

УДК 676.15.017.6

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПРОКЛЕЙКИ БУМАГИ ПОЛИКАТИОННЫМ ПОЛИМЕРОМ

© *О.С. Вдовина, С.Ю. Кожевников, И.Н. Ковернинский\**

*ООО «СКИФ Спешиал Кемикалз», Восточная промзона, 7, Дзержинск  
Нижегородской обл., 606000 (Россия), e-mail: kovern@list.ru*

Статья посвящена теоретическим представлениям о гидрофильно-гидрофобном состоянии бумаги и управлением влиянии на него поверхностной проклейкой новым полимерным клеем. Рассмотрены основные факторы процесса нанесения клея, влияющие на гидрофильную поверхность бумаги - температура, концентрация клея, микрорельеф и капиллярность бумаги. Проанализированы функциональные гидрофильные и гидрофобные радикалы действующего вещества полимерного клея и их влияние на образование гидрофобного слоя на поверхности бумаги.

*Ключевые слова:* бумага, поверхностная проклейка, гидрофобность, гидрофильность, поверхностное натяжение, полимер, сополимер, поликатионный полимер, гидрофильные радикалы, гидрофобные радикалы, когезия, адгезия, водно-полимерная оболочка, гидрофобный слой.

### *Введение*

Бумага (картон) благодаря гидрофильности растительного волокна и капиллярно-пористой структуре при выработке без проклейки отличается высокой гидрофильностью и гигроскопичностью. В то же время к большинству видов бумаги предъявляются требования ограниченного впитывания воды и поглощения влаги из воздуха. Задача ограничения впитывания воды или гидрофобизация бумаги решается в процессе проклейки, осуществляемой в виде проклейки в массе или поверхностной проклейки, или их сочетанием [1]. Проклейка в массе основана на взаимодействии волокна с клеем до формования бумаги, а поверхностная проклейка основана на взаимодействии с клеем поверхности сформованной бумаги. В данной работе остановимся на основных физико-химических основах поверхностной проклейки бумаги новым синтезированным поликатионным полимером.

### *Гидрофильно-гидрофобное состояние поверхности бумаги*

Ниже будут использоваться следующие обозначения:  $\theta$  – краевой угол смачивания; поверхностное натяжение на границах контактов: клей – воздух –  $\sigma_{жк}$ ; поверхность бумаги – воздух –  $\sigma_{тг}$ ; поверхность бумаги – клей –  $\sigma_{тж}$ .

Сформованная бумага без применения какого-либо метода проклейки, как уже указывалось, является гидрофильным материалом. Ее поверхность и внутренняя структура неограниченно (полностью) смачивается водой – краевой угол смачивания ( $\theta$ ) не определяется, а наносимый на поверхность клей растекается по ней в тонкую пленку, которая полностью обволакивает поверхность бумаги. Протекание процесса полного смачивания выполняется при условии –  $\sigma_{тг} > \sigma_{тж} + \sigma_{жк} \cos\theta$ . И в этом случае на поверхности бумаги образуется клеевой слой – водно-полимерная оболочка.

---

*Вдовина Ольга Сергеевна* – заведующая химической лабораторией, e-mail: olga\_vdovina@skif.ru  
*Кожевников Сергей Юрьевич* – кандидат технических наук, доцент, e-mail: skif.special.chemicals@gmail.com  
*Ковернинский Иван Николаевич* – доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, e-mail: kovern@list.ru

Гидрофобизация бумаги в процессе поверхностной проклейки переводит ее в ограниченно смачиваемый водой материал. Физико-химическими количественными величинами для характеристики гидрофобности поверхности явля-

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

ются  $\theta$  (условие гидрофобности  $90^\circ > \theta > 0^\circ$ ) или  $W_A$ . Для ограниченного смачивания должны выполняются условия:  $90^\circ > \theta > 0^\circ$  и  $2\sigma_{жг} > W_A > \sigma_{жг}$ , где:  $W_A$  – удельная работа адгезии воды к поверхности бумаги [2]. Как видно из условий, придаваемая степень гидрофобности имеет широкий предел, практически от полного смачивания (гидрофильный материал –  $\theta$  несколько градусов) – до полного несмачивания (гидрофобный материал –  $\theta$  вблизи  $90^\circ$ ). Движущей силой смачивания бумаги водой ( $U$ ) является разность  $\sigma_{жг} - \sigma_{тг}$ . При отрицательном значении  $U$  ( $\sigma_{тг} > \sigma_{жг}$ ), поверхность гидрофильная, самопроизвольно неограниченно смачивается водой с высвобождением энергии, а при положительном значении  $U$  ( $\sigma_{жг} > \sigma_{тг}$ ), поверхность гидрофобная, а смачивание возможно только при подводе энергии извне.

Учитывая рассмотренные условия и закономерности гидрофильно-гидрофобного состояния поверхности бумаги, можно сформулировать задачу поверхностной проклейки бумаги следующим образом: придание поверхности бумаги заданной гидрофобности.

Кратко рассмотрим процессы, обеспечивающие решение задачи.

### **Основы теории гидрофобизации бумаги**

Результатом поверхностной проклейки бумаги является заданная гидрофобность поверхности, количественно характеризуемая каким-либо из методов определения – степень проклейки (чернильно-штриховой или индикаторный методы), впитываемость воды при одностороннем смачивании (метод Кобба) [3], по краевому углу смачивания, геометрическим размерам капли воды на поверхности и др.

Любая из характеристик гидрофобности (гидрофильности) определяется равновесным состоянием удельных свободных поверхностных энергий на границе линии трехфазного контакта (ЛТК), одним из выражений которых являются поверхностные натяжения –  $\sigma_{жг}$ ,  $\sigma_{тг}$  и  $\sigma_{тж}$ .

Таким образом, управление гидрофобностью поверхности бумаги сводится к целевому воздействию на поверхностное натяжение контактирующих сред. В результате поверхностной обработки бумаги клеем следует достичь положительного значения движущей силы смачивания поверхности бумаги водой ( $U = \sigma_{жг} - \sigma_{тг}$ ). Это возможно при условии  $\sigma_{жг} > \sigma_{тг}$ . Выполнение данного условия обеспечивается повышением  $\sigma_{жг}$  или понижением  $\sigma_{тг}$ , или одновременным повышением и понижением этих величин.

Как указывалось, гидрофобизация гидрофильной поверхности бумаги с помощью поверхностной проклейки осуществляется нанесением на поверхность клея. В данной работе рассматривается гидрофобизация бумаги водным раствором нового поликатионного полимера. Полимер получают методом полимеризационного синтеза ряда мономеров алкеновых метакриловых производных, включающих мономер с явно выраженной катионактивной функциональной группой. Таким образом, действующим веществом полученного продукта является водорастворимый катионный полимакромолекулярный сополимер алкеновых метакриловых производных с полигетерогидрофобными радикалами в линейной цепи. Товарный продукт на основе данного сополимера – это клей для поверхностной проклейки бумаги, представляющий собой водный раствор концентрацией действующего вещества 18–23% и получивший фирменное название «Ультрасайз SP 312». Расход клея учитывается по товарному продукту и находится в пределах 0,5–1,5 кг/т бумаги. Следовательно, расход по действующему веществу при концентрации, например, 20% и расходе 1 кг/т составляет 0,2 кг/т или 200 г/т. Учитывая двустороннее нанесение и количество квадратных метров в 1 т бумаги (например, для массы бумаги 140 г/м<sup>2</sup> это 714 м<sup>2</sup>), расход клея на 1 м<sup>2</sup> составит 0,14 г на одну сторону.

Укажем, что водные растворы полимеров, подобные клею «Ультрасайз SP 312», относятся к термодинамически стабильным молекулярным коллоидным системам [4] и рассматриваются как коллоидные системы.

### **Основные стадии и механизм поверхностной проклейки бумаги**

При поверхностной проклейке бумаги следует рассматривать следующие основные стадии: нанесение клея на поверхность бумаги и его закрепление; образование поверхностного гидрофобного слоя. Задача нанесения клея предусматривает равномерное распределение заданного количества раствора полимера (макромолекул сополимера) по гидрофильной поверхности бумаги, а задача второй стадии – это взаимодействие полимера и поверхности бумаги с превращением водно-полимерной оболочки в поверхностный гидрофобный слой.

*Нанесение клея на поверхность бумаги и его закрепление.* Этот процесс зависит от межмолекулярного взаимодействия контактирующих сред – бумаги, клея и воздуха [2]. В момент нанесения клея поверхность бумаги отличается полной смачиваемостью, т.е.  $\sigma_{жг} - \sigma_{тг}$  имеет отрицательное значение, а, следовательно, клей

самопроизвольно и равномерно растекается по поверхности. Такое развитие процесса на поверхности бумаги на стадии нанесения клея является предпочтительным и определяется свойствами клея и свойствами бумаги.

Что касается клея, то он отличается значительно меньшей величиной  $\sigma_{жг}$  за счет влияния растворенного полимера и высокой температуры поверхности бумаги в зоне нанесения клея. Величина  $\sigma_{жг}$  в клее уменьшается за счет превалирования сил межмолекулярного взаимодействия воды над межмолекулярным взаимодействием воды и гидрофобных частей макромолекул. Разность взаимодействия обуславливает вытеснение гидрофобных радикалов и в целом макромолекул сополимера из объема клея в пограничный слой. В результате поверхностное натяжение смешанной фазы (воды и макромолекул сополимера) в пограничном слое клея уменьшается. Уменьшенное  $\sigma_{жг}$ , согласно движущей силе смачивания, усиливает растекание клея по поверхности и тем самым способствует более равномерному и полному распределению клея, следовательно, сополимера по поверхности бумаги. Роль высокой температуры поверхности бумаги, в условиях реального процесса в пределах 100–120 °С, заключается в значительном понижении  $\sigma_{жг}$  клея (примерно на 12–14 мН/м). Сочетание температурного понижения  $\sigma_{жг}$  клея с концентрационным понижением  $\sigma_{жг}$  сополимером является определяющим фактором быстрого, равномерного и полного распределения клея по поверхности бумаги.

Наряду со свойствами клея на его нанесение влияют свойства поверхности бумаги.

К основным свойствам поверхности бумаги, влияющими на нанесение клея, отнесем: микрорельеф, пористость, влажность, химическую и физико-химическую активность, электроповерхностную активность.

Поверхность бумаги имеет определенный микрорельеф (микрогометрию), характеризуемый шероховатостью или гладкостью. Как правило, фактическая (эффективная) площадь бумаги ( $S_{эф}$ ) за счет шероховатости значительно больше площади ее проекции на идеализированную (гладкую) поверхность ( $S_r$ ). Величина шероховатости измеряется коэффициентом шероховатости  $K_{эф} = S_{эф}/S_r$  ( $K_{эф} > 1$ ). Шероховатость поверхности влияет на смачиваемость поверхности посредством краевого угла смачивания  $\theta$ . Связь между краевыми углами смачивания на шероховатой (эффективной) поверхности  $\theta_{эф}$  и на гладкой поверхности дает уравнение Вензеля–Дерягина:  $\cos \theta_{эф} = K_{эф} \cos \theta_r$  [5]. Поскольку  $K_{эф} > 1$ , то по модулю  $|\cos \theta_{эф}| > |\cos \theta_r|$ . Таким образом, из рассмотренных данных видно, что шероховатость повышает смачивание ( $\theta_{эф} < \theta_r$ ) при  $\theta < 90^\circ$  и понижает смачивание (повышает гидрофобность) поверхности ( $\theta_{эф} > \theta_r$ ), при  $\theta > 90^\circ$ . При нанесении клея на поверхность бумаги реализуется процесс повышения смачиваемости.

Пористость бумаги – также фактор, повышающий эффект смачивания поверхности бумаги клеем. Морфологию пористости бумаги относят к губчатым набухающим разнороднопористым структурам, в которой системы пустот и каналов образуются сплошной сеткой твердой фазы – волокном (в отсутствие наполнителя) [6]. Пористые тела классифицируют по преимущественному размеру пор на микропористые (поры до 2 нм), мезопористые (от 2 до 50 нм) и макропористые (свыше 50 нм) [7, 8]. Общий объем пор для различных видов бумаги различается в широких пределах – от 30 до 70%. В бумагах, которые подвергаются гидрофобизации методом поверхностной проклейки, объем пор находится в пределах 50–60% со средним радиусом пор 0,16–0,18 мкм (160–180 нм). В бумаге без поверхностной проклейки преобладают макропоры или просто поры – это пространства между волокнами, заполненные воздухом и влагой. Мезопоры и микропоры, или капилляры – мельчайшие пространства неопределенной формы, также имеются в бумаге, пронизывая ее структуру и внутреннюю структуру целлюлозного и иного растительного волокна. Они также заполнены водой и воздухом.

Рассмотренная морфология пористости имеет вполне определенное значение при поверхностной проклейке. Пористости отдается предпочтение в механизме проникновения клея в структуру бумаги, в основу которого положен перенос жидкости по межволоконной капиллярно-пористой системе [9]. Принимая эту точку зрения, укажем, что проникновение клея в структуру бумаги – это обобщающий процесс, который отличается сложностью его составляющих: капиллярные явления (собственно перенос жидкости), адсорбция воды и полимера, диффузия компонентов, влияние воздуха, заключенного в порах. Однако рассмотрение составляющих – это тема другой работы.

Традиционно клей наносят на сформованный слой бумаги с сухостью в пределах 88–92% [1, 10]. Сухость (влажность) бумаги влияет на скорость и глубину проникновения клея в структуру бумаги [1, 11]. Пределы сухости 88–92% (влажность 8–12%), при которой бумага и клей приводятся в контакт, показывают то, что к моменту контакта в бумаге содержится только прочносвязанная влага, находящаяся преимущественно в микрокапиллярах. Следовательно, в механизме проникновения клея остается большая доля капиллярных эффектов – всасывания клея капиллярными силами за счет полного смачивания внутренней

поверхности капилляров. Эти эффекты также повышают проникновение клея в толщу бумаги. Одновременно происходит некоторое увлажнение бумаги, которое оценивается пределами сухости 75–85% [1].

Как показано в работе [12], глубина проникновения клея в бумагу главным образом зависит от концентрации и свойств полимера в клее, удельной плотности бумаги и времени контакта клея с поверхностью бумаги. Исследованиями установлено, что клей успевает проникать на глубину 90–130 мкм (90–130·10<sup>3</sup> нм). Таким образом, в этом пределе проникновения клея в структуру бумаги находится слой активного взаимодействия клеевой водно-полимерной оболочки с волокном.

Химическая, физико-химическая и электроповерхностная активность поверхности бумаги определяется микрорельефом (активными энергетическими центрами адсорбции воды и сополимера), поверхностной плотностью и активностью функциональных групп волокна. Эта тема будет подробно рассмотрена в следующем труде.

*Образование поверхностного гидрофобного слоя.* Поверхностный слой водно-полимерной оболочки с волокном в условиях высокой температуры и интенсивного удаления влаги из бумаги в коротком интервале времени превращается в поверхностный гидрофобный слой. Гидрофобность придается макромолекулами сополимера, являющимся действующим веществом клея. Учитывая малые расходы полимера в пределах 0,1–0,2 г/м<sup>2</sup>, можно утверждать, что гидрофобизация поверхности осуществляется мономолекулярной пленкой полимера с дискретным (точечным, мозаичным) распределением гидрофобных радикалов и групп по поверхности бумаги. При этом в соответствии с закономерностями гидрофобного взаимодействия [13] макромолекулы сополимера, сконцентрированные в граничном слое водно-полимерной оболочки на поверхности бумаги, остаются ориентированными гидрофобными участками к воздушной фазе. Гидрофильные функциональные группы и части макромолекул взаимодействуют с гидрофильными гидроксильными группами и участками волокна. Поликатионный характер макромолекул сополимера обеспечивает почти мгновенную фиксацию и закрепление их с полианионной поверхностью бумаги силами электростатического притяжения. Удаленная влага до конечной влажности бумаги 6–8% обеспечивает обнажение гидрофобных точечных участков на поверхности и тем самым создает определенное гидрофобно-гидрофильное состояние поверхности.

Характерные сополимеру функциональные радикалы приведены в таблице. Как видно в таблице 1, в макромолекуле действующего вещества клея содержатся полярные функциональные радикалы, обладающие гидрофильностью, и неполярные гидрофобные радикалы. При этом гидрофильные и гидрофобные радикалы имеют разное строение и различаются уровнем гидрофильности и гидрофобности. Поверхность бумаги также характеризуется мозаичностью распределения гидрофильных и гидрофобных участков. Следуя закономерностям, вода и гидрофильные радикалы сополимера будут ориентироваться и сцепляться с гидрофильными участками поверхности, а гидрофобные радикалы будут сцепляться с гидрофобными участками. Следовательно, имеет место избирательное смачивание поверхности бумаги. Поскольку гидрофильные и гидрофобные радикалы сополимера в цепи макромолекул чередуются, то сополимер будет равномерно распределяться по поверхности бумаги.

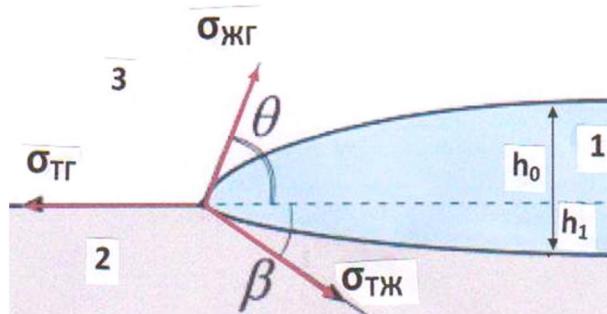
Таким образом, в условиях нанесения клея на поверхность бумаги температурным, концентрационным, микрорельефным и капиллярно-пористым факторами  $\sigma_{жг}$  существенно снижается. Это обеспечило равномерное распределение сополимера и его гидрофобных радикалов на поверхности бумаги. Удаление влаги до влажности бумаги 6–8% и высокая температура бумаги превращают водно-полимерную оболочку с поверхностным слоем волокна в гидрофобный слой. При контакте данного слоя с водой и воздухом межмолекулярные силы воды (силы когезии) превалируют над межмолекулярными силами взаимодействия воды с поверхностью (силы адгезии), т.е. выполняется условие гидрофобности поверхности  $\sigma_{жг} > \sigma_{тг}$ .

Иллюстрация состояния капли воды на гидрофобизированной клеем поверхности бумаги при контакте трех фаз «твердая поверхность – вода – воздух» в условиях равновесия представлена на рисунке.

Функциональные радикалы линейной цепи макромолекул сополимера

Гидрофильные		Гидрофобные	
Структура	Название	Структура	Название
—COOH —COO(R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> , R <sub>3</sub> , R <sub>4</sub> ), где: один из радикалов + R <sub>2</sub> (—CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> N(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) R <sub>3</sub> (—COOC <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ) R <sub>4</sub> (—COO(CH <sub>2</sub> ) <sub>17</sub> CH <sub>3</sub> )	карбоксильная сложноэфирная	—[CH <sub>2</sub> — CR <sub>1</sub> R <sub>2</sub> ] <sub>n</sub> — —[CH <sub>2</sub> — CR <sub>1</sub> R <sub>3</sub> ] <sub>m</sub> — —[CH <sub>2</sub> — CR <sub>1</sub> R <sub>4</sub> ] <sub>k</sub> — R <sub>1</sub> —CH <sub>3</sub> —C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> —(CH <sub>2</sub> ) <sub>17</sub> CH <sub>3</sub>	углеводородная цепь  метил циклогексил стеарил

Капля воды при трехфазном контакте:  
 1 – вода; 2 – бумага; 3 – воздух;  $\theta$  – краевой угол смачивания поверхности;  $\beta$  – краевой угол смачивания внутренней структуры;  $h_0$  – высота капли над поверхностью бумаги;  $h_1$  – глубина впитывания воды



На рисунке видно, что капля воды ограниченно растекается по гидрофобной поверхности и ограниченно проникает в пограничный слой бумаги. Высота капли над поверхностью бумаги ( $h_0$ ), глубина впитывания воды в пограничный слой ( $h_1$ ) и краевой угол смачивания  $\theta$  характеризуют величину гидрофобности бумаги. Гидрофобизацию поверхности бумаги при поверхностной проклейке осуществляют так, чтобы получить заданную величину гидрофобности.

### Выводы

1. Сформованная бумага без применения проклейки является предельно гидрофильным материалом, для которого выполняется условие  $\sigma_{тг} > \sigma_{жг}$ .
2. Клей для гидрофобизации поверхности гидрофильной бумаги представляет собой водный раствор катионного полимакромолекулярного сополимера алкеновых метакриловых производных с полигетеро-гидрофобными радикалами в линейной цепи.
3. В условиях контакта клея и поверхности бумаги, температурным, концентрационным, микрорельефным и капиллярно-пористым факторами  $\sigma_{жг}$  существенно снижается, создавая максимально благоприятное образование поверхностного слоя водно-полимерной оболочки с волокном.
4. Поверхностный слой водно-полимерной оболочки с волокном в условиях высокой температуры и интенсивного удаления влаги из бумаги, в коротком интервале времени превращается в поверхностный гидрофобный слой.
5. При контакте гидрофобного слоя с водой и воздухом межмолекулярные силы воды преобладают над межмолекулярными силами взаимодействия воды с поверхностью, т.е. выполняется условие гидрофобности поверхности  $\sigma_{жг} > \sigma_{тг}$ .

### Список литературы

1. Крылатов Ю.А., Ковернинский И.Н. Проклейка бумаги. М., 1987. 288 с.
2. Вдовина О.С., Кожевников С.Ю., Ковернинский И.Н. Теоретические основы управления гидрофильно-гидрофобным состоянием бумаги при поверхностной проклейке // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №22. С. 92–96.
3. Крылатов Ю.А., Ковернинский И.Н. Материалы для проклейки бумаги и картона. М., 1982. 84 с.
4. Ostwald W. Die Welt der vernachlassigten Dimensionen. Dresden-Leipzig: Verlag Th. Steinkopf, 1944. S. 236–246.
5. Шукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.Л. Коллоидная химия. М., 2004. 445 с.
6. Дубинин М.М. // Известия АН СССР. Сер. хим. 1981. №1. С. 9–23.
7. Грег С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость : пер. с англ. 2-е изд. М., 1970. 408 с.
8. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. М., 1982. 320 с.
9. Williams G.J., Drummond J.G. Preparation of Large Sections for the Microscopical Study of Puper Structure // Proceeding of 1994 Papermakers Conference. Tappi Press. 1994. Book 2. Pp. 517–523.
10. Фляте Д.М. Технология бумаги. М., 1988. 440 с.
11. Петров А.П. Поверхностная проклейка бумаги и картона. М., 1968. 80 с.
12. Shirazi M., Esmail N., Garnier G., T.M.G. van de Ven. Starch Penetration into Paper in a Size Press // J. of Dispersion science and Technology. 2004. Vol. 25, N4. Pp. 457–468.
13. Пчелин В.А. Гидрофобное взаимодействие в дисперсных системах. М., 1976. 64 с.

Поступило в редакцию 18 декабря 2014 г.

После переработки 14 января 2015 г.

Vdovina O.S., Kozhevnikov S.Iu., Koverninskiy I.N.\* PHYSICOCHEMICAL BASIS OF SURFACE SIZING PAPER POLYCATIONIC POLYMER

Co.Ltd «SKIF Special Chemical», Vostochnaya promzona, 7, Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod region, 606000 (Russia),  
e-mail: kovern@list.ru

The article is devoted to theoretical notions of hydrophilic-hydrophobic paper and state-controlled impact on a surface sizing new polycationic polymer glue. The main factors influencing the process of applying adhesive to the hydrophilic surface of the paper - the temperature, the concentration of glue, and capillary micro-relief of the paper. Analyzed functional hydrophilic and hydrophobic radicals of the active substance of adhesive polymer and their influence on the formation of a hydrophobic layer on the surface of the paper.

**Keywords:** paper, surface sizing, hydrophobicity, hydrophilicity, surface tension, a polymer, a copolymer, a polycationic polymer, hydrophilic radicals, the hydrophobic radicals, cohesion, adhesion, water-shell polymer, a hydrophobic layer.

### References

1. Krylatov Iu.A., Koverninskii I.N. *Prokleika bumagi*. [Paper sizing]. Moscow, 1987, 288 p. (in Russ.).
2. Vdovina O.S., Kozhevnikov S.Iu., Koverninskii I.N. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, no. 22, pp. 92–96. (in Russ.).
3. Krylatov Iu.A., Koverninskii I.N. *Materialy dlia prokleiki bumagi i kartona*. [Materials for the sizing of paper and paperboard]. Moscow, 1982, 84 p. (in Russ.).
4. Ostwald Wo. *Die Welt der vernachlassigten Dimensionen*. Drezden-Leipzig: Verlag Th. Steinkopf, 1944. S. 236–246.
5. Shchukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.L. *Kolloidnaia khimiia*. [Colloidal chemistry]. Moscow, 2004, 445 p. (in Russ.).
6. Dubinin M.M. *Izvestiia AN SSSR. Ser. khim.*, 1981, no. 1, pp. 9–23. (in Russ.).
7. Greg S. *Adsorbtsiia, udel'naia poverkhnost', poristost'*. [Adsorption, the specific surface area, porosity]. Moscow, 1970, 408 p. (in Russ.).
8. Kheifets L.I., Neimark A.V. *Mnogofaznye protsessy v poristyykh sredakh*. [Multiphase processes in porous media]. Moscow, 1982, 320 p. (in Russ.).
9. Williams G.J., Drummond J.G. *Proceeding of 1994 Papermakers Conference. Tappi Press*, 1994, Book 2, pp. 517–523.
10. Fliate D.M. *Tekhnologiia bumagi*. [Technology papers]. Moscow, 1988, 440 p. (in Russ.).
11. Petrov A.P. *Poverkhnostnaia prokleika bumagi i kartona*. [Surface sizing of paper and paperboard]. Moscow, 1968, 80 p. (in Russ.).
12. Shirazi M., Esmail N., Garnier G., T.M.G. van de Ven. *J. of Dispersion science and Technology*, 2004, vol. 25, no. 4, pp. 457–468.
13. Pchelin V.A. *Gidrofobnoe vzaimodeistvie v dispersnykh sistemakh*. [Hydrophobic interaction in dispersed systems]. Moscow, 1976, 64 p. (in Russ.).

Received December 18, 2014

Revised January 14, 2015

---

\* Corresponding author.