

Научная статья

УДК 676.017.439

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-3-173-184

## Исследование влияния температуры сушки на свойства бумаги из сульфатной беленой хвойной и лиственной целлюлозы

Д.А. Прохоров<sup>✉</sup>, инж. Voith Paper, аспирант;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5206-4119>

В.К. Дубовый, д-р техн. наук, проф.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-3872>

Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 198095; daniel.prokhorov@gmail.com<sup>✉</sup>, dubovy2004@mail.ru


Поступила в редакцию 20.06.22 / Одобрена после рецензирования 18.09.22 / Принята к печати 23.09.22

**Аннотация.** В Российской Федерации на большинстве бумажных фабрик наблюдается значительный перерасход энергии, по разным оценкам – до 40 %, обусловленный низким уровнем технического, научного и кадрового обеспечения. При этом осуществляется выпуск продукции с неконкурентоспособными потребительскими свойствами. Таким образом, оптимизация конструкций и применяемых технологий, включая температурные режимы сушки, является актуальной задачей. Сушильная часть бумагоделательной машины – ее самая энергоемкая часть, при этом оказывает значительное влияние на показатели механической прочности и другие свойства бумаги, в том числе структурно-размерные. На сушку бумажного полотна затрачивается 72–77 % от общего количества расходуемой машиной энергии. Цель работы – анализ влияния температуры сушки на прочностные и структурно-размерные свойства бумаги, с возможностью применения полученных закономерностей на действующих предприятиях отрасли, а также для дальнейших научных исследований. Приведены результаты изучения влияния вида целлюлозы, степени помола, массы 1 м<sup>2</sup> и температуры сушки на прочностные и структурно-размерные свойства лабораторных образцов бумаги. В ходе исследования изготовлены и испытаны лабораторные отливки массой от 60 до 120 г/м<sup>2</sup> из сульфатной беленой хвойной и лиственной целлюлозы, размолотой до степени помола от 20 до 50 °ШР. Температуру сушки материала варьировали от 80 до 140 °С. В результате анализа полученных образцов бумаги выявлено значительное влияние температуры сушки на прочностные и структурно-размерные свойства бумаги. Увеличение температуры сушки с 80 до 140 °С оказывает наибольшее влияние на структурно-размерные свойства бумаги, изготовленной из массы большей степени помола, и на прочностные свойства бумаги, изготовленной из массы меньшей степени помола, при использовании в качестве сырья как хвойной, так и лиственной сульфатной беленой целлюлозы.

**Ключевые слова:** бумагоделательная машина, сушильная часть бумагоделательной машины, температура сушки бумажного полотна, производительность бумагоделательной машины, бумажное полотно, разрушающее усилие, сопротивление продавливанию, сопротивление раздиранию, толщина, воздухопроницаемость

**Для цитирования:** Прохоров Д.А., Дубовый В.К. Исследование влияния температуры сушки на свойства бумаги из сульфатной беленой хвойной и лиственной целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 3. С.173–184. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-173-184>

© Прохоров Д.А., Дубовый В.К., 2023

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

Original article

## Influence of Drying Temperature on Paper Properties Made of Sulfate-Bleached Softwood and Hardwood Pulps

**Daniil A. Prokhorov**<sup>✉</sup>, Application Engineer of Voith Paper, Postgraduate Student;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5206-4119>

**Vladimir K. Dubovy**, Doctor of Engineering, Prof.;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2903-3872>

Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, ul. Ivana Chernykh, 4, Saint Petersburg, 198095, Russian Federation; daniel.prokhorov@gmail.com<sup>✉</sup>, dubovy2004@mail.ru

Received on June 20, 2022 / Approved after reviewing on September 18, 2022 / Accepted on September 23, 2022

**Abstract.** Most paper mills in the Russian Federation consume around 40 % more electrical power than they actually require. The reasons are a low level of technical, scientific, and proficient assistance. Moreover, the produced goods have non-competitive consumption characteristics. The urgent current measures in this matter contain constructional and technological optimization, including drying temperature modes. The drying section of a paper machine is the most energy-consuming, while it significantly affects the mechanical strength and supplementary properties of the resulting paper goods with their structural and dimensional characteristics. Drying the paper web takes 72–77 % of the total energy of the paper machine. Therefore, the purpose of this study is to analyze the influence of the temperatures of the drying process on the strength and structural-dimensional properties of the paper, with the perspective for further application of the results in the practice of industrial companies and additional scientific investigation. The presented results show the influence of pulp type, beating degree, mass of 1 m<sup>2</sup>, and drying temperature on the strength and structural-dimensional properties of laboratory samples. Within the investigational process, laboratory samples from sulphate-bleached softwood and hardwood pulp were created and tested. The weights of the samples varied from 60 to 120 g/m<sup>2</sup>, and the beating degrees ranged from 20 to 50 °SR. The drying temperature extended from 80 to 140 °C. The analysis of the acquired paper samples revealed that the drying temperatures had a considerable impact on the strength, structure, and dimensional qualities of the material. Namely, while sulfate-bleached softwood and hardwood pulp types were used as a raw material, increasing the drying temperature from 80 to 140 °C had the greatest effect on the structural-dimensional properties of the paper made from a pulp with a higher beating degree and the greatest effect on the strength properties of the paper made from a pulp with a lower beating degree.

**Keywords:** paper machine, drying section of paper machine, drying temperature of paper web, paper machine productivity, paper web, tensile strength, burst strength, tear strength, thickness, air permeability

**For citation:** Prokhorov D.A., Dubovy V.K. Influence of Drying Temperature on Paper Properties Made of Sulfate-Bleached Softwood and Hardwood Pulps. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 3, pp. 173–184. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-3-173-184>



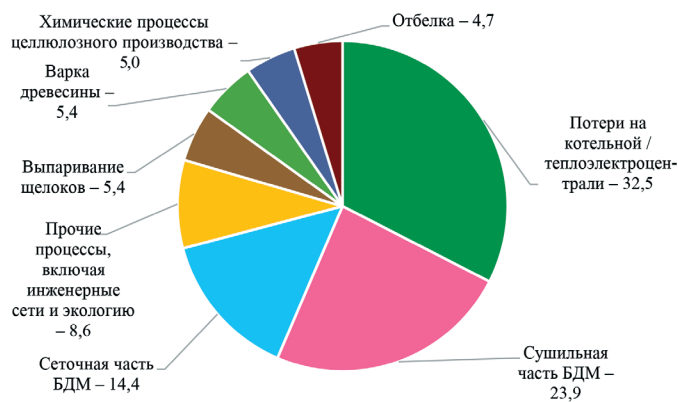
## Введение

Динамично развивающаяся целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) является одной из ведущих отраслей лесного комплекса и неразрывно связана с рядом сложных технологических, экономических, экологических и социальных аспектов [3, 4]. Производство бумаги и картона постоянно наращивается во всем мире и, согласно последним данным Стратегии развития лесного комплекса РФ, к 2030 г. достигнет 572 млн т. Повышение долгосрочной конкурентоспособности предприятий ЦБП в целом и предприятий отечественной ЦБП в частности является комплексной задачей, успех решения которой определяется рациональным использованием энергии, а также выпуском высококачественной продукции. Энергоэффективность и производительность в настоящее время находятся в фокусе внимания современных предприятий.

Анализ производственных процессов и оборудования с наибольшим энергопотреблением позволяет сделать технологически обоснованные предположения о потенциальных возможностях энергосбережения (рис. 1, 2). Так, согласно исследованиям [16], 24 % текущих возможностей экономии энергии в производственном цикле предприятий ЦБП сосредоточены в модернизации конструкции, технологического процесса и правильной настройке оборудования и сопутствующих систем сушильной части бумагоделательной машины (БДМ).

Рис. 1. Текущие возможности экономии энергии при внедрении наилучших достижений технологий для модернизации предприятий ЦБП [16], % (всего – 491 пДж)

Fig. 1. Current opportunities for energy savings in the implementation of BAT for the upgrade of pulp and paper enterprises [16], % (total – 491 PJ)



Для БДМ сушильная часть является наиболее энергоемкой: на сушку бумаги затрачивается 72...77 % от общего количества расходуемой машинной энергии, при этом удаляется менее 2 % влаги из бумажного полотна [1, 5]. В то же время в процессе сушки осуществляется не только окончательное обезвоживание полотна путем испарения из него влаги, но и протекают процессы, определяющие качество готовой продукции [9, 11, 17–20]. По мере удаления воды из влажного полотна происходит дальнейшее сближение волокон за счет сил поверхностного натяжения полотна с образованием межволоконных связей, от количества которых зависит плотность и прочность материала [6, 8].

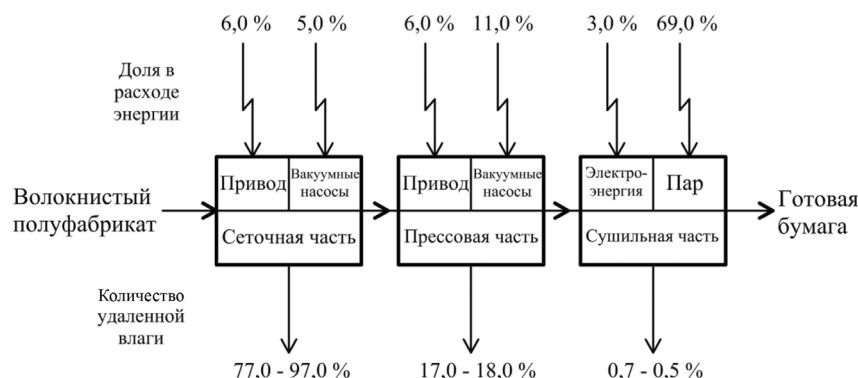


Рис. 2. Распределение расхода энергии современной БДМ и соотношение удаленной влаги [1, 2]

Fig. 2. Distribution of energy consumption of a modern paper machine and evaporated moisture ratio [1, 2]

Таким образом, оптимизация температур сушки, используемых на предприятиях отрасли, целесообразна. При этом есть потребность в исследованиях, посвященных изучению влияния температуры сушки на потребительские свойства бумаги [1, 9, 15].

Цель – исследование влияния температуры сушки на прочностные и структурно-размерные свойства бумаги из сульфатной беленой хвойной и лиственной целлюлозы.

Достижение поставленной цели обеспечивалось решением следующих задач:

1. изучить влияние температуры сушки лабораторных образцов сульфатной беленой целлюлозы на прочностные и структурно-размерные свойства;
2. оценить возможность повышения температуры сушки лабораторных образцов сульфатной беленой целлюлозы с точки зрения ее влияния на прочностные и структурно-размерные свойства;
3. установить оптимальную температуру сушки в зависимости от вида целлюлозы, степени помола и массы 1 м<sup>2</sup>.

#### Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования были использованы 2 вида волокна сульфатной беленой товарной целлюлозы в листах: хвойная (Mercer Rosenthal GmbH, Германия) и лиственная (The Navigator Company, Португалия). Характеристики изученной целлюлозы сведены в таблицу. Сульфатная целлюлоза была выбрана в связи с наибольшей распространенностью данного метода варки на сегодняшний день. Волокна сульфатной целлюлозы при всех прочих равных условиях придают бумаге, как правило, более высокие показатели механической прочности [7, 12–14].

Определение фракционного состава волокна выполнено с использованием анализатора волокна Lorentzen & Wettre Fibertester в соответствии со стандартом ISO 16065-2 [10, 16].

**Характеристики использованной беленой целлюлозы****Properties of the sulfate-bleached pulp**

Целлюлоза	Длина волокна, мм	Ширина волокна, мкм
Лиственная	0,753	26,1
Хвойная	2,131	38,8

Исследования произведены в лабораторных условиях. Для определения влияния температуры на волокна не использованы наполнители или химические добавки. Выбранные значения массы 1 м<sup>2</sup> (60, 80, 100, 120 г/м<sup>2</sup>), степени помола, а также температур сушки соответствуют наиболее распространенным при производстве различных видов бумаг и картона в реальных условиях на предприятиях бумажной промышленности.

В начале эксперимента предварительно подготовленная целлюлоза в количестве 450 г а.с.в. была замочена в воде на 4 ч, далее дезинтегрирована в течение 10 мин с последующим размолотом до заданной степени помола – 20, 30, 40, 50 °ШР на лабораторном коническом рафинере фирмы Andritz (мощность двигателя – 2,24...8 кВт, частота вращения 700–2500 об./мин, полезная мощность размолота – 0,5...2 кВт, характеристики гарнитуры: CrNi-сталь, угол конусности – 60 °, ширина ножей – 6 мм).

Отобранная из рафинера масса была взвешена и распределена по гомогенизаторам, с добавлением воды до достижения концентрации в гомогенизаторе 0,44...0,50 %. После проверки степени помола на аппарате Шопер-Риглера, произведено формование образцов бумаги на листоотливном аппарате Рапид-Кетен. Сформованные листы бумаги высушены на сушильной горке при заданных температурах – 80, 100, 120, 140 °С. В процессе проведения исследования контролировали и регулировали температуру греющей поверхности.

Неразрушающими методами определены структурно-размерные свойства полученных образцов бумаги. Для этого использовали лабораторные весы, толщиномер, прибор для определения воздухопроницаемости фирмы Lorentzen & Wettre. Воздухопроницаемость установлена методом Герлея (по стандарту ISO 5636-5).

Прочностные свойства полученных образцов определены при помощи приборов Lorentzen & Wettre: горизонтальной разрывной машины (по стандарту ISO 1924-2), устройства для определения сопротивления продавливанию (по стандарту ISO 2758) и прибора Эльмендорфа для определения сопротивления раздиранию бумаги (по стандарту ISO 1974).

*Результаты исследования и их обсуждение*

В результате проведения исследования получено более 500 образцов бумаги из беленой хвойной и лиственной целлюлозы, имеющих заданную степень помола, заданную массу 1 м<sup>2</sup> и высушенных при заданных температурах. Сле-

лено более 10 000 измерений прочностных и структурно-размерных свойств образцов бумаги. Выявлено влияние вида волокна, степени помола, массы 1 м<sup>2</sup> и температуры сушки на свойства бумаги.

У образцов бумаги, изготовленных из хвойной беленой целлюлозы, увеличение степени помола сопровождается ростом разрушающего усилия, сопротивления продавливанию, снижением воздухопроницаемости, а также после 30 °ШР отмечено уменьшение сопротивления раздиранию и толщины вне зависимости от массы 1 м<sup>2</sup> образцов и температуры сушки. При повышении степени помола с 20 до 50 °ШР наблюдали рост разрушающего усилия на 46 %, сопротивления продавливанию на 32 %, воздухопроницаемости в 11 раз, при повышении степени помола с 30 до 50 °ШР – снижение сопротивления раздиранию на 28 % и толщины на 9 % (здесь и далее указаны средние значения показателей свойств бумаги по всем измерениям при постоянной температуре сушки и массе 1 м<sup>2</sup>). Наибольший рост разрушающего усилия (17 %) и сопротивления продавливанию (19 %), снижение сопротивления раздиранию (16 %) и толщины (13 %) выявлены при увеличении степени помола с 30 до 40 °ШР. Наибольшее уменьшение воздухопроницаемости (290 %), наименьший рост сопротивления продавливанию (5 %) и снижение сопротивления раздиранию (14 %) – при увеличении степени помола с 40 до 50 °ШР. Наименьший рост разрушающего усилия (9 %) и уменьшение воздухопроницаемости (49 %) – при увеличении степени помола от 20 до 30 °ШР. С повышением степени помола воздух хуже проходит через структуру бумаги, т. е. снижается ее проницаемость и увеличивается время прохождения воздуха через структуру бумаги.

Исследование образцов бумаги из хвойной беленой целлюлозы показало, что увеличение температуры сушки сопровождается снижением разрушающего усилия (рис. 3), сопротивления продавливанию (рис. 4), сопротивления раздиранию (рис. 5), а также ростом толщины (рис. 6) и воздухопроницаемости (рис. 7) вне зависимости от степени помола целлюлозы и массы 1 м<sup>2</sup> образцов. При повышении температуры сушки с 80 до 140 °С отмечены снижение разрушающего усилия на 13 %, сопротивления продавливанию на 10 %, сопротивления раздиранию на 11 %, рост толщины на 9 % и воздухопроницаемости на 35 % (здесь и далее указаны средние значения показателей свойств бумаги по всем измерениям при постоянной степени помола и массе 1 м<sup>2</sup>). Наибольшее снижение разрушающего усилия (5 %), сопротивления продавливанию (4 %), сопротивления раздиранию (5 %), а также наибольший рост толщины (4 %) и воздухопроницаемости (23 %) установлены при увеличении температуры сушки от 80 до 100 °С. С ростом температуры сушки от 120 до 140 °С наблюдаются снижение разрушающего усилия на 4 %, сопротивления продавливанию на 1,5 %, сопротивления раздиранию на 3,5 %, увеличение воздухопроницаемости на 4,5 %, на толщине данное повышение температуры практически не отражается. С ростом температуры сушки воздух лучше проходит через структуру бумаги, т. е. увеличивается ее проницаемость и уменьшается время прохождения воздуха через структуру бумаги.

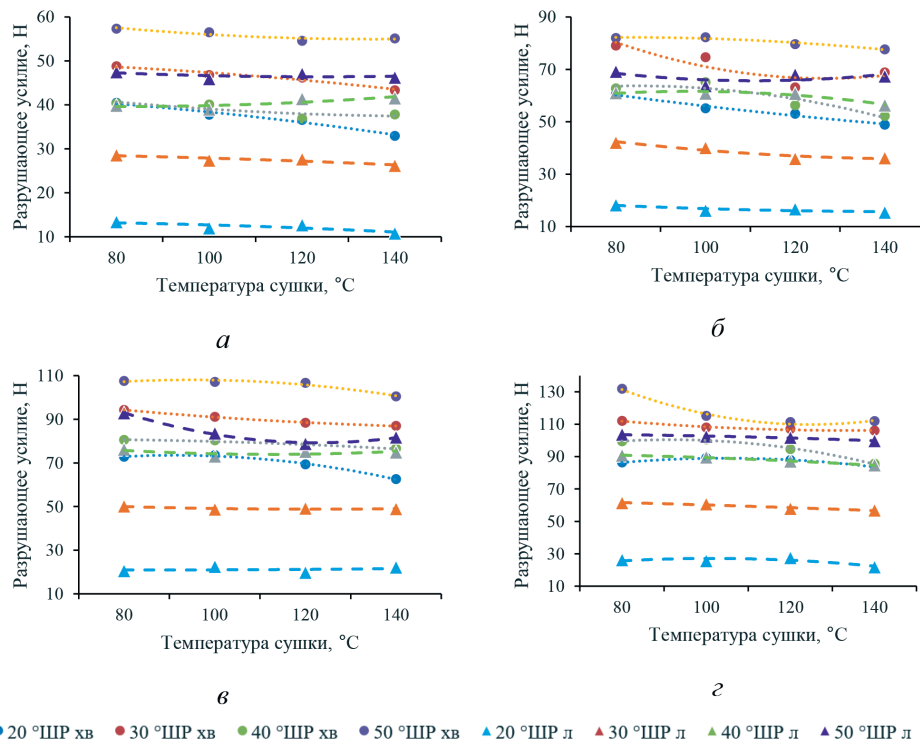


Рис. 3. Зависимость разрушающего усилия образцов бумаги из белой хвойной (хв) и лиственной (л) целлюлозы разной массы 1 м<sup>2</sup> от температуры сушки: а – 60 г/м<sup>2</sup>; б – 80 г/м<sup>2</sup>; в – 100 г/м<sup>2</sup>; з – 120 г/м<sup>2</sup> (обозначения в легенде соответствуют обозначениям на рис. 4–7)

Fig. 3. Dependence of tensile strength of paper samples made of bleached softwood and hardwood pulp with different weight of 1 m<sup>2</sup> on drying temperatures: а – 60 g/m<sup>2</sup>; б – 80 g/m<sup>2</sup>; в – 100 g/m<sup>2</sup>; з – 120 g/m<sup>2</sup> (the notations in the legend correspond to ones in fig. 4–7)

Увеличение степени помола образцов бумаги, изготовленных из лиственной белой целлюлозы, обуславливает повышение разрушающего усилия, сопротивления продавливанию, сопротивления раздиранию, снижение воздухопроницаемости и толщины независимо от массы 1 м<sup>2</sup> образцов и температуры сушки. При повышении степени помола с 20 до 50 °ШР наблюдаются рост разрушающего усилия на 300 %, сопротивления продавливанию на 382 %, сопротивления раздиранию на 164 %, снижение воздухопроницаемости в 22 раза. Наибольший рост разрушающего усилия (132 %), сопротивления продавливанию (150 %), сопротивления раздиранию (98 %), а также наименьшее снижение воздухопроницаемости (62 %) происходят при увеличении степени помола с 20 до 30 °ШР. Наибольшее снижение воздухопроницаемости (430 %) и толщины (18 %) – при увеличении степени помола с 30 до 40 °ШР. Наименьшие рост разрушающего усилия (14 %), сопротивления продавливанию (15 %), сопротивления раздиранию (3 %) и снижение толщины (9 %) отмечены при увеличении степени помола от 40 до 50 °ШР.

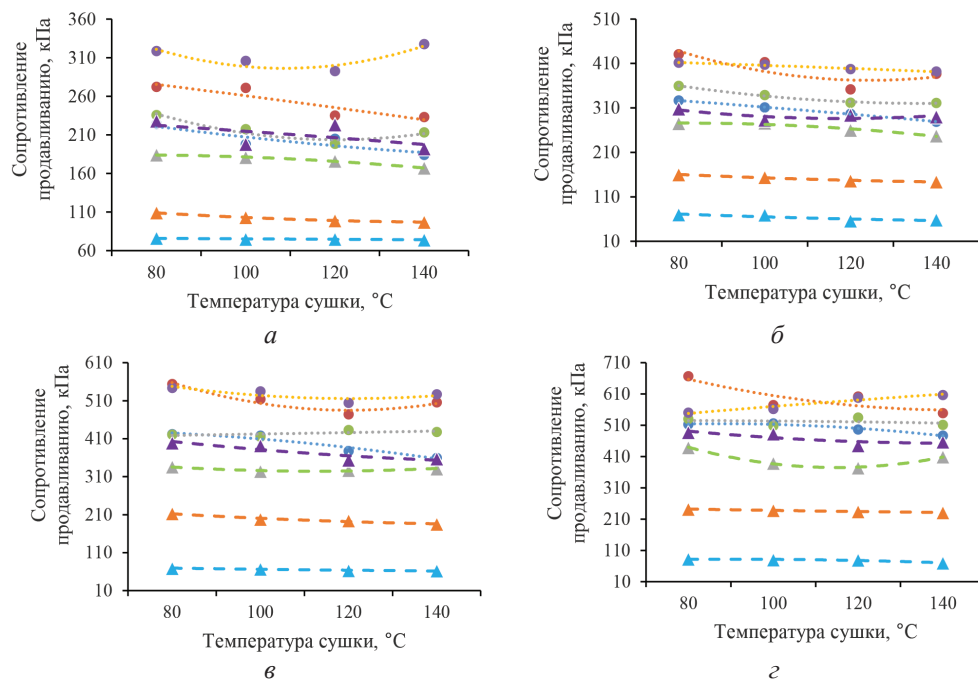


Рис. 4. Зависимость сопротивления продавливанию образцов бумаги из белой хвойной и лиственной целлюлозы разной массы  $1 \text{ м}^2$  от температуры сушки: *а* – 60 г/м<sup>2</sup>; *б* – 80 г/м<sup>2</sup>; *в* – 100 г/м<sup>2</sup>; *г* – 120 г/м<sup>2</sup>

Fig. 4. Dependence of burst strength of paper samples made of bleached softwood and hardwood pulp with different weight of  $1 \text{ m}^2$  on drying temperatures: *a* – 60 g/m<sup>2</sup>; *б* – 80 g/m<sup>2</sup>; *в* – 100 g/m<sup>2</sup>; *г* – 120 g/m<sup>2</sup>

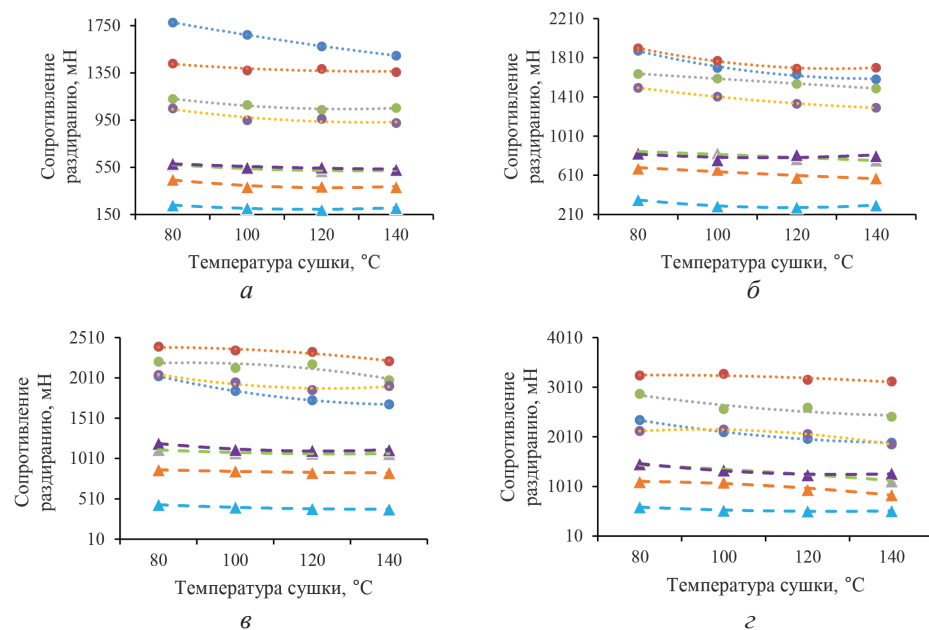


Рис. 5. Зависимость сопротивления раздиранию образцов бумаги из белой хвойной и лиственной целлюлозы разной массы  $1 \text{ м}^2$  от температуры сушки: *а* – 60 г/м<sup>2</sup>; *б* – 80 г/м<sup>2</sup>; *в* – 100 г/м<sup>2</sup>; *г* – 120 г/м<sup>2</sup>

Fig. 5. Dependence of tear strength of paper samples made of bleached softwood and hardwood pulp with different weight of  $1 \text{ m}^2$  on drying temperatures: *a* – 60 g/m<sup>2</sup>; *б* – 80 g/m<sup>2</sup>; *в* – 100 g/m<sup>2</sup>; *г* – 120 g/m<sup>2</sup>



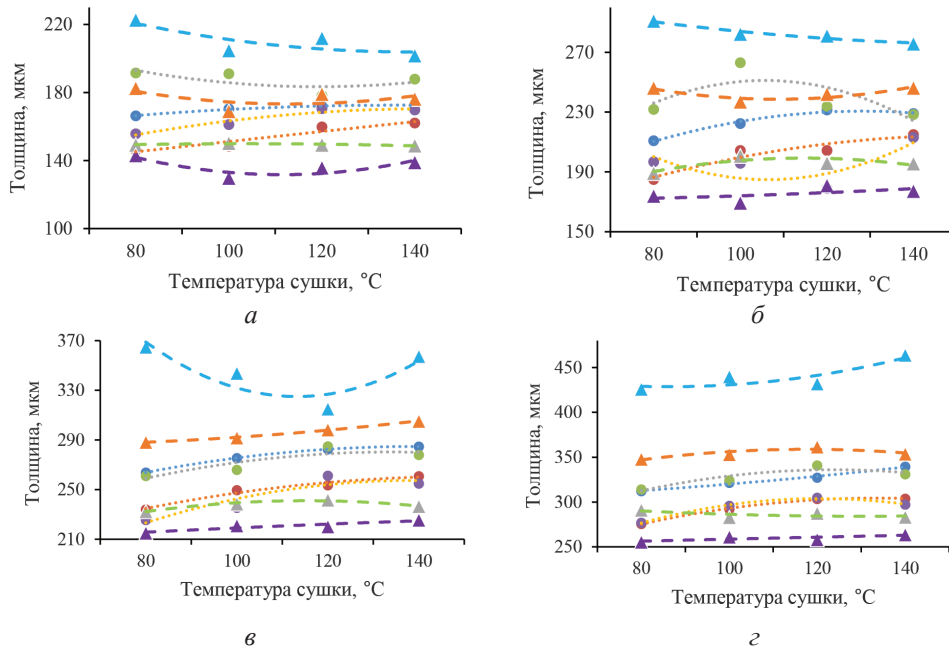


Рис. 6. Зависимость толщины образцов бумаги из беленой хвойной и лиственной целлюлозы разной массы 1 м<sup>2</sup> от температуры сушки: а – 60 г/м<sup>2</sup>; б – 80 г/м<sup>2</sup>; в – 100 г/м<sup>2</sup>; з – 120 г/м<sup>2</sup>

Fig. 6. Dependence of thickness of paper samples made of bleached softwood and hardwood pulp with different weight of 1 m<sup>2</sup> on drying temperatures: а – 60 g/m<sup>2</sup>; б – 80 g/m<sup>2</sup>; в – 100 g/m<sup>2</sup>; з – 120 g/m<sup>2</sup>

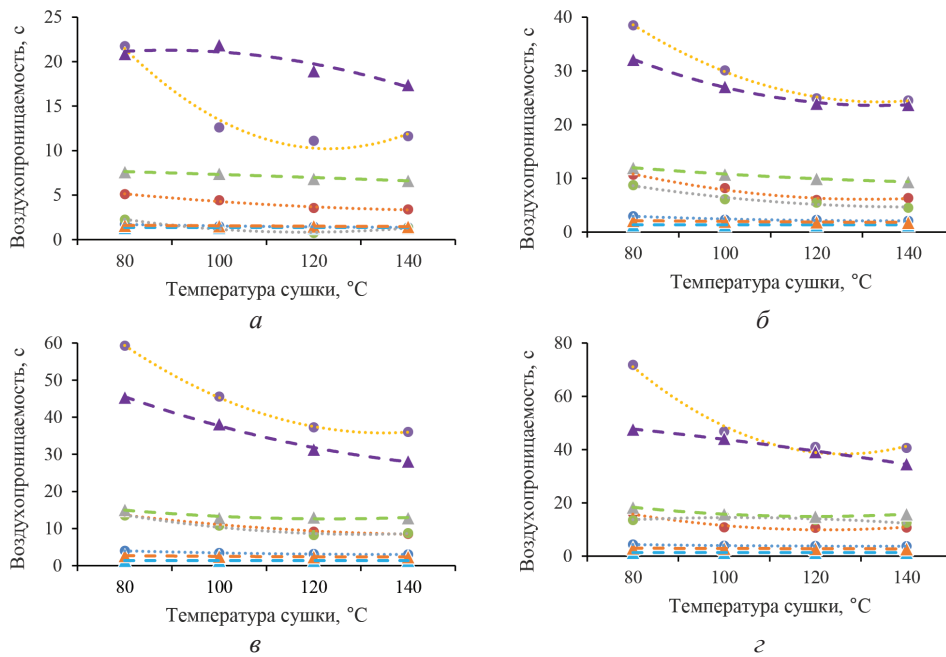


Рис. 7. Зависимость воздухопроницаемости образцов бумаги из беленой хвойной и лиственной целлюлозы разной массы 1 м<sup>2</sup> от температуры сушки: а – 60 г/м<sup>2</sup>; б – 80 г/м<sup>2</sup>; в – 100 г/м<sup>2</sup>; з – 120 г/м<sup>2</sup>

Fig. 7. Dependence of air permeability of paper samples made of bleached softwood and hardwood pulp with different weight of 1 m<sup>2</sup> on drying temperatures: а – 60 g/m<sup>2</sup>; б – 80 g/m<sup>2</sup>; в – 100 g/m<sup>2</sup>; з – 120 g/m<sup>2</sup>

Увеличение температуры сушки для образцов из лиственной беленой целлюлозы приводит к снижению разрушающего усилия (рис. 3), сопротивления продавливанию (рис. 4), сопротивления раздиранию (рис. 5), а также к росту толщины (рис. 6) и воздухопроницаемости (рис. 7) при всех заданных степенях помола целлюлозы и значениях массы 1 м<sup>2</sup> образцов. При повышении температуры сушки с 80 до 140 °С наблюдаются снижение разрушающего усилия на 7 %, сопротивления продавливанию на 10 %, сопротивления раздиранию на 11 % и рост воздухопроницаемости на 14 %. Наибольшее снижение разрушающего усилия (4 %), сопротивления продавливанию (4 %), сопротивления раздиранию (7 %), увеличение воздухопроницаемости (7 %) происходят при повышении температуры сушки с 80 до 100 °С. Рост температуры сушки с 120 до 140 °С практически не сказывается на механических свойствах: изменение составляет 1...3 %.

### Выводы

Анализ полученных данных о структурно-размерных и прочностных свойствах образцов бумаги позволил сделать следующие выводы.

1. Установлены закономерности, описывающие изменение структурно-размерных и прочностных свойств образцов бумаги из беленой сульфатной целлюлозы при увеличении температуры сушки с 80 до 140 °С. Подтверждено, что ключевыми факторами, определяющими степень изменения характеристик, являются степень помола и порода древесины.

2. Повышение температуры сушки с 80 до 140 °С приводит к росту интенсивности испарения воды из бумаги и, как следствие, разрыхлению структуры, что обуславливает увеличение воздухопроницаемости до 35 % и снижение прочностных показателей. Потеря прочности при этом может достигать до 15 % в зависимости от массы 1 м<sup>2</sup> и степени помола.

3. В диапазонах изменения температуры сушки 80...120 и 120...140 °С снижение качественных показателей происходит в большей степени при повышении температуры до 120 °С, в дальнейшем снижение сопротивления продавливанию, сопротивления раздиранию, разрушающего усилия минимально.

4. В процессе производства бумаги из беленой сульфатной целлюлозы при сокращении продолжительности сушки путем повышения ее температуры до 140 °С следует учитывать, что в этом случае произойдет потеря прочности бумаги, причем потеря будет больше при низкой степени помола.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бойков Л.М. Повышение эффективности сушки путем модернизации пароконденсатных систем бумагоделательных, картоноделательных машин и гофроагрегатов. СПб.: СПбГТУРП, 2015. 575 с.

Boykov L.M. *Improving the Drying Efficiency of Paper and Board Machines, and Corrugators*. Saint Petersburg, SPbSTUPP Publ., 2015. 575 p. (In Russ.).

2. Бойков Л.М., Прохоров Д.А., Ионин Е.Н. Повышение эффективности сушки на бумаго- и картоноделательных машинах // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2015. № 2. С. 66–69.

Boykov L.M., Prokhorov D.A., Ionin E.N. Improving Drying Efficiency on Paper and Board Machines. *Cellyuloza. Bumaga. Karton*, 2015, no. 2, pp. 66–69. (In Russ.).

3. 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 Pulp and Paper Industry of the Russian Federation. *Ucheny`e zapiski Rossijskoj Akademii predprinimatel'stva*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 43–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.24182/2073-6258-2022-21-2-43-49>

4. Прохоров Д.А. Общая характеристика и перспективы развития мировой целлюлозно-бумажной промышленности // Материалы III Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов ЦБП «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения», Санкт-Петербург, 8 нояб. 2021 г. Т. II. СПб.: ВШТЭ СПбГУИТД, 2022. С. 69–75.

Prokhorov D.A. General Characteristic and Development Prospects of the World Pulp and Paper Industry. *Proceedings of the 3rd International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of the Pulp and Paper Industry «Modern Pulp and Paper Industry. Actual Tasks and Promising Solutions»*, Saint Petersburg, 8 November 2021. Saint Petersburg, HSTE SPbSUITD Publ., 2022, pp. 69–75. (In Russ.).

5. Прохоров Д.А., Смолин А.С. Оценка эффективности сушильной части машин для выработки санитарно-гигиенических видов бумаги // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 2. С. 159–168.

Prokhorov D.A., Smolin A.S. Performance Assessment of the Drying Section of Machines for the Production of Tissue Paper Grades. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2020, no. 2, pp. 159–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-159-168>

6. Фляте Д.М. Свойства бумаги. 2-е изд., испр. и доп. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 648 с. Flyate D.M. *Paper Properties*. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1976. 648 p. (In Russ.).

7. Antonsson S., Mäkela P., Fellers C., Lindström M. Comparison of the Physical Properties of Hardwood and Softwood Pulps. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2009, vol. 24, no. 4, pp. 409–414. <https://doi.org/10.3183/npprj-2009-24-04-p409-414>

8. Björk E. *Production and Application of Fine Fractions Made of Chemical Pulp for Enhances Paperboard Strength*. Thesis for Licentiate Degree in Chemical Engineering. Sweden, Sundsvall, 2020. 41 p.

9. Boykov L.M., Prokhorov D.A., Ionin E.N., Lukianov S.A. Modernization of Steam and Condensate Systems of Drying Plants of Paper and Cardboard-Making Machines. *Proceedings of the 102-th International Scientific-Practical Conference “The Technical Progress of Humanity in the Context of the Continued Expansion of the Material Needs of Society”*. London, 2015, pp. 40–42.

10. Defraeye T., Houvenaghel G., Carmeliet J., Derome D. Numerical Analysis of Convective Drying of Gypsum Boards. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 55, no. 9-10, pp. 2590–2600. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.01.001>

11. Ham C.-H., Youn H.J., Lee H.L. Influence of Fiber Composition and Drying Conditions on the Bending Stiffness of Paper. *Bioresources*, 2020, vol. 15, no. 4, pp. 9197–9211. <https://doi.org/10.15376/biores.15.4.9197-9211>

12. Johansson A. *Correlations Between Fibre Properties and Paper Properties*. Master Thesis in Pulp Technology. Sweden, KTH Publ., 2011. 49 p.

13. Karlsson H. *Some Aspects on Strength Properties in Paper Composed of Different Pulps*. Licentiate thesis. Sweden, Karlstad, 2007. 57 p.

14. Karlsson H., Rinnevu T. *Fibre Guide: Fibre Analysis and Process Applications in the Pulp and Paper Industry: A Handbook*. Sweden, Kista, AB Lorentzen & Wettre Publ., 2006. 120 p.
15. Meltzer F.P. *Technologie der Zellstoffmahlung*. Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften. Germany, Aachen, 1994. 148 p. (In German).
16. Miller T., Kramer C., Fisher A. *Bandwidth Study on Energy Use and Potential Energy Saving Opportunities in US Pulp and Paper Manufacturing*. Washington, 2015. 108 p.
17. Mäkelä P. Effect of Drying Conditions on the Tensile Properties of Paper. In *Advances in Pulp and Paper Research. Proceedings of the 14th Fundamental Research Symposium, Oxford, 2009*. FRC, Manchester, 2018, pp. 1079–1094.
18. Poirier N., Pikulik I. The Effect of Drying Temperature on the Quality of Paper. *Drying Technology*, 1997, vol. 15, no. 6-8, pp. 1869–1879. <https://doi.org/10.1080/07373939708917333>
19. Wahlström T. *Influence of Shrinkage and Stretch During Drying on Paper Properties*. Licentiate Thesis. Sweden, Stockholm, 1999. 12 p.
20. Wahlström T. The Influence of Drying Time and Temperature Revisited. *Proceedings of the conference "Progress in Paper Physics", 2006*. Ed. by D.W. Coffin. USA, Miami University Oxford Publ., 2006, pp. 82–85.

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

---

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article