

УДК 676:661.728

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА ЭЛЕКТРОПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЧАСТИЦ МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ**

© *А.В. Лоренцсон\*, Н.Л. Королева, Ю.М. Чернобережский*

*Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, ул. Ивана Черных, 4, Санкт-Петербург, 198095 (Россия), e-mail: lorens74@mail.ru*

Исследованы электроповерхностные свойства (удельный поверхностный заряд частиц –  $\sigma_0$ , точка нулевого заряда –  $pH_{ТНЗ}$ , электрокинетический потенциал –  $\zeta$  и положение изоэлектрической точки –  $pH_{ИЭТ}$ ) дисперсий микрокристаллической целлюлозы (МКЦ) в водных растворах  $H_2SO_4$ ,  $NaOH$ ,  $Na_2SO_4$  и  $TiOSO_4$ . Продемонстрировано значительное влияние специфической адсорбции анионов и катионов на  $pH_{ТНЗ}$  и  $pH_{ИЭТ}$ . Изоэлектрическая точка частиц МКЦ в растворе  $H_2SO_4$  находится при  $pH$  2.0, тогда как точка нулевого заряда – в  $5 \cdot 10^{-4}$  М растворе  $Na_2SO_4$  при  $pH$  5.6. Наблюдаемое различие в положении  $pH_{ТНЗ}$  и  $pH_{ИЭТ}$  обусловлено специфической адсорбцией ионов  $SO_4^{2-}$ . Приведены возможные схемы строения двойного электрического слоя при разных значениях  $pH$ , учитывающие специфическую адсорбцию ионов в слое Штерна. Введение  $TiOSO_4$  ( $10^{-5}$  моль/л) приводит к смещению положения ИЭТ в менее кислую область –  $pH_{ИЭТ}$  4.5, обусловленному специфической адсорбцией положительно заряженных частиц – продуктов гидролиза  $TiOSO_4$ .

*Ключевые слова:* микрокристаллическая целлюлоза, двойной электрический слой, электроповерхностные свойства.

### **Введение**

В настоящее время различные целлюлозные материалы и их производные широко используются во многих отраслях промышленности. Большой интерес представляет микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ). Ее используют как стабилизатор влажности, эмульгатор, наполнитель в пищевой промышленности, в медицине и фармацевтике в качестве вспомогательных веществ жидких, сыпучих и таблетированных лекарственных средств, суспензий, мазей, кремов, зубных паст. В литературе также имеются сведения по получению и применению различных композиционных материалов на основе МКЦ и оксидов металлов [1–5].

Как при использовании чистой МКЦ, так и при ее модификации и получении композитов протекают различные коллоидно-химические процессы взаимодействия частиц МКЦ с другими компонентами системы, зависящие от электроповерхностных свойств, определяющихся строением двойного электрического слоя (ДЭС) частиц.

Согласно классическим представлениям [6], заряд на поверхности частиц, помещенных в водную среду, возникает двумя путями: в результате адсорбции на поверхности потенциалопределяющих ионов, либо в результате диссоциации поверхностных функциональных групп. В случае целлюлозы и ее различных форм в настоящее время отсутствует единое мнение о происхождении отрицательного заряда ее поверхности и строения ДЭС [7]. Большинство исследователей придерживаются точки зрения, что заряд на целлюлозных волокнах возникает в результате диссоциации карбоксильных групп ( $pK_d$  4.0–4.5), сосредоточенных на их поверхности [8–17]. В этом случае потенциалопределяющими являются ионы  $H^+$  и  $OH^-$ . Такая точка

зрения весьма оправдана, поскольку значение  $pH$  изоэлектрической точки ( $pH_{ИЭТ}$   $\zeta=0$ ), наблюдаемое для разных образцов целлюлозных материалов, соответствует  $pH$  2.0–2.8 [18–20]. При таком значении  $pH$  диссоциировано менее 5%  $COOH$ -групп [21]. В некоторых современных работах [7, 22]

---

*Лоренцсон Александр Валентинович* – директор института технологии, e-mail: lorens74@mail.ru  
*Королева Надежда Леонидовна* – старший преподаватель, e-mail: nadik-izmailova@mail.ru  
*Чернобережский Юрий Митрофанович* – профессор, e-mail: lorens74@mail.ru

\* Автор, с которым следует вести переписку.

утверждается, что количество СООН-групп в целлюлозных материалах настолько мало, что их диссоциация не может вызывать появления значительного наблюдаемого экспериментально отрицательного заряда (потенциала). Высказываются также предположения о том, что ДЭС может возникать за счет ориентации у поверхности частиц диполей воды.

Цель настоящей работы – исследование влияния электролитов на электроповерхностные свойства водных дисперсий микрокристаллической целлюлозы.

### *Экспериментальная часть*

Для исследования использовали хлопковую микрокристаллическую целлюлозу ОАО «Полиэкс» (Бийск, Алтайский край, Россия) марки МКЦ-П (Партия № 235, дата выпуска – май 2001 г.). Для приготовления суспензии микрокристаллической целлюлозы порошок МКЦ помещали в дистиллированную воду и выдерживали в течение 10 мин. Далее использовали ее для приготовления исследуемых дисперсий МКЦ в водных растворах электролитов ( $H_2SO_4$ , NaOH,  $Na_2SO_4$ ,  $TiOSO_4$ ) в диапазоне pH 2–11.

Определение плотности заряда частиц МКЦ (размер частиц 1–200 мкм) проводили методом непрерывного обратного кислотно-основного потенциометрического титрования, сущность которого заключается в построении кривых титрования раствора фонового электролита щелочью в отсутствие и при наличии дисперсной фазы. Величину адсорбции  $\Delta\Gamma = \Gamma_{OH^-} - \Gamma_{H^+}$  при данном значении pH определяли по разности абсцисс точек, лежащих на кривых зависимостей  $pH=f(V)$  [23] при этом же значении pH. Для определения pH точки нулевого заряда ( $pH_{ТНЗ}$ ) частиц МКЦ были построены зависимости  $\Delta\Gamma=f(pH)$ . Точка пересечения кривой с осью pH, отвечающая  $\Delta\Gamma=0$ , является точкой нулевого заряда частиц.

Определение электрофоретической подвижности и  $\zeta$ -потенциала частиц МКЦ (фракция < 5 мкм) проводилось по стандартной методике [23] с применением модифицированной ячейки Абрамсона. Для наблюдения за частицами использовали микроскоп PZO (Poland) с объективом  $5\times$  и  $10\times$  и окуляром  $7\times$ . Время прохождения частицей определенного пути измеряли секундометром с точностью 0.1 сек. Для минимизации тепловых потоков жидкости ток подавали на короткое время и после определения скорости одной или двух частиц направление тока меняли на обратное. Для вычисления электрофоретической подвижности и  $\zeta$ -потенциала использовали среднее значение скорости 25–30 частиц. Средняя погрешность измерений составляла 5–6% и не превышала 10%.

Расчет  $\zeta$ -потенциала частиц проводили по формуле Гельмгольца-Смолуховского

$$\zeta = \frac{\eta \cdot U}{E \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0},$$

где  $\eta$  – вязкость среды, Па·с;  $U$  – линейная скорость движения частиц, м/с;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

### *Результаты и их обсуждение*

На рисунке 1 представлены кривые потенциометрического титрования  $2 \cdot 10^{-3}$  М раствора  $H_2SO_4$  (1) и дисперсии МКЦ в этом растворе (2).

Из рисунка 1 следует, что точка пересечения кривых, соответствующая равенству адсорбции потенциалопределяющих ионов  $H^+$  и  $OH^-$  ( $\Gamma_{H^+} = \Gamma_{OH^-}$ ) и, следовательно, точке нулевого заряда ( $\sigma_0=0$ ) частиц МКЦ, находится при pH 5.6. Необходимо отметить, что так как при титровании кислой суспензии МКЦ раствором NaOH образуется  $Na_2SO_4$ , то найденное положение точки нулевого заряда ( $pH_{ТНЗ}=5.6$ ) отвечает нахождению частиц МКЦ в  $2 \cdot 10^{-3}$  М растворе  $Na_2SO_4$ . При  $pH < pH_{ТНЗ}$  преобладает адсорбция на поверхности частиц  $H^+$ -ионов ( $\Gamma_{H^+} > \Gamma_{OH^-}$  и  $\sigma_0 > 0$ ). Тогда как при  $pH > pH_{ТНЗ}$  наблюдается обратная картина ( $\Gamma_{H^+} < \Gamma_{OH^-}$  и  $\sigma_0 < 0$ ). На основании кривых потенциометрического титрования получена зависимость удельного поверхностного заряда частиц МКЦ от pH (регулирование pH производили  $H_2SO_4$ ), которая представлена на рисунке 2 (кривая 2). На этом же рисунке (кривая 1) приведена зависимость электрокинетического потенциала частиц МКЦ от pH, из которой следует, что изоэлектрическая точка ( $pH_{ИЭТ}$ ) соответствует  $pH=2$ . Наблюдаемое значительное различие в положениях  $pH_{ИЭТ}=2.0$  и  $pH_{ТНЗ}=5.6$  может быть объяснено специфической адсорбцией ионов  $SO_4^{2-}$ , входящих в слой Штерна двойного электрического слоя частиц.

Схематически строение ДЭС частиц МКЦ при различных значениях pH может быть представлено следующим образом (рис. 3).

Рис. 1. Кривые потенциометрического титрования  $2 \cdot 10^{-3}$  М раствора  $H_2SO_4$  (1) и дисперсии МКЦ в этом растворе (2)

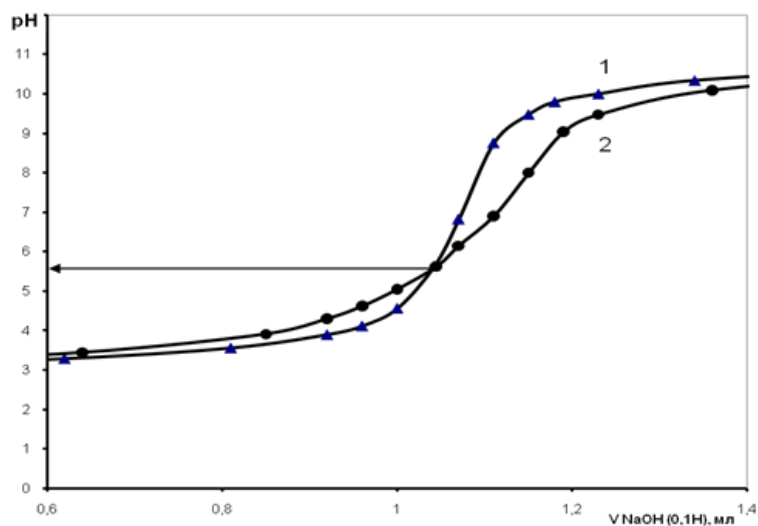


Рис. 2. Зависимость  $\zeta$ -потенциала (1) и  $\sigma_0$  (2) частиц МКЦ от pH

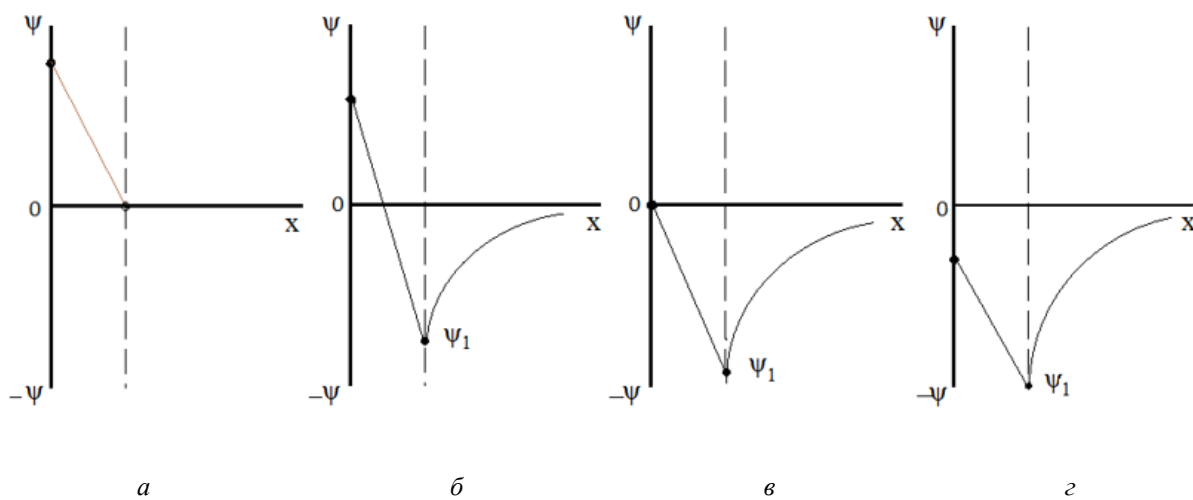
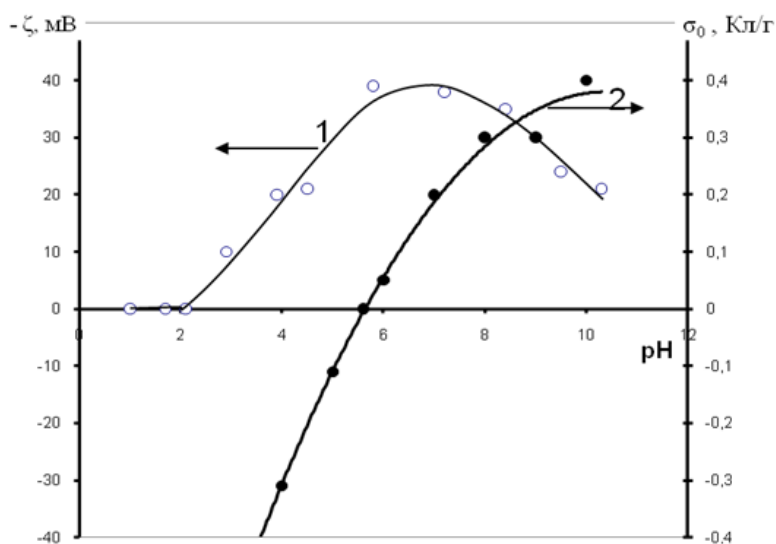


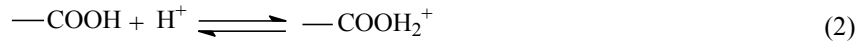
Рис. 3. Схематическое строение двойного электрического слоя частиц МКЦ при различных значениях pH: 2.0 (а); 4.0 (б); 5.6 (в); 7.0 (г)

Следует отметить, что при расчетах энергии парного взаимодействия частиц используется  $\psi_1$ -потенциал, приблизительно равный экспериментально определяемому  $\zeta$ -потенциалу.

Приведенное выше строение ДЭС частиц МКЦ базируется на общепринятых представлениях о том, что заряд (потенциал) поверхности частиц ( $\sigma_0$ ,  $\psi_0$ ) определяется наличием и состоянием поверхностных карбоксильных (COOH) групп [24]. Кроме реакции диссоциации этих групп



мы принимаем возможность протекания реакции их протонирования



приводящей к появлению положительных значений  $\sigma_0$ ,  $\psi_0$  в кислой области pH. Таким образом, при pH 2.0 (рис. 3а), отвечающей изоэлектрической точке частиц МКЦ, положительный заряд на поверхности частиц ( $\sigma_0 > 0$ ), возникающий в результате протекания реакции (2), и, следовательно, положительный потенциал  $\psi_0$ , полностью компенсирован специфической адсорбцией ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ , входящих в слой Штерна. Результирующий  $\psi_1$  потенциал равен нулю. Увеличение pH до 4.0 (рис. 3б) приводит к уменьшению адсорбции  $\text{H}^+$ -ионов, уменьшению величин  $\sigma_0$  и  $\psi_0$ , преобладанию адсорбции  $\text{SO}_4^{2-}$ -ионов и, следовательно, к появлению отрицательных значений  $\sigma_1$  и  $\psi_1$ . При pH 5.6 (рис. 3в), отвечающем  $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}$ , т.е. равенству адсорбции  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  ионов,  $\sigma_0$  и  $\psi_0$ , равны нулю. Отрицательные значения  $\sigma_1$  и  $\psi_1$ , определяются полностью специфической адсорбцией ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ . При  $\text{pH} > \text{pH}_{\text{ТНЗ}}$  (рис. 3г) возникающий в результате протекания реакции (1) заряд  $\sigma_0$ , а также заряд за счет специфической адсорбции  $\text{SO}_4^{2-}$  ионов отрицательны, суммарный заряд также отрицателен ( $\sigma_1 < 0$  и  $\psi_1 < 0$ ). Принимая, что  $\psi_1$ -потенциал приблизительно соответствует  $\zeta$ -потенциалу, все вышеприведенные рассуждения можно отнести к демонстрации влияния pH на величину  $\zeta$ -потенциала частиц МКЦ.

На рисунке 4 представлена зависимость  $\zeta$ -потенциала от pH для частиц МКЦ в отсутствие (кривая 1) и в присутствии  $\text{TiOSO}_4$  (кривая 2). Видно, что введение  $\text{TiOSO}_4$  приводит к смещению положения  $\text{pH}_{\text{ИЭТ}}$  в менее кислую область (с  $\text{pH}=2.0$  до  $\text{pH}=3.6$ ), что обусловлено специфической адсорбцией положительно заряженных частиц – продуктов гидролиза  $\text{TiOSO}_4$ .

Об их образовании при  $\text{pH} < 5.6$  свидетельствует рисунок 5, на котором представлена зависимость  $\zeta(\text{pH})$  частиц – продуктов гидролиза  $\text{TiOSO}_4$ .

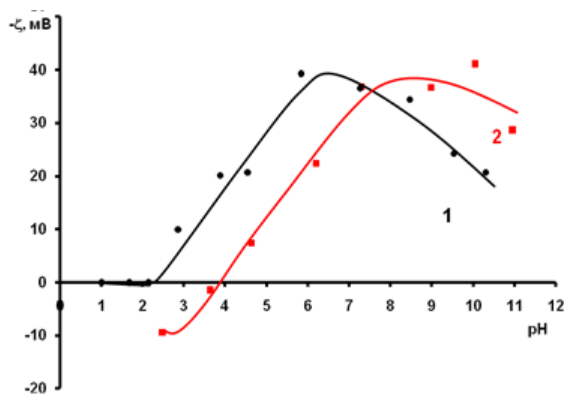


Рис. 4. Влияние  $\text{TiOSO}_4$  на зависимость  $\zeta$ -потенциала частиц МКЦ от pH. Концентрация  $\text{TiOSO}_4$ , моль/л: 0 (1);  $3 \cdot 10^{-5}$  (2)

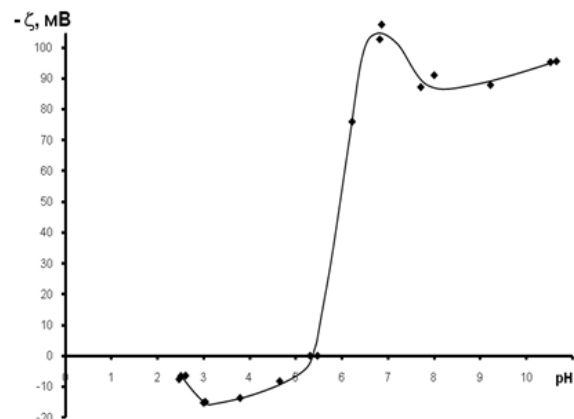


Рис. 5. Зависимость  $\zeta$ -потенциала частиц – продуктов гидролиза  $\text{TiOSO}_4$  от pH. Концентрация  $\text{TiOSO}_4$   $3 \cdot 10^{-4}$  моль/л

### Выводы

1. Показано значительное различие в положении точки нулевого заряда ( $\sigma_0=0$ ,  $\text{pH}_{\text{ТНЗ}}=5.6$ ) и изоэлектрической точки ( $\zeta=0$ ,  $\text{pH}_{\text{ИЭТ}}=2.0$ ) частиц МКЦ в водных растворах, содержащих ионы  $\text{SO}_4^{2-}$ .
2. Наблюдаемый эффект, свидетельствующий о возможности различия в знаках плотности заряда ( $\sigma_0$  и  $\sigma_1$ ), а также потенциалов ( $\psi_0$  и  $\psi_1 \approx \zeta$ ), обусловлен специфической адсорбцией на частицах МКЦ анионов  $\text{SO}_4^{2-}$ .
3. Приведено схематичное строение ДЭС частиц МКЦ при различных значениях pH.
4. Показана возможность специфической адсорбции положительно заряженных продуктов гидролиза  $\text{TiOSO}_4$  на частицах МКЦ, приводящей к смещению положения их изоэлектрической точки в менее кислую область pH ( $\text{pH}_{\text{ИЭТ}}=3.6$ ).

**Список литературы**

1. Kennedy J.F., Phillips G.O., Piculele L. Cellulose and cellulose derivatives: Physico-chemical aspects and industrial applications. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 1995.
2. Виноградова Л.И., Мельчакова Н.А., Шарков В.В., Шашилев А.В., Буров А.В. Влияние продуктов модификации целлюлозы на прочностные характеристики бумажного полотна // Химия и технология бумаги: межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛТА, 1983. С. 87–90.
3. Терентьева Э.П., Шарков В.В., Мельчакова Н.А. и др. Применение производных целлюлозы для упрочнения бумажного листа в полусухом и влажном состоянии // Состояние и перспективы развития технологии и оборудования ЦБП: межвуз. сб. науч. тр. Л.: ЛТИЦБП, 1982. С. 123–124.
4. Арсентьев В.А., Биленко Л.Ф., Вайсберг Л.А. Механическая активация сверх-тонких порошков на вибрационной мельнице // Вестник НТУ «ХПИ». 2006. №30. С. 53–63.
5. Арсентьев В.А., Биленко Л.Ф., Вайсберг Л.А., Дьячкова Т.Ф., Зуйков А.А., Сарана Н.В., Товстошкурова Д.У. Возможности применения плакированных волокон целлюлозы в бумажной промышленности // Вестник НТУ «ХПИ». 2008. №38. С. 7–11.
6. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Л., 1984. 368 с.
7. Евстигнеев Э.И. Путь волокна. Значение структуры древесины в технологии волокнистых полуфабрикатов и бумаги: монография. СПб., 2012. 308 с.
8. Юрьев В.И. Поверхностные свойства целлюлозных волокнистых материалов. СПб., 1996. 100 с.
9. Скурихина Г.М., Юрьев В.И. Изучение обменно-адсорбционных свойств монокарбоксилцеллюлозы // Журнал прикладной химии. 1958. Т. 31. №5. С. 931–937.
10. Виноградова Л.Г., Юрьев В.И. Сорбционные свойства различных видов древесной целлюлозы по отношению к золю гидрооксида алюминия // Химия и технология целлюлозы. 1977. №4. С. 112–115.
11. Юрьев В.И., Позин С.С., Скурихина Т.М. Влияние степени провара (жесткости) сульфитной небеленой целлюлозы на ее обменно-адсорбционные и электрокинетические свойства // Изв. вузов. Лесной журнал. 1958. №5. С. 147–151.
12. Heymann E., Rabinov G. The acid nature of cellulose. I. Equilibria between cellulose and salts // J. Phys. Chem. 1941. Vol. 5. N8. Pp. 1152–1166.
13. Скурихина Г.М., Юрьев В.И. Обменно-адсорбционное равновесие на целлюлозных материалах // Изв. вузов. Лесной журнал. 1959. №6. С. 139–146.
14. Заплата В.М., Виноградова Л.Г., Юрьев В.И. Изменение сорбционных свойств целлюлозы в процессе размола // Химия и технология целлюлозы и бумаги. 1973. Вып. I. С. 214–230.
15. Юрьев В.И., Скурихина Г.М. Ионнообменная способность однозамещенных фталевых и малеиновых эфиров целлюлозы // Журнал прикладной химии. 1980. Т. 33, вып. 12. С. 2603–2805.
16. Никитин Н.И. Химия древесины и целлюлозы. М.; Л., 1962. 712 с.
17. Юрьев В.И., Позин С.С. Изучение электрокинетических свойств монокарбоксилцеллюлозы и некоторых кислых эфиров целлюлозы // Коллоидный журнал. 1961. Т. 23. №4. С. 499–503.
18. Лашкевич О.В., Дягилева А.Б., Чернобережский Ю.М. Влияние pH на электроповерхностные свойства и агрегативную устойчивость водных дисперсий порошковой целлюлозы // Коллоидный журнал. 1998. Т. 60. №1. С. 42–45.
19. Izmailova N., Shabiev R., Lorentsson A., Saprykina N. Application of titanil sulphate for manufacturing paper containing TiO<sub>2</sub> filler // Химия растительного сырья. 2018. №3. С. 271–278.
20. Grankarić A.M., Ristić N., Tarbuk A., Ristić I. Electrokinetic Phenomena of Cationised Cotton and Dyeability with Reactive Dyes // FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe. 2013. Vol. 21. N6(102). Pp. 106–110.
21. Herrington T.M., Petzold J.C. An investigation into the nature of charge on the surface of papermaking woodpulp. I. Charge/pH isotherms. // Colloids and surfaces. 1992. Vol. 64. Pp. 97–108.
22. Смолин А.С., Бисальски М., Шабель С., Шабиев Р.О. Влияние размола и фракционирования на электроповерхностные свойства целлюлозных гидросуспензий // Химия растительного сырья. 2011. №3. С. 183–192.
23. Григоров О.Н., Карпова И.Ф., Козьмина З.П., Тихомолова К.П., Фридрихсберг Д.А., Чернобережский Ю.М. Руководство к практическим работам по коллоидной химии. Л., 1964. 332 с.
24. Чернобережский Ю.М., Кизим А.И., Капишова И.В., Сухов Д.А., Долгин Г.Л. О временной зависимости положения точки нулевого заряда порошковой целлюлозы // Коллоидный журнал. 1991. Т. 53. №2. С. 404–406.

*Поступила в редакцию 23 октября 2020 г.*

*После переработки 12 апреля 2021 г.*

*Принята к публикации 13 апреля 2021 г.*

**Для цитирования:** Лоренцсон А.В., Королева Н.Л., Чернобережский Ю.М. Влияние электролитов на электроповерхностные свойства частиц микрокристаллической целлюлозы // Химия растительного сырья. 2021. №3. С. 55–60. DOI: 10.14258/jcprgm.2021038738.

Lorentsson A.V.\*, Koroleva N.L., Chernoberezhskii Yu.M. EFFECT OF ELECTROLYTES ON ELECTROSURFACE PROPERTIES OF MICROCRYSTALLINE CELLULOSE PARTICLES

Saint Petersburg state University of industrial technologies and design. Higher school of technology and energy, ul. Ivana Chernykh, 4, St. Petersburg, 198095 (Russia), e-mail: lorens74@mail.ru

The electrical surface properties (specific surface charge of particles -  $\sigma_0$ , point of zero charge -  $\text{pH}_{\text{PZC}}$ , electrokinetic potential -  $\zeta$  and position of isoelectric point -  $\text{pH}_{\text{IEP}}$ ) of dispersions of microcrystalline cellulose (MCC) in aqueous solutions of  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  and  $\text{TiOSO}_4$  were investigated. Significant effects of specific adsorption of anions and cations on  $\text{pH}_{\text{PZC}}$  and  $\text{pH}_{\text{IEP}}$  have been demonstrated. The isoelectric point of the MCC particles in the  $\text{H}_2\text{SO}_4$  solution is at  $\text{pH}$  2.0, while the zero charge point in  $5 \cdot 10^{-4}$  M solution  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  at  $\text{pH}$  5.6. An explanation of the observed effects is given. Possible schemes of the structure of the electrical double layer at different  $\text{pH}$  values, taking into account specific adsorption of ions in the Stern layer, are given. The introduction of  $\text{TiOSO}_4$  ( $10^{-5}$  mol/dm<sup>3</sup>) shifts the position of IEP to a less acidic region ( $\text{pH}_{\text{IEP}}$  4.5) due to the specific adsorption of positively charged  $\text{TiOSO}_4$  hydrolysis products particles.

**Keywords:** microcrystalline cellulose, electrical double layer, electrical surface properties.

### References

- Kennedy J.F., Phillips G.O., Piculele L. *Cellulose and cellulose derivatives: Physico-chemical aspects and industrial applications*. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 1995.
- Vinogradova L.I., Mel'chakova N.A., Sharkov V.V., Shashilov A.V., Burov A.V. *Khimiya i tekhnologiya bumagi: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [Chemistry and technology of paper: interuniversity collection of scientific papers]. Leningrad, 1983, pp. 87–90. (in Russ.).
- Terent'yeva E.P., Sharkov V.V., Mel'chakova N.A. i dr. *Sostoyaniye i perspektivy razvitiya tekhnologii i oborudovaniya TsBP: mezhvuz. sb. nauch. tr.* [State and prospects for the development of technology and equipment for pulp and paper industry: interuniversity collection of scientific papers]. Leningrad, 1982, pp. 123–124. (in Russ.).
- Arsent'yev V.A., Bilenko L.F., Vaysberg L.A. *Vestnik NTU «KhPI»*, 2006, no. 30, pp. 53–63. (in Russ.).
- Arsent'yev V.A., Bilenko L.F., Vaysberg L.A., D'yachkova T.F., Zuykov A.A., Sarana N.V., Tovstoshkurova D.U. *Vestnik NTU «KhPI»*, 2008, no. 38, pp. 7–11. (in Russ.).
- Fridrikhsberg D.A. *Kurs kolloidnoy khimii. Uchebnik dlya vuzov. 2-ye izd., pererab. i dop.* [Colloidal chemistry course. Textbook for universities. 2nd ed., Rev. and add.]. Leningrad, 1984, 368 p. (in Russ.).
- Yevstigneyev E.I. *Put' volokna. Znachenkiye struktury drevesiny v tekhnologii voloknistykh polufabrikatov i bumagi: monografiya*. [Fiber path. The value of wood structure in the technology of fibrous semi-finished products and paper: monograph]. St.-Petersburg, 2012, 308 p. (in Russ.).
- Yur'yev V.I. *Poverkhnostnyye svoystva tsellyuloznykh voloknistykh materialov*. [Surface properties of cellulosic fibrous materials]. St.-Petersburg, 1996, 100 p. (in Russ.).
- Skurikhina G.M., Yur'yev V.I. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 1958, vol. 31, no. 5, pp. 931–937. (in Russ.).
- Vinogradova L.G., Yur'yev V.I. *Khimiya i tekhnologiya tsellyulozy*, 1977, no. 4, pp. 112–115. (in Russ.).
- Yur'yev V.I., Pozin S.S., Skurikhina T.M. *Izv. vuzov. Lesnoy zhurnal*, 1958, no. 5, pp. 147–151. (in Russ.).
- Heymann E., Rabinov G. *J. Phys. Chem.*, 1941, vol. 5, no. 8, pp. 1152–1166.
- Skurikhina G.M., Yur'yev V.I. *Izv. vuzov. Lesnoy zhurnal*, 1959, no. 6, pp. 139–146. (in Russ.).
- Zaplatila B.M., Vinogradova L.G., Yur'yev V.I. *Khimiya i tekhnologiya tsellyulozy i bumagi*, 1973, vol. I, pp. 214–230. (in Russ.).
- Yur'yev V.I., Skurikhina G.M. *Zhurnal prikladnoy khimii*, 1980, vol. 33, no. 12, pp. 2603–2805. (in Russ.).
- Nikitin N.I. *Khimiya drevesiny i tsellyulozy*. [Chemistry of wood and cellulose]. Moscow; Leningrad, 1962, 712 p. (in Russ.).
- Yur'yev V.I., Pozin S.S. *Kolloidnyy zhurnal*, 1961, vol. 23, no. 4, pp. 499–503. (in Russ.).
- Lashkevich O.V., Dyagileva A.B., Chernoberezhskiy Yu.M. *Kolloidnyy zhurnal*, 1998, vol. 60, no. 1, pp. 42–45. (in Russ.).
- Izmailova N., Shabiev R., Lorentsson A., Saprykina N. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2018, no. 3, pp. 271–278.
- Grankarić A.M., Ristić N., Tarbuk A., Ristić I. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, 2013, vol. 21, no. 6(102), pp. 106–110.
- Herrington T.M., Petzold J.C. *Colloids and surfaces*, 1992, vol. 64, pp. 97–108.
- Smolin A.S., Bisal'ski M., Shabel' S., Shabiyevev R.O. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2011, no. 3, pp. 183–192. (in Russ.).
- Grigorov O.N., Karpova I.F., Koz'mina Z.P., Tikhomolova K.P., Fridrikhsberg D.A., Chernoberezhskiy Yu.M. *Rukovodstvo k prakticheskim rabotam po kolloidnoy khimii*. [A guide to practical work in colloidal chemistry]. Leningrad, 1964, 332 p. (in Russ.).
- Chernoberezhskiy Yu.M., Kizim A.I., Kapishova I.V., Sukhov D.A., Dolgin G.L. *Kolloidnyy zhurnal*, 1991, vol. 53, no. 2, pp. 404–406. (in Russ.).

Received October 23, 2020

Revised April 12, 2021

Accepted April 13, 2021

**For citing:** Lorentsson A.V., Koroleva N.L., Chernoberezhskii Yu.M. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2021, no. 3, pp. 55–60. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2021038738.

\* Corresponding author.