

DOI: 10.15593/2224-9400/2018.1.10

УДК 676.2

Д.В. Слаутин, М.В. Теплоухова, Р.Э. АндраковскийПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ БУМАГИ,
ИЗГОТОВЛЕННОЙ ИЗ МАКУЛАТУРНОЙ МАССЫ**

Макулатура является источником вторичного волокна, пригодного в качестве сырья для бумажно-картонного производства и, в первую очередь, для тарного картона и упаковочных видов бумаги. В сравнении с первичными вторичные волокна характеризуются пониженными бумагообразующими свойствами (пониженной прочностью индивидуальных волокон; слабой способностью к образованию межволоконных связей и механическому сцеплению волокон в процессе формирования полотна).

Снижение бумагообразующих свойств макулатурных волокон неизбежно происходит в процессах первичного изготовления и переработки бумаги и картона в изделия, во время эксплуатации готовых изделий, а также в процессах подготовки макулатурной массы.

Снижение бумагообразующего потенциала вторичных волокон происходит в результате ороговения поверхности, термической деструкции, укорочения и ослабления индивидуальных волокон, а также снижения пластичности и способности волокон набухать. Бумагообразующие свойства макулатурной массы в значительной степени зависят от количества циклов переработки вторичного волокна.

Из литературных данных следует, что прочность бумаги, изготовленной из макулатурных волокон, можно повышать как на стадии подготовки макулатурной массы, так и на стадии производства бумаги и картона из макулатуры. Наиболее эффективным способом улучшения бумагообразующих свойств макулатурной массы является разработка и внедрение новых и совершенствования существующих технологий и оборудования.

Особое значение в производстве бумаги (картона) из макулатуры приобретает использование вспомогательных химических веществ (ВХВ). Резерв повышения прочности бумаги при добавке эффективных ВХВ оценивается в 15–20 %. Возрастающее значение для формирования с помощью ВХВ бумагообразующих свойств бумаги на основе вторичных волокон имеет осуществление контроля за физико-химическими и электрокинетическими параметрами бумажной массы.

Данная работа написана на основе обзора литературы об изготовлении бумаги и картона из вторичных волокон.

Ключевые слова: макулатура, вторичные волокна, восстановление бумагообразующих свойств, прочность бумаги, вспомогательные химические вещества, электрокинетические параметры.

D.V. Slautin, M.V. Teploukhova, R.E. Andrakovsky

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

IMPROVING THE STRENGTH OF PAPER FROM WASTE PAPER

Waste paper is a source of the secondary fiber suitable as raw materials for paper and cardboard production and, first of all, for container cardboard and packing types of paper. In comparison with primary secondary fibers are characterized by low paper-forming properties (low strength of individual fibers; weak ability to form fiber-to-fiber connections and mechanical adhesion of fibers in the process of forming the web).

Reduction of paper-forming properties of waste paper fibers inevitably occurs in the processes of primary production and processing of paper and cardboard in the product, during the operation of finished products, as well as in the preparation of waste paper.

Reduction of paper-forming potential of secondary fibers occurs as a result of surface keratinization, thermal degradation, shortening and weakening of individual fibers, as well as reduction of plasticity and ability of fibers to swell. Paper-forming properties of waste paper weight largely depend on the number of cycles of recycling of secondary fiber.

It follows from the literature data that the increase in the strength of paper made of waste fibers can be formed both at the stage of preparation of waste paper, and at the stage of production of paper and cardboard from waste paper. The most effective way to improve paper-forming properties of waste paper is the development and implementation of new and improvement of existing technologies and equipment.

Of particular importance in the production of paper (cardboard) from waste paper is the use of auxiliary chemicals (AC). The reserve of increasing the strength of the paper when adding effective AC is estimated at 15-20 %. An increasing importance for the formation of paper-forming properties of paper on the basis of secondary fibers with the help of AC is the monitoring of physical and chemical and electrokinetic parameters of the paper mass.

In this paper, a review of the literature in the field of paper and paperboard production on the basis of secondary fibers is given.

Keywords: *waste paper, secondary fibre, recovery paper-forming properties, the strength of paper, auxiliary chemicals, electro-kinetic parameters.*

Основным свойством бумаги и картона является прочность. В последние десятилетия различные виды бумаги и картона, особенно тароупаковочные виды, изготавливаются с использованием макулатуры. Учитывая нестабильность свойств и пониженную прочность вторичных волокон, можно понять особую актуальность повышения прочности картонно-бумажной продукции.

Повысить прочность бумажного (картонного) полотна без знания отличительных особенностей и причин снижения бумагообразующих свойств вторичных волокон, без понимания природы и механизма связеобразования между волокнами невозможно.

Основные различия первичных и вторичных волокон

В отличие от первичных полуфабрикатов волокнистая масса из макулатуры представляет собой многокомпонентную систему, которая характеризуется высокой полидисперсностью и неоднородностью по компонентному составу. Макулатура может состоять из смеси волокон различного происхождения и состояния (волокна беленых и небеленых видов целлюлозы, древесной массы, полуцеллюлозы, полученных из различных пород древесины различными способами с применением различных химикатов); набора включений неволокнистого характера и различной плотности, природы и происхождения (частицы наполнителя, типографской краски, связующих и проклеивающих веществ). При этом в макулатурной массе присутствуют включения, не только применяемые в композиции бумаги, но и попавшие при сборе, транспортировке и упаковке макулатуры, например, песок, скотч, канатно-веревочные материалы и т.д. [1–3].

Главное отличие вторичных волокон от первичных волокон – пониженные бумагообразующие свойства.

В результате прохождения технологических стадий первичного изготовления бумаги и картона (размол, прессование, сушка, отделка и т.д.), а также процессов переработки бумаги и картона (процессы гофрообразования, сушки гофрокартона) и подготовки макулатурной массы волокна приобретают новые физические свойства, которые являются причиной ухудшения бумагообразующих свойств вторичного волокна.

Вторичные волокна характеризуются следующими отличительными особенностями бумагообразующих свойств [4]:

1) пониженной прочностью индивидуальных волокон; слабой способностью к образованию межволоконных связей в процессе формирования полотна и механическому сцеплению волокон;

2) ухудшением способности волокон к набуханию, гидратации и внутреннему фибриллированию;

3) повышенной восприимчивостью к измельчению в процессе роспуска и размола и, как следствие, ухудшением фракционного состава;

Важным аспектом использования макулатуры в качестве сырья для бумажного производства является цикличность использования макулатуры (многократное использование макулатуры в процессе производства бумажно-картонной продукции). Увеличение циклов использования макулатуры сопровождается снижением бумагообразующей способности вторичных волокон, накоплением мелких волокон и ми-

неральных примесей в массе. Эта проблема является скрытой [5], так как на сегодняшний день невозможно определить количество производственных циклов с участием вторичного волокна, т.е. сколько раз макулатурные волокна подвергали роспуску, размолу, сушке и т.д.

Причины снижения бумагообразующих свойств вторичных волокон

В работах [6, 7] ухудшение бумагообразующих свойств вторичных волокон объясняется явлением «необратимого» ороговения, физический смысл которого заключается в снижении величины показателя вододержания волокнистой массой при центрифугировании. В результате ороговения часть функциональных групп гемицеллюлоз, участвующих в межволоконном связеобразовании, блокируются. Ороговение косвенно выражается в уменьшении способности волокон к набуханию и гидратации в процессе размола и аккумулялирования макулатурной массы перед подачей на машину. Кроме того, теряется прочность самого волокна, оно становится более хрупким и ломким.

Большое влияние на ухудшение бумагообразующих свойств волокна оказывает термическая деструкция, которая имеет место в процессах изготовления бумаги и картона. Изучение термодеструкции полисахаридов при сушке показывает [8], что полисахариды устойчивы к нагреванию примерно до температуры 100 °С, при дальнейшем ее повышении они начинают разрушаться со все возрастающей скоростью, при этом гемицеллюлозы более чувствительны к нагреванию, чем целлюлоза. Гемицеллюлозы аморфны, что объясняет их меньшую устойчивость к термической деструкции по сравнению с целлюлозой. Например, при температуре 120–140 °С начинается фрагментация макромолекул ксилана, что отрицательно сказывается на прочности бумаги.

Термодеструкция полисахаридов и волокон в целом происходит и в процессах подготовки макулатурной массы и, в первую очередь, при термодисперсионной обработке (ТДО). Горячая термодисперсионная обработка осуществляется при температуре 130–150 °С. Проведенные исследования [9] показали отрицательное влияние ТДО на прочностные показатели бумаги, изготовленной из вторичных волокон.

Технология переработки картона и бумаги для гофрирования в гофрокартон также включает высокотемпературные процессы. Температура гофроматериалов при прохождении через гофроагрегат может достигать 160–180 °С [10]. Учитывая, что большая часть тест-

лайнера и флютинга изготавливается из макулатуры или с ее добавлением, то процессы гофрообразования становятся наиболее значимыми с точки зрения снижения их бумагообразующих свойств.

Кроме явлений, связанных с воздействием температуры, исследователи [4, 11] выделяют еще одну группу процессов, ухудшающих бумагообразующие свойства вторичного волокна. Это процессы, связанные с роспуском и размолом, которые сопровождаются разрушением структуры волокна, что приводит к увеличению количества как мелких волокон, обрывков, так и наружных повреждений (сжатия, вмятины и скручивания). Как следствие, наблюдается ухудшение фракционного состава макулатурной массы – увеличивается доля коротковолокнистой фракции и снижается доля длиноволокнистой и средноволокнистой фракций [11]. Наряду с увеличением доли мелочи одновременно происходит и ее активное удаление в технологических процессах (провал волокна под сетку, удаление мелочи из потока с избыточной оборотной водой). Причина этого явления заключается в том, что наружные фибриллы частиц мелочи скручиваются или разрушаются, после чего частицы легко удаляются. Особенно это характерно для целлюлозы из лиственных пород древесины.

В работах [12, 13] отмечается, что снижению бумагообразующих свойств макулатурной массы способствуют частицы наполнителя, технологические добавки, связующие, частицы типографской краски и др., т.е. частицы, пассивные к образованию химических связей между волокнами. Связующие, используемые в композиции бумаги или картона, при повторной переработке макулатуры переходят в разряд «неактивных» компонентов, которые не способны образовывать связи с волокном. Часть этих компонентов не удаляется на стадиях подготовки макулатурной массы, а остается на целлюлозных волокнах, блокируя гидроксильные группы и тем самым снижая возможность образования межволоконных связей и, следовательно, бумагообразующие свойства волокон.

Пути восстановления бумагообразующих свойств вторичных волокон и повышения прочности бумаги на их основе

По сути, все стадии подготовки макулатурной массы направлены на сохранение и восстановление бумагообразующих свойств вторичных волокон с целью получения массы, качество которой конкурирует с качеством массы из первичных волокон. Полностью разница в качестве, в первую очередь прочности, не может быть преодолена, так как макулатурные волокна всегда более деструктивированы.

Анализ литературы [4, 7] показывает, что прочность бумаги, изготовленной из макулатурных волокон, можно повышать как на стадии подготовки макулатурной массы, восстанавливая бумагообразующие свойства вторичных волокон, так и на стадии производства бумаги и картона на их основе.

Схемы переработки макулатуры сложнее, чем схемы подготовки бумажной массы, что обусловлено отличительными особенностями вторичного сырья. Стадиями подготовки массы являются: разволокнение макулатуры, грубая и тонкая очистка, грубое и тонкое сортирование, фракционирование массы, дополнительный размол волокон или диспергирование массы.

Разволокнение макулатуры. Для эффективного роспуска необходимо использовать гидроразбиватели, специально предназначенные для работы с макулатурой, с правильно подобранными конструктивными элементами (тип ротора, количество направляющих ребер и т.д.) и режимом работы [1].

Конструктивные особенности гидроразбивателя определяют все последующие операции технологического процесса переработки макулатуры. Изначально эффективное разволокнение с полным разделением макулатурного сырья на отдельные волокна в гидроразбивателе сокращает количество используемого оборудования для подготовки макулатурной массы, а следовательно, уменьшает воздействие на волокна.

Очистка и сортирование. Задача этих операций – более полное удаление загрязнений различного характера. При этом загрязнения необходимо выводить из потока на более ранних стадиях переработки макулатуры, чтобы исключить их измельчение или изменение формы.

В современных схемах переработки вторичного волокнистого сырья следует применять фракционирование либо для разделения суспензии на длинноволокнистую и коротковолокнистую фракции, либо для отделения нуль-волокна с последующим удалением его из потока [14]. Нуль-волокна представляют собой ороговевшие фибриллы и мельчайшие обрывки волокон, которые по влиянию на процессы бумажного производства подобны зольным элементам.

Значительно повысить прочностные и деформационные характеристики бумажного листа, увеличить эффективность действия катионного крахмала, вводимого в качестве связующего позволяет удаление отработанного крахмального связующего из вторичного волокна [15].

Размол. На предприятиях по переработке макулатуры в большинстве случаев дополнительный размол используют. Однако ряд авторов считает [11], что это не очень оправдано, так как размол не всегда улуч-

шает бумагообразующие свойства, а в случае с макулатурой часто их снижает, что обусловлено значительным укорочением волокон и повышением жесткости бумажного листа. Кроме того, процесс размола является весьма энергоемким. В современных условиях на отечественных предприятиях доля энергетических затрат составляет не менее 50 % от себестоимости бумаги и картона. Поэтому повышение энергоемкости технологии изготовления бумаги и картона, в частности за счет более длительного процесса размола, снижает ее конкурентоспособность.

В ряде работ [1, 4, 11] отмечается, что целесообразно дополнительному размолу подвергать только грубую длинноволокнистую фракцию, отделенную в процессе фракционирования. При этом характер размола должен быть фибриллирующим (включая внутреннее фибриллирование) с минимальным укорочением волокна.

Следует понимать, что возможность улучшения бумагообразующих свойств вторичного волокна в процессах подготовки макулатурной массы ограничена. Эффективным, но дорогим ресурсом повышения прочности бумаги и картона на основе вторичных волокон является внедрение современных технологических решений и оборудования в производство бумаги и картона. Некоторые технические решения описаны в работе А.С. Смолина с соавторами [16].

Для картоноделательных машин неизменным условием повышения прочности материала является многослойное формование. Многослойные материалы всегда прочнее однослойных при сравнимой композиции. При выпуске картона на основе вторичных волокон этот тезис подтверждается неоднократно, многослойное формование материалов из макулатуры дает значительно больший эффект в сравнении с производством материалов из первичных волокон.

Весьма эффективно в производстве материалов на основе вторичных волокон использование прессовых частей картоноделательных и бумагоделательных машин с одним или несколькими прессами с широкой зоной прессования. При этом наряду с увеличением прочности бумажного и картонного полотна благодаря уплотнению волокон во влажной среде появляется возможность достичь требуемой сухости бумаги и картона с сохранением на определенном уровне толщины материала, что крайне важно для обеспечения показателей жесткости картона.

В значительной мере повышению качества бумаги и картона на основе вторичного волокна способствует работа современного пленочного клеильного пресса. Использование эффективных клеевых систем не только обеспечивает водостойкость и прочность поверхности материала, но

и способствует упрочнению материала в целом благодаря диффузии связующего реагента на определенную глубину в наружных слоях бумаги и картона и образованию дополнительных межволоконных связей. Возможный потенциал увеличения показателей прочности и жесткости материалов на основе вторичных волокон благодаря созданию современных технологических потоков может составить 35–40 %.

В последние годы особое значение в производстве бумаги (картона) из макулатуры приобретает использование связующих ВХВ, предназначенных для интенсификации межволоконного связеобразования, следствием чего является повышение прочности. В качестве связующих предлагается целый ряд химических реагентов, как правило, полимерного характера.

Связующие химические вещества для бумажного производства

Применение химических вспомогательных веществ для улучшения бумагообразующих свойств волокнистого сырья, особенно вторичного, используемого в производстве бумаги и картона, весьма актуально для российской бумажной промышленности по экономическим причинам. В настоящее время у большинства небольших и средних предприятий, выпускающих картонно-бумажную продукцию на основе вторичных волокон, отсутствуют средства для комплексной замены или модернизации оборудования для подготовки макулатурной массы и изготовления из нее продукции. Поэтому химические добавки и особенно связующие вещества играют в повышении качества продукции из 80–100%-ной макулатуры решающую роль [17].

В настоящее время для повышения прочности бумажного полотна наиболее широко применяется крахмал. Это связано как с его уникальными функциональными свойствами, так и с низкой ценой, природным происхождением и экологической чистотой. При этом в производстве бумаги и картона все больший удельный вес занимают модифицированные крахмалы (катионный и анионный). Нативный крахмал редко применяется в качестве связующего вещества из-за присущих ему недостатков.

В отличие от нативного крахмала, который удерживается в массе на 10–20 %, степень удержания катионных крахмалов достигает 95 % [8]. Катионные крахмалы не только повышают прочность бумаги, но при определенных условиях способны значительно повысить удержа-

ние мелочи на сетке бумагоделательной машины (БДМ) и естественно снизить содержание взвешенных веществ в подсеточной воде, улучшить работу отстойников для избыточной оборотной воды, а также имеют ряд других преимуществ.

Прочность бумаги при введении крахмала повышается, так как крахмал обладает сродством к целлюлозе и в набухшем состоянии, подобно гемицеллюлозам, устанавливает дополнительные водородные связи через свои гидроксильные группы с целлюлозой [18].

Наиболее часто катионные крахмалы применяются при изготовлении флутинга из 80–100%-ной макулатуры для повышения сопротивления продавливанию, торцевому и плоскостному сжатию, сжатию кольца, а также для повышения величины наполнения бумаги без снижения ее прочности [19].

Серьезным недостатком применения катионного крахмала является ограничение его. В результате добавления катионного крахмала к волокнам происходит нейтрализация анионного заряда на целлюлозных волокнах и наполнителях и, в конечном итоге, перезарядка, которая приводит к суммарному катионному заряду. Этого не следует допускать, поскольку перезарядка ведет к резкому снижению производительности мокрой части бумагоделательной машины, ухудшению общего удержания и формования [20].

Анионный крахмал, содержащий группы, способные придавать отрицательный заряд в водной среде при заданном значении рН, реже применяют при проклейке бумаги из-за низкой степени его удержания на волокне.

Удержание анионного крахмала на волокнах бумаги осуществляется в слабокислой среде в присутствии соединений алюминия. Катионный крахмал – вначале оседает и удерживается на волокнах за счет электростатического взаимодействия с отрицательно заряженной целлюлозой.

Кроме перечисленных выше, достоинством крахмала является способность растворяться в воде, довольно высокая температурная устойчивость и механическая стабильность.

Но есть и недостатки. Использование крахмала в производстве приводит к повышению слизееобразования и загрязнению технологических потоков продуктами жизнедеятельности микроорганизмов, снижению белизны, непрозрачности и лоску бумаги, вспениванию меловальной пасты.

В качестве синтетических связующих наиболее часто применяют водные дисперсии латексов, элементарным звеном которых является бутадиен-стирол, бутадиен-акрилонитрил, винилацетаты, акрилаты и др.

За исключением поливинилового спирта все синтетические связующие являются гидрофобными веществами, устойчивыми к воздействию энзимов и микроорганизмов [21].

Недостатками использования синтетических связующих являются их высокая чувствительность к изменению температуры и ограниченная механическая стабильность, что создает большие трудности при их транспортировке зимой и ограничивает срок хранения. Кроме того, обычно они дороже, чем натуральные связующие.

Ведущими фирмами, производящими химикаты для бумажной промышленности, являются «Hercules», «Kemira», «СКИФ Спешиал Кемикалз».

Механизм связеобразования и упрочнения бумаги

Связеобразование в полотне является ключевым моментом в повышении прочности бумаги (картона) и зависит от степени разработанности волокна, от их формы и размеров, от площади контактов волокон, а также наличия и природы химических веществ в бумажной массе.

Согласно выдвинутым теориям [18, 22], силы, связывающие волокна в листе бумаги, имеют физико-химическую и электростатическую природу и возникают между свободными поверхностными гидроксильными группами целлюлозных волокон при их взаимном сближении. Известная роль отводится также силам трения. Механизм образования сил связи, объединяющих волокна в бумажный лист, сложен. На сегодняшний день признанной является теория водородной связи.

Водородная связь между волокнами в бумаге возникает при взаимодействии атомов водорода гидроксильной группы одного волокна с атомом кислорода гидроксильной группы на поверхности соседнего волокна. Схематически связеобразование показано на рис. 1 [23].

Образование водородных связей между растительными волокнами происходит в три стадии. На первой стадии прочность бумажного полотна с сухостью ниже 25 % формируется только за счет сил поверхностного натяжения воды. При сухости в пределах 30–60 % поверхность волокон покрыта адсорбированными молекулами воды, но водородные связи между волокнами по-прежнему отсутствуют, тем не менее прочность бумажного полотна увеличивается. Этот факт объясняется, во-первых, ростом сил трения между волокнами из-за их сближения под влиянием сил поверхностного натяжения воды. Во-вторых, мономолекулярный слой воды, через который волокна связываются, гораздо

прочней, чем полимолекулярный слой, при котором количество воды превосходит мономолекулярный слой (см. рис. 1).

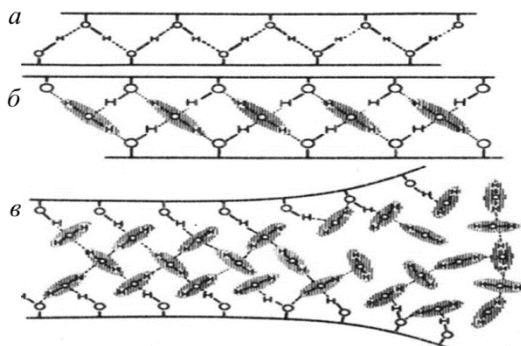


Рис. 1. Схема образования водородных связей между волокнами: *a* – водородные связи; *б* – мономолекулярная прослойка воды; *в* – полимолекулярная прослойка воды

В третьей стадии обезвоживания бумажного полотна при сухости больше чем 65 % образуются водородные связи, количество которых возрастает с увеличением сухости, и прочность бумаги стремительно увеличивается.

Энергия водородной связи составляет 4,5 ккал/моль, а расстояние между гидроксильными группами, при котором она образуется, составляет 2,7 А [18]. Наряду с водородной связью в бумаге действуют и силы Ван-дер-Ваальса, однако их энергия связи не может обеспечить достаточную прочность бумаги.

Некоторые исследователи высказывают предположение, что гемицеллюлозы активно участвуют в образовании водородных связей. Гемицеллюлозы, обладая более короткими, чем целлюлоза, цепями и ветвистым строением, способны очень сильно набухать, образуя подобие коллоидного раствора на поверхности фибрилл целлюлозы. В таком состоянии они, обладая известной степенью подвижности, могут перемещаться и сорбироваться на поверхности волокон, что облегчает образование межволоконных связей между микрофибриллами соседних волокон через гидроксильные группы. В начале при прессовании мокрого листа эта связь устанавливается через гидратированную пленку воды на поверхности микрофибрилл, затем при удалении воды сушкой – через мономолекулярную пленку воды с более четкой ориентацией гидроксильных групп и, наконец, через водородную связь при полном удалении воды сушкой и сближении поверхностей волокон силами поверхностного натяжения воды [18].

Авторы работ [21, 24] относят технологию изготовления бумаги и картона к нанотехнологии и с этой точки зрения рассматривают механизм образования связей между волокнами.

К нанотехнологиям относят процессы с участием частиц размером $1 \cdot 10^{-9}$ – $1 \cdot 10^{-7}$ м (имеющих эти размеры хотя бы в одном направлении), которые приводят к созданию новых продуктов, приданию новых свойств продуктам или существенному улучшению уже имеющихся у них свойств (не менее 20 %). В технологии изготовления бумаги принимают участие объекты малых размеров – от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-12}$ м. Таким образом, химическая технология бумаги имеет наносоставляющую.

Анализ объектов малых размеров в волокне и бумаге (таблица), которые участвуют и могут участвовать в нанопроцессах, подтверждает потенциальную перспективность применения нанотехнологии в производстве бумаги [25].

Размеры наноэлементов волокна, бумаги и процессы с их участием

Наноэлементы волокна и бумаги	Размеры, нм · 10 ⁻⁹	Процессы
Фибриллы (ширина)	400	Гидродинамические и гидромеханические процессы технологии, обуславливающие внутреннее и поверхностное фибриллирование волокна до наноразмеров
Микрофибриллы: ширина длина	3,5–10 50–60	
Связи: Ван-дер-Ваальса водородная (длина/расстояние взаимодействия) ковалентная	0,79 0,24–0,27/ 0,17–0,60 1,3	Образование сил связи между волокнами с участием поверхности волокна, фибрилл
Истинные (молекулярные) растворы	< 1	Взаимодействие на внутренней и внешней поверхности волокна, фибрилл и микрофибрилл
Дисперсии: ультрамикрогетерогенные коллоидные (микрогетерогенные) грубодисперсные (суспензии)	1–100 100–10 000 > 10 000	
Водные системы синтетических полимеров	1–1000	
Поры: микропоры мезопоры макропоры	< 2 2–50 > 50	Образование внутренней поверхности волокна и бумаги, на которой протекают химические взаимодействия

Поскольку суспензия бумажной массы относится к коллоидно-химическим структурам, то по современным воззрениям ее следует относить к нанотехнологии. Так, например, образование одного из основ-

ных элементов в бумажном листе – связей между волокнами – происходит на наноуровне. Образующиеся водородные связи (Н-связи) имеют длину 0,24–0,27 нм (взаимодействие на расстояниях 0,17–0,60 нм) [21].

Суть нанотеории повышения прочности бумаги и картона заключается в следующем. Волокно в воде имеет отрицательный заряд. При введении в массу положительно заряженного полимера происходит его электростатическое притяжение поверхностью волокна. В итоге понижается электроотрицательность массы, вплоть до перезарядки поверхности и значительного повышения положительного заряда массы. Далее происходит внесение в массу отрицательно заряженного полимера, который начинает притягиваться к комплексу волокна с катионным полимером. Чередую добавление в массу отрицательно и положительно заряженных полимеров, можно поочередно наслаивать макромолекулы полимеров на поверхности волокна, тем самым формируя поликатионный-полианионный двойной слой и от слоя к слою повышать термодинамический и ζ -потенциал волокна.

На рис. 2 наглядно показан механизм попеременного наслаивания катионного PAA и анионного PSS полимеров [21].

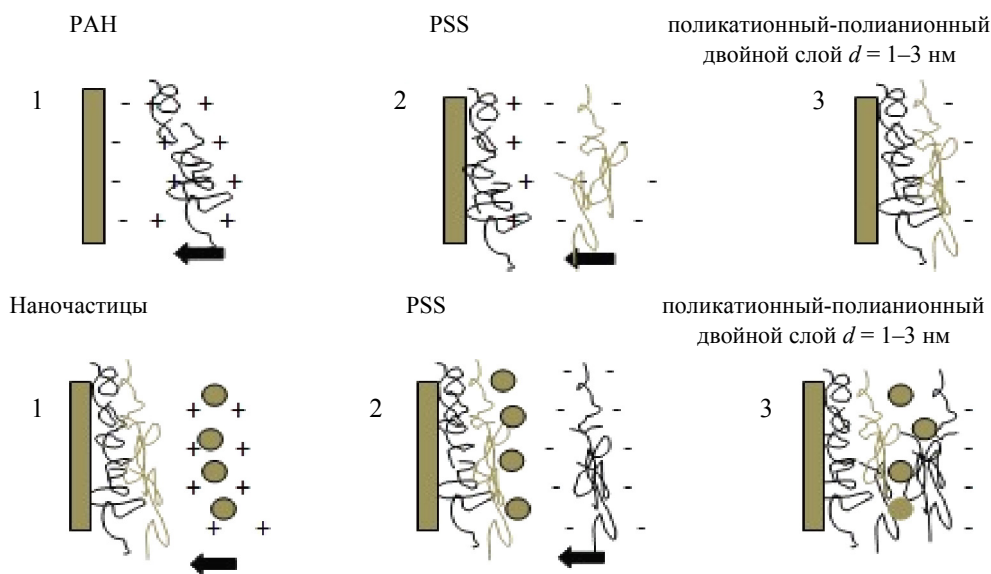


Рис. 2. Механизм построения полианионного-поликатионного двойного слоя на поверхности волокна с применением катионного полимера полиаллиламиногидрохлорида (Polyallylamine hydrochloride (ПАА)) и анионного полимера полистиролсульфоната натрия (Polystyrene sulfonat (PSS))

Монослои каждого полимера имеют толщину 1–3 нм, а можно построить поликатионный-полианионный двойной слой в пределах 5–50 нм. Реализуя подобный механизм, можно от слоя к слою повышать электростатическое притяжение волокон друг к другу и тем самым повышать прочность бумаги.

Таким образом, последовательное наложение полимеров увеличивает толщину ДЭС и снижает возможность образования водородной связи, взамен которой образуются более сильные электростатические связи.

Контроль электрокинетических параметров бумажной массы

Поведение волокнистых материалов в воде определяется не только их химическим строением, но в значительной степени особенностями их физической структуры. Наличие отрицательного ζ -потенциала на поверхности волокна характерно для растительных волокон, причем электрический потенциальный барьер достигает такой величины, что в нормальных условиях исключается возможность приближения любого отрицательного иона к волокну. За последние несколько десятилетий в отечественном и мировом производстве бумаги произошли серьезные изменения, связанные с переходом от кислой к слабонефтральной среде в основных технологических процессах изготовления бумаги – массоподготовки и отлива. Снизилось использование минеральных коагулянтов, увеличилось использование различных синтетических полимеров, значительно выросла доля использования вторичного волокна и полуфабрикатов высокого выхода при снижении использования целлюлозы. Задача регулирования их дозировки и получения продукции со стабильными свойствами, общая экономия сырья и энергии, ужесточение экологического законодательства заставляют производителей бумаги пересматривать принятые методы анализа волокнистых полуфабрикатов и широко использовать дополнительные параметры, в том числе электрокинетические параметры бумажной массы [26]. В последнее время контролю изменений этих параметров стали уделять повышенное внимание, что привело к необходимости разработки приборов [27] для их измерения и оценки особенностей воздействия внешних факторов. Получение такой информации повысит точность регулирования параметров мокрой части БДМ.

Характер взаимодействия в этой системе определяется, прежде всего, межфазными характеристиками самих компонентов, самыми важными из которых являются удельная поверхность и заряд поверх-

ности. Волокнистая мелочь, наполнитель (при определенных условиях), нативный крахмал, смоляной клей, частицы печатной краски, все эти вещества несут при нормальных условиях отрицательный заряд, это снижает их удержание на целлюлозных волокнах, тоже заряженных отрицательно.

Нежелательным компонентом бумажной массы являются интерферирующие вещества, или анионные загрязнения [28]. Эти вещества приходят из волокнистого полуфабриката, потока брака, макулатуры в микроколичествах и накапливаются в оборотной воде. Эти вещества являются высокомолекулярными ионогенными растворенными соединениями, отрицательно заряженными олигомерами и полимерами, неионными гидроколлоидами, уроновыми и галактуроновыми кислотами. Состав этой группы веществ может быть разнообразным, она включает в себя глюкуроновые и галактуроновые кислоты, глюкопротеины, лигнаны, смоляные и жирные кислоты, крахмал и прочие. Анионные загрязнения снижают или нивелируют действие добавляемых полезных химикатов, что приводит к затруднениям нормального функционирования основных процессов производства бумаги. Для оценки содержания интерферирующих веществ в потоке бумажной массы оперируют показателем катионной потребности (КП) [29], оценка уровня которого относится к важному этапу подготовки бумажной массы и определяет оптимальную дозировку полезных реагентов. Повышение этого показателя говорит о повышении активности анионных загрязнений в потоке, что при определенной величине приводит к ухудшению процесса удержания и обезвоживания бумажной массы, усилению образования отложений на одежде БДМ, а также повышению колебаний влажности бумажного полотна. К сожалению, этот показатель не всегда отражает мутность подсеточной воды. Достижение некоего критического значения содержания анионных загрязнений приводит к ухудшению потребительских свойств и повышению себестоимости бумажной продукции.

При анализе мокрой части БДМ определяют не только показатель КП, но и ζ -потенциал волокон [30, 31]. Оба показателя дополняют друг друга, а информация, полученная с их помощью, является более ценной для предсказания действия химических реагентов, чем информация, полученная только по одному из них. Поверхностные электрохимические явления сказываются на всех процессах подготовки бумажной массы, а также на формировании макроструктуры бумажного полотна и на конечных свойствах товарного продукта. Такое всесто-

роннее влияние электрокинетических явлений на процессы бумажного производства замечено достаточно давно, а проводить соответствующие измерения начали еще с середины прошлого столетия [32].

При ζ -потенциале, близком к нулю, чаще всего наблюдается максимальное удержание бумажной массы, при этом также должно улучшаться обезвоживание. Снижение показателя КП способствует усилению водоотдачи за счет повышения эффективности работы катионных химических реагентов. Лучшее удаление воды увеличивает сухость полотна на гауч-вале, что позволяет повысить скорость машины, ее производительность и сократить расход пара на сушку. Оптимизация ζ -потенциала и снижение показателя КП улучшает проклейку, удержание мелкого волокна и наполнителя улучшает просвет бумажного полотна, сокращает содержание взвешенных веществ в оборотной воде, это снижает слизееобразование и нагрузку на очистные сооружения. Чем выше по абсолютному значению ζ -потенциал, тем сильнее частицы отталкиваются друг от друга и тем меньше их склонность к хлопьеобразованию. Так как хлопьеобразование является основным процессом при отливе бумажного полотна, то очевидно, что для обеспечения оптимального режима формования бумажного полотна и получения максимального удержания компонентов массы необходимо довести массу, подаваемую на сетку, до изоэлектрической точки. Существует корреляция между колебаниями ζ -потенциала в напорном ящике и скоростью БДМ: чем выше колебания, тем ниже скорость. Для снижения этой вариативности определяют и регулируют электрокинетические характеристики бумажной массы в напорном ящике.

Анализируя ζ -потенциал и показатель КП при подготовке бумажной массы, можно решить следующие технологические задачи [33]:

- 1) определить оптимальную дозировку химикатов;
- 2) улучшить обезвоживание на сетке и повысить скорость БДМ;
- 3) снизить мутность оборотной воды;
- 4) оптимизировать распределение волокнистой мелочи и наполнителя в z-направлении, повысить сопротивление выщипыванию и улучшить печатные свойства;
- 5) повысить удержание клея АКД, а также улучшить равномерность проклейки.

Большинство исследователей принимают величину ζ -потенциала, близкую к изоэлектрической точке, за оптимальную. В.А. Александр полагает [34], что поддержание ζ -потенциала при производстве бумаги в ки-

слой среде в пределах от -3 до $+5$ мВ обеспечивает оптимальное протекание всех процессов в мокрой части БДМ и позволяет увеличить удержание наполнителя на 10–20 %, сократить расход клея на 5 % и красителя на 75 %, и в целом сократить затраты на производство бумаги на 10–25 %. В источнике [35] указывается оптимальный диапазон ζ -потенциала в пределах $+1$ до $+6$ мВ, при котором все исследуемые параметры максимальны. В этом диапазоне снижалась двусторонность и пылимость бумажного полотна. При производстве бумаги в нейтральной среде преимущества только возрастают, а оптимальный диапазон величин электрокинетических параметров должен определяться в каждом конкретном случае индивидуально.

В связи с таким обширным влиянием электрокинетических явлений на основные процессы получения бумаги и ее свойства рекомендуется также осуществлять онлайн-мониторинг этих показателей. Контроль и управление электрокинетическими параметрами дает возможность придать бумаге более высокую прочность, однородность степени проклейки, повысить удержание наполнителя и волокнистой мелочи, улучшить стабильность основных процессов производства бумаги, что является наиважнейшей задачей производства.

Хотя величина или изменение ζ -потенциала и не определяет процесс в целом, однако оказывает существенное влияние на характер адсорбции химических реагентов. Если технологический процесс построен без учета этого влияния, то электрокинетические свойства поверхности волокна могут оказать решающее влияние на конечный результат всего технологического процесса.

Таким образом, измерение изменений ζ -потенциала и других параметров является лишь косвенной оценкой эффективности основных технологических процессов. Знание об электроповерхностных явлениях гидросуспензий растительных волокон позволит выявлять и поддерживать благоприятные условия протекания основных технологических процессов при подготовке бумажной массы.

Выводы

На сегодняшний день использование химикатов в производстве бумаги и картона на основе вторичных волокон является наиболее доступным и экономически выгодным способом приближения показателей прочности к уровню материалов на основе свежих волокон.

Влияние вспомогательных химических веществ на повышение прочности бумаги для гофрирования, изготовленной из макулатурной массы, является предметом дальнейших исследований авторов статьи.

Список литературы

1. Яблочкин Н.И., Комаров В.И., Ковернинский И.Н. Макулатура в технологии картона. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2004. – 252 с.
2. Чемезов А.С. О производстве и использовании тары и упаковки из картона и бумаги // Аграрный вестник Урала. – 2006. – №1. – С. 18–19
3. Heitmann J.A. Pulp Properties in Pulp and Paper Manufacture // TAPPI Journal. – 1992. – No. 9. – P. 85–96.
4. Особенности технологии бумаги-основы для гофрирования из макулатуры и требования к ее потребительским свойствам / Л.А. Южанинова, Д.А. Дулькин, В.А. Спиридонов, В.И. Комаров. – Архангельск, 2007. – 103 с.
5. Кулешов А.В. Осипов А.С. Влияние цикличности использования макулатурного волокна на бумагообразующие свойства // Лесной журнал. – 2008. – № 4. – С. 132–139.
6. Karlsson H. Fibre Guide – Fibre analysis and process applications in the pulp and paper industry. – Sweden, Kista, 2006. – 102 p.
7. Hernadi A., Lele I. Using α -amylase to improve the secondary fiber quality // Papiripar. – 2004. – В. 48, № 3. – С. 97–106.
8. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров: учеб. для вузов / СПбЛТА. – СПб., 1999. – 628 с.
9. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. / Э.В. Виролайнен, Ю.А. Поляков, А.М. Кряжев, С.С. Пузырев. – СПб.: Политехника, 2004. – Т. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. – 316 с.
10. Перепелкина А.А., Мусина Л.Р., Галиханов М.Ф. Влияние термической обработки и электрофизического воздействия на сопротивление продавливанию целлюлозно-бумажного материала // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2013. – Т. 16, № 7. – С. 113–114.
11. Лапин В.В., Смоляков А.И., Кудрина Н.Д. Проблема прочностных свойств бумаги для гофрирования и картона для плоских слоев из 70...100 % макулатуры: роль размола // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2002. – № 9–10. – С. 34–37.
12. Лапин В.В., Смоляков А.И., Кудрина Н.Д. Загрязнения в бумажной массе из 100 % макулатуры: влияние на степень помола и прочность бумаги и картона // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2001. – № 7–8. – С. 32–34.
13. Проблема переработки макулатуры, содержащей катионные и анионные виды крахмалов / Н.И. Яблочкин, И.Н. Ковернинский, М.Д. Овчинникова, Д.А. Дулькин // Технология переработки макулатуры: тр. 6-й науч.-техн. конф. – Караваево: Правда, 2005. – С. 19–21.

14. Вспомогательные химические вещества в производстве бумаги и картона: тез. докл. науч.-практ. конф. / СПбГТУРП. – СПб., 2008 – 60 с.
15. Характеристики макулатурного волокна после ферментативного удаления крахмала / А.В. Кондаков, А.В. Кулешов, Е.В. Новожилов, А.С. Смолин // Лесной журнал. – 2009. – № 5. – С. 115–120.
16. Рациональные пути повышения прочности материалов на основе вторичного волокна / А.С. Смолин, Р.О. Шабиев, Н.П. Мидуков, С.Ю. Кожевников // Материалы II междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти проф. В.И. Комарова. – Архангельск, 2013. – С. 23–26.
17. Жирнова Г.Н. Улучшение качества бумаги для гофрирования введением в ее состав химических вспомогательных веществ: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Л., 1988. – 16 с.
18. Иванов С.Н. Технология бумаги. – М.: Школа бумаги, 2006. – 696 с.
19. Стрекаловский В.А., Стрекаловская Л.Т., Лапин В.В. Опыт использования катионного крахмала при производстве бумаги для гофрирования и картона для плоских слоев из 100 % макулатуры // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2002. – № 7/8. – С. 22–26.
20. Осипов П.В. Технология и механизмы упрочнения внутренней структуры бумаги и картона // Новое в химии бумажно-картонного производства и полиграфии. – СПб., 2006. – С. 18–23.
21. Хованский В.В., Дубовый В.К., Кейзер П.М. Применение химических вспомогательных веществ в производстве бумаги и картона: учеб. пособие. – СПб., 2013. – 153 с.
22. Тарасов С.М. Химические вспомогательные средства в производстве целлюлозных композиционных материалов: учеб.-метод. пособие. – М., 2016. – 36 с.
23. Кожевников С.Ю., Ковернинский И.Н. Межволоконные электростатические связи в бумаге // Химия растительного сырья. – 2012. – № 3. – С. 197–202.
24. Ковернинский И.Н., Кожевников С.Ю. Нанохимия упрочнения бумаги // Химические процессы современной технологии: сб. тр. 3-й междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2010. – С. 22–27.
25. Лапин В.В. Нанотехнологии. Не все так просто // Химия в ЦБП: тр. Междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2009. – С. 31–33.
26. Смолин А.С., Шабиев Р.О., Яскола П. Исследование дзета-потенциала и катионной потребности волокнистых полуфабрикатов // Химия растительного сырья. – 2009. – № 1. – С. 177–184.
27. Каталог приборов для контроля качества целлюлозы, бумаги и картона фирмы «Сигма Микрон». – СПб., 2009. – 38 с.
28. Соколов В.В., Селемнева Д.В., Шишканов Н.В. Интерферирующие вещества – «анионный мусор» – «катионная потребность» в ЦБП // 17-й Менде-

леевский съезд по общей и прикладной химии «Материалы и нанотехнологии». – Казань, 2003. – С. 395–399.

29. Nishi K. Bhardwaj, Sanjay Kumar, Pramod K. Bajpai. Effects of Processing on Zeta Potential and Cationic Demand of Kraft Pulps: Colloids and Surfaces A // *Physicochem. Eng. Aspects*. – 2004. – № 246. – P. 121–125.

30. О природе электрокинетического потенциала целлюлозы / Г.З. Аксельрод, А.С. Смолин, М.А. Иванов, М.Л. Фомина, Н.В. Ходырева // Сб. тр. ВНИИБа. – 1973. – Вып. 65. – С. 58–64.

31. Hubbe M.A. Sensing the Electrokinetic Potential of Cellulosic Fiber Surfaces // *BioResources*. – 2006. – Vol. 1, № 1. – P. 116–149.

32. Jacobasch H.J., Bauböck G., Schurz J. Problems and results of zeta-potential measurement on fibers // *J. Colloid Polym. Sci.* – 1985. – № 263. – P. 3–24.

33. Шабиев Р.О., Смолин А. Анализ электрокинетических параметров бумажной массы: учеб. пособие, 2012. – 80 с.

34. Александр В.А. Влияние электрокинетического потенциала волокнистой массы на процессы производства бумаги: обзор / ВНИПИЭИ леспром. – М., 1975. – 40 с.

35. Doiron B.E. Retention Aid Systems // *Retention of Fines and Fillers during Papermaking*. – TAPPI Press, Atlanta, 1998. – Ch. 8. – P. 159.

References

1. Iablochkin N.I., Komarov V.I., Koverninskii I.N. *Makulatura v tekhnologii kartona* [Waste Paper in the Cardboard Technology]. Arkhangel'sk, Izdatelstvo AGTU, 2004, 252 p.

2. Chemezov A.S. O proizvodstve i ispol'zovanii tary i upakovki iz kartona i bumagi [About production and use of a container and packing from a cardboard and paper]. *Agrarnyi vestnik Urala*, 2006, no. 1, pp. 18-19.

3. Heitmann J.A. Pulp Properties in Pulp and Paper Manufacture. *TAPPI Journal*, 1992, no. 9, pp. 85-96.

4. Iuzhaninova L.A., Dul'kin D.A., Spiridonov V.A, Komarov V.I. Osobennosti tekhnologii bumagi-osnovy dlia gofirovaniia iz makulatury i trebovaniia k ee potrebitel'skim svoistvam [Technology features of the base paper fluting paper and requirements for its consumer properties]. Arkhangel'sk, 2007, 103 p.

5. Kuleshov A.V., Osipov A.S. Vliianie tsiklichnosti ispol'zovaniia makulturnogo volokna na bumagoobrazuiushchie svoistva [Effect of Cyclical Use of Recycled Fiber on the Paper-Forming Properties]. *Lesnoy zhurnal*, 2008, no. 4, pp. 132-139.

6. Karlsson H. *Fibre Guide – Fibre analysis and process applications in the pulp and paper industry*. Sweden, Kista, 2006. 102 p.

7. Hernadi A., Lele I. Using α -amylase to improve the secondary fiber quality. *Papiripar*, 2004, B.48, no. 3, pp. 97-106.

8. Azarov V.I., Burov A.V., Obolenskaia A.V. *Khimiia drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Chemistry of wood and synthetic polymers]. Saint Petersburg, SPbLTA, 1999, 628 p.

9. Virolainen E.V., Poliakov Iu.A., Kriazhev A.M., Puzyrev S.S. *Tekhnologiia tselliulozno-bumazhnogo proizvodstva. Tom 1. Syr'e i proizvodstvo polufabrikatov. Chast*

3. Proizvodstvo polufabrkatov [The Technology of Pulp and Paper Production. Vol. 1. Raw materials and semifinished manufacturing. Part 3. Semifinished manufacturing]. Saint Petersburg, Politehnika, 2005, 423 p.

10. Perepelkina A.A., Musina L.R., Galikhanov M.F. Vliianie termicheskoi obrabotki i elektrofizicheskogo vozdeistviia na soprotivlenie prodavlivaniuu tselliulozno-bumazhnogo materiala [Heat treatment and electrophysical impact influence on resistance to breakdown of pulp-and-paper material]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, vol. 16, no. 7, pp. 113-114.

11. Lapin V.V., Smoliakov A.I., Kudrina N.D. Problema prochnostnykh svoistv bumagi dlia gofirovaniia i kartona dlia ploskikh sloev iz 70...100 % makulatury: rol' razmola [Problem of strength properties of paper for goffering and a cardboard for flat layers from 70...100% of waste paper: grind role]. *Tselliuloza. Bumaga. Karton*, 2002, no. 9-10, pp. 32-34.

12. Lapin V.V., Smoliakov A.I., Kudrina N.D. Zagriazneniia v bumazhnoi masse iz 100 % makulatury: vliianie na stepen' pomola i prochnost' bumagi i kartona [Pollution in paper stock from 100% of waste paper: influence on degree of a grinding and durability of paper and cardboard]. *Tselliuloza. Bumaga. Karton*, 2001, no. 7-8, pp. 32-34.

13. Iablochkin N.I., Koverninskii I.N., Ovchinnikova M.D., Dul'kin D.A. Problema pererabotki makulatury, sodержashchei kationnye i anionnye vidy krakhmalov [The problem of processing waste paper containing cationic and anionic types of starches]. *Tekhnologiya pererabotki makulatury*, Karavaev, Pravda, 2005, pp. 19-21.

14. Vspomogatel'nye khimicheskie veshchestva v proizvodstve bumagi i kartona [Auxiliary chemicals in production of paper and a cardboard]. Nauchno-prakt. konf. 23-24 April, Saint Petersburg, 2008, 60 p.

15. Kondakov A.V., Kuleshov A.V., Novozhilov E.V., Smolin A.S. Kharakteristiki makulturnogo volokna posle fermentativnogo udaleniia krakhmala [Characteristics of waste fiber after enzymatic removal of starch]. *Lesnoi zhurnal*, 2009, no. 5, pp. 115-120.

16. Smolin A.S., Shabiev R.O., Midukov N.P., Kozhevnikov S.Iu. Ratsional'nye puti povysheniia prochnosti materialov na osnove vtorichnogo volokna [Rational ways of increase in durability of materials on the basis of secondary fiber]. Materialy II mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii posviashchennoi pamiati professora V.I. Komarova, 10-12 September, 2013, Arkhangel'sk, pp. 23-26.

17. Zhirnova G.N. Uluchshenie kachestva bumagi dlia gofirovaniia vvedeniem v ee sostav khimicheskikh vspomogatel'nykh veshchestv [Improvement of quality of paper for goffering by introduction to its composition of chemical excipients]. Abstract of Ph. D. thesis. Leningrad, 1988, 16 p.

18. Ivanov S.N. Tekhnologiya bumagi [Technology of paper]. Moscow: Shkola bumagi, 2006. 696 p.

19. Strekalovskii V.A., Strekalovskaia L.T., Lapin V.V. Opyt ispol'zovaniia kationnogo krakhmala pri proizvodstve bumagi dlia gofirovaniia i kartona dlia ploskikh sloev iz 100 % makulatury [Experience of use of cationic starch by production of paper for goffering and a cardboard for flat layers from 100% of waste paper]. *Tselliuloza. Bumaga. Karton*, 2002, no. 7/8, pp. 22-26.

20. Osipov P.V. Tekhnologiya i mekhanizmy uprochneniia vnutrennei struktury bumagi i kartona [Technology and mechanisms of hardening of internal structure of paper

and cardboard]. *Novoe v khimii bumazhno-kartonnoogo proizvodstva i poligrafii*, Saint Petersburg, 2006, pp. 18-23.

21. Khovanskii V.V., Dubovyi V.K., Keizer P.M. Primenenie khimicheskikh vspomogatel'nykh veshchestv v proizvodstve bumagi i kartona [Chemical excipients application in production of paper and a cardboard]. Saint Petersburg, 2013, 153 p.

22. Tarasov S.M. Khimicheskie vspomogatel'nye sredstva v proizvodstve tselliuloznykh kompozitsionnykh materialov [Chemical supportive applications in production of cellulose composite materials]. Moscow, MGUL, 2016, 36 p.

23. Kozhevnikov S.Iu., Koverninskii I.N. Mezhvolokonnnye elektrostatische svyazi v bumage [Interfiber electrostatic communications in paper]. *Khimiia rastitel'nogo syr'ia*, 2012, no. 3, pp. 197-202.

24. Koverninskii I.N., Kozhevnikov S.Iu. Nanokhimiia uprochneniia bumagi [Paper hardening nanochemistry]. *Khimicheskie protsessy sovremennoi tekhnologii tselliulozno-bumazhnoi promyshlennosti*, Saint Petersburg, 2010, pp. 22-27.

25. Lapin V.V. Nanotekhnologii. Ne vse tak prosto [Nanotechnologies. Not everything is so simple]. *Khimiia v TsBP*. Saint Petersburg, 2009, pp. 31-33.

26. molin A.S., Shabiev R.O., Iakkola P. Issledovanie dzeta-potentsiala i kationnoi potrebnosti voloknistykh polufabrikatov [Zeta-potential and cationic requirement of fibrous semi-finished products research]. *Khimiia rastitel'nogo syr'ia*, 2009, no. 1, pp. 177-184.

27. Katalog priborov dlia kontroliia kachestva tselliulozy, bumagi i kartona firmy "Sigma Mikron [The catalog of devices for quality control of cellulose, paper and a cardboard]. – Saint Petersburg, 2009, 38 p.

28. Sokolov V.V., Selemneva D.V., Shishkanov N.V. Interferiruiushchie veshchestva – «anionnyi musor» – «kationnaia potrebnost'» v TsBP [Interfering substances – "anion garbage" – "the cationic need" for pulp and paper industry]. *17-i Mendeleevskii s"ezd po obshchei I prikladnoi khimii «Materialy i nanotekhnologii»*, Kazan', 2003, pp. 395-399.

29. Nishi K. Bhardwaj, Sanjay Kumar, Pramod K. Bajpai. Effects of Processing on Zeta Potential and Cationic Demand of Kraft Pulps: Colloids and Surfaces A. *Physicochem. Eng. Aspects*, 2004, no. 246, pp. 121-125.

30. Aksel'rod G.3., Smolin A.S., Ivanov M.A., Fomi- na M.L., Khodyreva N.V. O prirode elektrokineticheskogo potentsiala tselliulozy [About the nature of electrokinetic potential of cellulose]. *Sb. trudov VNIIBa*, 1973, iss. 65, pp. 58-64.

31. Hubbe M.A. Sensing the Electrokinetic Potential of Cellulosic Fiber Surfaces. *BioResources*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 116-149.

32. Jacobsch H.J. Bauböck G., Schurz J. Problems and results of zeta-potential measurement on fibers. *J. Colloid Polym. Sci.*, 1985, no. 263, pp. 3-24.

33. Shabiev R.O., Smolin A. Analiz elektrokineticheskikh parametrov bumazhnoi massy [Electrokinetic parameters the analysis in paper stock]. Saint Petersburg, 2012, 80 p.

34. Aleksandr V.A. Vliianie elektrokineticheskogo potentsiala voloknistoï massy na protsessy proizvodstva bumagi [Electrokinetic potential of fibrous weight influence on processes of production of paper]. Moscow, VNIPIEI lesprom, 1975, 40 p.

35. Doiron B.E., "Retention Aid Systems," in J. M. Gess, Ed., *Retention of Fines and Fillers during Papermaking*, TAPPI Press, Atlanta, 1998, Ch. 8, p. 159.

Получено 14.02.2018

Об авторах

Слаутин Дмитрий Васильевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mvt-6@mail.ru).

Теплоухова Марина Владимировна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mvt-6@mail.ru).

Андраковский Руслан Эдуардович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mvt-6@mail.ru).

About the authors

Dmitry V. Slautin (Perm, Russian Federation) – Master of the Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: mvt-6@mail.ru).

Marina V. Teploukhova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: mvt-6@mail.ru).

Ruslan E. Andrakovsky (Perm, Russian Federation) – Master of the Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: mvt-6@mail.ru).