

УДК 676.038.22

ПРИМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ БУМАГИ И КАРТОНА

© *А.А. Остапенко¹, И.Н. Ковернинский^{2*}, О.В. Ткаченко¹*

¹*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, Киев, 03057 (Украина)*

²*ООО Промышленный Парк «Уссурийский», Раковское шоссе, 1, Уссурийск, 692527 (Россия), e-mail: kovern@list.ru*

Цель исследования заключается в оценке процесса взаимодействия амфотерных полимерных смол (АПС) с волокнами целлюлозы на молекулярном уровне.

По стандартным методикам ЯМР ¹H и ¹³C-спектроскопии определено взаимодействие АПС с фрагментами целлюлозы.

С целью изучения взаимодействия амфотерной полимерной смолы (АПС) с целлюлозой на молекулярном уровне в работе проведено их имитационное моделирование. Суть имитационного моделирования заключается в замене целлюлозных волокон на вещества, близкие по функциональному назначению к целлюлозе. К таким веществам относятся глюкоза, сахароза, крахмал и этиленгликоль, которые растворяются в воде. Установлено, что при наличии большого количества воды в системе АПС – волокна макулатуры образуются межмолекулярные и межфрагментные водородные связи, а при достижении в системе критического количества воды происходит образование новых ковалентных связей эфирного типа между функциональными группами компонентов модельных систем и системы АПС – целлюлоза, что свидетельствует о возможности повышения физико-механических показателей бумаги и картона из вторичного сырья.

Полученные результаты показывают, что имитационное моделирование структурно-функциональных преобразований в сложных по природе системах, к которым относится система целлюлоза – АПС, подтверждает наличие в них процессов, которые происходят при взаимодействии АПС с гидроксильными группами целлюлозных волокон.

Ключевые слова: амфотерная полимерная смола, глюкоза, крахмал, сахароза, целлюлоза, функциональные группы, этиленгликоль, ¹³C ЯМР-спектроскопия.

Введение

Первичное сырье для производства бумаги – волокна целлюлозы, полученные из природных материалов, преимущественно из древесины, посредством химической обработки. Такая технология является энергоемкой и материалозатратной, кроме того, использование в процессе химических реагентов сопряжено с возрастанием нагрузки на экосистемы [1, 2]. Альтернативой является использование вторичного волокна. При повторном использовании растительного сырья уровень затрат энергии и расхода реагента значительно ниже, однако необходимо учитывать, что свойства бумаги изменяются вследствие необратимых структурных преобразований волокон. Степень изменения определяется количеством циклов и способом выделения воло-

кон. Переработка обуславливает изменения механических характеристик оболочек в клеточной структуре и в результате – ухудшение технологических параметров волокнистой массы. В последующем, во время сушки, происходит дальнейшее необратимое структурное изменение компонентов [3–7]. Использование вторичного волокна при производстве бума-

Остапенко Алина Анатольевна – ассистент кафедры экологии и технологии растительных полимеров, e-mail: alina-ostapenko@ukr.net

Ковернинский Иван Николаевич – доктор технических наук, профессор, академик РАН, e-mail: kovern@list.ru

Ткаченко Ольга Викторовна – студент, e-mail: tkacenkoola46@gmail.com

* Автор, с которым следует вести переписку.

ги позволяет экономить природное растительное сырье, снизить объемы потребляемой воды, а также эксплуатационные и капитальные затраты бумагоделательного предприятия, уменьшить ущерб, наносимый окружающей среде (например, 1 т макулатуры сохраняет ~2.5 м³ древесины).

Актуальной проблемой данной технологии является повышение механических параметров вторичного волокна в процессе производства бумаги и картона [8–11]. Для достижения требуемого уровня существует ряд технических и технологических возможностей:

- за счет увеличения числа химических связей между фрагментами волокон при введении на определенных стадиях процесса модифицирующих добавок, обуславливающих реакционное преобразование связующих веществ;

- за счет активного взаимодействия с функциональными группами волокон и инициации формирования дополнительных межфрагментных и межмолекулярных связей [12–15].

Анализ литературных данных и накопленного производственного опыта показывает [16–20], что такой технологический прием экономически выгоден, а также эффективен в решении задачи повышения прочности и жесткости композиции конечного продукта – бумаги. Кроме того, до 97–99% появляется возможность достижения полного удержания фракции мелких волокон, степень которого обуславливает пропорциональное уменьшение показателя обезвоживания волокнистой массы на сетке, и в перспективе механическая прочность может возрасти благодаря эффективности действия упрочняющих и проклеивающих реагентов [21–23]. Поэтому стремление к увеличению степени химизации технологии бумажного производства является постоянно действующим фактором развития и повышения качества бумажно-картонных материалов. Для применения в производстве бумаги функционально подходящими добавками к волокнистой массе являются экологически безопасные синтетические продукты – АПС, характеризующиеся совместимостью с поверхностью волокон за счет энергии и числа образуемых связей [24].

В зависимости от функциональной принадлежности компонентов АПС вводятся в систему для формирования новых водостойких композиций путем реализации соответствующего механизма. Прочностные характеристики бумаги с АПС изучены в ряде работ [24–26].

Цель данной работы – имитировать процесс взаимодействия АПС с целлюлозными волокнами на молекулярном уровне.

Экспериментальная часть

В работе использовали АПС Ультразез 200, которая, как исследовано [27, 28], повышает физико-механические показатели бумаги и картона из вторичного сырья. Структурная формула АПС приведена на рисунке 1.

Для имитационного моделирования, суть которого заключалась в замене реакционных центров твердой поверхности, близкими по функциональной принадлежности веществами выбраны следующие: глюкоза, сахароза, крахмал и этиленгликоль, которые растворяются в воде. В составе указанных веществ имеются гидроксильные группы, поэтому они могут рассматриваться как модельные вещества, имитирующие поверхность целлюлозы.

Модельные системы готовили при комнатной температуре смешиванием в колбе вышеуказанных реагентов в стехиометрическом соотношении 1 : 1 (в случае с этиленгликолем – 1 : 2) и непрерывном перемешивании раствора с помощью магнитной мешалки в течение 2 мин. Затем полученные растворы бинарных систем исследовались методом ¹³C ЯМР-спектроскопии.

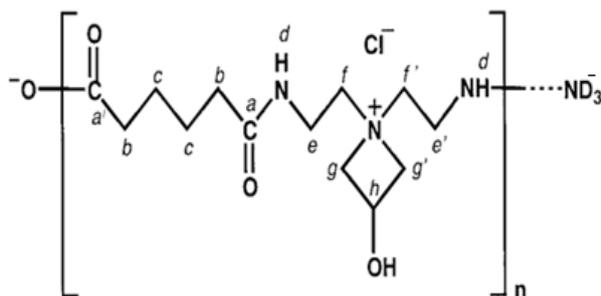


Рис. 1. Общая структурная формула АПС [27]: a, a', b, c, e, e', f, f' – атомы углерода линейной цепи амфотерных полимерных смол и g, g', h – атомы углерода азетидиновой группы

Спектры ^{13}C веществ записывали с помощью спектрометра AVANCE-400 фирмы Bruker на частотах 100.613 МГц. Величины химических сдвигов сигналов ^{13}C определяли относительно сигналов тетраметилсилана. Интервал между импульсами составлял 4 с при общем количестве накоплений примерно 4000. Фурье-преобразования выполняли с одновременным экспоненциальным взвешиванием спада свободной индукции с константой, эквивалентной уширения линий 10 Гц. Информация об особенностях строения молекул АПС полученная анализом экспериментальных параметров с использованием в процессе регистрации спектров как эталонного сигнала гексаметилдисилоксана ($\delta=0.05$ м.ч.). Спектры ЯМР ^{13}C записано за 295 К с применением двух методик [29]. По первой методике для идентификации углеродсодержащих функциональных групп АПС, в которых атомы углерода связаны с атомами азота, кислорода и различным числом атомов водорода, для выявления тонких взаимодействий атомов углерода с более отдаленными атомами водорода, спектры ЯМР ^{13}C снимали без спиновой развязки. По второй методике для определения структурно и функционально неэквивалентных атомов углерода спектры ЯМР ^{13}C снимали с использованием спин-спиновой развязки от протонов. Для имитации процесса сушки бумаги на сушильных цилиндрах бумагоделательной машины, модельные системы глюкоза – Ультрарез 200, сахароза – Ультрарез 200 и крахмал – Ультрарез 200 нагревали в реакторе до температуры 105 ± 5 °С в течение 15 мин с целью постепенного уменьшения содержания воды.

Далее отобранную из реактора пробу доводили до комнатной температуры и регистрировали спектры. В результате нагрева модельной системы в вакууме в течение 1 ч происходило испарение воды с ее последующей конденсацией в ловушке со сжиженным азотом.

Результаты и обсуждение

На рисунках 1 и 2 представлены результаты спектров ЯМР ^{13}C , исследованных индивидуальных реагентов АПС Ультрарез 200 и глюкозы.

Анализ спектров ЯМР ^{13}C (рис. 1–3) показал, что положение линий, характерных для функциональных групп индивидуальных соединений (глюкоза и АПС Ультрарез 200), испытывает заметные изменения по сравнению с их положением в системе глюкоза – АПС Ультрарез 200 – H_2O . Разница между химическими сдвигами индивидуальных растворов и их смесей находится в интервале значений 3–3.56 м.д. Это свидетельствует о сохранении их функциональной принадлежности и указывает, что химических взаимодействий между компонентами системы не происходит. Надо отметить, что в указанных модельных системах происходит уменьшение числа молекул воды в окружении функциональных групп растворенных веществ за счет образования сетки новых водородных связей и, как следствие, изменения положения сигналов.

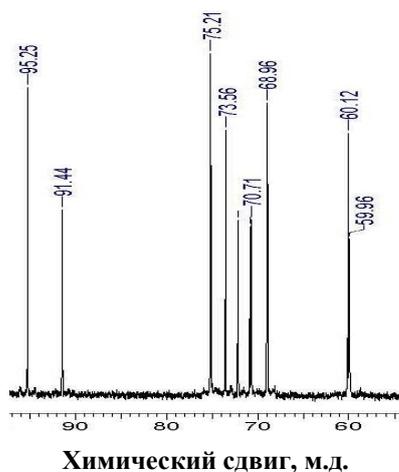


Рис. 1. Спектр ЯМР ^{13}C раствора глюкозы

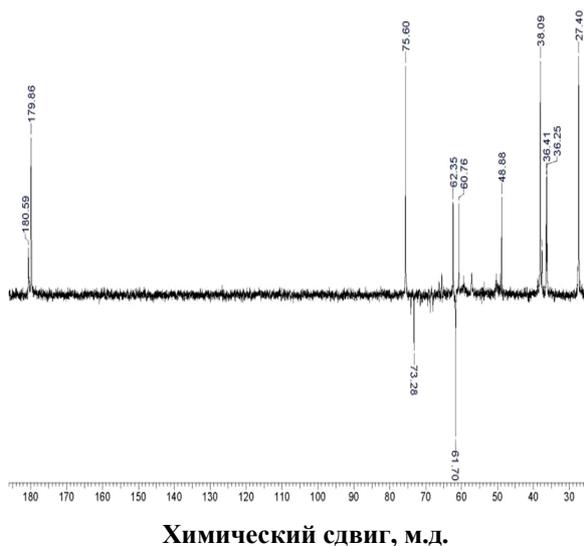


Рис. 2. Спектр ЯМР ^{13}C раствора Ультрарез 200

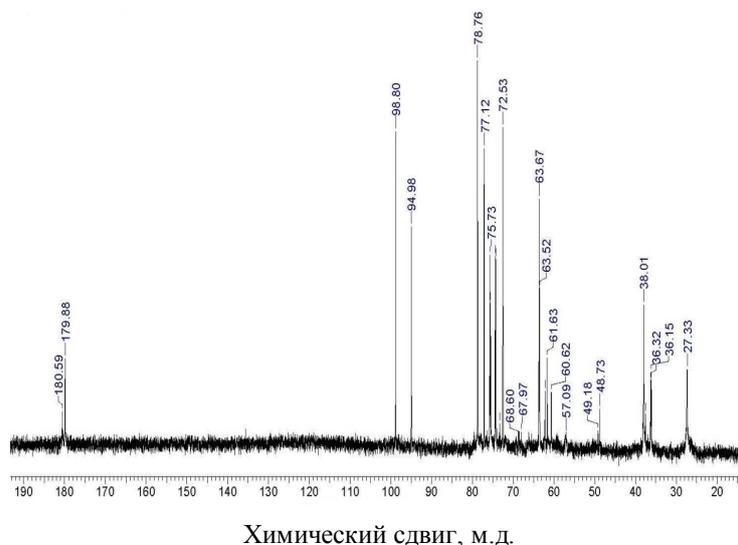


Рис. 3. Спектр ЯМР ^{13}C системы глюкоза – Ультразез 200 – H_2O

В спектрах ЯМР ^{13}C водного раствора глюкозы (рис. 1) значения химических сдвигов атомов углерода функциональных групп, активных при формировании межмолекулярных связей, составляют 95.25 м.д.; 91.44 м.д. и 75.21 м.д., а в системе глюкоза – Ультразез 200 – H_2O (рис. 3) – значения химических сдвигов атомов углерода этих функциональных групп меняется – 98.8 м.д.; 94.48 м.д. и 78.76 м.д., соответственно.

Следует подчеркнуть, что отсутствие новых линий в спектрах ЯМР ^{13}C растворов модельных систем с АПС Ультразез 200 свидетельствует о неизменности их атомно-молекулярного состава. Величина изменений значений химических сдвигов указывает на перераспределение электронной плотности в углеводородных цепях реагентов. От их структурно-функциональных характеристик зависит пространственно-временная организация создаваемых систем, в частности это сказывается на времени ЯМР – релаксации соответствующих атомов углерода. Сокращение времени релаксации приводит к росту ширины резонансных сигналов и уменьшению их амплитуды с приблизительным сохранением интегральных интенсивностей характерных линий. Для сигналов атомов углерода со значениями химического сдвига 95.25 м.ч. раствора глюкозы (при неизменных концентрационных и температурных характеристик и параметров прибора) амплитуда сигнала составляла 0.91 у.е., для сигналов с $\delta = 91.44$ и 75.21 м.ч. амплитуда составила 0.61 и 1.2 у.е. соответственно. В то же время в системе глюкоза–Ультразез 200 для сигналов атомов углерода со значением химического сдвига $\delta = 98.8$ и 94.48 м.ч. сигналов амплитуда составляла 0,82 и 0.55 у.е. соответственно, а для атомов углерода с химическим сдвигом $\delta = 78.76$ м.ч. – 0.98 у.е.

Таким образом, признаком межмолекулярных взаимодействий с участием как функциональных групп АПС и молекул модельных веществ, так и молекул воды, является эволюция параметров ЯМР. Это свидетельствует о динамике системы водородных связей при действии различных факторов (концентрационных, стереохимических и функциональных): их преобразование сопровождаются изменением значений химических сдвигов, амплитуд и ширины сигналов.

На рисунке 4 приведен спектр ЯМР ^{13}C системы глюкоза – Ультразез 200 – H_2O (после термообработки).

Появление новых линий на спектрах ЯМР ^{13}C для смеси глюкоза – Ультразез 200 – H_2O в областях 49.22, 56.84, 57.07, 95.60, 98.61, 100.45, 106.16 м.д. (рис. 4) свидетельствует о взаимодействии и образовании новых ковалентных связей эфирного типа между функциональными группами Ультразез 200 и гидроксильными группами целлюлозных волокон. Для определения оптимальных условий процесса сушки бумаги из макулатуры с использованием АПС, в работе осуществлено имитационное моделирование модельного раствора АПС – этиленгликоль (рис. 5). Выбор этиленгликоля связан с тем, что этот спирт имеет температуру кипения 197 °С и две гидроксильные группы, которые могут имитировать гидроксильные группы целлюлозы. Поскольку температура кипения этиленгликоля значительно выше, чем температура кипения воды, то в процессе нагрева модельного раствора увеличивается относительное содержание этиленгликоля и молекул АПС, что способствует их взаимодействию.

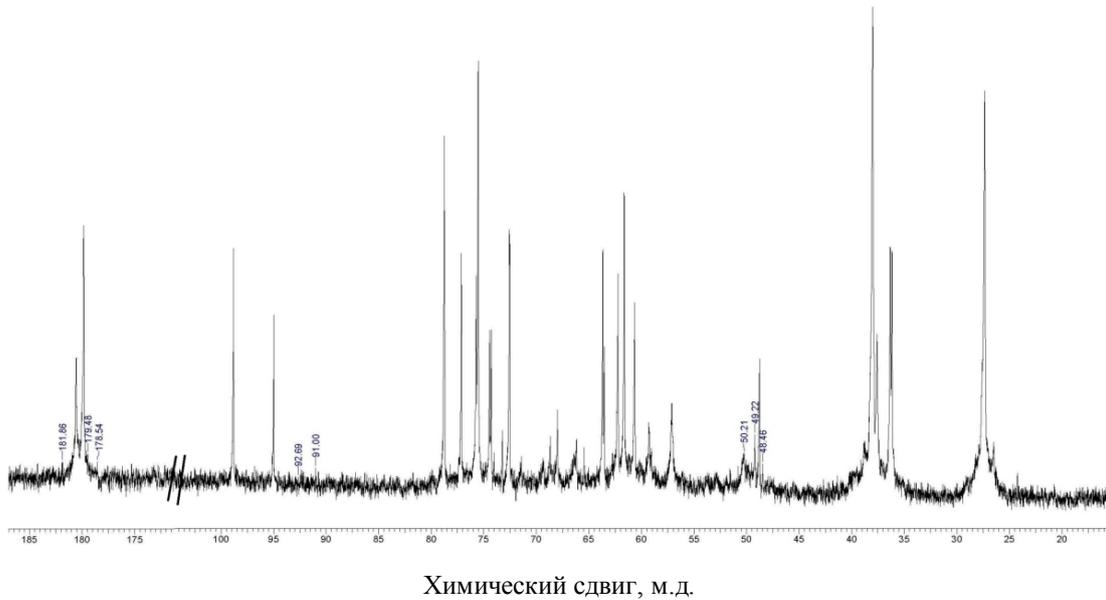


Рис. 4. Спектр ЯМР ^{13}C системы глюкоза – Ультрарез 200 – H_2O (после термообработки)

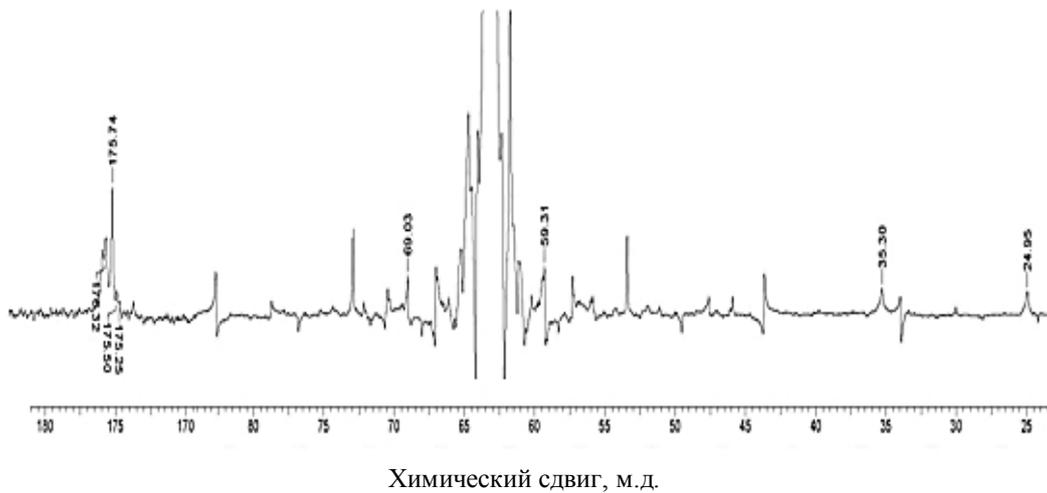


Рис. 5. Спектр ЯМР ^{13}C системы лиофильно-высушена АПС Ультрарез 200 – этиленгликоль

Из данных рисунка 5 можно сделать следующий вывод: только при высокой степени дегидратации системы в модельной матрице интенсифицируются процессы полимеризации и этерификации, которые обуславливают сшивку (межфрагментную, межмолекулярную, межцепную), что приводит к масштабному структурированию. Подтверждением этому является отсутствие сигнала атома углерода в области 75.60 м.ч. (атом углерода азетидинового цикла АПС) в спектрах ЯМР ^{13}C растворов полисахаридов и появление сигналов с δ 59.31 м.д., 35.30 м.д. и 69.03 м.д. после термообработки. Наличие сигналов в указанных областях спектра, величины химических сдвигов δ свидетельствуют о раскрытии азетидинового цикла и прохождения реакции полимеризации с участием молекул АПС и функциональных групп целлюлозных волокон.

Из данных рисунка 5 также можно сделать вывод о росте числа линий по принадлежности к карбоксильным группам, которые имеют химические сдвиги, соответственно: 176.32 м.ч., 175.74 м.ч., 175.50 м.ч. и 175.25 м.ч., что свидетельствует о формировании стерических неэквивалентных эфирных фрагментов цепей молекул.

Заключение

Рассмотренные результаты показывают, что имитационное моделирование, структурно-функциональных преобразований в сложных по природе системах, к которым относится система целлюлоза – АПС, подтверждает наличие в них процессов, которые происходят при взаимодействии АПС с гидроксильными группами целлюлозных волокон. Это позволяет сделать вывод о том, что только при наличии большого количества воды в системе АПС – целлюлоза образуются межмолекулярные и межфрагментные водородные связи, а при достижении в системе совсем малого содержания воды происходит образование ковалентных связей эфирного типа между функциональными группами компонентов модельных систем, и системы АПС – целлюлоза.

Также можно сделать вывод о том, что полное удаление воды в модельных системах с участием АПС приводит к процессу полимеризации АПС и этерификации функциональных групп смолы с функциональными группами целлюлозы, что подтверждает повышение физико-механических показателей различных видов бумаги и картона, в том числе из макулатуры с использованием АПС.

Список литературы

1. Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И. Современное состояние и перспективы развития использования вторичного волокна из макулатуры в мировой и отечественной индустрии бумаги. Архангельск, 2007. 118 с.
2. Кулешов А.В., Смолин А.С. Влияние цикличности использования макулатурного волокна на бумагообразующие свойства // Лесной журнал. 2008. №4. С. 131–138.
3. Rahman M.O., Hussain A., Basri H. A critical review on waste paper sorting technique International // Journal of Environmental Science and Technology. 2014. Vol. 11. N2. Pp. 551–564.
4. Bystrom S., Lonnstedt L. Paper recycling: a discussion of methodological approaches // Resources, Conservation and Recycling. 2000. Vol. 28. N1-2. Pp. 55–65.
5. Guo X., Jiang Z., Li H., Li W. Production of recycled cellulose fibers from waste paper via ultrasonic wave processing // Journal of Applied Polymer Science. 2015. Vol. 32. N19. Pp. 55–65.
6. Rodriguez C., Alaswad A., El-Hassan Z., Olabi A.G. Mechanical pretreatment of waste paper for biogas production // Waste Management. 2017. Vol. 68. Pp. 157–164.
7. Bobalek J.F., Chaturvedi M. The effects of recycling on the physical properties of handsheets with respect to specific wood species // Tappi Journal. 1989. Vol. 72 (6). P. 123.
8. Pivnenko K., Eriksson E., Astrup T.F. Waste paper for recycling: Overview and identification of potentially critical substances // Waste Management. 2015. Vol. 45. Pp. 134–142.
9. Осипов П.В. Системная технология и синергизм процессов – основа химической технологии // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2006. №9. С. 38–43.
10. Zule J., Cernec F., Likon M. Chemical properties and biodegradability of waste paper mill sludges to be used for landfill covering // Waste Management. 2007. Vol. 25. Pp. 120–134.
11. Juppi K., Kaihovirta J. The effect of the dryer section on paper quality // Pulp and Paper Canada. 2003. Vol. 104. N5. Pp. 58–61.
12. Alinec B., Vanerek A., de Oliveira M.H., Van De Ven T.G.M. The effect of polyelectrolytes on the wet-web strength of paper // Nordic and Pulp Paper Research Journal. 2006. Vol. 21 (5). P. 653.
13. Кожевников С.Ю., Ковернинский И.Н. Химия и технология СКИФ для бумаги. М., 2010. 91 с.
14. Bhardwaj N.K., Rajan V. Wet-strength paper repulping: effect of process variables // Appita Journal. 2004. Vol. 57 (4). P. 305.
15. Ковернинский И.Н., Кожевников С.Ю. Нанохимия упрочнения бумаги // Химические процессы современной технологии ЦБП: сборник трудов 3-й Международной научно-практической конференции. СПб., 2010. С. 22–27.
16. Ковернинский И.Н., Кожевников С.Ю., Молодцов М.А., Севастьянова Ю.В. Исследование влияния применения химических полимеров на свойства и прочностные показатели полуфабриката из макулатурной массы // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2016. №7. С. 74–77.
17. Ковернинский И.Н., Кожевников С.Ю., Смолин А.С., Шабиев Р.О. Исследование влияния поликатионных полимеров на обезвоживание макулатурной массы // Химия растительного сырья. 2016. №2. С. 139–143.
18. Xu Y., Chen C.M., Yang C.Q. Application of polymeric multifunctional carboxylic acids to improve wet strength // Tappi Journal. 1998. Vol. 81 (11). P. 159.
19. Осипов П.В. Химические продукты как часть российского бумажного производства // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2002. №11-12. С. 14–16.
20. Krüger E., Göttching L., Mönch D. The behaviour of fixed interfering substances in the recycling process // Wochenblatt für Papierfabrikation. 1997. Vol. 125. P. 25.
21. Wägberg L., Björklund M. On the mechanism behind wet strength development in papers containing wet strength resins // Nordic Pulp and Paper Research. 1993. N1. P. 53.
22. Gärdlund L., Norgren M. The use of polyelectrolyte complexes (PEC) as strength additives for different pulps used for production of fine paper // Nordic Pulp and Paper Research Journal. 2007. Vol. 22 (2). P. 210.

23. Herzig R., Johnson D.B. Investigation of thin fiber mats formed at high velocity // TAPPI. 1999. Vol. 82. Pp. 226–230.
24. Auhorn W.J. Chemical additives for papermaking // World pulp&paper technology. 2001. Pp. 14–16.
25. Bhardwaj N.K., Rajan V. Wet-strength paper repulping: effect of process variables // Appita Journal. 2004. Vol. 57 (4). P. 305.
26. Obokata T., Isogai A. Wet-strength development of cellulose sheets prepared with polyamideamine-epichlorohydrin (PAE) resin by physical interactions // Nordic pulp and paper research journal. 2009. Vol. 24. Pp. 135–140.
27. Барбаш В.А., Остапенко А.А., Трачевский В.В. Вплив структури амфотерних полімерних смол на якість паперу для гофрування // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2015. №1. С. 58–64.
28. Остапенко А.А., Мороз В.Н., Барбаш В.А., Кожевников С.Ю., Дубовой В.К., Ковернинский И.Н. Повышение качества бумаги из макулатуры химическими функциональными веществами // Химия растительного сырья. 2012. №1. С. 187–190.
29. Obokata T., Isogai A. ¹H- and ¹³C-NMR analyses of aqueous polyamideamine epichlorohydrin resin solutions // Journal of Applied Polymer Science. 2004. Vol. 92. P. 1847.

Поступило в редакцию 11 декабря 2017 г.

После переработки 6 февраля 2018 г.

Для цитирования: Остапенко А.А., Ковернинский И.Н., Ткаченко О.В. Применение химических вспомогательных веществ для обеспечения ресурсосбережения в производстве бумаги и картона // Химия растительного сырья. 2018. №2. С. 225–232. DOI: 10.14258/jcprm.2018023488

Ostapenko A.A.¹, Koverninsky I.N.^{2}, Tkachenko O.V.¹* APPLICATION OF CHEMICAL ADDITIVES FOR RESOURCE CONSERVATION PRODUCTION OF PAPER AND CARDBOARD

¹ National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", pr. Pobedy, 37, Kyiv, 03057 (Ukraine)

² LLC Industrial Park "Ussuriyskiy", Rakovskoe shosse, 1, Ussuriysk, 692527 (Russia), e-mail: kovern@list.ru

The aim of the study is to evaluate the interaction of amphoteric polymer resins with cellulose fibers at the molecular level.

The interaction of amphoteric polymer resins with cellulose fragments was determined by standard ¹H NMR and ¹³C spectroscopy techniques.

To study the interaction of amphoteric polymeric resins with cellulose at the molecular level, imitation modeling has been carried out in the work. The essence of the simulation is the replacement of cellulose fibers with substances that are close to the functional purpose of cellulose. Such substances include glucose, sucrose, starch and ethylene glycol, which dissolve in water. It is established that in the presence of a large amount of water in the APS – waste paper system, intermolecular and interfluid hydrogen bonds are formed, and upon reaching a critical amount of water in the system, new covalent ether-type bonds are formed between the functional groups of the components as model systems and amphoteric polymeric systems resin - cellulose and this indicates the possibility of increasing the physical and mechanical properties of paper and paperboard from secondary raw materials.

The results show that simulation simulation of structural and functional transformations in complex systems, including the cellulose-APS system, confirms the presence in them of processes that occur during the interaction of amphoteric polymeric resins with hydroxyl groups of cellulose fibers

Keywords: amphoteric polymeric resin, glucose, cellulose, composition, functional groups, saharose, starch, ethylene glycol, ¹³C NMR spectroscopy.

* Corresponding author.

References

1. Dul'kin D.A., Spiridonov V.A., Komarov V.I. *Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia ispol'zova-niia vtorich-nogo volokna iz makulatury v mirovoi i otechestvennoi industrii bumagi*. [Current state and prospects for the devel-opment of the use of recycled fiber from waste paper in the global and domestic paper industry]. Arkhangel'sk, 2007, 118 p. (in Russ.).
2. Kuleshov A.V., Smolin A.S. *Lesnoi zhurnal*, 2008, no. 4, pp. 131–138. (in Russ.).
3. Rahman M.O., Hussain A., Basri H. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 11, no. 2, pp. 551–564.
4. Bystrom S., Lonnstedt L. *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, vol. 28, no. 1-2, pp. 55–65.
5. Guo X., Jiang Z., Li H., Li W. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, vol. 32, no. 19, pp. 55–65.
6. Rodriguez C., Alaswad A., El-Hassan Z., Olabi A.G. *Waste Management*, 2017, vol. 68, pp. 157–164.
7. Bobalek J.F., Chaturvedi M. *Tappi Journal*, 1989, vol. 72 (6), p. 123.
8. Pivnenko K., Eriksson E., Astrup T.F. *Waste Management*, 2015, vol. 45, pp. 134–142.
9. Osipov P.V. *Tselluloza. Bumaga. Karton*, 2006, no. 9, pp. 38–43 (in Russ.).
10. Zule J., Cernec F., Likon M. *Waste Management*, 2007, vol. 25, pp. 120–134.
11. Juppi K., Kaihovirta J. *Pulp and Paper Canada*, 2003, vol. 104, no. 5, pp. 58–61.
12. Alince B., Vanerek A., de Oliveira M.H., Van De Ven T.G.M. *Nordic and Pulp Paper Research Journal*, 2006, vol. 21 (5), p. 653.
13. Kozhevnikov S.Iu., Koverninskii I.N. *Khimiia i tekhnologiia SKIF dlia bumagi*. [Chemistry and technology SKIF for paper]. Moscow, 2010, 91 p. (in Russ.).
14. Bhardwaj N.K., Rajan V. *Appita Journal*, 2004, vol. 57 (4), p. 305.
15. Koverninskii I.N., Kozhevnikov S.Iu. *Khimicheskie protsessy sovremennoi tekhnologii TsBP: sbornik trudov 3-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Chemical processes of modern pulp and paper technology: a col-lection of works of the 3rd International Scientific and Practical Conference]. St. Petersburg, 2010, pp. 22–27. (in Russ.).
16. Koverninskii I.N., Kozhevnikov S.Iu., Molodtsov M.A., Sevastianova Iu.V. *Tselluloza. Bumaga. Karton*, 2016, no. 7, pp. 74–77. (in Russ.).
17. Koverninskii I.N., Kozhevnikov S.Iu., Smolin A.S., Shabiev R.O. *Khimiia rastitel'nogo syr'ia*, 2016, no. 2, pp. 139–143. (in Russ.).
18. Xu Y., Chen C.M., Yang C.Q. *Tappi Journal*, 1998, vol. 81 (11), p. 159.
19. Osipov P.V. *Tselluloza. Bumaga. Karton*, 2002, no. 11-12, pp. 14–16. (in Russ.).
20. Krüger E., Götttsching L., Mönch D. *Wochenblatt für Papierfabrikation*, 1997, vol. 125, p. 25.
21. Wägberg L., Björklund M. *Nordic Pulp and Paper Research*, 1993, no. 1, p. 53.
22. Gärdlund L., Norgren M. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, 2007, vol. 22 (2), p. 210.
23. Herzig R., Johnson D.B. *TAPPI*, 1999, vol. 82, pp. 226–230.
24. Auhorn W.J. *World pulp&paper technology*, 2001, pp. 14–16.
25. Bhardwaj N.K., Rajan V. *Appita Journal*, 2004, vol. 57 (4), p. 305.
26. Obokata T., Isogai A. *Nordic pulp and paper research journal*, 2009, vol. 24, pp. 135–140.
27. Barbash V.A., Ostapenko A.A., Trachevskii V.V. *Visnik NTUU «KPI». Khimichna inzheneriia, ekologiia ta resur-sozberezhennia*, 2015, no. 1, pp. 58–64. (in Ukr.).
28. Ostapenko A.A., Moroz V.N., Barbash V.A., Kozhevnikov S.Iu., Dubovoi V.K., Koverninskii I.N. *Khimiia ras-titel'nogo syr'ia*, 2012, no. 1, pp. 187–190. (in Russ.).
29. Obokata T., Isogai A. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, vol. 92, p. 1847.

Received December 11, 2017

Revised February 6, 2018

For citing: Ostapenko A.A., Koverninsky I.N., Tkachenko O.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2018, no. 2, pp. 225–232. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2018023488