

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)
УДК 541.64
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-551-557>

Поступило в редакцию 06.05.2020
Received 06.05.2020

**С. В. Буча, Ю. В. Липай, П. Д. Воробьев, Д. В. Чередниченко,
А. Д. Воробьев, академик Н. П. Крутько**

*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

СТРУКТУРНО-РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ И АНИОННЫХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Аннотация. Изучено влияние додецилсульфата натрия и олеата натрия на структурно-реологические свойства диспергированного гидрогеля на основе полиакриловой кислоты. Показано, что вязкость композиций гидрогеля с поверхностно-активными веществами выше вязкости отдельных компонентов и увеличивается при повышении температуры от 20 до 40 °С. Композиции с олеатом натрия относятся к неньютоновским жидкостям и проявляют тиксотропные свойства.

Ключевые слова: полимерный гидрогель, поверхностно-активное вещество, реологические свойства, мицелла, структура

Для цитирования. Структурно-реологические свойства систем на основе полимерных гидрогелей и анионных поверхностно-активных веществ / С. В. Буча [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 5. – С. 551–557. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-551-557>

**Sviatlana V. Bucha, Yuliya V. Lipai, Pavel D. Vorobiev, Denis V. Cherednichenko,
Artyom D. Vorobiov, Academician Nikolay P. Krutko**

*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

STRUCTURAL-RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SYSTEMS BASED ON POLYMERIC HYDROGELS AND ANIONIC SURFACTANTS

Abstract. The effect of sodium dodecyl sulfate and sodium oleate on the structural-rheological properties of a dispersed hydrogel based on polyacrylic acid was studied. It was shown that the viscosity of hydrogel compositions with surfactants is higher than the viscosity of the individual components and increases with increasing temperature from 20 to 40 °C. Compositions with sodium oleate are non-Newton liquids and exhibit thixotropic properties.

Keywords: polymer hydrogel, surfactant, rheological properties, micelle, structure

For citation: Bucha S. V., Lipai Yu. V., Vorobiev P. D., Cherednichenko D. V., Vorobiov A. D., Krutko N. P. Structural-rheological properties of systems based on polymeric hydrogels and anionic surfactants. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 5, pp. 551–557 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-5-551-557>

Введение. В настоящее время исследования поверхностных явлений в растворах смесей полиэлектролитов и поверхностно-активных веществ (ПАВ) представляют быстро развивающуюся область коллоидной химии [1–4]. Растворы смесей полиэлектролитов с ПАВ часто используются в медицине, фармацевтической, косметической и пищевой отраслях промышленности. Во многих случаях эффективность использования таких систем, прежде всего, в виде пен и эмульсий, определяется их поверхностными и реологическими свойствами [5; 6].

Особое место в этом направлении занимают редкосшитые полимеры с высокой степенью набухания в воде – полимерные гидрогели (ПГ). На их основе возможно создание материалов нового типа, обладающих уникальными свойствами. Гидрогели способны обратимо реагировать на незначительные изменения свойств среды (рН, температура, состав внешней среды, электрическое поле), причем реакция системы легко видна невооруженным глазом (образование новой фазы, резкое набухание или сжатие гидрогеля). Данные специфические свойства обусловлены

особым строением ПГ, а именно, наличием пространственной трехмерной сетки, образованной большим числом макромолекул полимеров, химически сшитых поперечными связями [7; 8].

Исследование взаимодействия полимерных слабосшитых гелей с низкомолекулярными амфифильными соединениями важно для развития фундаментальных представлений о физико-химических свойствах полимерных сеток. Кроме того, изучение взаимодействий в системе «гидрогель–низкомолекулярный ПАВ» представляется весьма перспективным с практической точки зрения, поскольку это простой и эффективный метод модификации свойств полимерных материалов и получения новых форм функциональных полимерных систем.

Традиционно взаимодействие полимеров и ПАВ на межфазных границах жидкость/жидкость и жидкость/газ исследуют с помощью измерения поверхностного натяжения и реологических свойств. В ряде работ показано, что добавление ПАВ к раствору полиэлектролита приводит к изменению вязкости и поверхностного натяжения за счет образования полимер-коллоидных комплексов [9; 10]. В смеси полиэлектролита и ПАВ электростатические силы притяжения между заряженными сегментами полимерной цепи и молекулами ПАВ, а также гидрофобные взаимодействия между неполярными группами ПАВ и полимера приводят к образованию комплекса, поверхностно-активные и реологические свойства которого отличаются от свойств входящих в его состав компонентов.

Возможны аналогичные процессы в системах, содержащих полимерный гидрогель и ПАВ, однако взаимодействие компонентов в этом случае происходит не в растворе, а на границе раздела фаз гель/жидкость. Обнаружен коллапс полиэлектролитных гидрогелей, индуцируемый взаимодействием с противоположно заряженными ПАВ. Показано, что переход от набухшего к сколлапсированному гелю связан с абсорбцией, концентрированием и образованием межмолекулярных агрегатов низкомолекулярных ПАВ в геле [11; 12].

Взаимодействие дисперсий на основе одноименно заряженных полиэлектролитных гидрогелей и поверхностно-активных веществ практически не описано в литературе и представляет научный и практический интерес для оценки возможности получения материалов с заданными свойствами.

В данном сообщении приведены результаты исследования коллоидно-химических свойств систем, содержащих дисперсии частиц полимерного гидрогеля на основе полиакриловой кислоты и анионные поверхностно-активные вещества.

Материалы и методы исследования. Равновесно набухший в воде ПГ, полученный на основе полиакриловой кислоты и поливинилового спирта [13], диспергировали до фракции с размером частиц 0,2–0,3 мм и помещали в водный раствор ПАВ. Содержание дисперсной фазы (гидрогелевых частиц) 50 %, ПАВ (додецилсульфат и олеат натрия) 1,0; 3,0 и 5,0 % от массы дисперсной фазы.

Вязкость, скорость сдвига и напряжение сдвига дисперсии ПГ и смесей ПГ с ПАВ определяли при $20 \pm 0,5$ °C на ротационном вискозиметре «Brookfield» марки «LV DV++ Pro» со стандартными комплектами S18 и S16.

Результаты и их обсуждение. Как следует из рис. 1, вязкость смеси гидрогеля и додецилсульфата натрия выше по сравнению с гелем без добавок поверхностно-активного вещества. В дисперсии гидрогеля в присутствии ПАВ граничные слои воды перестраиваются на минимизацию контакта неполярных групп ПАВ с водой. Гидрофобные взаимодействия между неполярными участками молекул ПАВ и макромолекул полимеров в сетке гидрогеля способствуют образованию мицеллярных областей и увеличению прочности дисперсной системы [2; 14].

На границе раздела фаз гидрогель/раствор молекулы анионного ПАВ отталкиваются от поверхности частиц ПГ вследствие одноименного заряда карбоксильных групп гидрогеля и сульфатных групп молекул ПАВ. Это препятствует проникновению молекул ПАВ внутрь набухших частиц и их равномерному распределению. Таким образом, при введении анионного ПАВ в дисперсию гидрогеля электростатическое отталкивание одноименно заряженных групп сетки геля, молекул ПАВ и «выталкивание» со стороны молекул воды неполярных фрагментов ПАВ и полимера структурирует систему, о чем свидетельствует увеличение вязкости композиции гидрогеля с додецилсульфатом натрия.

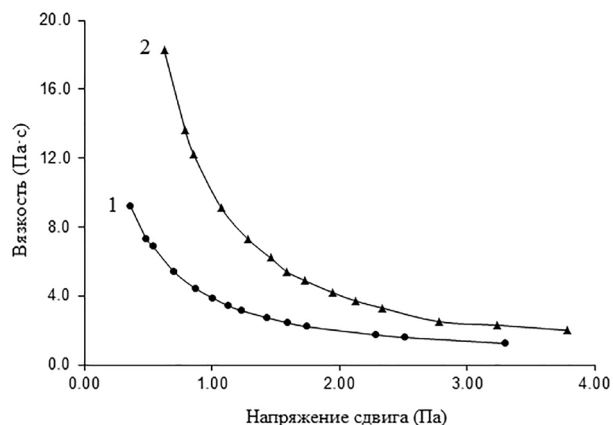


Рис. 1. Зависимость вязкости от напряжения сдвига ПГ (1) и смеси ПГ с додецилсульфатом натрия (2) (концентрация ПАВ 5,0 %)

Fig. 1. Viscosity vs. shear stress of PH (1) and a mixture of PH with sodium dodecylsulfate (2) (surfactant concentration of 5.0 %)

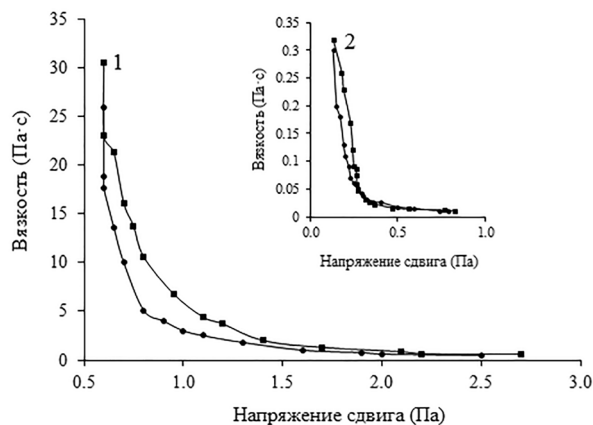


Рис. 2. Зависимость вязкости от напряжения сдвига гидрогеля (1) и олеата натрия (содержание 1,0 %) (2) при температуре 20 °С: ■ – прямой ход кривой; ● – обратный ход кривой

Fig. 2. Viscosity vs. shear stress of hydrogel (1) and sodium oleate (content of 1.0 %) (2) at a temperature of 20 °С: ■ – direct curve; ● – return curve

В соответствии с общей классификацией дисперсных систем по характеру реологического течения гели относятся к неньютоновским жидкостям, характеризующимся снижением вязкости при увеличении скорости сдвига. По мнению авторов [14], этот факт связан с сохранением пространственной сетки геля при низких значениях скорости сдвига, вследствие чего вязкость системы высока. При увеличении скорости сдвига элементы сетки геля дезагрегируют, ориентируются по направлению течения, происходит проскальзывание их друг относительно друга, и, как следствие, снижение вязкости гелей. В дисперсии гидрогелевых частиц на поверхности каждой частицы молекулы воды формируют гидратный слой. Реологические свойства дисперсии частиц геля без ПАВ характеризуют структуру, полученную за счет взаимодействия частиц геля через гидратные внешние слои. Как видно из рис. 2, вязкость дисперсии полимерного гидрогеля снижается с ростом напряжения сдвига.

Молекулярный раствор олеата натрия обладает относительно невысокой вязкостью и при низких значениях напряжения сдвига достигает 0,2–0,3 Па·с (рис. 2). Растворимые в воде соли карбоновых кислот (мыла) склонны к формированию слоистых гелеобразных структур. С увеличением напряжения сдвига ориентированные слои молекул ПАВ разрушаются на частицы коллоидных размеров – мицеллы, которые формируют ассоциаты сольватированных молекул. Результатом является уменьшение вязкости раствора олеата натрия с увеличением напряжения сдвига.

Вязкость композиции ПГ с олеатом натрия выше по сравнению с индивидуальными компонентами в десятки и сотни раз в зависимости от содержания ПАВ в дисперсии гидрогеля (рис. 3), что свидетельствует о формировании структуры при смешивании гидрогеля и ПАВ.

Одноименно заряженные диссоциированные карбоксильные группы, зафиксированные в сетке ПГ, и полярные группы молекул ПАВ отталкиваются друг от друга. Кроме того, в системе при используемой концентрации ПАВ, превышающей ККМ ($26 \cdot 10^{-3}$ моль/л [15]), проявляется фактор структурно-механической устойчивости, обусловленный гидрофобными взаимодействиями неполярных групп компонентов. Мицеллярные области, которые формируются вследствие гидрофобного взаимодействия неполярных частей молекул ПАВ, уплотняются за счет «вытеснения» со стороны воды и отталкивания от одноименно заряженных анионных групп гидрогеля. Контактная с гидрофобными участками полимерной сетки ПГ мицеллы ПАВ способствуют образованию «мостичных» связей, соединяющих частицы геля друг с другом.

Композиции ПГ с ПАВ проявляют свойства неньютоновских жидкостей. При относительно низком содержании олеата натрия (1,0 %) наблюдается явление дилатансии, характеризующееся

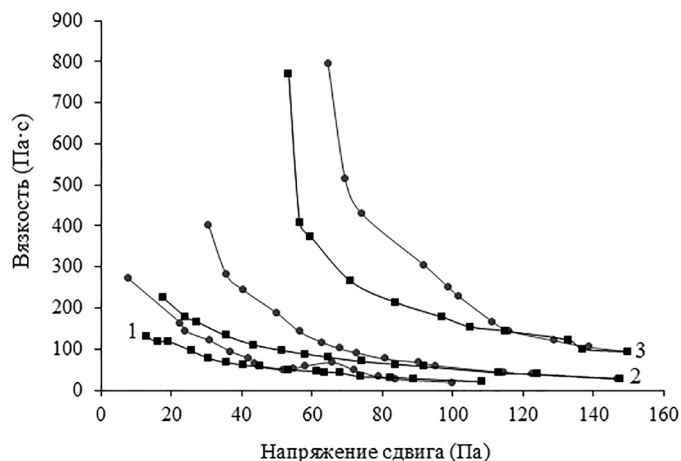


Рис. 3. Вязкость композиций ПГ–ПАВ в зависимости от напряжения сдвига и содержания ПАВ 1,0 % (1); 3,0 % (2); 5,0 % (3) (20 °С): ■ – прямой ход кривой; ● – обратный ход кривой

Fig. 3. The viscosity of the compositions PH–surfactant vs. shear stress and the content of surfactant 1.0 % (1); 3.0 % (2); 5.0 % (3) (20 °С): ■ – direct curve; ● – return curve

скачком вязкости при изменении напряжения сдвига (рис. 4), что может быть обусловлено нестабильностью образующихся контактов между частицами гидрогеля. При повышении температуры от 20 до 30 и 40 °С (рис. 4) и с ростом содержания ПАВ до 3,0 % (рис. 5) дилатансии не наблюдается, что свидетельствует об увеличении прочности структурированных мицеллярных прослоек из молекул ПАВ, формирующихся между частицами гидрогеля.

Как видно из реограмм, приведенных на рис. 5, композиции геля с олеатом натрия проявляют тиксотропные свойства. Вязкостная тиксотропия при высоких напряжениях сдвига свидетельствует о разрушении и последующем восстановлении структуры, сформированной из частиц геля и мицелл ПАВ. Проявление тиксотропных свойств в рассматриваемом случае свидетельствует о том, что определяющее значение в образовании структуры принадлежит гидрофобным взаимодействиям, которые имеют тенденцию к усилению с ростом температуры и с увеличением концентрации мицеллообразующего поверхностно-активного вещества.

Анализ реологических кривых, построенных для композиции гидрогеля с ПАВ с содержанием последнего 3 % при различных температурах, позволил рассчитать структурно-реологические характеристики исследуемой системы (таблица). В соответствии с [16] на реологической кри-

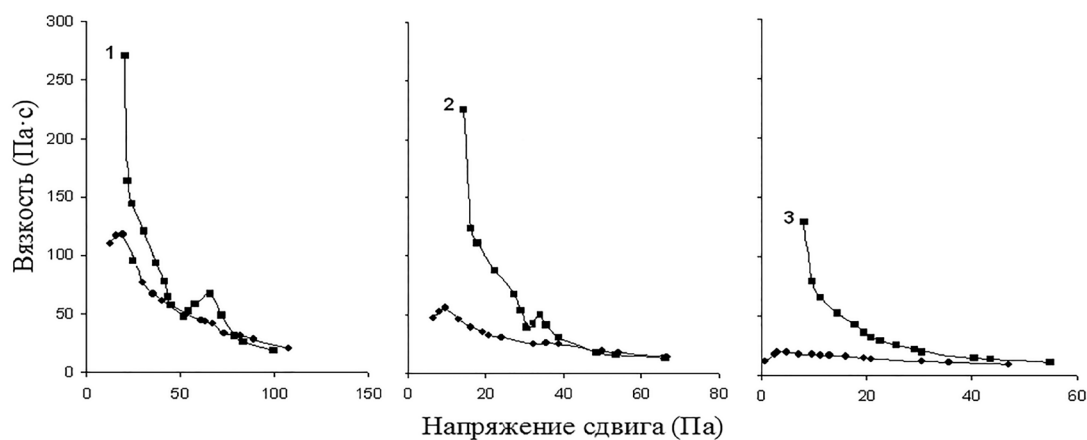


Рис. 4. Вязкость композиций ПГ–ПАВ (содержание ПАВ 1,0 %) в зависимости от напряжения сдвига при 20 °С (1); 30 °С (2); 40 °С (3): ■ – прямой ход кривой; ● – обратный ход кривой

Fig. 4. Viscosity vs. shear stress of the compositions PH–surfactant (surfactant content of 1.0 %) at 20 °С (1); 30 °С (2); 40 °С (3): ■ – direct curve; ● – return curve

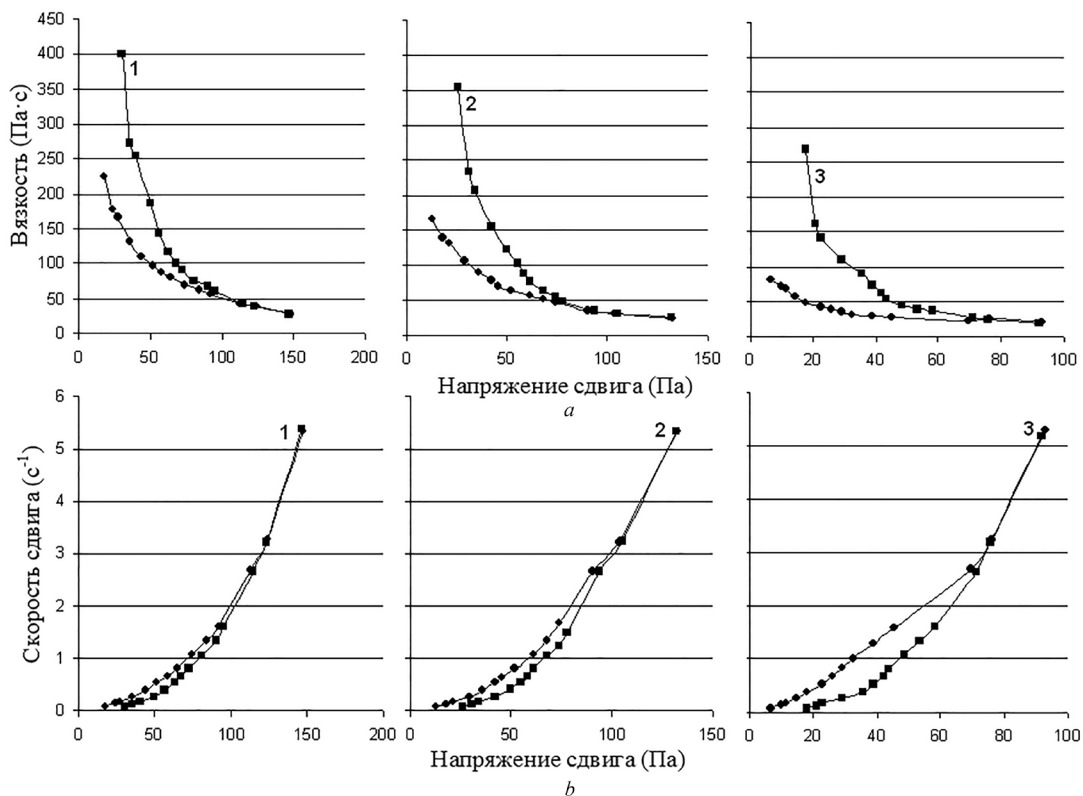


Рис. 5. Вязкость композиций ПГ–ПАВ (содержание ПАВ 3,0 %) в зависимости от напряжения сдвига при 20 °С (1); 30 °С (2); 40 °С (3): ■ – прямой ход кривой; ● – обратный ход кривой

Fig. 5. Viscosity vs. shear stress of the compositions PH–surfactant (surfactant content of 3.0 %) at 20 °C (1); 30 °C (2); 40 °C (3): ■ – direct curve; ● – return curve

вой в области до нижнего предела текучести P_{k1} деформации полностью обратимы. На участке выше P_{k1} движение системы характеризуется наибольшей пластической вязкостью по Шведову η_0^* . В этой области происходит незначительное разрушение связей между частицами гидрогеля и мицеллами ПАВ, которые при малых скоростях сдвига успевают восстанавливаться.

Структурно-реологические характеристики композиций гидрогеля с олеатом натрия

Structural-rheological characteristics of hydrogel compositions with sodium oleate

Концентрация ПАВ в композиции, мас. % Surfactant concentration	Температура термостатирования, °С Thermostating temperature, °C	P_{k1} , Па	η_0^* , Па·с	P_{k2} , Па	η_m^* , Па·с	P_m , Па
1	20	21,0	24,6	55,6	18,4	98,4
3		30,7	40,0	67,2	27,1	147,8
5		64,6	118,2	85,1	93,7	149,9
1	30	14,5	26,3	27,3	12,0	65,8
3		25,8	34,6	53,1	24,2	132,0
5		46,8	85,8	80,0	57,6	157,2
1	40	8,0	12,8	26,3	10,1	54,8
3		17,7	23,1	48,7	17,3	93,1
5		35,5	58,6	72,8	37,9	123,1

В системе выше динамического предела текучести (P_{k2}) наблюдается течение с минимальной пластической вязкостью. При увеличении скорости сдвига структурная сетка не выдерживает нагрузки и разрушается, вязкость уменьшается, что характеризуется изменением напряжения, соответствующего предельному разрушению структуры (P_m), и наименьшей пластической вязкости по Бингаму (η_m^*).

Прочность структуры и количество связей тем значительней, чем больше разность между вязкостью практически неразрушенной структуры (η_0^*) и вязкостью предельно разрушенной структуры (η_m^*). Как видно из таблицы, прочность связей в композиции возрастает с увеличением концентрации ПАВ от 1 до 5 %. О прочности связей в структуре композиционных материалов можно также судить по величине динамического предела текучести P_{k2} , соответствующего преодолению упругости системы и началу ее пластического течения. Чем выше значение предела текучести, тем прочнее связи и медленнее восстанавливается структура, что можно наблюдать при увеличении концентрации раствора олеата натрия в композиции.

Уменьшение значений P_m с ростом температуры свидетельствует о некотором ослаблении связей в структуре композиций ПГ–ПАВ, возможно, за счет увеличения количества и прочности контактов внутри мицелл ПАВ, не связанных с полимерной матрицей гидрогеля.

Заключение. Показано, что вязкость системы, содержащей диспергированный полимерный гидрогель на основе сшитой полиакриловой кислоты и анионное поверхностно-активное вещество, выше вязкости гидрогеля и ПАВ по отдельности при тех же концентрациях. Вязкость системы гидрогель/ПАВ выше в случае олеата натрия, чем додецилсульфата натрия, и при увеличении температуры от 20 до 40 °С.

Композиции полимерного гидрогеля с олеатом натрия проявляют свойства неньютоновских жидкостей. При относительно низком содержании ПАВ дисперсии являются дилатантными, что обусловлено разрушением контактов между частицами геля, образованных с участием молекул ПАВ. Отсутствие дилатансии при повышении температуры от 20 до 40 °С и с ростом содержания ПАВ до 3,0 %, а также тиксотропные свойства системы при высоких напряжениях сдвига свидетельствуют об увеличении прочности структуры, сформированной из частиц геля и мицелл ПАВ.

Список использованных источников

1. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг [и др.]. – М., 2007. – 528 с.
2. Сумм, Б. Д. Основы коллоидной химии / Б. Д. Сумм. – 2-е изд. – М., 2007. – 240 с.
3. Ionic surfactants with polymeric counterions / L. Piculell [et al.] // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2009. – Vol. 147–148. – P. 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.009>
4. Goddard, E. D. Polymer/Surfactant Interaction: Interfacial Aspects / E. D. Goddard // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2002. – Vol. 256, N 1. – P. 228–235. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.8066>
5. Taylor, D. J. F. Polymer/surfactant interactions at the air/water interface / D. J. F. Taylor, R. K. Thomas, J. Penfold // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2007. – Vol. 132, N 2. – P. 69–110. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.01.002>
6. Polymer–surfactant systems in bulk and at fluid interfaces / E. Guzmán [et al.] // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2016. – Vol. 233. – P. 38–64. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.11.001>
7. Филиппова, О. Е. «Восприимчивые» полимерные гели / О. Е. Филиппова // *Высокомолекулярные соед.* – 2000. – Т. 42, № 12. – С. 2328–2352.
8. Ruel-Gariepy, E. In situ-forming hydrogels – review of temperature-sensitive systems / E. Ruel-Gariepy, J.-C. Leroux // *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. – 2004. – Vol. 58. – P. 409–426. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2004.03.019>
9. Полимер-коллоидные комплексы сукцината хитозана с анионным ПАВ в водных средах / С. В. Шилова [и др.]. // *Вестн. Технолог. ун-та.* – 2017. – Т. 20, № 21. – С. 24–27.
10. Jain, N. J. Study of adsorbed monolayers of a cationic surfactant and an anionic polyelectrolyte at the air–water interface / N. J. Jain, P.-A. Albouy, D. Langevin // *Langmuir*. – 2003. – Vol. 19, N 14. – P. 5680–5690. <https://doi.org/10.1021/la0209051>
11. Hoare, T. R. Hydrogels in drug delivery: progress and challenges / T. R. Hoare, D. S. Kohane // *Polymer*. – 2008. – Vol. 49, N 8. – P. 1993–2007. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.01.027>
12. Тарарышкин, Д. В. Взаимодействие двух полиэлектролитных гелей в растворе противоположно заряженного поверхностно-активного вещества / Д. В. Тарарышкин, Е. Ю. Крамаренко, А. Р. Хохлов // *Высокомолекулярные соед., Сер. А.* – 2007. – Т. 49, № 10. – С. 1828–1837.
13. Гидроаккумулирующий полимерный комплекс на основе полиакриловой кислоты и поливинилового спирта / Ю. В. Матрунчик [и др.]. // *Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук.* – 2008. – № 4. – С. 81–84.
14. Шрамм, Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм; под ред. В. Г. Куличихина. – М., 2003. – 312 с.
15. Технология жиров и жирозаменителей / В. Х. Паронян [и др.]. – М., 1982. – 352 с.
16. Malkin, A. Y. Rheology: concepts, methods and applications / A. Y. Malkin, A. I. Isayev. – Elsevier Science, 2017. – 500 p. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-04626-4>

References

- Holmberg K., Jansson B., Kronberg B., Lindman B. *Surfactants and polymers in aqueous solutions*. John Wiley & Sons, Ltd, 2003. 545 p. <https://doi.org/10.1002/0470856424>
- Summ B. D. *Fundamentals of colloidal chemistry*. 2nd ed. Moscow, 2007. 240 p. (in Russian).
- Picullell L., Norrman J., Svensson A. V., Lynch I., Bernardes J. S., Loh W. Ionic surfactants with polymeric counterions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, vol. 147–148, pp. 228–236. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.09.009>
- Goddard E. D. Polymer/Surfactant Interaction: Interfacial Aspects. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, vol. 256, no. 1, pp. 228–235. <https://doi.org/10.1006/jcis.2001.8066>
- Taylor D. J. F., Thomas R. K., Penfold J. Polymer/surfactant interactions at the air/water interface. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2007, vol. 132, no. 2, pp. 69–110. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.01.002>
- Guzmán E., Llamas S., Maestro A., Fernández-Peña L., Akanno A., Miller R., Ortega F., Rubio R. G. Polymer–surfactant systems in bulk and at fluid interfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2016, vol. 233, pp. 38–64. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.11.001>
- Filippova O. E. Responsive polymer gels. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya C = Polymer Sciences. Series C*, 2000, vol. 42, no. 12, pp. 2328–2352 (in Russian).
- Ruel-Gariepy E., Leroux J.-C. In situ-forming hydrogels – review of temperature-sensitive systems. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2004, vol. 58, no. 2, pp. 409–426. <https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2004.03.019>
- Shilova S. V., Basyrova S. I., Tretyakova A. Ya., Barabanov V. P. Polymer-colloidal complexes of chitosan succinate with anionic surfactants in aqueous media. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*, 2017, vol. 20, no. 21, pp. 24–27 (in Russian).
- Jain N. J., Albouy P.-A., Langevin D. Study of adsorbed monolayers of a cationic surfactant and an anionic polyelectrolyte at the air–water interface. *Langmuir*, 2003, vol. 19, no. 14, pp. 5680–5690. <https://doi.org/10.1021/la0209051>
- Hoare T. R., Kohane D. S. Hydrogels in drug delivery: progress and challenges. *Polymer*, 2008, vol. 49, no. 8, pp. 1993–2007. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.01.027>
- Tararyshkin D. V., Kramarenko E. Yu., Khokhlov A. R. Interaction of two polyelectrolyte gels in solution of an oppositely charged surfactant. *Polymer Science Series A*, 2007, vol. 49, no. 10, pp. 1129–1136. <https://doi.org/10.1134/s0965545x07100100>
- Matrunchik Yu. V., Vorobyeva E. V., Basalyga I. I., Krutko N. P. Hydroaccumulating polymer complex based on polyacrylic acid and polyvinyl alcohol. *Vestsi Natsyynal'най akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2008, no. 4, pp. 81–84 (in Russian).
- Schramm G. *Fundamentals of practical rheology and rheometry*. Moscow, 2003. 312 p. (in Russian).
- Paronyan V. Kh., Maznyak F. I., Kafiev N. M., Chekmareva I. B. *Technology of fats and fat substitutes*. Moscow, 1982. 352 p. (in Russian).
- Malkin A. Y., Isayev A. I. *Rheology: concepts, methods and applications*. Elsevier Science, 2017. 500 p. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-04626-4>

Информация об авторах

Буча Светлана Васильевна – науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: buchal003@gmail.com.

Липай Юлия Владимировна – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yuliya.M@tut.by.

Воробьев Павел Дмитриевич – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pdvc@tut.by.

Чередниченко Денис Викторович – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: cherednichenko_dv@tut.by.

Воробьев Артем Дмитриевич – канд. техн. наук, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tommy.vrb@gmail.com.

Крутко Николай Павлович – академик, д-р хим. наук, профессор, заведующий отделом. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: krutko@igic.bas-net.by.

Information about the authors

Bucha Sviatlana V. – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: buchal003@gmail.com.

Lipai Yuliya V. – Ph. D. (Chemistry), Senior researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yuliya.M@tut.by.

Vorobiev Pavel D. – Ph. D. (Chemistry), Leading researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pdvc@tut.by.

Cherednichenko Denis V. – Ph. D. (Chemistry), Leading researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: cherednichenko_dv@tut.by.

Vorobiov Artyom D. – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tommy.vrb@gmail.com.

Krutko Nikolay P. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: krutko@igic.bas-net.by.