

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 541.64
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-3-293-299>

Поступило в редакцию 17.04.2020
Received 17.04.2020

Е. В. Воробьёва

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

НАБУХАНИЕ ГИДРОГЕЛЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИАКРИАМИДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ НИЗКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЛЕЙ

(Представлено академиком Н. П. Крутько)

Аннотация. Изучена кинетика набухания сшитого полиакриламида в зависимости от состава внешнего раствора. Показано, что набухание полимерного геля при переходе от воды к раствору хлорида калия или натрия и обратно резко уменьшается, затем постепенно возрастает. Набухание геля в растворе хлорида натрия выше, чем хлорида калия. В равновесно набухшем геле концентрация солей в фазе геля выше, чем во внешнем растворе, и увеличивается при переходе от хлорида калия к хлориду натрия.

Ключевые слова: набухание, полимерный гидрогель, растворы, хлорид натрия, хлорид калия

Для цитирования: Воробьёва, Е. В. Набухание гидрогеля на основе полиакриламида в водных растворах низкомолекулярных солей / Е. В. Воробьёва // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 3. – С. 293–299. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-3-293-299>

Elena V. Vorobieva

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

SWELLING OF POLYACRYLAMIDE-BASED HYDROGEL IN AQUEOUS SOLUTIONS OF LOW-MOLECULAR SALTS

(Communicated by Academician Nikolai P. Krutko)

Abstract. The swelling kinetics of cross-linked polyacrylamide was studied depending on the composition of the external solution. It was shown that the polymer gel swelling during the transition from water to a potassium or sodium chloride solution and vice versa sharply decreases, then gradually increases. The swelling of gel in a solution of sodium chloride is higher than that of potassium chloride. In the equilibrium swollen gel, the concentration of salts in the gel phase is higher than in the external solution and increases with the transition from potassium chloride to sodium chloride.

Keywords: swelling, polymer hydrogel, solutions, sodium chloride, potassium chloride

For citation: Vorobieva E. V. Swelling of polyacrylamide-based hydrogel in aqueous solutions of low-molecular salts. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 3, pp. 293–299 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-3-293-299>

Введение. Особое место среди широкого круга полимерных материалов занимают полимерные гидрогели, которые с каждым годом все больше используются в различных областях. Гидрогели представляют собой сшитые полимеры на основе гидрофильных макромолекул, способные к равновесному и обратимому набуханию в воде и водных растворах [1; 2]. Величины степени так называемого свободного набухания лежат в интервале от нескольких миллилитров до нескольких литров (сильно набухающие полимерные гидрогели) на 1 г сухого вещества и определяют области использования этих материалов. Полимерные гидрогели обладают способностью к переходу из слабо набухшего состояния в сильно набухшее и наоборот (коллапс) в ответ на изменение внешней среды – pH, ионная сила раствора, температура, излучение и т. п. [3–6].

Способность полимерных гидрогелей в ответ на стимулирующий фактор переходить из набухшего состояния в сколлапсированное и наоборот может иметь различное технологическое

применение, например, в качестве агентов доставки лекарственных веществ, высвобождающих лекарство при том или ином воздействии [2; 7].

Особый интерес исследователей вызывают полиэлектролитные гели, содержащие заряженные группы. В воде такие гидрогели диссоциируют с образованием звеньев макромолекул, несущих заряд, и противоионов. При этом в макромолекулах заряженные ионы связаны с цепью, а противоионы остаются в растворителе в свободном состоянии. Происходит отталкивание одноименно заряженных звеньев пространственной сетки друг от друга, вытягивание цепей, имеющих изначально конформацию клубка. При этом образец геля, поглощая воду, начинает набухать [6; 7]. Фактором, способствующим набуханию гелей, является осмотическое давление, создаваемое противоионами, которые перемещаются внутри геля, но не имеют возможности его покинуть (энтропийный фактор) [3; 4; 8].

Коллапс полиэлектролитных гелей, вызванный изменением внешних условий, обусловлен тем обстоятельством, что за счет усиления сил притяжения между макромолекулами полимера, ввиду гидрофобных взаимодействий или водородных связей, происходит вытеснение растворителя из объема геля во внешний раствор. Восприимчивые к изменению pH гели имеют в структуре группы слабого основания или слабой кислоты, обладающие способностью к ионизации при изменении кислотности окружающей среды [8–10].

В отличие от полиэлектролитных полимерные гидрогели на основе сшитых мономеров акриламида и влияние солевой среды на переход таких гелей из набухшего в сколлапсированное состояние мало изучены, хотя данные вопросы являются не менее интересными в свете расширяющихся областей применения этих уникальных материалов.

В настоящем сообщении приведены результаты исследования кинетики набухания и сорбционных свойств гидрогеля на основе сшитого полиакриламида в водных растворах в присутствии хлоридов калия и натрия.

Материалы и методы исследования. В работе использован гидрогель на основе сшитого полиакриламида в виде гранул сферической формы диаметром 2–3 мм (Sigma-Aldrich). Для исследования кинетики набухания гидрогеля использовали ячейку, в которой находилась гранула геля и анализируемый раствор. Ячейку помещали на предметный столик, освещенный снизу источником света. Используя проекцию гранулы, увеличенную оптическим блоком, измеряли ее диаметр (D_0). Гранулу переносили в раствор соли известной концентрации и измеряли ее диаметр через определенные промежутки времени. После установления равновесия гранулу переносили в ячейку с водой и проводили аналогичные измерения. По результатам эксперимента строили кинетические кривые, характеризующие изменение размера гранул геля при переходе от воды к водным растворам хлоридов калия и натрия различной концентрации и обратно (D / D_0).

Количество растворенного низкомолекулярного вещества в равновесном внешнем растворе и в полимерном геле определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Таким образом, получены данные о распределении электролитов между гелем и внешним раствором.

Результаты и их обсуждение. Конформационные изменения, протекающие в цепях полимеров, наиболее явно наблюдаются в полимерных гидрогелях, представляющих собой совокупность макромолекул, сшитых ковалентными химическими связями и имеющих трехмерную структуру. Преимущество изучения гелей по сравнению с растворами линейных макромолекул состоит в том, что конформационные изменения полимерных цепей приводят к изменению макроскопических размеров образца геля, что допускает их прямую визуальную регистрацию, однако для установления равновесия в таких системах требуется больше времени по сравнению с несшитыми полимерами, что связано с большей продолжительностью диффузионных процессов проникновения растворителя внутрь частиц геля.

Как видно из рис. 1, изменение размера гранул гидрогеля, перенесенных из воды в солевой раствор с концентрацией соли 1,5 моль/л, проходит через минимум на коротком начальном участке в первые несколько секунд после перемещения гранулы. Далее размер гранул геля начинает увеличиваться и после установления равновесия в растворе хлорида натрия становится больше, чем в воде, тогда как в растворе хлорида калия остается меньше, чем в воде.

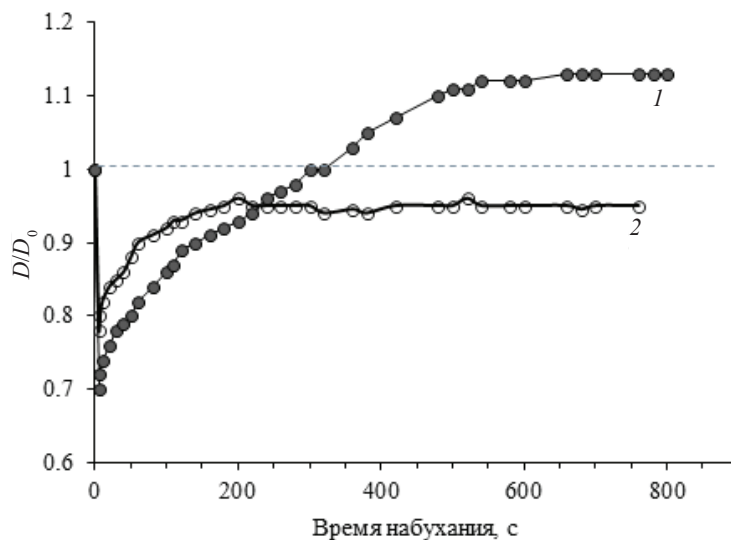


Рис. 1. Кинетические кривые изменения размера гранулы гидрогеля при перемещении ее из воды в раствор хлорида натрия (1) и калия (2)

Fig. 1. Kinetic curves of the size change of the hydrogel granule when moving it from water to a solution of sodium chloride (1) and potassium (2)

Уменьшение размера гранул гидрогеля связано с переходом клубок–глобула [10; 11] в цепях, составляющих полимерный гель; в результате образец гидрогеля коллапсирует как целое. Это связано с тем, что сколлапсированная фаза стабилизируется силами притяжения полимерных звеньев, и объем геля в этом случае мало зависит от степени заряда макромолекул.

Резкое уменьшение размера гранул геля при их перемещении из воды в раствор соли обусловлено потерей воды, находящейся внутри набухшей фазы. По мнению авторов [11; 12] это связано с тем, что активность воды, находящейся в геле, больше, чем во внешнем растворе, и эта вода покидает гель из-за возникшей разности химических потенциалов между гранулой и раствором. Скорость проникновения раствора в гранулу меньше, о чем свидетельствуют более пологие правые крылья пиков. В растворе хлорида калия по мере проникновения внешнего раствора в гранулу ее размер постепенно увеличивается и через некоторое время (около 7 мин) приходит к равновесному значению. Полученный после достижения равновесия размер гранул гидрогеля меньше, чем в воде.

Поведение гидрогеля в растворе хлорида натрия, возможно, связано с иным механизмом переноса, в частности, из-за взаимодействия полярных групп полимера с катионами натрия. В [13] установлено, что в модельных водно-солевых системах с полиакриламидом расстояние между концевыми атомами углерода увеличивается при переходе от растворов хлорида калия к хлориду натрия. В солевой среде катион натрия связан с амидными группами и длина связи меньше суммы радиусов взаимодействующих ионов, тогда как калий не образует связей с амидными группами и связан с элементами модельной системы через молекулы воды. Взаимодействие катионов натрия с амидными группами полимерного гидрогеля способствует увеличению набухания гидрогеля.

В обратном эксперименте, при переносе гидрогеля из солевого раствора в воду, кинетические кривые проходят через минимум (рис. 2). Далее в случае хлорида калия кривая плавно возрастает и приблизительно через такое же время, как и в прямом эксперименте, размер гранулы становится равным исходному, т. е. ее объему в воде перед проведением первого опыта. Так как время достижения равновесия в прямом и обратном экспериментах приблизительно одинаково, то можно считать, что лимитирующей стадией в этом случае является скорость перемещения раствора хлорида калия между гелем и внешним раствором.

Концентрация растворенного вещества в фазе геля больше, чем его концентрация во внешнем растворе (рис. 3), т. е. возникает градиент концентраций, приводящий к увеличению скорости

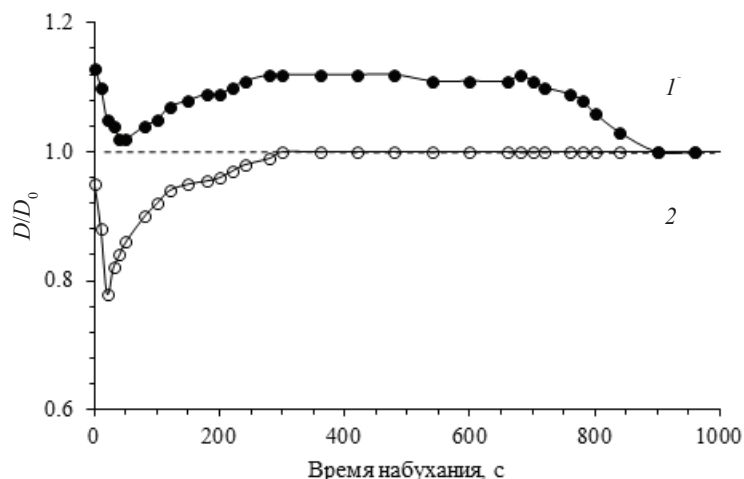


Рис. 2. Кинетические кривые изменения размера гранулы геля при переносе полимера из раствора хлорида натрия (1) и калия (2) в воду

Fig. 2. Kinetic curves of the size change of the gel granules when moving the polymer from a solution of sodium (1) and potassium (2) chloride into water

диффузии воды в полимер. Заметное отклонение от равновесия приводит к тому, что избыточный по сравнению с равновесным раствор соли покидает гель, что влечет уменьшение его объема. Принимая во внимание полученные данные, можно предположить, что появление максимума на кривой связано с протеканием процесса переноса соли по диффузионному механизму [14]. При одинаковой концентрации внешнего раствора концентрация хлорида натрия в геле больше, чем концентрация KCl, причем, в большей степени в области более низких концентраций соли во внешнем растворе.

Известно, что катионы натрия и калия имеют различные значения ионного радиуса и плотность заряда ниже в случае K^+ . Время присутствия молекулы воды в гидратной оболочке положительно гидратированных ионов больше, чем в объеме раствора, такие ионы укрепляют водную сетку, повышая структурированность воды. Отрицательно гидратированные ионы с большим ионным радиусом в меньшей степени способны притягивать молекулы воды, тем самым увеличивая их активность, что приводит к снижению структурированности водной сетки [15]. Ион натрия имеет меньший ионный радиус и большую плотность заряда, что повышает притяжение диполей воды к катиону. «Структуроразрушающие» свойства катиона калия повышают подвиж-

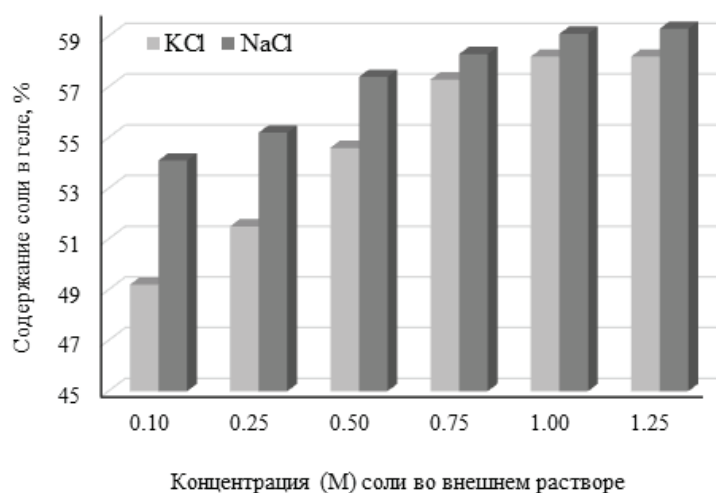


Рис. 3. Распределение солей в равновесно набухшем полимерном геле

Fig. 3. The distribution of salts in an equilibrium swollen polymer gel

ность молекул воды в растворах по сравнению с чистой водой, что приводит к увеличению скорости диффузии молекул воды в гидрогель. «Структурообразующие» свойства натрия и сохранение молекул воды в гидратном слое вокруг катиона способствуют набуханию геля. Этим можно объяснить наблюдаемое увеличение набухания полимерного гидрогеля в присутствии хлорида натрия по сравнению с хлоридом калия.

На рис. 4 приведена зависимость набухания полимерного геля от состава и концентрации внешнего раствора. Видно, что при переносе геля из воды в солевой раствор в области малых концентраций соли равновесная степень набухания полимера уменьшается. Затем по мере увеличения концентрации в растворах хлорида калия равновесное значение степени набухания немного увеличивается, проходит через максимум и далее уменьшается, причем, степень набухания полимера в растворе хлорида калия меньше, чем в воде. В растворе хлорида натрия относительный размер гранул уменьшается, затем возрастает и при повышении концентрации раствора становится больше, чем в воде.

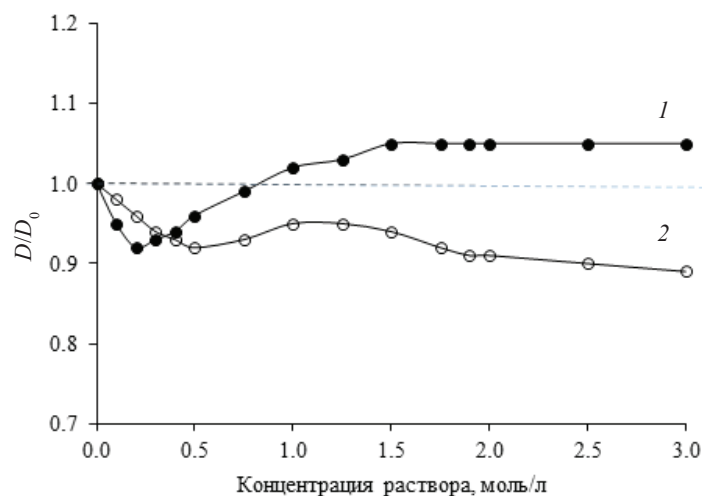


Рис. 4. Изменение относительного размера гранул равновесно набухшего геля в зависимости от концентрации раствора хлорида натрия (1) и калия (2)

Fig. 4. Change in the relative granule size of an equilibrium swollen gel depending on the concentration of sodium (1) and potassium (2) chlorides solution

Наличие экстремумов на кривой зависимости набухания гидрогеля от концентрации раствора хлорида калия можно объяснить различным вкладом в набухание двух факторов: количество гидратной воды, связанной с амидной группой, а также количество раствора соли в фазе полимерного геля. Если предположить, что вся вода в набухшем геле сорбируется одним типом сорбционных центров и составляет единый объем, тогда активность воды в полимере уменьшается за счет химического (гидратационного) взаимодействия с полярными группами [14; 16]. В таком случае при малых концентрациях раствора электролита даже незначительное изменение активности воды приводит к значительному уменьшению количества сорбированной воды и к уменьшению набухания геля.

Если предположить существование в полимере двух видов сорбционных центров различной гидрофильности, оказывается, что вода, сорбированная менее гидрофильными областями, где меньше полярных групп ($-\text{CONH}_2$), не влияет на состояние воды в ранее заполненной гидрофильной области [14]. Фактор, влияющий на набухание геля — количество раствора хлорида калия в фазе полимера, при малых концентрациях внешнего раствора вносит меньший вклад в изменение объема геля по сравнению с сорбцией воды. При увеличении концентрации хлорида калия данный фактор превалирует, размер гранулы растет. Последующее уменьшение их размера связано с тем, что, несмотря на увеличение количества электролита в геле, количество воды, проникающее вместе с ним в фазу полимера из-за роста концентрации, уменьшается. Одновременно уменьшается и количество воды, сорбированной на амидных группах. В результате суммарное набухание геля уменьшается.

В том случае, когда внешним раствором является хлорид натрия, на кривой обнаруживается минимум при малых концентрациях соли с последующим плавным ростом размера гранул. Схожие начальные участки на кривых для хлоридов натрия и калия говорят о схожих механизмах происходящих процессов. Однако следует отметить, что из-за присутствия в растворе катионов, имеющих различные по размеру сольватные оболочки, положение минимумов на кривых для разных электролитов не совпадает. На участке с большими концентрациями плавный рост набухания в растворе хлорида натрия можно объяснить тем, что вклад в набухание геля, который вносит катион натрия, выше вклада покидающей гель гидратной воды амидных групп. Вероятно, это связано с тем, что хлорид натрия проникает в полимерную фазу в большей степени, чем хлорид калия. Как было отмечено выше, катионы натрия взаимодействуют с амидными группами полимера, а катионы калия образуют связи с полимером через молекулы воды.

Заключение. Обнаружен эффект коллапса геля на основе сшитого полиакриламида при изменении состава внешней среды с переходом от воды к растворам хлоридов калия и натрия и обратно. Кинетика набухания геля после коллапса и его сорбционные свойства определяются следующими основными факторами: скоростью диффузии воды и солевого раствора в гидрогеле, количеством гидратной воды, связанной с амидной группой, и взаимодействием полимера с растворенным веществом. В равновесно набухшем геле на основе сшитого полиакриламида в растворах хлоридов калия и натрия удельное количество низкомолекулярных электролитов в фазе полимерного геля различается и определяется их природой и концентрацией.

Список использованных источников

1. Роговина, Л. З. К определению понятия «полимерный гель» / Л. З. Роговина, В. Г. Васильев, Е. Е. Браудо // Высокомолекулярные соединения. Сер. С. – 2008. – Т. 50, № 7. – С. 1397–1406.
2. Инагамов, С. Я. Поликомплексные гели на основе натрий карбоксиметилцеллюлозы – новые пролонгаторы лекарственных препаратов / С. Я. Инагамов, М. Ю. Мухамеджанова, Г. И. Мухамедов // Химия растительного сырья. – 2011. – № 2. – С. 51–56.
3. Filippova, O. E. Responsive polymer gels / O. E. Filippova // Высокомолекулярные соединения. – 2000. – Т. 42, № 12. – С. 2328–2352.
4. Sing, Ch. E. Effect of Ion–Ion Correlations on Polyelectrolyte Gel Collapse and Reentrant Swelling / Ch. E. Sing, J. W. Zwanikken, M. O. Cruz // *Macromolecules*. – 2013. – Vol. 46. – P. 5053–5065. <https://doi.org/10.1021/ma400372p>
5. Влияние pH при полимеризации на свойства слабозаряженного гидрофобно модифицированного полиакриламида / Ю. А. Шашкина [и др.] // Структура и динамика молекулярных систем. – Казань, 2003. – Вып. 10, ч. 1. – С. 202–205.
6. Ельяшевич, Г. К. Процессы набухания/сжатия гидрогелей полиакрилата натрия в средах с различными значениями pH / Г. К. Ельяшевич, Н. Г. Бельникевич, С. А. Веснеболоцкая // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2009. – Т. 51, № 5. – С. 809–812.
7. Sareen, R. Meloxicam Carbopol-based gels: characterization and evaluation / R. Sareen, S. Kumar, G. D. Gupta // *Curr. Drug. Deliv.* – 2011. – Vol. 8, N 4. – P. 407–415. <https://doi.org/10.2174/156720111795768013>
8. Филиппова, О. Е. «Умные» полимерные гидрогели / О. Е. Филиппова // Природа. – 2005. – № 8. – С. 11–17.
9. Sircar, S. The effect of divalent vs. monovalent ions on the swelling of Mucin-like polyelectrolyte gels: Governing equations and equilibrium analysis / S. Sircar, J. P. Keener, A. L. Fogelson // *J. Chem. Phys.* – 2013. – Vol. 138, N 1. – Art. 014901. <https://doi.org/10.1063/1.4772405>
10. Термо- и pH-чувствительные гидрогели на основе хитозана, полученные с использованием диазида терефталевой кислоты / А. Е. Мочалова [и др.] // Перспективные материалы. – 2009. – № 5. – С. 61–65.
11. Голубовский, Д. Н. Переход клубок–глобула в реалистичной модели N-изопропилакриламида: компьютерный эксперимент / Д. Н. Голубовский, В. А. Иванов, А. Р. Хохлов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. – 2008. – № 3. – С. 64–66.
12. Osada, Y. Polymer gels / Y. Osada, J. P. Gong, Y. Tanaka // *Journal of Macromolecular Science. Part C: Polymer Reviews*. – 2004. – Vol. 44, N 1. – P. 87–112. <https://doi.org/10.1081/mc-120027935>
13. Состояние ионов и молекул воды в водно-солевых растворах полиакриламида и сополимера «акриламид–Na/K соль акриловой кислоты» / В. С. Солдатов [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 6. – С. 695–703. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-6-695-703>
14. Ферапонтов, Н. Б. Свойства воды в растворах гидрофильных полимеров / Н. Б. Ферапонтов, М. Г. Токмачев, А. Н. Гагарин // Журн. физ. химии. – 2009. – Т. 83, № 8. – С. 1487–1492.
15. Реологические свойства и концентрационные переходы в водно-солевых растворах полиакриламида и анионных (со)полимеров акриламида / Д. Н. Давлюд [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 4. – С. 69–76.
16. Реологические свойства гидрогелей на основе полиакриламида / Т. В. Шевченко [и др.] // Коллоидный журн. – 2004. – Т. 66, № 6. – С. 840–843.

References

1. Rogovina L. Z., Vasil'ev V. G., Braudo E. E. Definition of the concept of polymer gel. *Polymer science, Series C*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 85–92. <https://doi.org/10.1134/s1811238208010050>
2. Inagamov S. Ya., Mukhamedzhanova M. Yu., Mukhamedov G. I. Polycomplex gels based on sodium carboxymethyl cellulose – new drug prolongators. *Khimija rastitel'nogo syr'ja* [Chemistry of Plant Raw Material], 2011, no. 2, pp. 51–56 (in Russian).
3. Filippova O. E. Responsive polymer gels. *Vysokomolekulyarnye soedineniya = Polymer science, Series C*, 2000, vol. 42, no. 12, pp. 2328–2352.
4. Sing Ch. E., Zwanikken J. W., Cruz M. O. Effect of Ion–Ion Correlations on Polyelectrolyte Gel Collapse and Reentrant Swelling. *Macromolecules*, 2013, vol. 46, no. 12, pp. 5053–5065. <https://doi.org/10.1021/ma400372p>
5. Shashkina Yu. A., Zaroslov Yu. D., Pryakhina T. A., Blagodatskikh I. V., Filippova O. E., Khokhlov A. R. The effect of pH during polymerization on the properties of a weakly charged hydrophobically modified polyacrylamide. *Struktura i dinamika molekulyarnykh sistem* [Structure and Dynamics of Molecular Systems]. Kazan', 2003, vol. 10, part 1, pp. 202–205 (in Russian).
6. Elyashevich G. K., Bel'nikovich N. G., Vesnebolotskaya S. A. Swelling-contraction of sodium polyacrylate hydrogels in media with various pH values. *Polymer Science. Series A*, 2009, vol. 51, no. 5, pp. 550–553. <https://doi.org/10.1134/s0965545x09050095>
7. Sareen R., Kumar S., Gupta G. D. Meloxicam Carbopol-based gels: characterization and evaluation. *Current Drug Delivery*, 2011, vol. 8, no. 4, pp. 407–415. <https://doi.org/10.2174/156720111795768013>
8. Philippova O. E. «Smart» polymeric hydrogels. *Priroda* [Nature], 2005, no. 8, pp. 11–17 (in Russian).
9. Sircar S., Keener J. P., Fogelson A. L. The effect of divalent vs. monovalent ions on the swelling of Mucin-like polyelectrolyte gels: Governing equations and equilibrium analysis. *Journal of Chemical Physics*, 2013, vol. 138, no. 1, art. 014901. <https://doi.org/10.1063/1.4772405>
10. Mochalova A. E., Budruev A. V., Oleinik A. V., Smirnova L. A. Thermo- and pH-sensitive hydrogels on chitozan base, obtained with use of diazide of terephthalic acid. *Perspektivnye materialy* [Promising materials], 2009, no. 5, pp. 61–65 (in Russian).
11. Golubovsky D. N., Ivanov V. A., Khokhlov A. R. Transition of the ball-globule in a realistic model of N-isopropyl acrylamide: computer experiment. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3: Fizika. Astronomiya* [Moscow University Physics Bulletin. Series 3. Physics. Astronomy], 2008, no. 3, pp. 64–66 (in Russian).
12. Osada Y., Gong J. P., Tanaka Y. Polymer gels. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 2004, vol. 44, no. 1, pp. 87–112. <https://doi.org/10.1081/mc-120027935>
13. Soldatov V. S., Davlyud D. N., Bezyazychnaya T. V., Vorobieva E. V., Kasandrovich E. G., Vorobiev P. D. State of ions and water molecules in the water salt solutions of polyacrylamide and co-polymer of “acrylamide–acrylic acid Na/K salt”. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 6, pp. 695–703 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-6-695-703>
14. Ferapontov N. B., Tokmachev M. G., Gagarin A. N. The properties of water in solutions of hydrophilic polymers. *Russian Journal of Physical Chemistry*, 2009, vol. 83, no. 8, pp. 1321–1325.
15. Davlyud D. N., Vorobieva E. V., Layeuskaya E. V., Krutko N. P., Vorobiev P. D., Cherednichenko D. V. Rheological properties and concentration cross-overs of polyacrylamide and anionic (co)polymers of acrilamide in aqueous-salt solutions. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2017, vol. 61, no. 4, pp. 69–76 (in Russian).
16. Shevchenko T. V., Ul'rikh E. V., Yakovchenko M. A., Pirogov A. N., Smirnov O. E. Rheological properties of polyacrylamide-based hydrogels. *Colloid Journal*, 2004, vol. 66, no. 6, pp. 756–759. <https://doi.org/10.1007/s10595-005-0019-2>

Информация об авторе

Воробьева Елена Викторовна – д-р хим. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by.

Information about the author

Vorobieva Elena V. – D. Sc. (Chemistry), Associate 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: evorobieva@igic.bas-net.by.