

Разработка методики оценки распределения крахмалсодержащих составов в z-направлении бумаги и оценка ее пригодности

**М. О. Парфенок¹, В. В. Горжанов¹,
Н. А. Герман¹, И. М. Грошев²**

¹Белорусский государственный технологический университет,
²ОАО «Витебскдрев», Республика Беларусь

Аннотация. Явления, происходящие при поверхностной обработке бумаги, весьма сложны и не до конца изучены. Несмотря на работы, проведенные в этом направлении сохраняется множество факторов, влияющих на неопределенность конечного результата и обусловленные, в первую очередь, применением природных материалов, свойства которых не могут быть воспроизведены с должной точностью. Свойства же бумаги, формируемые при поверхностной проклейке, напрямую зависят от этих составляющих и определяются глубиной проникновения составов и их распределением в z-направлении бумажного листа. Методики, предлагаемые для определения этих показателей, не позволяют оценить распределение крахмала в z-направлении уже изготовленной бумаги, что затрудняет изучение влияния факторов поверхностной проклейки на распределение крахмала в реальных условиях промышленного производства. Это определило цель работы, которая заключалась в разработке методики определения глубины пенетрации крахмала, нанесенного при поверхностной проклейке, и изучение его распределения в z-направлении бумаги.

Предлагаемая методика определения проникновения крахмала при поверхностной проклейке бумаги позволяет с достаточной большой точностью (абсолютная погрешность в оценке средних значений содержания вещества состава составляет не более 5 %) судить как о глубине проникновения крахмала, так и о его распределении по всей толщине бумаги. Суть методики заключалась в обработке образцов бумаги составом на основе йода с целью его связывания в комплексные соединения с крахмалом, получения изображений поперечных срезов бумаги и их обработки при помощи программного обеспечения. Для оценки пригодности методики проведены сравнительные измерения двух образцов бумаги, изготовленных в промышленных условиях, проклеенных с поверхности составами на основе оксиэтилированного крахмала, имеющих различные характеристики по вязкости вследствие различия концентрации состава. Применение методов метаматематической обработки полученных данных позволило объективно показать чувствительность методики к характеристикам проклеивающих составов на основе крахмала, обусловленным различным содержанием сухого вещества

Ключевые слова: поверхностная проклейка, проникновение крахмала, z-направление бумаги, концентрация состава, пенетрация.

Информация о статье: поступила 13 февраля 2025 года.

Development of a method for assessment the distribution of starch-containing compositions in the z-direction of paper and its suitability assessment

**Maria O. Parfenok¹, Vadim V. Gorzhanov¹,
Natalia A. Herman¹, Ivan M. Groshev²**

¹Belarusian State Technological University,
²JSC "Vitebskdrev", Republic of Belarus

Abstract. The phenomena occurring during surface treatment of paper are very complex and not fully understood. Despite the work carried out in this direction, many factors remain that affect the uncertainty of the final result and are primarily due to the use of natural materials whose properties cannot be reproduced with due accuracy. The properties of paper formed during surface sizing directly depend on these components and are determined by the depth of penetration of the compositions and their distribution in the z-direction of the paper sheet. The methods proposed for determining these indicators do not allow us to estimate the distribution of starch in the z-direction of already manufactured paper, which complicates the study of the effect of surface sizing factors on the distribution of starch in real industrial production

conditions. This determined the purpose of the work, which was to develop a method for determining the depth of penetration of starch applied during surface sizing and to study its distribution in the z-direction of paper.

The proposed method for determining starch penetration during surface sizing of paper allows one to judge both the depth of starch penetration and its distribution over the entire thickness of the paper with sufficient accuracy (the absolute error in estimating the average values of the substance content of the composition is no more than 5 %). The essence of the method was to treat paper samples with an iodine-based composition in order to bind it into complex compounds with starch, obtain images of cross sections of paper and process them using software. To assess the suitability of the method, comparative measurements were carried out on two paper samples manufactured under industrial conditions, sized from the surface with compositions based on oxyethylated starch, having different viscosity characteristics due to differences in the concentration of the composition. The use of meta-mathematical processing methods for the obtained data made it possible to objectively demonstrate the sensitivity of the method to the characteristics of starch-based sizing compositions due to different dry matter content.

Keywords: surface sizing, starch penetration, z-direction of paper, composition concentration, penetration.

Article info: received February 13, 2025.

Введение

В производстве печатных видов бумаги важную роль играет поверхностная проклейка, которая обеспечивает бумаге необходимую впитывающую способность к печатным краскам, улучшает структурно-механические свойства, снижает пылимость и выщипывание при нанесении печати, повышает устойчивость к деформации во влажном состоянии [В.В. Хованский, В.К. Дубовый и П.М. Кейзер, 2013]. Для поверхностной проклейки наиболее часто применяют модифицированный химическим или физико-химическим способами крахмал [К.В. Пинчукова, Я.В. Глазкова и З. Кужугалдинова, 2016; Л.Р. Мусина, М.Ф. Галиханов, 2014].

Явления, происходящие при поверхностной обработке бумаги, весьма сложны и не до конца изучены. Сложность процесса обусловлена особенностями коллоидно-химических свойств веществ, используемых для поверхностной проклейки, неоднородностью химического состава волокнистых материалов, входящих в композицию бумаги, изменчивостью форм коагуляции проклеивающего вещества при взаимодействии его с волокнистым материалом и условий миграции в пористую структуру [Х.А. Барахнова и др., 2022].

Особое значение для объяснения теории поверхностной проклейки имеет процесс проникновения проклеивающего состава в структуру бумаги [О.С. Вдовина, С.Ю. Кожевников и И.Н. Коверинский, 2015; А.П. Петров, 1968].

Именно процессы проникновения составов при поверхностной проклейке определяют поглощение желательного количества добавок полимера и его од-

нородность при распределении на поверхности и в толще бумаги [Н.В. Черная, Н.А. Герман, 2020; А.В. Вураско, М.А. Агеев и А.Я. Агеев, 2021; Д.И. Малютина, Е.Г. Смирнова, 2023]. Понимание механизмов распределения составов возможно только при сопоставлении технологических параметров проклейки с распределением составов в z-направлении бумажного листа [О.А. Новосельская и др., 2018].

Наиболее полное исследование по теории проникновения составов для поверхностной проклейки в бумагу в z-направлении изложено в работе М. Ширази с соавторами [M. Shirazi et al, 2004]. В рассматриваемой работе изучено проникновение растворов крахмалов в бумагу и картон в z-направлении в зависимости от скорости бумагоделательной машины, усилия сжатия валов клеильного пресса, вида и вязкости раствора крахмалов. Исследования проведены на модельных неклеенных образцах бумаги (масса 1 м² 55 г, толщина 150 мкм) и картона (масса 1 м² 220 г, толщина 500 мкм) с использованием лабораторной установки, имитирующей наклонный клеильный пресс. В качестве методики оценки проникновения составов предложена обработка крахмала смесью **I₂** и **KI** и нанесение данной смеси на поверхность бумаги с последующим сканированием полученной бумаги при помощи электронного микроскопа с функцией элементного анализа и обработкой полученного изображения [Р.О. Шабиев, А.С. Смолин и Л.Л. Парамонова, 2013].

Данная методика не позволяет оценить распределение крахмала в z-направлении уже изготовленной бумаги, что затрудняет изучение влияния факторов по-

верхностной проклейки на распределение крахмала в реальных условиях промышленного производства.

Цель работы заключалась в разработке методики определения глубины пенетрации крахмала, нанесенного при поверхностной проклейке, и изучения его распределения в z-направлении бумаги.

Методы и средства исследований

Идентификацию крахмала в z-направлении в бумаге проводили с помощью сканирующей электронной микроскопии по методике [R. Alem, 1998].

Отбор проб бумаги для испытания проводили в соответствии с ГОСТ 8047-2001.

Методика заключалась в обработке образцов бумаги составом на основе йода с целью его связывания в комплексные соединения с крахмалом, получения изображений поперечных срезов бумаги и их обработки при помощи программного обеспечения.

Отобранные образцы бумаги разрезали на полосы 10×150 мм при помощи хирургического скальпеля вдоль машинного направления бумаги. Поверхность полученного поперечного сечения образца должна быть гладкой и плоской.

Образцы бумаги погружали в раствор йода (1 г/л I_2 + 10 г/л KI) на 10 минут, затем в дистиллированную воду также на 10 минут, чтобы удалить несвязанный йод из бумаги, в результате чего крахмал в структуре листа окрашивается в темный цвет. После каждого погружения раствор йод-калий-йодида заменяли, чтобы гарантировать его чистоту, и чтобы свет не ослаблял реакцию окрашивания.

Окрашенные влажные образцы бумаги высушивали в сушильном шкафу при температуре (100±5) °C. Высушенный образец помещали между двух металлических пластин и с помощью скальпеля делали срез. Лезвие заменяли после резки 5 полос.

Изображения получали при помощи оптического микроскопа со встроенной аналогово-цифровой фотокамерой LeicaDFC 280 (Германия). Специфика исследования заключалась в необходимости наблюдать структуру поверхности непрозрачных тел. Устанавливали необходимое значение увеличения, при котором получали четкое изображение поперечного сечения бумаги, и делали фотографию сечения.

Анализ изображений проводился с применением программы PhotoshopCS 5.

После загрузки изображения среза бумаги выполняются следующие команды программы:

- изображение среза образца бумаги располагается горизонтально;

- в пункте «Изображение» главного меню выполняется команда «Режим», «Черно-белый (Ч-Б)»;

- в пункте «Вид» главного меню выполняются команды: «Линейки»; «Реальный размер», «Показать во весь экран», «Включит Сетку»;

- на панели инструментов выбирается пиктограмма «Заливка» и выполняется заливка фона белым цветом. Таким образом, устанавливается верхняя и нижняя границы изображения поперечного сечения;

- в пункте «Окно» главного меню открываются окна «Гистограмма», «Инфо», «Цвет»;

- выбирается инструмент «Пипетка»;

- оценка яркости пиксел выполняется с шагом 0,1L по длине образца бумаги (L – длина образца бумаги на изображении). Участки, содержащие деформированную поверхность, пропускаются. Сканирование в z-направлении по толщине бумаги Н проводится от лицевой до сеточной поверхности с шагом каждого уровня Н/15. Таким образом, в результате каждого сканирования в z-направлении получали 16 результатов измерения яркости пиксел (для 16 уровней включая нулевой).

На каждом образце бумаги получали не менее 10 результатов оценки изменения яркости пиксел в z-направлении (10 шагов).

Обработка результатов измерений глубины проникновения крахмалсодержащего состава в z-направлении осуществлялась по стандартным методикам, заключающимся в расчете среднего значения яркости пиксел, его среднего квадратичного отклонения, погрешности, относительного отклонения и доверительного интервала.

Результаты анализа отображаются в виде кривых пенетрации крахмалсодержащего состава для поверхностной проклейки.

После анализа изображений снимков поперечного сечения и получения кривых пенетрации крахмалсодержащего состава для поверхностной проклейки, которые показывают относительное содержание крахмала (в интервале от 0 до 100 %) в z-направлении (глубину) листа, определяли безразмерную величину пенетрации, Q с целью получения представления относительно глубины проникновения крахмала. Этот показатель может быть использован для сравнения образцов бумаги с различными уровнями пенетрации крахмала. Вид кривой пенетрации представлен на рисунке 1.

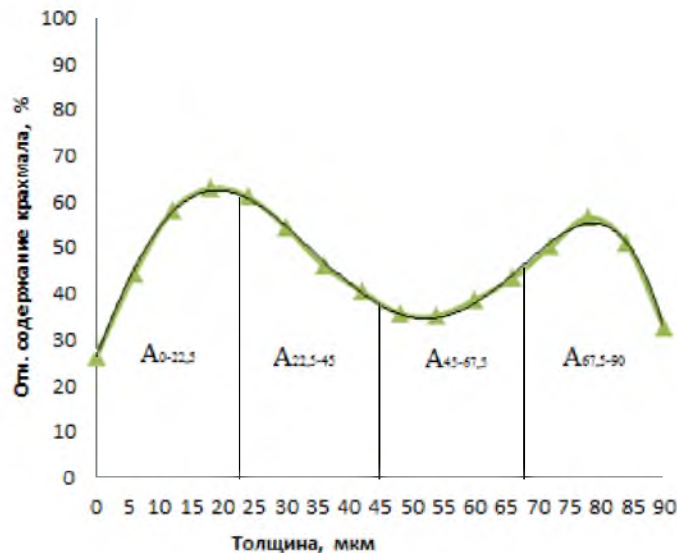


Рисунок 1 – Изображение полученных поперечных сечений $A_{0-22,5}$, $A_{22,5-45}$, $A_{45-67,5}$, $A_{67,5-90}$ покрываемых кривой пенетрации крахмала

Figure 1 – Image of the obtained cross sections $A_{0-22,5}$, $A_{22,5-45}$, $A_{45-67,5}$, $A_{67,5-90}$ covered by the starch penetration curve

Определение безразмерной величины проводят с применением программы Mathcad 13.

Последовательность обработки данных была следующей:

а) Получали с помощью электронных таблиц Microsoft Office Excel уравнение $f(x)$, аппроксимирующее данные пенетрации крахмала.

б) Для определения безразмерной величины пенетрации, Q , толщину изображения сечения образца бумаги в z-направлении делили на четыре слоя, равных по размеру, а интегралы (области, охватываемые кривой пенетрации), этих участков определяли как $A_{0-22,5}$, $A_{22,5-45}$, $A_{45-67,5}$, $A_{67,5-90}$.

в) Величины пенетрации на лицевой $Q_{верх}$ и сеточной $Q_{низ}$ сторонах бумажного листа определяли отдельно, как на лицевой, так и на сеточной сторонах: отношение площади, покрытой кривой пенетрации на внутренней четверти толщины листа ($A_{22,5-45}$ или $A_{45-67,5}$), к площади, покрытой кривой пенетрации на половину толщины образца ($A_{0-22,5} + A_{22,5-45}$ или $A_{45-67,5} + A_{67,5-90}$). Это выполняли с помощью следующих уравнений:

$$Q_{верх} = \frac{A_{22,5-45}}{A_{0-22,5} + A_{22,5-45}}; \quad Q_{низ} = \frac{A_{45-67,5}}{A_{45-67,5} + A_{67,5-90}}. \quad (1)$$

г) Среднюю величину пенетрации $Q_{ср}$ рассчитывали как среднее значение от величин пенетрации, полученных с обеих сторон по формуле

$$Q_{ср} = \frac{Q_{верх}(A_{0-22,5} + A_{22,5-45}) + Q_{низ}(A_{45-67,5} + A_{67,5-90})}{A_{0-22,5} + A_{22,5-45} + A_{45-67,5} + A_{67,5-90}}. \quad (2)$$

Характеристики $Q_{верх}$, $Q_{низ}$ и $Q_{ср}$ варьируют в стандартных пределах [0,1]. Если значение $Q_{ср} < 0,5$, то содержание крахмала стабильно в z-направлении. Если $Q_{ср} > 0,5$, то больше крахмала находится во внутренней части образца поперечного сечения, чем на его поверхности.

Результаты эксперимента и их анализ. С целью оценки пригодности методики были проведены сравнительные измерения для двух образцов бумаги, изготовленных в промышленных условиях, проклеенных с поверхности составами на основе оксиэтилированного крахмала, имеющих различные характеристики по вязкости вследствие различия концентрации состава (С.А. Гордейко, Н.В. Черная и Е.П. Шишаков, 2015; Д.М. Фляте, 1988). Образец 1 проклеивался составом концентрацией 3,7 %, образец 2 – 5,8 %.

Результаты определения содержания состава для поверхностной проклейки в z-направлении бумаги представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание состава для поверхностной проклейки (СПП) в z-направлении
Table 1 – Surface bonding compound (SBC) content in z-direction

Уровень сечения в z-направлении, мкм	Среднее содержание СПП, %		Абсолютная разность, %	Относительная разность, %
	образец 1	образец 2		
0	26,5	22,8	3,7	15,7
6	44,4	44,9	-0,5	-0,7
12	58,0	59,2	-1,2	-2,5
18	62,9	62,5	0,4	1,2
24	61,0	52,1	8,9	14,7
30	54,5	45,9	8,6	19,5
36	46,1	38,2	7,9	17,4
42	40,6	30,2	10,4	23,4
48	35,7	25,8	9,9	28,6
54	35,2	24,0	11,2	26,7
60	38,7	28,1	10,6	22,3
66	43,4	35,5	7,9	12,2
72	50,2	46,3	3,9	2,9
78	56,5	50,2	6,3	7,5
84	51,0	44,4	6,6	9,3
90	32,2	24,2	8,0	33,3

Анализ таблицы 1 показал, что относительная разность в содержании крахмала при сравнении образцов 1 и 2 имеет наибольшие значения в интервале уровней сечения 20–90 мкм и составляет от 14,3 до 33,3 %. Следует отметить, что на лицевой стороне бумаги разница в содержании крахмала практически отсутствует, тогда как на поверхности сеточной стороны она составляет 33,3 %. Абсолютная разница в проникновении крахмала в указанных уровнях сечения составляет до 9 %.

На рисунке 2 показано распределение состава для поверхностной проклейки (СПП) по уровням сечения для образцов 1 и 2.

В таблице 2 представлена оценка однородности дисперсий распределения содержания крахмала для образцов 1 и 2.

Анализ таблицы 2 показывает, что дисперсии, характеризующие рассеяние результатов измерений относительно средних, практически все неоднородны в интервале уровней сечений 36–84 мкм, что свидетельствует о неоднородности результатов определения проникновения крахмала в бумагу на этих уровнях сечений, что

требует увеличения количества параллельных определений.

Оценка существенности различий средних значений распределения состава для поверхностной проклейки для образцов 1 и 2 представлена в таблице 3.

Таким образом, проведенные расчеты, представленные в таблице 3, показали, что различие средних значений распределения СПП для образцов 1 и 2 существенно. Это свидетельствует о корректности отклика методики на внешние изменения (в нашем случае изменение концентрации состава). Стандартные отклонения значений проникновения крахмала для образца 2 существенно меньше и составляют в среднем 9,4 % в сравнении с 12,9 % для образца 1. Доверительные интервалы средних значений содержания состава для поверхностной проклейки в образцах 1 и 2 представлены в таблицах 4 и 5 соответственно.

Анализ таблиц 4 и 5 подтверждает высокую точность измерения содержания крахмала – абсолютная погрешность в оценке средних значений составляет не более 5 %.

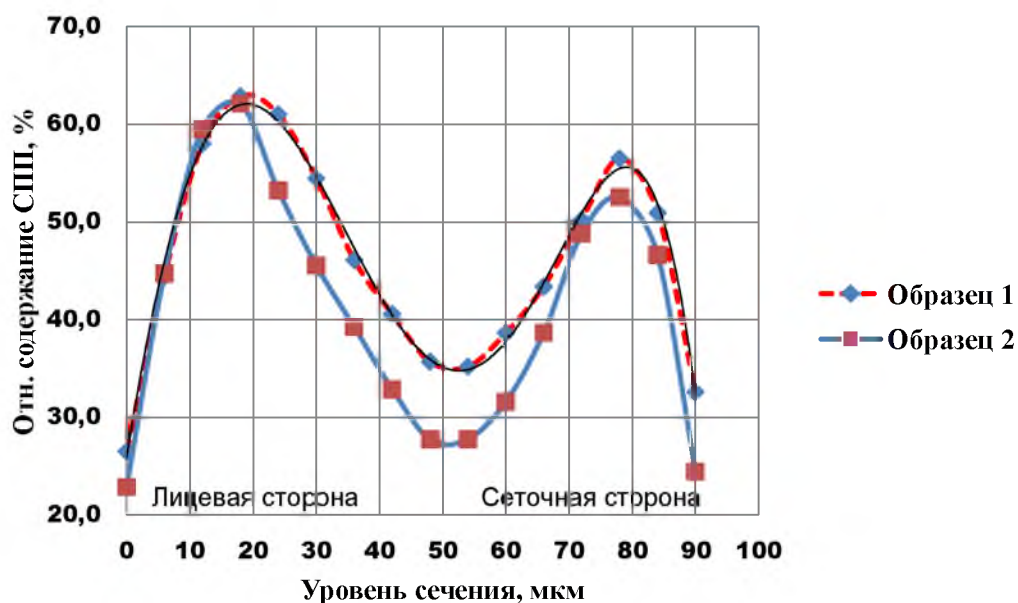


Рисунок 2 – Распределение СПП по уровням сечения
Figure 2 – Distribution of SBC by section levels

Таблица 2 – Оценка однородности дисперсий распределения содержания крахмала для образцов 1 и 2
Table 2 – Evaluation of homogeneity of starch content distribution variances for samples 1 and 2

Уровень сечения в z-направлении, мкм	Среднее содержание СПП, %		Дисперсии		Расчетное значение критерия Фишера F_p	Значение распределения Фишера $F_{крит}$	Оценка однородности дисперсий	Уровень значимости для F_p
	образец 1	образец 2	образец 1	образец 2				
0	26,5	22,8	6,9	7,6	1,10	1,54	однородны	2,75E-01
6	44,4	44,9	57,4	44,6	1,29	1,54	однородны	1,02E-01
12	58,0	59,2	33,0	48,1	1,46	1,54	однородны	7,51E-02
18	62,9	62,5	88,9	41,3	2,15	1,54	не однородны	1,79E-02
24	61,0	52,1	177,0	208,3	1,18	1,54	однородны	1,22E-01
30	54,5	45,9	304,6	215,9	1,41	1,54	однородны	8,18E-02
36	46,1	38,2	325,4	172,6	1,89	1,54	не однородны	3,22E-02
42	40,6	30,2	318,8	94,6	3,37	1,54	не однородны	6,74E-04
48	35,7	25,8	348,2	92,1	3,78	1,54	не однородны	1,86E-04
54	35,2	24,0	371,8	101,6	3,66	1,54	не однородны	2,74E-04
60	38,7	28,1	258,8	157,1	1,65	1,54	не однородны	5,24E-02
66	43,4	35,5	277,2	185,2	1,50	1,54	однородны	7,00E-02
72	50,2	46,3	212,9	119,1	1,79	1,54	не однородны	3,96E-02

Окончание таблицы 2 – Оценка однородности дисперсий распределения содержания крахмала для образцов 1 и 2

End of Table 2 – Evaluation of homogeneity of starch content distribution variances for samples 1 and 2

78	56,5	50,2	137,2	56,9	2,41	1,54	не однородны	9,55E-03
84	51,0	44,4	97,0	75,5	1,71	1,54	не однородны	4,68E-02
90	32,2	24,2	50,9	9,9	0,20	1,54	однородны	4,23E-01

Таблица 3 – Оценка существенности различий средних значений распределения СПП для образцов 1 и 2

Table 3 – Assessment of the significance of differences in the mean values of the distribution of the SBC for samples 1 and 2

Уровень сечения в z-направлении, мкм	Среднее содержание СПП, %		Стандартное отклонение		Расчетное значение критерия Стьюдента	Значение распределения Стьюдента, $t_{крит}$	Оценка существенно-сти различий средних	Уровень значимости для $t_{крит}$
	образец 1	образец 2	образец 1	образец 2				
0	26,5	22,8	2,6	2,8	7,576	1,98	существенно	3,16E-10
6	44,4	44,9	7,6	6,7	0,320	1,98	не существенно	3,75E-01
12	58,0	59,2	5,7	6,9	1,033	1,98	не существенно	1,53E-01
18	62,9	62,5	9,4	6,4	0,272	1,98	не существенно	3,93E-01
24	61,0	52,1	13,3	14,4	3,525	1,98	существенно	4,17E-04
30	54,5	45,9	17,5	14,7	2,908	1,98	существенно	2,57E-03
36	46,1	38,2	18,0	13,1	2,759	1,98	существенно	3,87E-03
42	40,6	30,2	17,9	9,7	3,956	1,98	существенно	1,05E-04
48	35,7	25,8	18,7	9,6	3,667	1,98	существенно	2,68E-04
54	35,2	24,0	19,3	10,1	3,969	1,98	существенно	1,01E-04
60	38,7	28,1	16,1	12,5	4,013	1,98	существенно	8,69E-05
66	43,4	35,5	16,6	13,6	2,840	1,98	существенно	3,11E-03
72	50,2	46,3	14,6	10,9	1,672	1,98	не существенно	4,99E-02
78	56,5	50,2	11,7	7,5	3,512	1,98	существенно	4,34E-04
84	51,0	44,4	9,9	8,7	3,893	1,98	существенно	1,29E-04
90	32,2	24,2	7,1	3,2	7,928	1,98	существенно	4,04E-11
90	32,2	24,2	7,1	3,2	7,928	1,98	существенно	4,04E-11

После анализа изображений снимков поперечного сечения и получения кривых пенетрации состава для поверхностной проклейки, которые показывают относительное содержание состава для поверхностной проклейки (СПП) в z-направлении (глубину) листа, определяли безразмерную величину пенетрации, Q , значения которой представлены в таблице 6.

Для образца 1 значения величин пенетрации показывают:

- значение величины пенетрации $Q_{верх} = 0,505$ характеризует относительно равномерное распределение СПП в z-направлении от лицевой поверхности бумажного листа до половины толщины образца;
- значение величины пенетрации $Q_{низ} = 0,358$ говорит о том, что больше СПП находится на сеточной сторо-

Таблица 4 – Доверительные интервалы средних значений содержания состава для поверхностной проклейки в образце 1

Table 4 – Confidence intervals of the mean values of the content of the composition for surface sizing in sample 1

Уровень сечения в z-направлении, мкм	Среднее содержание, %	Абсолютная погрешность, %	Относительная погрешность, %	Доверительный интервал	
0	26,5	0,680	2,57 %	25,8	27,2
6	44,4	1,956	4,40 %	42,5	46,4
12	58,0	1,482	2,56 %	56,5	59,5
18	62,9	2,434	3,87 %	60,4	65,3
24	61,0	3,436	5,63 %	57,6	64,5
30	54,5	4,506	8,27 %	50,0	59,0
36	46,1	4,658	10,10 %	41,4	50,8
42	40,6	4,610	11,36 %	36,0	45,2
48	35,7	4,818	13,50 %	30,9	40,5
54	35,2	4,979	14,15 %	30,2	40,2
60	38,7	4,154	10,75 %	34,5	42,8
66	43,4	4,299	9,91 %	39,1	47,7
72	50,2	3,767	7,50 %	46,5	54,0
78	56,5	3,024	5,35 %	53,5	59,5
84	51,0	2,543	4,99 %	48,4	53,5
90	32,2	1,842	5,73 %	30,3	34,0

Таблица 5 – Доверительные интервалы средних значений содержания состава для поверхностной проклейки в образце 2

Table 5 – Confidence intervals of the mean values of the content of the composition for surface sizing in sample 2

Уровень сечения в z-направлении, мкм	Среднее содержание, %	Абсолютная погрешность, %	Относительная погрешность, %	Доверительный интервал	
0	22,8	0,71	3,13 %	22,1	23,5
6	44,9	1,72	3,84 %	43,1	46,6
12	59,2	1,79	3,02 %	57,4	61,0
18	62,5	1,66	2,66 %	60,8	64,1
24	52,1	3,73	7,15 %	48,4	55,8
30	45,9	3,79	8,27 %	42,1	49,7
36	38,2	3,39	8,89 %	34,8	41,5
42	30,2	2,51	8,32 %	27,7	32,7
48	25,8	2,48	9,62 %	23,3	28,2

Окончание таблицы 5 – Доверительные интервалы средних значений содержания состава для поверхностной проклейки в образце 2

End of Table 5 – Confidence intervals of the mean values of the content of the composition for surface sizing in sample 2

54	24,0	2,60	10,83 %	21,4	26,6
60	28,1	3,24	11,52 %	24,8	31,3
66	35,5	3,51	9,89 %	32,0	39,0
72	46,3	2,82	6,09 %	43,5	49,1
78	50,2	1,95	3,88 %	48,3	52,1
84	44,4	2,24	5,06 %	42,1	46,6
90	24,2	0,81	3,37 %	23,4	25,0

Таблица 6 – Определение безразмерной величины пенетрации Q

Table 6 – Definition of dimensionless penetration value Q

Значение величины пенетрации	Бумага	
	Образец 1	Образец 2
на лицевой стороне, $Q_{\text{верх}}$	0,505	0,455
на сеточной стороне, $Q_{\text{низ}}$	0,358	0,396
средняя, $Q_{\text{ср}}$	0,419	0,427

не бумажного листа, чем во внутренней четверти нижней половины толщины образца ($A_{45-67,5'}$, рисунок 1);

– средняя величина пенетрации $Q_{\text{ср}} = 0,419$ говорит о том, что в сумме больше СПП находится на лицевой и сеточной сторонах бумажного листа, чем во внутренней части поперечного сечения образца.

Анализ значений величин пенетрации образца 2 показал следующее:

– значение величины пенетрации $Q_{\text{верх}} = 0,455$ говорит о том, что больше СПП находится на лицевой стороне бумажного листа до половины толщины образца;

– значение величины пенетрации $Q_{\text{низ}} = 0,396$ говорит о том, что больше СПП находится на сеточной стороне бумажного листа, чем во внутренней четверти нижней половины толщины образца ($A_{45-67,5'}$, рисунок 1);

– средняя величина пенетрации $Q_{\text{ср}} = 0,427$ говорит о том, что больше СПП находится на лицевой и сеточной сторонах бумажного листа, чем во внутренней части поперечного сечения образца.

Выводы

Проведенный анализ бумаги, проклеенной с поверхности составами на основе крахмала с различной концентрацией (3,7 и 5,8 %) показал, что относительная разность в содержании крахмала при сравнении образцов 1 и 2 имеет наибольшие значения в интервале уровней сечения 20–90 мкм и составляет от 14,3 до 33,3 %. На лицевой стороне бумаги разница в содержании крахмала практически отсутствует, тогда как на поверхности сеточной стороны она составляет 33,3 %. Абсолютная разность в проникновении крахмала в указанных уровнях сечения достигает 9 %, среднее значение относительной разницы составляет 15 %. Это свидетельствует о том, что увеличение концентрации состава снижает проникновение крахмала во внутренние слои бумаги.

Стандартные отклонения значений проникновения крахмала для бумаги, проклеенной с поверхности составом с концентрацией 5,8 %, существенно меньше и составляют в среднем 9,4 % в сравнении с 12,9 % для бумаги, проклеенной составом с более низкой концен-

трацией. Это свидетельствует о большей сплошности нанесения покрытия и, как следствие, равномерном проникновении крахмала, особенно в интервале уровней сечений 36–54 мкм, то есть в среднем слое, и показывает существенность отличий средних значений, полученных для бумаги, проклеенной с поверхности составами с различной концентрацией.

Средние значения безразмерных величин пенетрации СПП $Q_{cp} = 0,419$ для бумаги, проклеенной составом с концентрацией 3,7 % и $Q_{cp} = 0,427$ для бумаги, проклеенной составом с концентрацией 5,8 % говорят о том, что больше СПП находится на лицевой и сеточной сторонах бумажного листа, чем во внутренней части поперечного сечения образца.

Таким образом, полученные данные о погрешности измерений (абсолютная погрешность в оценке средних значений содержания СПП составляет не более 5 %) представленной методики оценки распределения крахмалсодержащих составов в z-направлении бумаги, подтверждают возможность ее применения для оценки глубины проникновения крахмала и особенностей его распределения по всей толщине бумаги. Данная методика может быть использована при проведении научных исследований для оценки влияния как параметров технологического процесса, так и характеристик составов на распределение целевого вещества (крахмала) в бумаге с поверхностной проклейкой, полученной в промышленных условиях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Бабаханова, Х.А., Садриддинов, А.А., Абдуназаров, М.М., Бабаханова, М.А. и Громыко И.Г. [2022]. Применение методов инфракрасной спектроскопии в исследовании составов для проклейки бумаги. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, Т. 22, № 6, С. 1048–1054.

Вдовина, О.С., Кожевников, С.Ю. и Ковернинский, И.Н. [2015]. Физико-химические основы поверхностной проклейки бумаги поликатионным полимером. *Химия растительного сырья*, № 1, С. 187–192.

Вураско, А.В., Агеев, М.А. и Агеев, А.Я. [2021]. *Технология получения, обработки и переработки бумаги и картона*. Екатеринбург: УГЛТУ, Российская Федерация.

Гордейко, С.А., Черная, Н.В. и Шишаков, Е.П. [2015]. Упрочнение макулатурных видов бумаги и картона, проклеенных в кислой, нейтральной и слабощелочной средах. *Лесной журнал. Известия высших учебных заведений*, Т. 5, С. 1–9.

Малютина, Д.И. и Смирнова, Е.Г. [2023]. *Химико-механическая технология обработки и переработки целлюлозы, бумаги и картона*. Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД, Российская Федерация.

Мусина, Л.Р. и Галиханов, М.Ф. [2014]. Улучшение технологических свойств целлюлозно-бумажных материалов модифицированием их поверхности. *Химия растительного сырья*, № 3, С. 259–263.

Новосельская, О.А., Соловьева, Т.В., Нагорнова, И.В. и Варепко, Л.Г. [2018]. Анализ свойств листовых бумажных материалов в z-направлении. *Принттехнологии и медиакоммуникации : тезисы докладов 82-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 1–14 февраля 2018 г.*, Минск: БГТУ, С. 43.

Петров, А.П. [1968]. *Поверхностная проклейка бумаги и картона*. Москва: Лесная промышленность, СССР.

Пинчукова, К.В., Глазкова, Я.В. и Кужугалдинова З. [2016]. Перспективы использования модифицированного крахмала для улучшения эксплуатационных свойств бумаги и картона. *Молодой ученый*, Т. 2, № 28, С. 163–166.

Фляте, Д.М. [1988]. *Технология бумаги*. Москва: Лесная промышленность, СССР.

Хованский, В.В., Дубовый, В.К. и Кейзер, П.М. [2013]. *Применение химических вспомогательных веществ в производстве бумаги и картона*. Санкт-Петербург: СПбГТУРП, Российская Федерация.

Черная, Н.В. и Герман, Н.А. [2020]. *Синтетические материалы в бумажных и картонных производствах: ресурсосбережение и импортозамещение*. Минск: БГТУ, Республика Беларусь.

Шабиев, Р.О., Смолин, А.С. и Парамонова, Л.Л. [2013]. *Изготовление и испытание лабораторных образцов бумаги и картона из вторичного сырья*. Санкт-Петербург: СПбГТУРП, Российская Федерация.

Alem, R. (1998). Characterization of paper coating by scanning electron microscopy and image, *Journal of pulp and paper science*, vol. 24, no. 10, pp. 329–336.

Shirazi, M., Esmail, N., Garnier, G. and van de Ven, T. G. M. (2004). Starch penetration into paper in a size press. *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 25, no. 4, pp. 457–468.

REFERENCES

Alem, R. (1998). Characterization of paper coating by scanning electron microscopy and image, *Journal of pulp and paper science*, vol. 24, no. 10, pp. 329–336.

Babahanova, H.A., Sadridinov, A.A., Abdunazarov, M.M., Babahanova, M.A. and Gromyko I.G. (2022). Application of infrared spectroscopy methods in the study of paper sizing compositions [Primenenie metodov infrakrasnoj spektroskopii v issledovanii sostavov dlya proklejki bumagi]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki* = *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, vol. 22, no. 6, pp. 1048–1054 [In Russian].

Chernaya, N.V. and German, N.A. (2020). *Sinteticheskiye materialy v bumazhnykh i kartonnykh proizvodstvakh: resursoberezeniye i importozameshcheniye* [Synthetic materials in paper and cardboard production: resource conservation and import substitution], Minsk: BSTU, Republic of Belarus [In Russian].

Flate, D.M. (1988). *Tekhnologiya bumagi* [Paper Technology]. Moscow: Forestry Industry, USSR [In Russian].

Gordeyko, S.A., Chernaya, N.V. and Shishakov, E.P. (2015). Strengthening of waste paper and cardboard types sized in acidic, neutral and slightly alkaline environments [Uprochnenie makulturnykh vidov bumagi i kartona, prokleennykh v kisloj, nejtral'noj i slaboshchelochnoj sredah]. *Lesnoj zhurnal. Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij* = *Forestry magazine. News of higher educational institution*, vol. 5, pp. 1–9 [In Russian].

Khovansky, V.V., Dubovy, V.K. and Keizer P.M. (2013). *Primeneniye khimicheskikh vspomogatel'nykh veshchestv v proizvodstve bumagi i kartona* [Application of chemical auxiliaries in the production of paper and cardboard], St. Petersburg: SPbGTURP, Russian Federation [In Russian].

Malyutina, D.I. and Smirnova, E.G. (2023). *Khimiko-mekhanicheskaya tekhnologiya obrabotki i pererabotki tsellyulozy, bumagi i kartona* [Chemical-mechanical technology of processing and recycling of cellulose, paper and cardboard]. St. Petersburg: VShTE SPbGUPTD, Russian Federation [In Russian].

Musina, L.R. and Galikhanov, M.F. (2014). Improving the technological properties of pulp and paper materials by modifying their surface [Uluchshenie tekhnologicheskikh svoystv cellyulozno-bumazhnykh materialov modifitsirovaniem ih poverhnosti]. *Himiya rastitel'nogo syr'ya* = *Chemistry of plant raw materials*, no. 3, pp. 259–263 [In Russian].

Novoselskaya, O.A., Solovyova, T.V., Nagornova, I.V. and Varepo, L.G. (2018). Analysis of the properties of sheet paper materials in the z-direction [Analiz svoystv listovykh bumazhnykh materialov v z-napravlenii]. *Printtekhologii i mediakommunikatsii : tezisy dokladov 82-j nauchno-tehnicheskoy konferencii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem), Minsk, 1–14 fevralya 2018 g.* = *Printing technologies and media communications: theses of the participants of the 82nd scientific and technical conference of professors, teachers, research fellows and postgraduates (with international participation), Minsk, 1–14 february 2018*. Minsk: BSTU, pp. 43 [In Russian].

Petrov, A.P. (1968). *Poverkhnostnaya proklejka bumagi i kartona* [Surface sizing of paper and cardboard]. Moscow: Forestry Industry, USSR [In Russian].

Pinchukova, K.V., Glazkova, Ya.V. and Kuzhugaldinova Z. (2016). Prospects for the use of modified starch to improve the performance properties of paper and cardboard [Perspektivy ispol'zovaniya modifitsirovannogo krahmala dlya uluchsheniya ekspluatatsionnykh svoystv bumagi i kartona]. *Molodoj uchenyj* = *Young Scientist*, vol. 2, no. 28, pp. 163–166 [In Russian].

Shabiev, R.O., Smolin, A.S. and Paramonova, L.L. (2013). *Izgotovleniye i ispytaniye laboratornykh obraztsov bumagi i kartona iz vtorighnogo syr'ya* [Production and testing of laboratory samples of paper and cardboard from secondary raw materials]. St. Petersburg: SPbGTURP, Russian Federation [In Russian].

Shirazi, M., Esmail, N., Garnier, G. and van de Ven, T. G. M. (2004). Starch penetration into paper in a size press. *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 25, no 4, pp. 457–468.

Vdovina, O.S., Kozhevnikov, S.Yu. and Koverninsky, I.N. (2015). Physicochemical foundations of surface sizing of paper with polycationic polymer [Fiziko-himicheskie osnovy poverhnostnoj proklejki bumagi polikationnym polimerom]. *Himiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of plant raw materials*, no. 1, pp. 187–192 (In Russian).

Vurasko, A.V., Ageev, M.A. and Ageev, A.Ya. (2021). *Tekhnologiya polucheniya, obrabotki i pererabotki bumagi i kartona* [Technology of obtaining, processing and recycling paper and cardboard]. Ekaterinburg: USLTU, Russian Federation (In Russian).

Информация об авторах

Information about the authors

Парфенок Мария Олеговна

Студент, Белорусский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: mashabt21@gmail.com

Горжанов Вадим Валерьевич

Кандидат технических наук, начальник центра организации образовательной деятельности БГТУ, Белорусский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: horzhanovvadim@mail.ru

Герман Наталия Александровна

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Химическая переработка древесины», Белорусский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

E-mail: herman_n@belstu.by

Грошев Иван Михайлович

Кандидат технических наук, начальник центральной заводской лаборатории, ОАО «Витебскдрев», Республика Беларусь.

E-mail: groshev.i@vitebskdrev.com

Maria O. Parfenok

Student, Belarusian State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: mashabt21@gmail.com

Vadim V. Gorzhanov

Candidate of Sciences (in Engineering), Head of the Center for Organizing Educational Activities of BSTU, Belarusian State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: horzhanovvadim@mail.ru

Natalia A. Herman

Candidate of Sciences (in Engineering), Associate Professor of the Department "Chemical Wood Processing", Belarusian State Technological University, Republic of Belarus.

E-mail: herman_n@belstu.by

Ivan M. Groshev

Candidate of Sciences (in Engineering), Head of the Central Plant Laboratory, JSC "Vitebskdrev", Republic of Belarus.

E-mail: groshev.i@vitebskdrev.com