

УДК 676.017

**Я.В. Казаков<sup>1</sup>, Т.В. Воробьева<sup>1</sup>, Р.Г. Хромцова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>ЗАО «Нордавиа»

Казаков Яков Владимирович родился в 1966 г., окончил в 1990 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии целлюлозно-бумажного производства Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, член международного научного общества EUROMECH. Имеет более 170 научных работ в области деформативности и прочности целлюлозно-бумажных материалов.

E-mail: j.kazakov@narfu.ru



Воробьева Татьяна Валентиновна окончила в 1995 г. Поморский международный педагогический университет имени М.В. Ломоносова, соискатель кафедры технологии целлюлозно-бумажного производства Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Имеет 4 научные работы в области технологии и свойств целлюлозно-бумажных материалов.

E-mail: tvnaz1@rambler.ru



Хромцова Раиса Геннадьевна окончила в 2008 г. Архангельский государственный технический университет по специальности химическая технология целлюлозно-бумажного производства, зам. руководителя Центра управления полетами ЗАО «Нордавиа».

E-mail: r.hromtsova@nordavia.ru



### **ФОРМИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОУПРУГОСТИ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ**

Дана количественная характеристика деформационного поведения при растяжении образцов целлюлозно-бумажных материалов с различной композицией по волокну и при различной влажности, характерной для состояния материала в сушильной части БДМ. Показано, что снижение влажности материала приводит к росту по экспоненциальному закону не только прочности, но и жесткости, и вязкоупругости образцов.

*Ключевые слова:* сульфатная целлюлоза, сушка бумаги, вязкоупругость, прочность, деформативность, межволоконные связи, прочность волокна.

В настоящее время развитие технологии целлюлозно-бумажного производства направлено на повышение качества продукции при увеличении производительности бумагоделательных машин (БДМ) главным образом за счет повышения скорости. Одним из важнейших условий для обеспечения воз-

возможности повышения скорости БДМ является достижение необходимого уровня не только прочности, но и жесткости бумажного полотна во влажном состоянии. Становится все более очевидным, что именно вязкоупругие свойства определяют выбор режимов технологических операций и, самое главное, качество изготавливаемых целлюлозных материалов. Установление количественных закономерностей между влажностью бумаги с заданной композицией и проявлением ее вязкоупругих свойств в процессе сушки – необходимое условие оптимизации процесса.

Повышение внимания к вязкоупругим свойствам волокнистых материалов связано также с тем, что, в отличие от ранних работ, в которых исследователи стремились описать взаимозависимость главных физико-механических показателей, в настоящее время объектами изучения становятся процессы формирования свойств в ходе изготовления волокнистого целлюлозного материала [5]. Более глубокое исследование деформационных свойств волокнистых материалов на разных стадиях производственных процессов с использованием методов исследований, оценивающих кинетику деформирования образца, позволяет установить максимально допустимый уровень натяжения бумажного полотна в каждой сушильной группе при его свободном ходе между сушильными цилиндрами и определить оптимальные условия транспортировки бумажного полотна в сушильной части БДМ [6].

Формирование прочности бумаги в процессе сушки связывают главным образом с образованием межволоконных водородных связей [2, 5]. Современные представления о механизме образования в бумаге межволоконных связей при сушке были сформированы в конце XX в. [1–3, 5, 6] и предусматривали несколько стадий этого процесса. В первой стадии сушки волокно покрыто пленкой жидкости, и до сухости около 55 % сцепление между волокнами в бумаге обусловлено в основном силами трения; во второй стадии, при сухости бумажного полотна выше 60 %, свободная влага с поверхности волокон исчезает, но еще остается во внутренних капиллярах, начинается формирование водородных связей между волокнами; в третьей стадии удаления связанной влаги, оставшейся в стенках волокон и в микрокапиллярах, т.е. ниже точки насыщения волокна (абс. влажность ~ 30 %), начинается усадка самих волокон, а следовательно, и бумаги, в ней заканчивается формирование межволоконных связей, и она приобретает прочность.

Таким образом, результаты исследований прошлых лет [1, 2, 5] показали решающий вклад межволоконных связей в формирование прочности структуры целлюлозно-бумажного материала.

Среди факторов, определяющих прочность готовой бумаги, важнейшая роль принадлежит межволоконным связям, прочности волокна, плотности структуры и длине волокна [3, 5]. Рассмотрение формирования этих факторов в процессе сушки и их влияния на деформационное поведение и вязкоупругость материала позволит получить новую информацию для понимания и объяснения происходящих явлений.

Для количественной оценки формирования деформационных, вязкоупругих и прочностных свойств целлюлозно-бумажных материалов в процессе сушки нами был проведен лабораторный эксперимент, в котором использованы 4 вида производственной сульфатной целлюлозы: небеленая хвойная (НС-1), беленая хвойная (ХБ-1), беленая лиственная (ЛС-1), небеленая лиственная, высушенные в лабораторных условиях.

Образцы с различной влажностью получены за счет варьирования продолжительности сушки отливок в сушильной камере листоотливного аппарата ЛА-3. Масса высушенных отливок составляла  $100 \text{ г/м}^2$ , степень помола  $30^\circ \text{ШР}$ . Ориентировочный контроль влажности осуществляли по изменению массы отливок. Отливки с различной влажностью (от 5 до 60 %) выдерживали в герметично закрытом полиэтиленовом пакете для выравнивания влажности, через сутки у них определяли влажность и выполняли испытания.

При оценке вязкоупругих свойств материала были проведены испытания на растяжение на лабораторном испытательном комплексе, включающем разрывную машину Тестсистема-101 и ПЭВМ. Для образцов размерами  $50 \times 40 \text{ мм}$ , у которых предварительно была измерена толщина, выполнены испытания на растяжение с постоянной скоростью  $10 \text{ мм/мин}$  с получением и математической обработкой графиков зависимости нагрузка–удлинение ( $F-\Delta l$ ) и напряжение–деформация ( $\sigma-\epsilon$ ) [4]. В результате получен спектр характеристик, оценивающих свойства материала в упругой зоне, зоне замедленной упругости и зоне предразрушения. Кроме того, для учета вклада в поведение листа прочности волокон и межволоконных сил связи проведены испытания на растяжение при нулевом расстоянии между зажимами образцов шириной  $15 \text{ мм}$ , которые позволили оценить собственную прочность волокон, а также определены межволоконные силы связи по Иванову ( $F_{св}$ ) на 2-слойных образцах шириной  $25 \text{ мм}$ .

Полученные зависимости напряжение–деформация представлены на рис. 1. При увеличении влажности не только снижается прочность и жесткость образцов, что закономерно, но и уменьшается упругая зона деформирования и увеличивается зона предразрушения. Способность к растяжению, характеризуемая деформацией разрушения, имеет свое максимальное значение в диапазоне влажности  $18 \dots 24 \%$ . Данные закономерности наблюдаются как у беленых образцов, так и у небеленых. За счет того, что толщина образцов при уменьшении влажности также снижается, зависимости напряжение–деформация и нагрузка–удлинение имеют похожий характер, т.е. влияние толщины в данном случае не имеет решающего влияния на форму кривой.

Из-за того, что при изменении влажности характеристики прочности резко отличаются друг от друга в одном ряду для каждого вида материала, для более точной оценки изменения формы кривых были рассчитаны и построены зависимости  $\sigma-\epsilon$  в процентах от максимального (рис. 2).

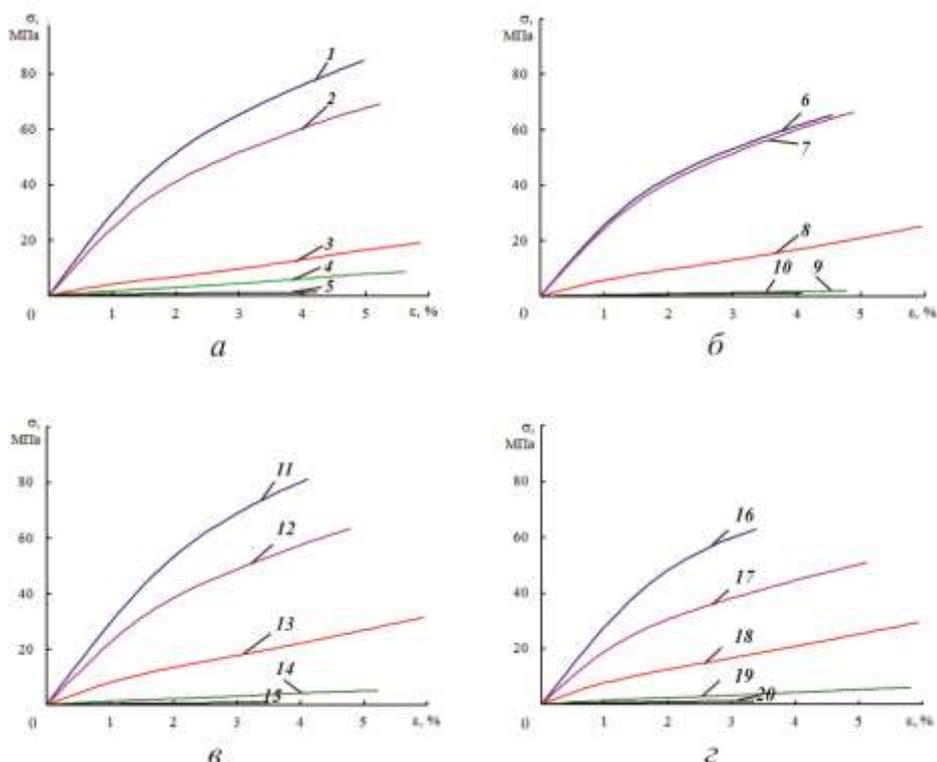


Рис. 1. Графические зависимости напряжение–деформация ( $\sigma$ – $\epsilon$ ) образцов целлюлозы лабораторного изготовления с различной влажностью  $w$ : *а* – хвойная небеленая; *б* – хвойная беленая; *в* – лиственная небеленая; *г* – лиственная беленая; 1, 7, 11 –  $w = 6,5$  %; 2 – 7,1; 3 – 24,0; 4 – 27,0; 5 – 61,0; 6 – 5,0; 8 – 19,0; 9 – 51,0; 10 – 54,0; 12 – 11,0; 13 – 23,0; 14 – 38,0; 15 – 52,0; 16 – 5,5; 17 – 10,0; 18 – 18,0; 19 – 28,0; 20 – 48,0 %

У всех образцов целлюлозы с влажностью 20...40 % (кривые 3 и 4) кривые деформирования отличаются по форме: в зоне предразрушения четко наблюдаются участки упрочнения структуры, что выражается в увеличении угла наклона кривой в процессе растяжения, т. е. при данной влажности, в условиях слабо сформированных межволоконных связей, происходит повышение жесткости материала за счет сопротивления трению при вытаскивании волокон (имеется в виду – в процессе разрушения испытуемого образца при воздействии на него нагрузка). Это отличается от поведения сухих образцов, у которых зона упрочнения отсутствует. Участки с упрочнением наблюдается независимо от вида целлюлозы.

Для образцов с большой влажностью размер зоны предразрушения, в которой кривая практически прямолинейна, существенно выше, т. е. при вытаскивании волокон из влажной структуры жесткость материала остается примерно постоянной в отличие от сухого материала, где жесткость непрерывно уменьшается за счет разрыва связей. При этом сохраняется целостность влажного материала при больших деформациях.

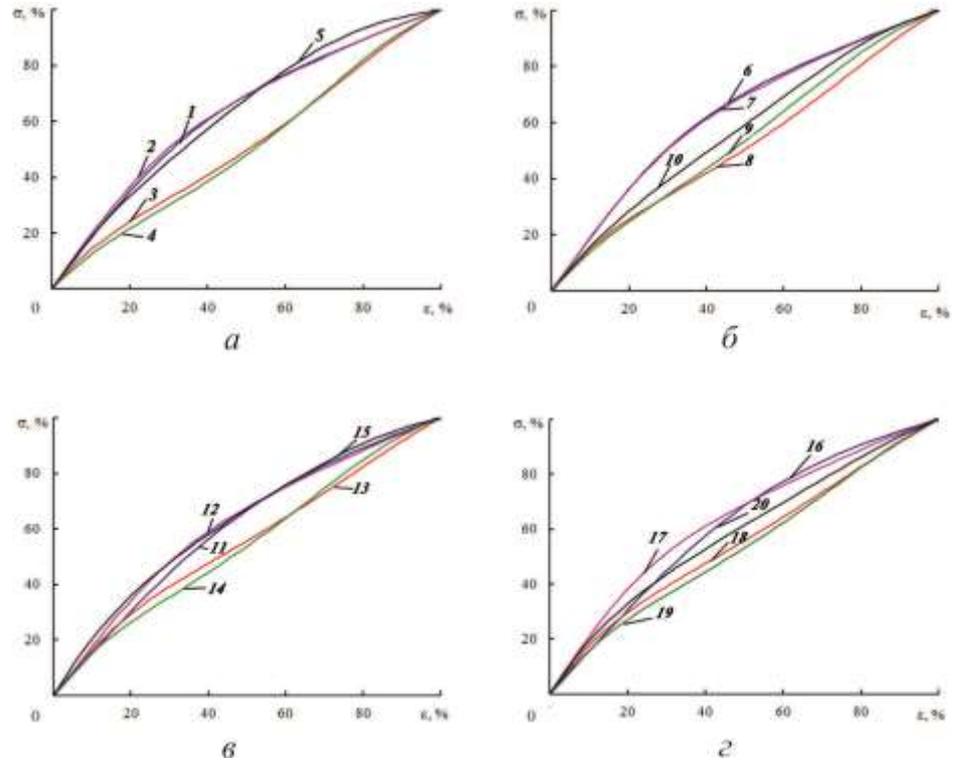


Рис. 2. Изменение в процессе сушки формы зависимости  $\sigma$ – $\varepsilon$  (в процентах от максимального) для образцов целлюлозы лабораторного изготовления (см. обозначения на рис. 1)

Влияние длины волокна на деформационное поведение при растяжении зависит от влажности. Если для сухих материалов из лиственных волокон при влажности 5...6% характерны более низкая прочность и меньшая растяжимость по сравнению с хвойными, то при влажности 20...25% различия в растяжимости и прочности лиственных и хвойных образцов минимальны. При влажности 50...60% (как после прессовой части) длина волокон влияет в большей степени на растяжимость, в меньшей – на прочность.

Сравнивая поведение небеленых и беленых образцов, необходимо отметить, что отбелка сказывается в большей степени на прочности и в меньшей степени на растяжимости недосушенных образцов. Это связано с тем, что прочность влажных образцов определяется в основном силами механического трения сцепления волокон, а влияние межволоконных сил связи проявляется при достижении сухости более 80%, т.е. с точки зрения сопротивления растаскиванию поведение беленых и небеленых волокон отличается мало, различия проявляются при формировании межволоконных сил связей, которые зависят от химического состава материала.

В результате математической обработки кривых  $\sigma$ - $\epsilon$  были рассчитаны характеристики деформативности и прочности и построены их зависимости от сухости образцов (рис. 3). Для выяснения причинно-следственных закономерностей графики дополнены данными для межволоконных сил связи образцов по методу Иванова ( $F_{cb}$ ) и нулевой разрывной длины ( $L_0$ ).

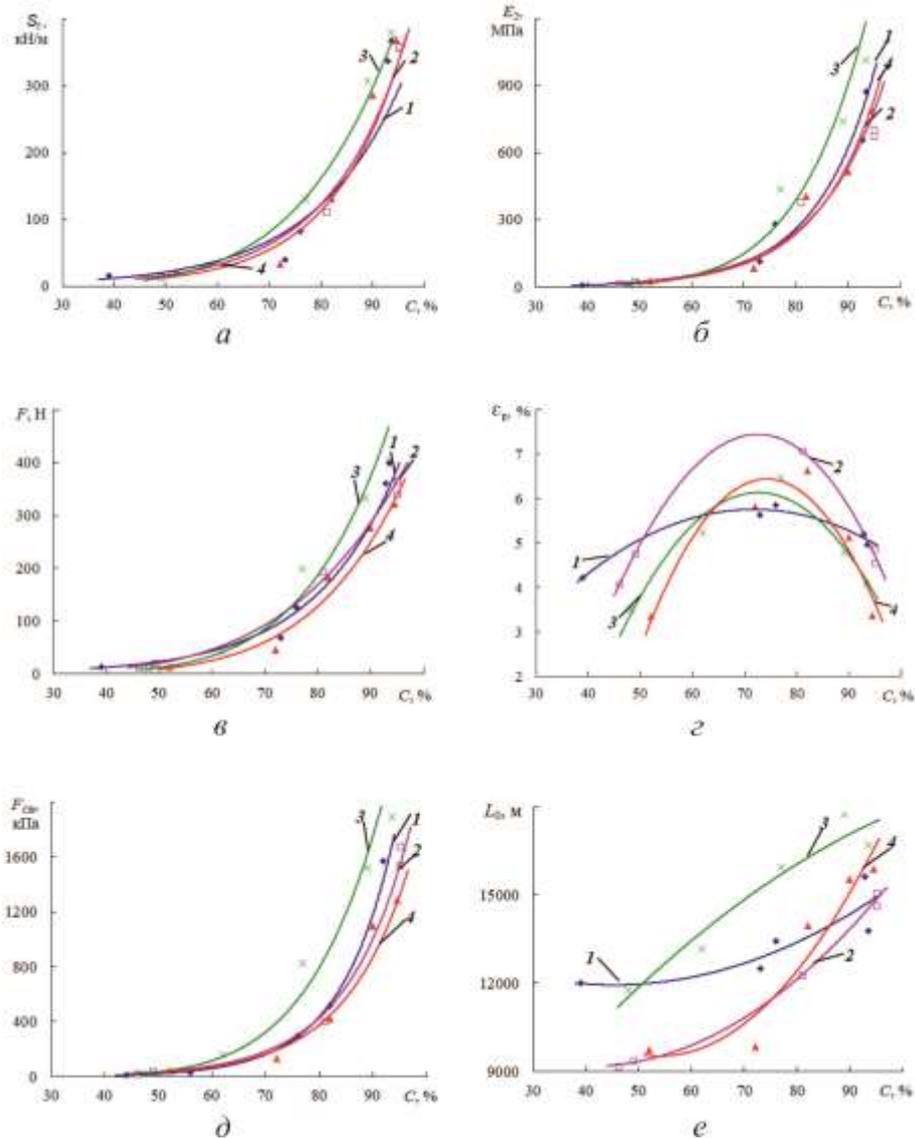


Рис. 3. Формирование прочностных характеристик лабораторных образцов целлюлозы в процессе сушки: 1 – хвойная небеленая; 2 – хвойная беленая; 3 – лиственная небеленая; 4 – лиственная беленая; а – жесткость при растяжении  $S_2$ ; б – модуль упругости в области предразрушения  $E_2$ ; в – разрушающее усилие  $F$ ; г – деформация разрушения  $\epsilon_p$ ; д – межволоконные силы связи  $F_{cb}$ ; е – нулевая разрывная длина  $L_0$

Для большинства характеристик (рис. 3, *a–в,д*) зависимость имеет экспоненциальный характер и практически полностью соответствует зависимости для межволоконных сил связи (рис. 3, *д*).

Увеличение собственной прочности волокон (рис. 3, *е*) при росте сухости происходит в гораздо меньшей степени. У влажных образцов прочность волокна снижается за счет разрушения молекулами воды водородных связей между гидрофильными гемицеллюлозными компонентами, а целлюлоза с повышенной кристаллическостью не теряет своей прочности. В сухом состоянии прочность волокон в значительной степени определяется прочностью связей между целлюлозными и нецеллюлозными компонентами клеточной стенки. Существующие дефекты в стенке волокна могут быть «замазаны» или «скреплены» гемицеллюлозными комплексами, которые в сухом состоянии связаны прочно, а во влажном их прочность резко снижается. По соотношению «сухой» и «влажной» нулевой разрывной длины можно судить о степени дефектности волокон полуфабриката.

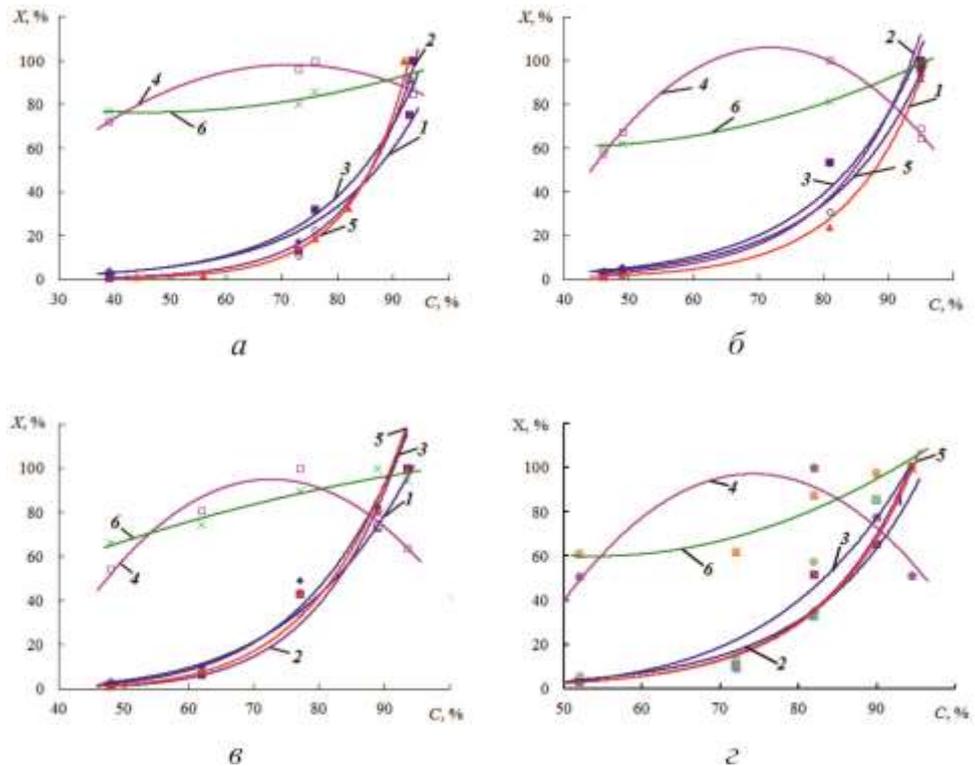


Рис. 4. Зависимость характеристик  $X$  (в процентах от максимального) образцов целлюлозы лабораторного изготовления от сухости отливок  $C$ : *a* – хвойная небеленая; *б* – хвойная беленая; *в* – лиственная небеленая; *г* – лиственная беленая; 1 – жесткость при растяжении  $S$ ; 2 – модуль упругости в области предразрушения  $E_2$ ; 3 – разрушающее усилие  $F$ ; 4 – деформация разрушения  $\epsilon_p$ ; 5 – межволоконные силы связи  $F_{св}$ ; 6 – нулевая разрывная длина  $L_0$

Особый полиномиальный характер имеют кривые изменения деформации разрушения при увеличении сухости образцов, которые проходят через максимум в интервале сухости 70...75 %. До этой сухости при разрушении растянутых образцов происходит вытаскивание волокон из структуры листа без повреждения самих волокон. При увеличении сухости материала начинают разрушаться не только межволоконные связи, но и некоторые волокна, что снижает деформацию разрушения.

Поскольку абсолютные значения у разных характеристик различаются в одной серии и для разных образцов весьма существенно, то для обеспечения возможности сравнения были рассчитаны относительные величины в процентах от максимального в серии. На рис. 4 представлены зависимости для разных характеристик одного материала.

Увеличение большинства характеристик деформативности и прочности в процессе сушки для всех материалов происходит похожим образом (изменение составляет больше чем на порядок) – по экспоненте, аналогично изменению межволоконных сил связи. При этом нулевая разрывная длина, оценивающая прочность волокна, для влажных образцов хвойной небеленой целлюлозы составляет 75...80 %, для остальных – 60...65 %.

#### *Выводы*

В результате проведенного эксперимента дана количественная характеристика деформационного поведения при растяжении с получением и математической обработкой кривых зависимости напряжение–деформация для образцов целлюлозно-бумажных материалов с различной композицией по волокну и при различной влажности, характерной для состояния материала в сушильной части БДМ. Установлено, что уменьшение влажности материала приводит к росту не только прочности образцов, но и характеристик жесткости и вязкоупругости, а также изменяет вид кривой деформирования и соотношение упругой и пластической составляющих деформации.

Показано, что рост большинства характеристик деформативности, прочности и вязкоупругости при уменьшении влажности образцов носит экспоненциальный характер, аналогичный изменению межволоконных сил связи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Апсит С.О., Клипенко А.В.* Бумагообразующие свойства волокнистых полуфабрикатов. М.: Лесн. пром-сть, 1972. 88 с.
2. *Иванов С.Н.* Технология бумаги. М.: Лесн. пром-сть, 1970. 696 с.
3. *Кларк Дж.* Технология целлюлозы (Наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка ее в бумагу, методы испытаний) / Пер. с англ. А.В. Оболенской, Г.А. Пазухиной. М.: Лесн. пром-сть, 1983. 456 с.
4. *Казаков Я.В., Комаров В.И.* Математическая обработка кривых зависимости напряжение–деформация, полученных при испытании целлюлозно-бумажных материалов на растяжение// Лесн. журн. 1995. №1. С.109–114.

5. *Фляте Д.М.* Технология бумаги: учеб. для вузов. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 440 с.

6. *Markku Karlsson.* Papermaking science and technology. Papermaking Part 2, Drying. Book 9, Drying Fapet Oy, Finland, 2000. Vol. 9. 496 p.

Поступила 11.01.13

*Ya.V. Kazakov<sup>1</sup>, T.V. Vorobyeva<sup>1</sup>, R.G. Khromtsova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

<sup>2</sup> Nordavia Ltd

**Formation of Viscoelastic Properties of Pulp-and-Paper Material  
in the Process of Drying**

The paper presents quantitative characteristics of deformation behaviour at stretching for pulp-and-paper samples with different fiber composition at various ranges of humidity similar to the state of the material in the drying part of paper machine. It is established that lower moisture content of the material, in addition to increasing durability of samples, also improves rigidity and viscoelasticity.

*Keywords:* kraft pulp, paper drying, viscoelasticity, strength, deformability, interfiber bonding, fiber strength.