

Научная статья

УДК 66-935.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-5-203-213

Результаты исследования взаимосвязи вязкости и механической прочности блененой лиственной сульфатной целлюлозы

Т.А. Королева¹✉, канд. техн. наук, науч. сотр.; ResearcherID: [ABB-5651-2020](https://orcid.org/0000-0002-9477-5864),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9477-5864>

В.В. Медведев², инж.; ResearcherID: [ADK-0832-2022](https://orcid.org/0000-0002-9877-5829),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9877-5829>

Ю.В. Помелов³, нач. участка диоксида хлора; ResearcherID: [KHU-2203-2024](https://orcid.org/0009-0004-1019-9495),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1019-9495>

¹Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лавёрова РАН, просп. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Россия, 163020; tataak@mail.ru✉


²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; parker2005@mail.ru

³АО «Архангельский целлюлозно-бумажный комбинат», ул. Мельникова, д. 1, г. Новодвинск, Архангельская обл., Россия, 164900; pomelov.yuri@appm.ru

Поступила в редакцию 09.04.24 / Одобрена после рецензирования 27.06.24 / Принята к печати 30.06.24

Аннотация. Проведена оценка взаимосвязи вязкости и механической прочности промышленных образцов лиственной сульфатной блененой целлюлозы. Для производства данного вида полуфабриката использовали древесину березы и осины, которая была заготовлена на территории Северо-Западного региона Российской Федерации. Вязкость раствора высокомолекулярных полимеров дает представление о средней длине волокон и, соответственно, об их степени деструкции. В свою очередь, от длины волокна в значительной мере зависят механические свойства волокнистого полуфабриката и прочность изготовленной из него продукции. В связи с тем, что для определения вязкости раствора высокомолекулярных полимеров требуется не более 2 ч, а для получения стандартных характеристик механической прочности 8–10 ч, анализ вязкости можно считать экспресс-методом, дающим информацию о механической прочности полуфабриката. В представленной работе вязкость полуфабриката определялась в соответствии с международным стандартом ISO 5351:2010 в растворе куприэтилендиамина. Для промышленных образцов лиственной блененой сульфатной целлюлозы с вязкостью более 800 мл/г были выявлены высокие значения характеристик механической прочности. Для образцов целлюлозы установлена корреляционная связь только между числом двойных перегибов и вязкостью. Дальнейшее исследование выполнено для образцов блененой лиственной сульфатной целлюлозы с различной степенью деструкции волокна, которые были изготовлены при варьировании параметров обработки гипохлоритом натрия. Результаты позволили получить диапазон значений критической вязкости для блененой лиственной сульфатной целлюлозы, который составил 600...700 мл/г, и полиномиальную зависимость между сопротивлением раздиранию, разрывной длиной, числом двойных перегибов и вязкостью при высоком коэффициенте достоверности аппроксимации данных – не менее 0,89. Показано, что вязкость может стать аналитическим инструментом в экспресс-диагностике механической прочности волокнистого полуфабриката на

© Королева Т.А., Медведев В.В., Помелов Ю.В., 2024

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

промежуточных стадиях производства бленной лиственной сульфатной целлюлозы и при контроле качества готового полуфабриката.

Ключевые слова: сульфатная целлюлоза, отбелка, вязкость целлюлозы, характеристики механической прочности, гипохлорит натрия

Для цитирования: Королева Т.А., Медведев В.В., Помелов Ю.В. Результаты исследования взаимосвязи вязкости и механической прочности бленной лиственной сульфатной целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 5. С. 203–213. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-203-213>

Original article

The Results of the Study of the Relationship between Viscosity and Mechanical Strength of Bleached Hardwood Kraft Pulp

*Tatiana A. Koroleva*¹✉, Candidate of Engineering, Research Scientist;

ResearcherID: [ABB-5651-2020](https://orcid.org/0000-0002-9477-5864), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9477-5864>

*Vasily V. Medvedev*², Engineer; ResearcherID: [ADK-0832-2022](https://orcid.org/0000-0002-9877-5829),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9877-5829>

*Yuri V. Pomelov*³, Chlorine Dioxide Section Manager; ResearcherID: [KHU-2203-2024](https://orcid.org/0009-0004-1019-9495),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1019-9495>

¹N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolskiy prosp., 20, Arkhangelsk, 163020, Russian Federation; tataak@mail.ru✉

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; parker2005@mail.ru

³Arkhangelsk Pulp and Paper Mill, ul. Mel'nikova, 1, Novodvinsk, Arkhangelsk Region, 164900, Russian Federation; pomelov.yuri@ppm.ru

Received on April 9, 2024 / Approved after reviewing on June 27, 2024 / Accepted on June 30, 2024

Abstract. An assessment has been made of the relationship between viscosity and mechanical strength of industrial samples of bleached hardwood kraft pulp. To produce this type of semi-finished product, birch and aspen wood has been used, which has been harvested in the Northwestern region of the Russian Federation. The viscosity of a solution of high-molecular polymers provides an idea of the average length of the fibers and, accordingly, their degree of destruction. In turn, the mechanical properties of the fibrous semi-finished product and the strength of the products made from it largely depend on the length of the fiber. Since it takes no more than 2 hours to determine the viscosity of a solution of high-molecular polymers, and 8–10 hours to obtain standard mechanical strength characteristics, viscosity analysis can be considered an express method that provides information on the mechanical strength of a semi-finished product. In this work, the ISO 5351:2010 international standard in cupriethylenediamine solution has been used to analyze the viscosity of the semi-finished product. High values of mechanical strength characteristics have been detected for industrial samples of bleached hardwood kraft pulp with a viscosity of more than 800 ml/g. For pulp samples, a correlation has been established only between the number of double folds and viscosity. Further research has been carried out on samples of bleached hardwood kraft pulp with different degrees of fiber destruction, which have been produced with varying the parameters of sodium hypochlorite treatment. The results have made it possible to establish



a range of critical viscosity values for bleached hardwood kraft pulp, which has amounted to 600...700 ml/g, and a polynomial relationship between tear resistance, breaking length, a number of double folds and viscosity with a high confidence coefficient of data approximation of no less than 0.89. It has been shown that viscosity can become an analytical tool in the express diagnostics of the mechanical strength of a fibrous semi-finished product at the intermediate stages of production of bleached hardwood kraft pulp and in quality control of the ready-made semi-finished product.

Keywords: kraft pulp, bleaching, pulp viscosity, mechanical strength characteristics, sodium hypochlorite

For citation: Koroleva T.A., Medvedev V.V., Pomelov Yu.V. The Results of the Study of the Relationship between Viscosity and Mechanical Strength of Bleached Hardwood Kraft Pulp. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 5, pp. 203–213. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-5-203-213>

Введение

Беленая лиственная сульфатная целлюлоза (БЛСЦ) является востребованным товарным продуктом на мировом рынке лесной индустрии [4]. В Российской Федерации данный вид полуфабриката остается основным сырьем для производства писчих и печатных видов бумаг. Химико-технологический процесс получения БЛСЦ предполагает множество окислительно-восстановительных превращений древесной лигноуглеводной матрицы, направленных на удаление лигнина, сохранение целлюлозных волокон и придания им определенных свойств.

Целлюлоза и гемицеллюлозы древесины в условиях химической переработки подвержены реакциям модификации и деполимеризации [1, 17], что приводит к потере прочности волокнистого полуфабриката и, соответственно, снижению объема производства.

На ступенях варки и отбелки механическую прочность полуфабриката оценивают по стандартным характеристикам: прочности на разрыв и удлинению при растяжении с постоянной скоростью (разрывная длина), сопротивлению раздираанию, прочности на излом при многократных перегибах (число двойных перегибов). Продолжительность определения характеристик механической прочности составляет 10–12 ч. Временной график лабораторных испытаний и последовательность технологических ступеней не дают возможности согласовывать оперативное регулирование технологических параметров, главным образом температуры и расхода химических реагентов, в соответствии с полученными лабораторными данными.

Необходим метод, который позволил бы прогнозировать механическую прочность волокнистых полуфабрикатов за меньшее время, что в итоге сделало бы производственный процесс более гибким и экономичным. Такой экспресс-метод существует. Примерно с 1940 г. прочность и степень деструкции волокон оценивали по вязкости полуфабриката в медно-аммиачном растворе [9, 13]. Продолжительность данного метода не превышает 2 ч, и он нашел широкое применение при производстве целлюлозы, предназначенной для дальнейшей

химической переработки. Растворы волокнистых полимеров находятся в двухфазном жидкокристаллическом состоянии и, как правило, относятся к неньютоновским системам [3]. Такие системы характеризуются повышением вязкости из-за обилия водородных связей внутри и между молекулярными углеводными цепями, а также дисперсионного и диполь-дипольного взаимодействия [2, 18]. Сегодня для определения вязкости волокнистых полуфабрикатов используют раствор куприэтилендиамина [12], в силу того что он более устойчив, чем раствор медноаммиачного комплекса, и окисление целлюлозы в нем значительно меньше [15].

Вязкость раствора высокомолекулярных полимеров дает представление о средней длине волокон и, соответственно, об их степени деструкции [10, 14]. В свою очередь, между морфологическими характеристиками волокна и физико-механическими свойствами волокнистого полуфабриката, бумаги и картона существует тесная взаимосвязь [5, 8, 11]. Длина волокна в значительной мере определяет механические свойства волокнистого полуфабриката и прочность изготовленной из него продукции. Наличие корреляционной связи между длиной волокна и индексом разрыва установлено для небеленой лиственной (НЛСЦ) и хвойной сульфатной целлюлозы [10, 14]. Также была обнаружена корреляционная зависимость между вязкостью и сопротивлением продавливанию, раздиранию для НЛСЦ. Для небеленой хвойной сульфатной целлюлозы – между вязкостью и разрывной длиной, сопротивлением продавливанию и прочностью на излом при многократных перегибах [5]. Определены критические значения вязкости в растворе куприэтилендиамина для НЛСЦ – это 1000...1100 мл/г – и небеленой хвойной сульфатной целлюлозы – 900...950 мл/г. При вязкости ниже критической наблюдается резкое уменьшение прочностных свойств полуфабриката [5].

Тема взаимосвязи между вязкостью беленой лиственной и хвойной сульфатной целлюлозы и ее прочностными характеристиками была затронута в ряде работ зарубежных авторов [10, 11, 16]. Для беленой сульфатной целлюлозы также были установлены критические значения вязкости: для лиственной – 630...800 мл/г, для хвойной – 800...915 мл/г [10].

Таким образом, приведенная информация свидетельствует о возможности использования вязкости волокнистого полуфабриката в качестве характеристики, прогнозирующей его прочностные свойства. В то же время химические, физико-механические свойства волокнистого полуфабриката и морфологические характеристики волокна зависят от множества факторов: географии происхождения древесины, породы древесного сырья и условий его хранения, качества производственной воды, применяемых технологий варки и отбелики и т. п. Поэтому применение вязкости в предложенном качестве требует индивидуального лабораторного исследования, ограниченного такими условиями, как вид волокнистого полуфабриката, используемые древесное сырье и технология его переработки.

Цель работы – изучение взаимосвязи вязкости и прочностных свойств БЛСЦ, полученной из древесины, заготовленной на территории Северо-Западного региона, и возможности использования данных о вязкости для диагностики прочностных свойств БЛСЦ.

Объекты и методы исследования

Образцы БЛСЦ были отобраны на одном из целлюлозно-бумажных предприятий Северо-Западного региона России. Древесное сырье для производства БЛСЦ включало 60 % березы и 40 % осины. Согласно регламенту предприятия, в перечень характеристик контроля качества небеленой и беленой целлюлозы включены: число Каппа для небеленой целлюлозы, яркость для беленой целлюлозы и показатели механической прочности: разрывная длина, сопротивление раздиранию и число двойных перегибов – для обоих видов полуфабрикатов. Периодичность производственного контроля характеристик механической прочности полуфабриката составляет 12 ч, его осуществляют в соответствии с временным графиком прохождения целлюлозной массы от участка хранения небеленой целлюлозы до участка хранения беленой целлюлозы. Схема отбора проб была согласована с регламентом предприятия, для каждого образца целлюлозы фиксировали производственные данные по перечисленным показателям качества исходной небеленой и беленой целлюлозы. Всего отобрано 65 образцов БЛСЦ. Все они разбиты на 6 групп по числу Каппа исходной небеленой целлюлозы в интервале от 12,0 до 14,5: 12,0 (5 образцов), 12,5 (6 образцов), 13,0 (12 образцов), 13,5 (6 образцов), 14,0 (14 образцов), 14,5 (6 образцов). В каждой группе выбрано по 2 образца со стабильными числами Каппа и механической прочностью. Для этих образцов определена вязкость в растворе куприэтилendiамина с использованием капиллярного вискозиметра по международному стандарту ISO 5351:2010 (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики качества лиственной сульфатной целлюлозы до и после отбелки
The quality characteristics of hardwood kraft pulp before and after bleaching

| № образца | НЛСЦ | | | | БЛСЦ | | | | |
|-----------|-------------|---------------------|------------------------------|-------------------------|------------|---------------------|------------------------------|-------------------------|----------------|
| | Число Каппа | Разрывная длина, км | Сопротивление раздиранию, мН | Число двойных перегибов | Яркость, % | Разрывная длина, км | Сопротивление раздиранию, мН | Число двойных перегибов | Вязкость, мл/г |
| 1 | 12,0 | 9,7 | 56 | 1710 | 89,5 | 9,1 | 65 | 910 | 816 |
| 2 | 12,0 | 8,9 | 58 | 1560 | 89,0 | 8,6 | 57 | 720 | 815 |
| 3 | 12,5 | 10,3 | 55 | 1510 | 89,5 | 8,8 | 57 | 1260 | 922 |
| 4 | 12,5 | 9,7 | 60 | 1750 | 89,5 | 8,7 | 62 | 1120 | 930 |
| 5 | 13,0 | 10,5 | 54 | 1780 | 89,0 | 9,2 | 57 | 1180 | 997 |
| 6 | 13,0 | 9,5 | 55 | 1420 | 89,5 | 8,8 | 65 | 1080 | 950 |
| 7 | 13,5 | 8,7 | 56 | 1800 | 89,0 | 7,0 | 58 | 1230 | 900 |
| 8 | 13,5 | 9,5 | 55 | 1720 | 90,0 | 8,9 | 59 | 1210 | 980 |
| 9 | 14,0 | 10,1 | 50 | 1600 | 89,0 | 9,0 | 57 | 1080 | 930 |
| 10 | 14,0 | 10,1 | 58 | 1620 | 90,0 | 8,5 | 66 | 1100 | 993 |
| 11 | 14,5 | 10,9 | 57 | 1730 | 89,0 | 9,7 | 59 | 1270 | 980 |
| 12 | 14,5 | 9,0 | 55 | 1900 | 89,5 | 9,7 | 62 | 1350 | 1020 |

В процессе анализа полученных данных (рис. 1) для образцов БЛСЦ с достаточно высокими механической прочностью и вязкостью не выявлены взаимосвязи между сопротивлением раздиранию, разрывной длиной и вязкостью.

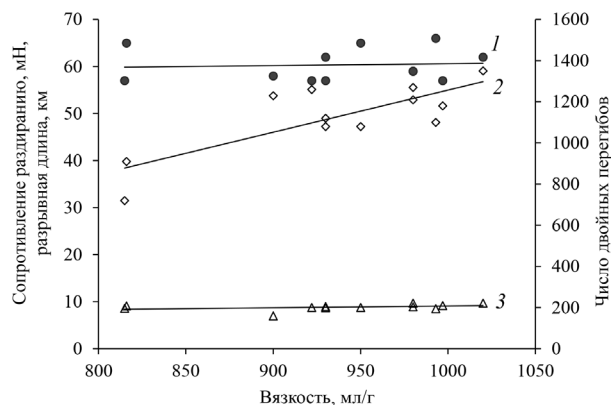


Рис. 1. Предварительные данные взаимосвязи вязкости и механической прочности блененой лиственной сульфатной целлюлозы (1 – вязкость / сопротивление раздиранию; 2 – вязкость / число двойных перегибов; 3 – вязкость / разрывная длина)

Fig. 1. The preliminary data on the relationship between viscosity and mechanical strength of bleached hardwood kraft pulp (1 – viscosity / tear resistance; 2 – viscosity / number of double folds; 3 – viscosity / tear length)

Корреляционная связь была обнаружена только между вязкостью и числом двойных перегибов с достоверностью 0,63 при уровне значимости 0,01 [19]. Высокие механическая прочность БЛСЦ и вязкость полуфабриката свидетельствуют об относительно незначительной степени деструкции целлюлозных волокон.

Для поиска интервала значений, в которых возможно выявление зависимости вязкости и механической прочности, было принято решение о проведении дополнительных лабораторных обработок, обеспечивающих принудительную деградацию углеводной составляющей волокнистого полуфабриката. Для этой цели были выбраны химический реагент – гипохлорит натрия (NaClO) – и специальные условия обработки БЛСЦ: концентрация массы – 8 % при pH 6...7 [6, 7], расход гипохлорита натрия – 8...15 кг/т в ед. активного хлора, температура – 65...85 °C, продолжительность – 60...180 мин (табл. 2).

Таблица 2

Условия обработки блененой лиственной сульфатной целлюлозы гипохлоритом натрия

The conditions for treating bleached hardwood kraft pulp with sodium hypochlorite

| № образца | Расход NaClO , кг/т в ед. активного хлора | Температура, °C | Продолжительность, мин |
|-----------|--|-----------------|------------------------|
| 2 | 8,0 | 65 | 60 |
| 3 | 7,0 | 85 | 60 |
| 4 | 10,0 | 85 | 60 |
| 5 | 12,5 | 85 | 90 |
| 6 | 15,0 | 85 | 60 |
| 7 | 15,0 | 85 | 90 |
| 8 | 15,0 | 85 | 120 |
| 9 | 15,0 | 85 | 180 |

Обработку гипохлоритом натрия проводили в герметично закрытых стеклянных банках, которые погружали в емкость лабораторной бани ЭКРОС ПЭ-4310, заполненной водой. Регулирование температуры в емкости бани осуществлялось автоматически.

Производственный образец целлюлозы, не предназначенный для проведения обработок NaClO , был отобран после ступеней отбеливания D_{01} (диоксид хлора) – D_{02} (диоксид хлора) – ЩП_1 (пероксид водорода в щелочных условиях) – D_1 (диоксид хлора) – ЩП_2 (пероксид водорода в щелочных условиях) и имел следующие характеристики: вязкость – 1000 мл/г, разрывная длина – 9 км, сопротивление раздиранию – 57 мН, число двойных перегибов – 1420. Данному образцу был присвоен номер 1.

Образцы БЛСЦ были размолоты на аппарате центробежного действия до 60°ШР при концентрации массы 6 %. Отливки массой 75 г/м^2 для механических испытаний изготовлены на листоотливном аппарате. Сопротивление раздиранию оценивали в соответствии с ГОСТ 13525.3–97 «Полуфабрикаты волокнистые и бумага. Метод определения сопротивления раздиранию (метод Эльмендорфа)», прочность на излом при многократных перегибах (ч.д.п.) – в соответствии с ГОСТ ИСО 5626–97 «Бумага. Определение прочности на излом при многократных перегибах (методы Шоппера, Ломаржи, Келер-Молина, М1Т)», разрывную длину – по ГОСТ 13525.1–79 «Полуфабрикаты волокнистые, бумага и картон. Методы определения прочности на разрыв и удлинения при растяжении».

Результаты исследования и их обсуждение

Испытания лабораторных образцов показали (табл. 3, рис. 2), что увеличение расхода гипохлорита натрия, температуры и продолжительности обработки приводит к общему снижению вязкости и прочностных свойств БЛСЦ. Значимое уменьшение механической прочности было зафиксировано для образца № 6 при снижении вязкости целлюлозы до 500 мл/г.

Таблица 3

Экспериментальные данные о характеристиках механической прочности образцов целлюлозы после обработки гипохлоритом натрия **The experimental data on the mechanical strength characteristics of pulp samples after treatment with sodium hypochlorite**

| № образца | Вязкость, мл/г | Разрывная длина, км | Сопротивление раздиранию, мН | Число двойных перегибов |
|-----------|----------------|---------------------|------------------------------|-------------------------|
| 1 | 1000 | 9,0 | 57 | 1420 |
| 2 | 900 | 8,8 | 58 | 1100 |
| 3 | 850 | 8,8 | 53 | 1120 |
| 4 | 700 | 8,7 | 50 | 1010 |
| 5 | 600 | 8,7 | 48 | 880 |
| 6 | 500 | 8,4 | 42 | 730 |
| 7 | 500 | 8,4 | 41 | 580 |
| 8 | 500 | 8,4 | 40 | 470 |
| 9 | 500 | 8,3 | 33 | 290 |

Сопротивление раздиранию снижалось незначительно, и только увеличение продолжительности обработки от 150 до 180 мин привело к его резкому уменьшению до 33 мН (образец № 9). Максимальное снижение числа двойных перегибов (до 22,5 %) было зафиксировано после первой обработки, ужесточение условий в каждой последующей обработке сопровождалось падением этого показателя в среднем на 8,5 % (образец № 2).

Изменение вязкости полуфабриката отличалось от поведения характеристик механической прочности. На рис. 2 хорошо видно, что при достижении вязкости 500 мл/г (образец № 6) последующее ужесточение условий обработки, а именно увеличение продолжительности от 60 до 180 мин при постоянных расходе NaClO 15 кг/т и температуре 85 °С (образцы № 7–9), не привело к ее дополнительному снижению.

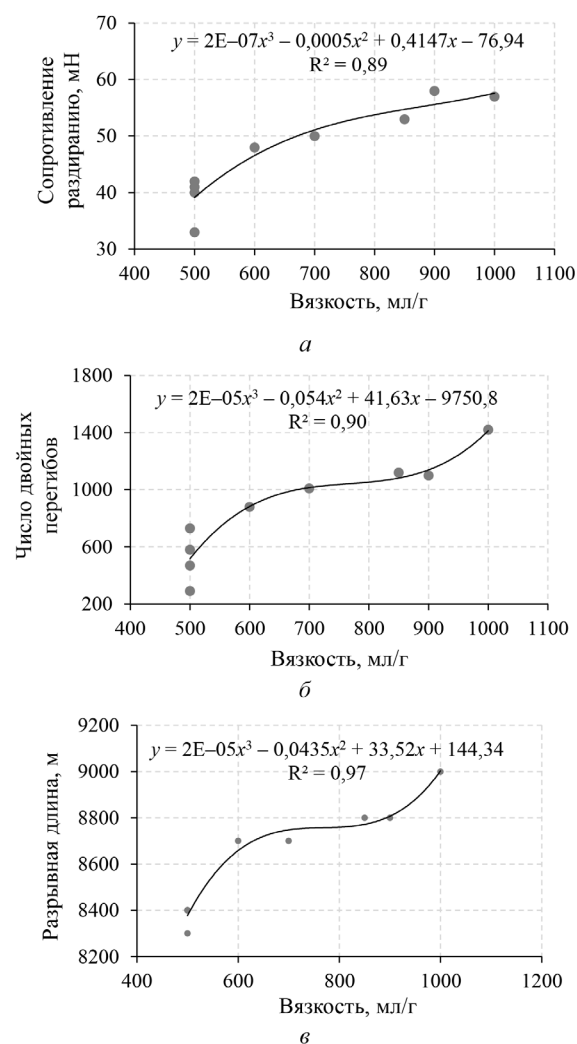


Рис. 2. Взаимосвязь вязкости и механической прочности бленой лиственной сульфатной целлюлозы: *а* – вязкость / сопротивление раздиранию; *б* – вязкость / число двойных перегибов; *в* – вязкость / разрывная длина

Fig. 2. The relationship between viscosity and mechanical strength of bleached hardwood kraft pulp: *a* – viscosity / tear resistance; *б* – viscosity / number of double folds; *в* – viscosity / breaking length

Здесь следует обратить внимание на то, что при достижении вязкости 500 мл/г сопротивление раздиранию в образцах № 6–9 и число двойных перегибов в образце № 9 достигли 33–42 мН и 290 соответственно, и эти значения ниже приведенных в ГОСТ 28172–89 «Целлюлоза сульфатная бленая из смеси

лиственных пород древесины». В то же время при вязкости 600 мл/г в образцах БЛСЦ сопротивление раздиранию и число двойных перегибов превышают требуемые значения, приведенные в этом же ГОСТе для всех марок белой целлюлозы. Таким образом, резкое снижение механической прочности при падении вязкости БЛСЦ с 600 до 500 мл/г позволило определить критическую вязкость БЛСЦ, которая соответствует диапазону 600...700 мл/г.

Математическая обработка экспериментальных данных показала наличие полиномиальной зависимости между вязкостью и сопротивлением раздиранию, числом двойных перегибов, разрывной длиной с высокими коэффициентами достоверности аппроксимации данных – не менее 0,89.

Заключение

Данные, полученные при проведении лабораторного эксперимента, позволили выявить полиномиальную зависимость между вязкостью белой лиственной сульфатной целлюлозы и сопротивлением раздиранию, разрывной длиной, числом двойных перегибов при высоком коэффициенте достоверности аппроксимации. Определен диапазон критической вязкости для белой лиственной сульфатной целлюлозы, который составил 600...700 мл/г. При вязкости 700 мл/г и выше обеспечиваются характеристики механической прочности в соответствии с ГОСТ 28172–89, при вязкости ниже 600 мл/г происходит резкая потеря механической прочности белой лиственной сульфатной целлюлозы.

Таким образом, показано, что вязкость может стать аналитическим инструментом в экспресс-диагностике механической прочности белой лиственной сульфатной целлюлозы на стадиях производства, где присутствуют процессы деградации волокна, а именно после кислородно-щелочной обработки и делигнифицирующих ступеней отбелки, а также для контроля качества готового полуфабриката. Это позволит сделать процесс изготовления белой целлюлозы более гибким и экономичным, кроме того, оценка прочности целлюлозы по вязкости существенно упростит модернизацию схем отбелки в производственных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Богомолов Б.Д. Химия древесины и основы химии высокомолекулярных соединений. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 399 с.
Bogomolov B.D. *Chemistry of Wood and Basic Chemistry of High Molecular Weight Compounds*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 399 p. (In Russ.).
2. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. М.: Химия, 1977. 438 с.
Vinogradov G.V., Malkin A.Ya. *Rheology of Polymers*. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 438 p. (In Russ.).
3. Вшивков С.А., Русинова Е.В., Салех А.С.А. Реологические свойства жидкокристаллических растворов производных целлюлозы // Высокомолекуляр. соединения. Сер. А. 2021. Т. 63, № 4. С. 243–248.
Vshivkov S.A., Rusinova E.V., Abo Saleh A.S. Rheological Properties of Liquid Crystalline Solutions of Cellulose Derivatives. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A = Polymer Science. Series A*, 2021, vol. 63, no. 4, pp. 243–248. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S2308112021040088>

4. Камчатова Е.Ю., Перевозчикова А.К. Тенденции развития целлюлозно-бумажной промышленности Российской Федерации // Уч. зап. Рос. акад. предпринимательства. 2022. Т. 21, № 2. С. 43–49.

Kamchatova E.Yu., Perevozchikova A.K. Trends in the Development of the Pulp and Paper Industry of the Russian Federation. *Uchenye zapiski Rossijskoj akademii predprinimatel'stva* = Scientific Notes of the Russian Academy of Entrepreneurship, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 43–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.24182/2073-6258-2022-21-2-43-49>

5. Карманова Т.Е. Взаимосвязь вязкости сульфатных небеленых целлюлоз с фундаментальными, деформационными и прочностными свойствами: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2012. 143 с.

Karmanova T.E. *Relationship between the Viscosity of Sulfate Unbleached Pulps and Fundamental, Deformation and Strength Properties*: Cand. Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2012. 143 p. (In Russ.).

6. Миловидова Л.А., Комарова Г.В., Королева Т.А., Севастьянова Ю.В., Казаков Я.В., Белоглазов В.И. Промывка и отбелка целлюлозы. 2-е изд. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2019. 192 с.

Milovidova L.A., Komarova G.V., Koroleva T.A., Sevastyanova Yu.V., Kazakov Ya.V., Beloglazov V.I. *Washing and Bleaching of Pulp*. 2nd ed. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2019. 192 p. (In Russ.).

7. Муллина Э.Р., Чупрова Л.В., Ершова О.В., Лыгина Е.Г., Корниенко Н.Д., Пинчукова К.В. Влияние химической природы отбеливающих реагентов на свойства целлюлозного волокна // Успехи соврем. естествознания. 2015. № 11. С. 74–77.

Mullina E.R., Chuprova L.V., Ershova O.V., Lygina E.G., Kornienko N.D., Pinchukova K.V. Influence of the Chemical Nature of the Bleaching Reagents on Properties of Cellulose fibre. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences, 2015, no. 11, pp. 74–77. (In Russ.).

8. Anjos O., Santos A.J.A., Simões R., Pereira H. Morphological, Mechanical, and Optical Properties of Cypress Papers. *Holzforschung*, 2014, vol. 68, iss. 8, pp. 867–874. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0125>

9. Annergren G.E. Strength Properties and Characteristics of Bleached Chemical and (Chemi)mechanical Pulps. *Pulp Bleaching: Principles and Practice. Section VII: The Properties of Bleached Pulp*, 1996, chapt. 3, pp. 717–748.

10. Brogdon B.N., Lucia L.A. Kraft Pulp Viscosity as a Predictor of Paper Strength: Its Uses and Abuses. *TAPPI Journal*, 2023, vol. 22, no. 10, pp. 631–643. <https://doi.org/10.32964/TJ22.10.631>

11. Fišerová M., Gigac J., Balberčák J. Relationship between Fibre Characteristics and Tensile Strength of Hardwood and Softwood Kraft Pulps. *Cellulose Chemistry & Technology*, 2010, vol. 44, no. 7–8, pp. 249–253.

12. Hänninen T., Thygesen A., Mehmood S., Madsen B., Hughes M. Mechanical Processing of Bast Fibres: The Occurrence of Damage and its Effect on Fibre Structure. *Industrial Crops and Products*, 2012, vol. 39, pp. 7–11. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.01.025>

13. Lapierre L., Bouchard J., Berry R. On the Relationship between Fibre Length, Cellulose Chain Length and Pulp Viscosity of a Softwood Sulfite Pulp. *Holzforschung*, 2006, vol. 60, no. 4, pp. 372–377. <https://doi.org/10.1515/HF.2006.058>

14. Lapierre L., Bouchard J., Berry R. The Relationship Found between Fibre Length and Viscosity of Three Different Commercial Kraft Pulps. *Holzforschung*, 2009, vol. 63, iss. 4, pp. 402–407. <https://doi.org/10.1515/HF.2009.072>

15. Liu J., Zhang J., Zhang B., Zhang X., Xu L., Zhang J., He J., Liu C.-Y. Determination of Intrinsic Viscosity-Molecular Weight Relationship for Cellulose in BmimAc/DMSO Solutions. *Cellulose*, 2016, vol. 23, iss. 4, pp. 2341–2348. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-0967-1>

16. Oglesby R.J., Moynihan H.J., Santos R.B., Ghosh A., Hart P.W. Does Kraft Hardwood and Softwood Pulp Viscosity Correlate to Paper Properties. *Tappi Journal*, 2016, vol. 15, no. 10, pp. 643–651. <https://doi.org/10.32964/TJ15.10.643>
17. Schaubeder J.B., Spirk S., Fliri L., Orzan E., Biegler V., Palasingh C., Selinger J., Bakhshi A., Bauer W., Hirn U., Nypelö T. Role of Intrinsic and Extrinsic Xylan in Softwood Kraft Pulp Fiber Networks. *Carbohydrate Polymers*, 2024, vol. 323, art. no. 121371. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121371>
18. Seddiqi H., Oliaei E., Honarkar H., Jin J., Geonzon L.C., Bacabac R.G., Klein-Nulend J. Cellulose and its Derivatives: Towards Biomedical Applications. *Cellulose*, 2021, vol. 28, pp. 1893–1931. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03674-w>
19. Weber E. *Grundriss der Biologischen Statistik*. 4 aufl. Jena, VEB G. Fischer, 1961. 252 p. (In Germ.).

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest