydrophobicity (A_i) decreases from $A_3 = (24.2–49.3)$ g/m² to $A_2 = (18.6–39.8)$ g/m². Strength (breaking length (B_i)) increases from $B_3 = (5085–8720)$ m to $B_2 = (4560–8990)$ m. Moisture strength (C_i) increases from $C_3 = (8.4–16.9)\%$ to $C_2 = (7.1–17.9)\%$. The improvement in the quality of paper samples can be explained by the increase in the interfiber bonding forces (D_i) in their structure due to the shift of the sizing process from the traditional homocoagulation mode (the existing technology using imported TM) to a more effective heterocoagulation mode (the proposed technology using the developed high-resin MCP). This is confirmed by the increase in the interfiber bonding forces according to Scott (D_i) from $D_3 = (198.4–366.5)$ J/m² to $D_2 = (177.3–410.1)$ J/m².

Keywords: cellulose, waste paper, strength, inter-fiber bonds, gluing, hydrophobicity.

For citation: Dashkevich S. A., Gordeyko S. A., Herman N. A. The influence of the composite composition of paper pulp on fiber and the conditions of their gluing on the quality of paper samples. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnology, Geoecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 145–153 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-18.

Введение. Современная тенденция развития целлюлозно-бумажной промышленности характеризуется изготовлением массовых видов бумаги и картона с использованием первичных (различных видов целлюлозы) и вторичных (разнообразных марок макулатуры) волокнистых полуфабрикатов.

В настоящее время применяют различные волокнистые суспензии, отличающиеся композиционным составом по волокну следующим образом:

1) один первичный волокнистый полуфабрикат (целлюлоза хвойная или целлюлоза из лиственных пород древесины);

2) один вторичный волокнистый полуфабрикат (макулатура);

3) композиция из двух видов первичных волокнистых полуфабрикатов (целлюлоза хвойная + целлюлоза из лиственных пород древесины);

4) композиция из двух видов волокнистых полуфабрикатов:

– первичный (целлюлоза хвойная) + вторичный (макулатура);

– первичный (целлюлоза из лиственных пород древесины) + вторичный (макулатура);

5) композиция из трех видов волокнистых полуфабрикатов:

– первичный (целлюлоза хвойная) + первичный (целлюлоза из лиственных пород древесины) + вторичный (макулатура).

Разнообразие композиционных составов бумажных масс обусловлено не только областью применения бумаги и картона, но и комплексом регламентируемых 5–12 показателей качества, среди которых необходимо отметить гидрофобность, прочность и влагопрочность. Эти показатели качества обеспечиваются в присутствии необходимых количеств химических веществ, оказывающих на структуру бумаги и картона требуемые гидрофобизирующее и упрочняющее (в сухом и во влажном состояниях) действия.

В технологии клееных видов бумаги и картона, отличающихся свойствами и областью применения, широко используют следующие виды функциональных химических веществ:

– модифицированные канифольные продукты и электролиты (обеспечивают формирование проклеивающих комплексов и последующее их электростатическое взаимодействие с волокнами);

– упрочняющие и влагопрочные вещества. Их макромолекулы (имеют положительно заря-

женные группы) располагаются между волокнами и участвуют в формировании дополнительных межволоконных связей;

– другие вещества (наполнители, отбеливатели, красители, флокулянты и т. д.). Необходимость использования каждого соединения обусловлена требованиями к качеству бумаги и картона и областью их применения.

Существующая актуальная проблема состоит в сложности одновременного придания бумаге и картону высоких показателей качества по трем основным свойствам – гидрофобность, прочность и влагопрочность. Это можно объяснить тем, что процессы гидрофобизации и упрочнения (в сухом и во влажном состояниях) являются конкурирующими. Об этом свидетельствуют установленные в лабораторных и подтвержденные в производственных условиях следующие факты:

1) повышение степени гидрофобности бумаги и картона сопровождается снижением их прочности и влагопрочности;

2) увеличение прочности и влагопрочности бумаги и картона вызывает ухудшение их гидрофобности.

Одной из основных причин возникающих трудностей для решения существующей актуальной проблемы является участие определенного количества реакционно способных отрицательно заряженных активных (гидроксильных групп) волокон в процессах гидрофобизации и упрочнения (в сухом и во влажном состояниях).

Актуальной существующей проблемой выступает потеря прочности бумаги и картона при использовании импортных аналогов ТМ и ЖМ в кислой среде (рН 4,8–5,2). Эти проклеивающие вещества представляют собой нейтральные модифицированные канифольные продукты (МКП), содержащие полностью нейтрализованные смоляные кислоты.

Одним из способов решения актуальной существующей проблемы выступает замена нейтральных МКП (применяют для проклейки в кислой среде (рН 4,8–5,2) на высокосмоляные (используют для проклейки в нейтральной (рН 6,5–7,2) и слабощелочной (рН 7,3–7,5) средах). Положительный эффект достигается, во-первых, за счет изменения структуры модифицированных смоляных кислот и, во-вторых, за счет смещения процесса проклейки волокнистых суспензий из традиционного режима гомокоагуляции в более эффективный режим гетероадагуляции.

Отсутствие в научной и технической литературе информации о межволоконных силах связи в структуре бумаги и картона, полученных из различных волокнистых полуфабрикатов (первичных и вторичных) и их смесей и проклеенных в кислой (рН 4,8–5,2), нейтральной (рН 6,5–7,2) и слабощелочной (рН 7,3–7,5) средах, обуславливает актуальность настоящей работы.

Предмет исследования – процессы и явления, протекающие в бумажных массах, содержащих волокна разной природы и частицы дисперсной фазы канифольных эмульсий (разработанного высокосмоляного МКП и импортного нейтрального аналога ТМ).

Цель исследования – сравнение эффективности применения в технологии клееных видов бумаги и картона разработанных образцов проклеивающих веществ (высокосмоляными МКП) с импортным аналогом (нейтральными ТМ).

Основная часть. Объекты исследования – бумажные массы, отличающиеся композиционным составом по волокну и содержащие разработанные образцы проклеивающих веществ (высокосмоляные МКП) и импортный аналог (нейтральный ТМ), и полученные образцы бумаги (картона) с их использованием.

Для достижения поставленной цели в лабораторных условиях кафедры химической переработки древесины реализован план Шеффе, включающий 15 опытов и учитывающий композиционный состав по волокну (табл. 1) при проклейке волокнистых суспензий с использованием разработанного высокосмоляного МКП и импортного нейтрального аналога ТМ (табл. 2).

Составы бумажных масс во всех 15 опытах были идентичными.

В табл. 1–3 приняты следующие условные обозначения:

X_1 – X_3 – доля каждого из трех волокнистых полуфабрикатов в композиции суспензии (пробе бумажной массы) в соответствии с планом Шеффе, доли ед.; при этом выполнялось условие $X_1 + X_2 + X_3 = 1,00$ г;

Z_1 – Z_3 – количество волокон конкретного вида полуфабриката в пробе суспензии (образце бумажной массы) в соответствии с планом Шеффе, г; при этом выполнялось условие $Z_1 + Z_2 + Z_3 = 2,50$ г;

A_i – впитываемость образца бумаги при одностороннем смачивании его поверхности водой в течение 30 с (Кобб₃₀), г/м²;

B_i – разрывная длина образца бумаги, м;

C_i – влагопрочность образца бумаги, %;

D_i – межволоконные силы связи по Скотту, Дж/м².

Волокнистые суспензии получали из широкоприменяемых в технологии бумаги картона волокнистых полуфабрикатов. Для исследования выбраны беленые виды следующих волокнистых полуфабрикатов:

– целлюлоза хвойная (X_1) по ГОСТ 11208–82 «Целлюлоза древесная (хвойная) сульфатная небеленая»;

– целлюлоза из лиственных пород древесины (X_2) по ГОСТ 28172–89 «Целлюлоза сульфатная беленая из смеси лиственных пород древесины»;

– макулатура (X_3) по ГОСТ 10700–97 «Макулатура бумажная и картонная».

Таблица 1

Влияние состава бумажной массы на качество исходных образцов бумаги без использования химических веществ

Номер	Состав бумажной массы						Качество образцов бумаги			
	композиция, доли ед.			композиция, г			A_1 , г/м ²	B_1 , м	C_1 , %	D_1 , Дж/м ²
	X_1	X_2	X_3	Z_1	Z_2	Z_3				
1	1	0	0	2,500	0,000	0,000	87,1	8310	2,5	532,5
2	0	1	0	0,000	2,500	0,000	104,5	9210	1,5	435,4
3	0	0	1	0,000	0,000	2,500	82,8	5260	2,2	258,7
4	0,5	0,5	0	1,250	1,250	0,000	98,5	8290	2,5	369,4
5	0,5	0	0,5	1,250	0,000	1,250	85,5	5530	2,7	315,6
6	0	0,5	0,5	0,000	1,250	1,250	100,3	7210	1,3	460,2
7	0,75	0,25	0	1,875	0,625	0,000	102,2	7080	3,7	434,6
8	0,25	0,75	0	0,625	1,875	0,000	105,8	8750	1,8	371,9
9	0,75	0	0,25	1,875	0,000	0,625	94,2	7500	3,2	385,4
10	0,25	0	0,75	0,625	0,000	1,875	103,1	6242	2,2	324,9
11	0	0,75	0,25	0,000	1,875	0,625	102,1	5215	2,6	438,3
12	0	0,25	0,75	0,000	0,625	1,875	103,6	6620	1,7	326,5
13	0,5	0,25	0,25	1,250	0,625	0,625	116,3	9210	2,3	401,8
14	0,25	0,5	0,25	0,625	1,250	0,625	112,5	8090	2,1	423,6
15	0,25	0,25	0,5	0,625	0,625	1,250	94,8	7590	1,7	319,4

Таблица 2

Влияние композиционного состава бумажных масс по волокну и условий их проклейки на качество образцов бумаги

Номер	При использовании МКП				При использовании ТМ			
	A_2 , г/м ²	B_2 , м	C_2 , %	D_2 , Дж/м ²	A_3 , г/м ²	B_3 , м	C_3 , %	D_3 , Дж/м ²
1	29,0	8230	11,0	410,1	40,1	8720	16,2	342,5
2	29,5	7690	16,1	322,8	29,6	8125	15,4	353,9
3	27,2	4560	7,1	221,9	35,7	5300	8,5	226,9
4	28,7	7400	13,4	313,1	34,0	7940	14,6	350,3
5	35,3	6170	13,9	251,7	34,1	5515	10,3	258,4
6	39,8	6270	11,1	274,0	49,4	6490	9,2	237,8
7	26,9	8990	9,5	371,5	35,3	7730	8,4	218,5
8	23,4	8390	17,9	341,7	32,4	8040	17,2	295,4
9	24,0	7720	12,4	325,3	46,0	8060	13,3	337,9
10	22,4	5770	13,2	177,3	29,8	5650	10,3	198,4
11	26,1	7200	17,4	266,0	26,3	7240	12,4	364,2
12	19,2	5520	14,0	244,3	25,6	5085	10,9	248,8
13	18,6	7600	18,2	366,0	42,0	7125	14,2	322,1
14	30,8	7075	13,0	287,9	28,3	6270	16,2	366,5
15	31,5	5240	14,5	268,1	24,2	6335	16,9	253,4

Получение волокнистых суспензий основывалось на последовательном осуществлении процессов диспергирования (стадия роспуска) и фибриллирования (стадия размол) с использованием стандартного оборудования. Для этого распущенную волокнистую суспензию получали на дезинтеграторе БМ-3, а ее размол осуществляли на лабораторном ролле. Волокнистые суспензии, полученные из трех видов волокнистых полуфабрикатов, имели одинаковые концентрацию ($C = 1\%$) и степень помола 40°ШР .

Исследования проводили в три этапа.

На первом этапе изготавливали и испытывали образцы бумаги, отличающиеся композиционным составом по волокну (изменяли по плану Шеффе параметры X_1 – X_3), без использования проклеивающих веществ и электролита. Результаты исследования представлены в табл. 1.

На втором этапе в пробы волокнистых суспензий (250 см^3), отличающихся композиционным составом по волокну (изменяли по плану Шеффе параметры X_1 – X_3), вводили 1%-ную канифольную эмульсию, полученную на основе разработанного высокосмоляного МКП, и 1%-ный раствор электролита. Содержание МКП в каждой пробе являлось одинаковым и составляло 2% от абсолютно сухого волокна. Соотношение МКП : электролит было постоянным и составляло 1 : 2.

Проклеенные бумажные массы имели рН 6,5–7,5. Их использовали для изготовления образцов бумаги. Условия получения образцов бумаги, отличающихся композиционным составом

по волокну, и результаты их испытания представлены в табл. 2.

На третьем этапе изготавливали образцы бумаги, проклеенные импортным нейтральным аналогом ТМ в кислой среде (рН 4,8–5,2). Соотношение ТМ : электролит составляло 1 : 3. Условия получения образцов бумаги и результаты их испытания представлены в табл. 2.

В лабораторных условиях получали 15 видов проб волокнистых суспензий, отличающихся содержанием волокон X_1 – X_3 . Масса каждого образца бумаги составляла 2,500 г. При этом содержание каждого вида волокнистого полуфабриката по плану Шеффе, включающему 15 опытов, изменялось в установленном диапазоне таким образом, чтобы для каждой пробы волокнистой суспензии выполнялось условие $X_1 + X_2 + X_3 = 1,00$ долей ед.

Образцы бумаги имели массу одного метра квадратного 80 г/м^2 и отличались составом по волокну, видом используемой канифольной эмульсии (МКП или ТМ) и способами проклейки:

– в нейтральной (рН 6,5–7,2) и слабощелочной (рН 7,3–7,5) средах использовали разработанный высокосмоляной МКП и электролит при их соотношении 1 : 2;

– в кислой (рН 4,8–5,2) среде применяли нейтральный импортный аналог ТМ и электролит при их соотношении 1 : 3.

Разработанный высокосмоляной МКП и импортный нейтральный аналог ТМ использовали для получения 1%-ных канифольных эмульсий. Для этого исходные пастообразные продукты

МКП и ТМ, содержащие 50% и 70% сухих веществ соответственно, смешивали с расчетным количеством воды, имеющей температуру 60°C. Содержание канифольных эмульсий в волокнистых суспензиях было одинаковым и составляло 2% от абсолютно сухого волокна (а. с. в.).

Для получения проклеивающих комплексов в каждую пробу волокнистой суспензии, содержащей равномерно распределенные в межволоконном пространстве частицы дисперсной фазы проклеивающего вещества (разработанного высокосмоляного МКП или импортного (нейтрального) аналога ТМ), добавляли необходимое количество 1%-ного раствора электролита (сульфата алюминия). Используемый раствор имел pH 4,30 и содержал положительно заряженные формы гидроксо соединений алюминия $Al(H_2O)_6^{3+}$ (85%), $Al(H_2O)_5(OH)^{2+}$ (10%) и $Al(H_2O)_4(OH)^{2+}$ (5%).

Сопоставительный анализ результатов исследования, представленных в табл. 1 и 2, свидетельствует о том, что качество образцов бумаги (A_i , B_i и C_i) зависит от их композиционного состава по волокну ($X_1 + X_2 + X_3$ и $Z_1 + Z_2 + Z_3$) и условий проклейки волокнистых суспензий.

При этом межволоконные силы связи по Скотту (D_i) изменяются в диапазонах, указанных в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что составы бумажных масс, полученные по условиям табл. 1 и 2, и способы их проклейки оказывают существенное влияние на свойства образцов бумаги (A_i , B_i и C_i) и межволоконные силы связи по Скотту (D_i). Следует отметить, что указанные диапазоны изменения A_i , B_i , C_i и D_i по условному принципу «минимальное значение – максимальное значение» характерны для разных составов бумажных масс (табл. 1–2), что не позволяет сделать однозначные выводы об эффективности

применения разработанного МКП и импортного аналога ТМ.

Положительные эффекты зависят, по нашему мнению, от композиционного состава бумажных масс по волокну. Поэтому научный и практический интерес представляют зависимости влияния композиционного состава бумажных масс по волокну на A_i , B_i , C_i и D_i в виде диаграмм «состав – свойство».

По данным табл. 1–3 получены адекватные полиномиальные уравнения влияния X_1 – X_3 на качество образцов бумаги (A_i , B_i , C_i и D_i):

$$A_i = 87,1X_1 + 104,5X_2 + 82,8X_3 + 10,8X_1X_2 + 2,2X_1X_3 + 26,6X_2X_3 + 27,2X_1X_3(X_1 - X_2) - 59X_1X_3(X_1 - X_3) - 65,9X_2X_3(X_2 - X_3) + 131,9X_1X_2(X_1 - X_2)^2 + 283,8X_1X_3(X_1 - X_3)^2 + 90X_2X_3(X_2 - X_3)^2 + 1685,1X_1^2X_2X_3 + 886,27X_1X_2^2X_3 - 1639,8X_1X_2X_3^2;$$

$$B_i = 8310X_1 + 9210X_2 + 5260X_3 - 1880X_1X_2 - 5020X_1X_3 - 100X_2X_3 - 6514,8X_1X_2(X_1 - X_2) - 1425,8X_1X_3(X_1 - X_3) - 18049X_2X_3(X_2 - X_3) - 10520X_1X_2(X_1 - X_2)^2 + 21942,1X_1X_3(X_1 - X_3)^2 - 27741X_2X_3(X_2 - X_3)^2 + 170017X_1^2X_2X_3 + 22492,9X_1X_2^2X_3 - 46399X_1X_2X_3^2;$$

$$C_i = 2,5X_1 + 1,5X_2 + 2,2X_3 + 2X_1X_2 + 1,4X_1X_3 - 2,2X_2X_3 + 7,476X_1X_2(X_1 - X_2) + 4,539X_1X_3(X_1 - X_3) + 6,675 \cdot y \cdot z \cdot (y - z) + 8,01X_1X_2(x - y)^2 + 1,869X_1X_3(x - z)^2 + 15,219X_2X_3(y - z)^2 - 50,835X_1^2X_2X_3 + 22,149X_1X_2^2X_3 + 1,086X_1X_2X_3^2;$$

$$D_i = 532,5X_1 + 435,4X_2 + 258,7X_3 - 458,2X_1X_2 - 320X_1X_3 + 452,6X_2X_3 + 75,561X_1X_2(X_1 - X_2) - 407,98X_1X_3(X_1 - X_3) + 125,223X_2X_3(X_2 - X_3) + 111,339X_1X_2(X_1 - X_2)^2 + 417,588X_1X_3(X_1 - X_3)^2 - 1057,6X_2X_3(X_2 - X_3)^2 + 3879,42X_1^2X_2X_3 + 3540,26X_1X_2^2X_3 - 6493,3X_1X_2X_3^2.$$

Таблица 3

Диапазон изменения свойств образцов бумаги (A_i), (B_i) и (C_i) и межволоконных сил связи по Скотту (D_i) в зависимости от состава бумажных масс и способов их проклейки

Диапазон изменения свойств (минимальное значение – максимальное значение)			
Гидрофобность	Прочность	Влагопрочность (C_i), %	Межволоконные силы связи по Скотту (D_i), Дж/м ²
Впитываемость при одностороннем смачивании (A_i), г/м ²	Разрывная длина (B_i), м		
Исходные образцы бумаги (без использования химических веществ)			
87,1–105,8	5215–9210	1,3–3,7	258,7–532,5
Образцы бумаги, проклеенные <i>разработанным</i> высокосмоляным МКП			
18,6–39,8	4560–8990	7,1–17,9	177,3–410,1
Образцы бумаги, проклеенные <i>импортным</i> нейтральным аналогом ТМ			
24.2–49.4	5085–8720	8,4–16.9	198.4–366.5

На основании полученных уравнений в программе STATISTICA 6.0 были построены поверхности отклика. Результаты исследования влияния композиционного состава бумажных масс по волокну (использованы три вида волокнистых полуфабрикатов) на свойства исходных образцов бумаги (без использования химических веществ) представлены на следующих рисунках в виде диаграмм «Состав – свойство»: рис. 1 – для показателя гидрофобности (впитываемости при одностороннем смачивании (A_1)), г/м²; рис. 2 – для показателя прочности (разрывной длины (B_1)), м; рис. 3 – для показателя влагопрочности (C_1), %; рис. 4 – для показателя межволоконных сил связи по Скотту (D_1), Дж/м²

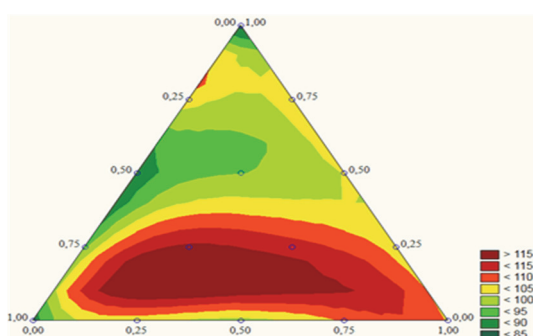


Рис. 1. Диаграмма «Состав – свойство (A_1)» для образцов бумаги по изменению их гидрофобности (впитываемости при одностороннем смачивании), г/м²

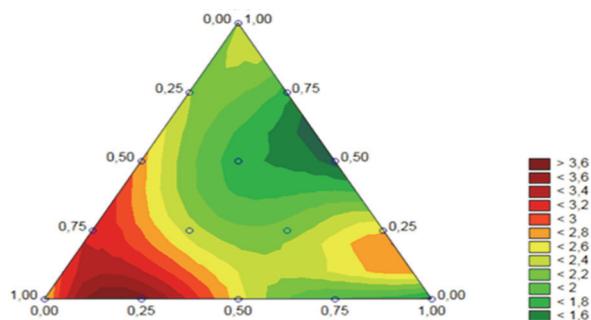


Рис. 2. Диаграмма «Состав – свойство (B_1)» для образцов бумаги по изменению их прочности (разрывной длины, м)

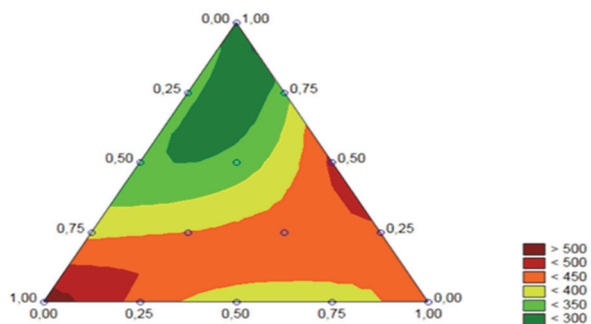


Рис. 3. Диаграмма «Состав – свойство (C_1)» для образцов бумаги по изменению их влагопрочности, %

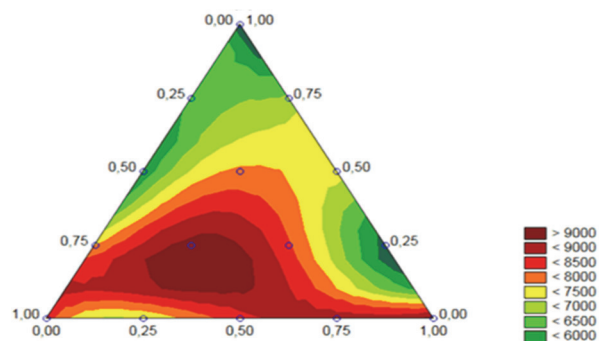


Рис. 4. Диаграмма «Состав – свойство (D_1)» для образцов бумаги по изменению межволоконных сил связи по Скотту, Дж/м²

Сопоставительный анализ диаграмм «Состав – свойство», представленных на рис. 1 – 4, демонстрирует влияние композиционного состава бумажных масс по волокну на свойства образцов бумаги: гидрофобность (рис. 1), прочность (рис. 2) и влагопрочность (рис. 3). При этом важное значение играют межволоконные силы связи в структуре бумаги (рис. 4).

Свойства образцов бумаги свидетельствуют об улучшении гидрофобности, прочности и влагопрочности при использовании разработанного высокосмоляного МКП вместо импортного аналога ТМ. Гидрофобность (A_i) снижается от $A_3 = (24,2–49,3)$ г/м² до $A_2 = (18,6–39,8)$ г/м². Прочность (разрывная длина (B_i)) повышается от $B_3 = (5085–8720)$ м до $B_2 = (4560–8990)$ м. Влагопрочность (C_i) возрастает от $C_3 = (8,4–16,9)\%$ до $C_2 = (7,1–17,9)\%$.

Улучшение качества образцов бумаги можно объяснить повышением межволоконных сил связи (D_i) в их структуре за счет смещения процесса проклейки из традиционного режима гомотоагуляции (существующая технология при использовании импортного аналога ТМ) в более эффективный режим гетероадагуляции (предлагаемая технология при использовании разработанного высокосмоляного МКП). Подтверждением этому является увеличение межволоконных сил связи по Скотту (D_i) от $D_3 = (198,4–366,5)$ Дж/м² до $D_2 = (177,3–410,1)$ Дж/м². Следовательно, гидрофобность, прочность и влагопрочность образцов бумаги зависят от композиционного состава по волокну и условий применения проклеивающих веществ (разработанного высокосмоляного МКП в нейтральной среде (рН 6,5–7,5)) и импортного аналога ТМ в кислой среде (рН 4,8–5,2).

Эффективность процесса проклейки бумажных масс повышается в 1,7–2,1 раз за счет использования разработанного высокосмоляного МКП вместо импортного нейтрального аналога ТМ. Изменение структуры частиц дисперсной фазы модифицированных смоляных кислот за счет замены моноэтилцеллозольвмалеината

и малеинового ангидрида на моноэфир малеинового ангидрида и высших жирных спиртов фракции $C_{10}-C_{18}$ ($C_{12}-C_{14}$) способствует уменьшению частиц дисперсной фазы от 210–230 до 180–200 нм и повышению их электрокинетического потенциала от –70 до –25 мВ. Следствием этого является обеспечение протекания процесса проклейки в режиме гетероадагуляции, что сопровождается одновременным увеличением гидрофобности образцов бумаги на 15–20% и прочности на 7–10%.

Заключение. Изучено качество образцов бумаги, полученных из первичных (целлюлозы хвойных и лиственных пород деревьев) и вторичных (макулатуры) волокнистых полуфабрикатов и содержащих в своей структуре проклеивающие комплексы (разработанные и традиционно применяемые).

Установленные зависимости влияния композиционного состава масс по волокну и условий их проклейки в кислой среде (использовали импортный нейтральный аналог ТМ) и нейтральной среде (применяли разработанный высокосмоляной МКП) на качество образцов бумаги позволили сделать следующие выводы:

– эффективность процесса проклейки повышается в 1,7–2,1 раза при смещении процесса проклейки из кислой среды в нейтральную;

– замена процесса проклейки в традиционном режиме гомокоагуляции на более эффективный режим гетероадагуляции позволяет максимально сохранить первоначальную прочность образцов бумаги даже при повышении доли макулатуры от 0,25 до 0,50 долей ед. (в 2 раза); об этом свидетельствует повышение межволоконных сил связи по Скотту от 366,6 до 410,1 Дж/м² (на 12%);

– изменение структуры частиц дисперсной фазы модифицированных смоляных кислот за счет замены моноэтилцеллозольмалеината и малеинового ангидрида на моноэфир малеинового ангидрида и высших жирных спиртов фракции $C_{10}-C_{18}$ ($C_{12}-C_{14}$) способствует уменьшению частиц дисперсной фазы от 210–230 до 180–200 нм и повышению их электрокинетического потенциала от –70 до –25 мВ; следствием этого является обеспечение протекания процесса проклейки в режиме гетероадагуляции, что сопровождается одновременным увеличением гидрофобности образцов бумаги на 15–20% и прочности на 7–10%.

Список литературы

1. Фляте Д. М. Технология бумаги. М.: Лесная пром-сть, 1988. 440 с.
2. Черная Н. В., Ламоткин А. И. Проклейка бумаги и картона в кислой и нейтральной средах. Минск: БГТУ, 2003. 345 с.
3. Черная Н. В. Теория и технология клееных видов бумаги и картона: монография. Минск: БГТУ, 2009. 394 с.
4. Гордейко С. А., Черная Н. В., Шишаков Е. П. Упрочнение макулатурных видов бумаги и картона, проклеенных в кислой, нейтральной и слабощелочной средах // ИВУЗ. Лесной журнал. 2015. № 5. С. 165–173.
5. Черная Н. В. Концептуальное развитие теории и технологии проклейки бумаги и картона гидродисперсиями модифицированной канифоли в режиме гетероадагуляции пептизированных частиц // Полимерные материалы и технологии. 2015. Т. 1, № 1. С. 76–90.
6. Иванов С. Н. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. СПб.: Политехника, 2006. Т. 2. Производство бумаги и картона. Ч. 2. Основные виды и свойства бумаги, картона, фибры и древесных плит. 499 с.
7. Шабиев Р. О., Смолин А. С. Анализ электрокинетических параметров бумажной массы. СПб.: СПб ГТУРП, 2012. 80 с.
8. Кожевников С. Ю., Ковернинский И. Н. Межволоконные электростатические связи в бумаге // Химия растительного сырья. 2012. № 3. С. 197–202.
9. Bicu I. Water soluble polymers from Diels-Alder adducts of abietic acid as paper additives // Macromol. Mater. Eng. 2000. No. 280/281. P. 47–53.
10. Kotitschke G. "Triple star" – The State of the Art and Most Efficient Production Line in the World for Woodfree Cjfted Papers. New York: Voith, 2002. 186 p.
11. Loretz A., Wetter N. Paper Testing and Process Optimization. Stockholm: L & Handbook, 2000. 218 p.
12. Zholnerovich N. V., Nicolaychik I. V., Chernaya N. V. Influence of urea-formaldehyde oligomer composition on technical paper properties // Proceedings of BSTU. 2014. No. 4: Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology. P. 125–127.
13. Копылов М. Н., Радион Е. В., Баев А. К. Распределение различных форм алюминия (III) и меди (II) в растворах и схема процесса гетероядерного гидроксокомплексобразования // Координационная химия. 1995. Т. 21, № 1. С. 66–71.
14. Хованский В. В., Дубовый В. К., Кейзер П. М. Применение химических вспомогательных веществ в производстве бумаги и картона. СПб.: СПб ГТУРП, 2013. 151 с.

15. Химия бумаги: исследование действия упрочняющих и обезвоживающих добавок / Р. О. Шабиев [и др.] // Химия растительного сырья. 2014. № 4. С. 263–270.

16. Ресурсосберегающая технология высококачественных видов бумаги и картона из вторичных волокнистых полуфабрикатов / Н. В. Черная [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 1 (277). С. 36–42.

References

1. Flyate D. M. *Tekhnologiya bumagi* [Paper technology]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 440 p. (In Russian).

2. Chernaya N. V., Lamotkin A. I. *Prokleyka bumagi i kartona v kisloy i neytral'noy sredakh* [Sizing paper and cardboard in acidic and neutral media]. Minsk, BGTU Publ., 2003. 345 p. (In Russian).

3. Chernaya N. V. *Teoriya i tekhnologiya kleyenykh vidov bumagi i kartona* [Theory and technology of glued types of paper and cardboard]. Minsk, BGTU Publ., 2009. 394 p. (In Russian).

4. Gordeyko S. A., Chernaya N. V., Shishakov E. P. *Hardening of recycled paper and cardboard, glued in acidic, neutral and slightly alkaline media. IVUZ. Lesnoy zhurnal* [NHEI. Forest Journal], 2015, no. 5, pp. 165–173 (In Russian).

5. Chernaya N. V. Conceptual development of the theory and technology of sizing paper and cardboard with hydrodispersions of modified rosin in the mode of heteroadagulation of peptized particles. *Polimernyye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2015, vol. 1, no. 1, pp. 76–90 (In Russian).

6. Ivanov S. N. *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva* [Technology of pulp and paper production], vol. 2, The main types and properties of paper, cardboard, fiber and wood slabs. St. Petersburg, Politehnika Publ., 2006. 499 p. (In Russian).

7. Shabiev R. O., Smolin A. S. *Analiz elektrokineticheskikh parametrov bumazhnoy massy* [Analysis of electrokinetic parameters of paper mass]. St. Petersburg, SPb GTURP Publ., 2012. 80 p. (In Russian).

8. Kozhevnikov S. Yu., Koverninski I. N. Inter-Fiber electrostatic bonds in paper. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2012, no. 3, pp. 197–202 (In Russian).

9. Bicu I. Water soluble polymers from Diels-Alder adducts of abietic acid as paper additives. *Macromol. Mater. Eng.*, 2000, no. 280/281, pp. 47–53.

10. Kotitschke G. "Triple star" – The State of the Art and Most Efficient Production Line in the World for Woodfree Papers Cjfted. New York, Voith Publ., 2002. 186 p.

11. Loretzen A., Wetter N. *Paper Testing and Process Optimization*. Stockholm, L & Handbook Publ., 2000. 218 p.

12. Zholnerovich N. V., Nicolaychik I. V., Chernaya N. V. Influence of urea-formaldehyde oligomer composition on technical paper properties. *Proceedings of BSTU*, 2014, no. 4: Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology, pp. 125–127.

13. Kopylovich M. N., Radion E. V., Baev A. K. The distribution of various forms of aluminum (III) and copper (II) in solutions and the scheme of the heteronuclear hydroxocomplex formation process. *Koordinatsionnaya khimiya* [Coordination chemistry], 1995, vol. 21, no. 1, pp. 66–71 (In Russian).

14. Khovanskiy V. V., Dubovyy V. K., Keyzer P. M. *Primeneniye khimicheskikh vspomogatel'nykh veshchestv v proizvodstve bumagi i kartona* [The use of chemical excipients in the production of paper and cardboard]. St. Petersburg, SPb GTURP Publ., 2013. 151 p. (In Russian).

15. Shabiev R. O., Smolin A. S., Kozhevnikov S. Yu., Koverninskiy I. N. Paper chemistry: investigation of the hardening and dehydrating additives action. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2014, no. 4, pp. 263–270 (In Russian).

16. Chernaya N. V., Gordeyko S. A., German N. A., Chernysheva T. V., Dashkevich S. A., Misyurov O. A. Resource-saving technology of high-quality types of paper and cardboard from secondary fibrous semi-finished products. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology, 2024, no. 1 (277), pp. 36–42 (In Russian).

Информация об авторах

Дашкевич Светлана Аркадьевна – магистр технических наук, младший научный сотрудник кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: s.dawkevi4@gmail.com

Гордейко Светлана Александровна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sveta_gordeiko@mail.ru

Герман Наталия Александровна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: herman_n@belstu.by

Information about the authors

Dashkevich Svetlana Arkad'yevna – Master of Engineering, Junior Researcher, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.dawkevi4@gmail.com

Gordeyko Svetlana Aleksandrovna – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sveta_gordeiko@mail.ru

Herman Natalia Aleksandrovna – PhD (Engineering), Senior Lecturer, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: herman_n@belstu.by

Поступила 15.06.2025