

ХИМИЯ
CHEMISTRYУДК 544.723.54, 544.725.2
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-678-684>Поступило в редакцию 11.11.2020
Received 11.11.2020**Е. В. Воробьёва***Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***ВЛАГОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОГО ГИДРОГЕЛЯ И БЕНТОНИТА***(Представлено академиком Н. П. Крутько)*

Аннотация. Рассмотрены вопросы получения, сорбционные и реологические свойства композиционных материалов на основе полимерного гидрогеля и бентонита. Показано, что бентонит препятствует коллапсу гидрогеля в водных растворах электролитов и приводит к увеличению влагосодержания после коллапса. После нескольких повторных циклов набухания в воде с последующей сушкой при 60 и 110 °С степень набухания композита выше, чем гидрогеля. В интервале температур от 20 до 40 °С полимерный гидрогель и композит способны выдерживать не менее десяти циклов набухания и сушки без изменения степени набухания.

Ключевые слова: композиционный материал, полимерный гидрогель, бентонит, влагопоглощение, реология, набухание, коллапс

Для цитирования. Воробьёва, Е. В. Влагопоглощающие материалы на основе полимерного гидрогеля и бентонита / Е. В. Воробьёва // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 678–684. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-678-684>

Elena V. Vorobieva*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus***WATER-ABSORBING MATERIALS BASED ON POLYMER HYDROGEL AND BENTONITE***(Communicated by Academician Nikolay P. Krutko)*

Abstract. The article deals with the production, sorption and rheological properties of composite materials based on polymer hydrogel and bentonite. It is shown that bentonite prevents the collapse of the hydrogel in aqueous solutions of electrolytes and leads to an increase in the moisture content after the collapse. After several repeated cycles of swelling in water, followed by drying at 60 and 110 °C, the degree of swelling of the composite is higher than that of the hydrogel. In the temperature range from 20 to 40 °C, the polymer hydrogel and the composite are able to withstand at least ten cycles of swelling and drying without changing the degree of swelling.

Keywords: composite material, polymer hydrogel, bentonite, moisture absorption, rheology, swelling, collapse

For citation: Vorobieva E. V. Water-absorbing materials based on polymer hydrogel and bentonite. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 678–684 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-678-684>

Введение. Полимерные гидрогели привлекают в последние десятилетия все большее внимание исследователей благодаря уникальным свойствам, позволяющим использовать их в различных областях, в том числе связанных с медициной и биотехнологией [1–3]. В литературе описаны примеры применения таких гелей как компонентов систем с контролируемым выделением

лекарственного вещества, подложек для клеточной инженерии, материалов для имплантатов в хирургии, искусственных мышц, датчиков, а также в сельском хозяйстве и садоводстве, например, в устройствах с контролируемым высвобождением воды и питательных веществ в почвы [4; 5].

Однако обладая рядом существенных преимуществ: высокой сорбционной способностью, биосовместимостью, чувствительностью к внешним условиям, полимерные гидрогели имеют недостатки, в частности, низкие физико-механические параметры, которые затрудняют их практическое применение. Одним из способов улучшения эксплуатационных характеристик материалов является введение в полимерную матрицу наполнителей и модификаторов различной природы. В частности, показано, что введение в состав полимерных гидрогелей глинистых частиц придает гелям новые свойства, улучшает их сорбционные и механические характеристики, препятствует коллапсу при изменении внешних условий [6].

Особое место в нанотехнологиях занимает бентонит – природный глинистый тонкодисперсный высокопластичный материал, обладающий хорошими связующими и сорбционными свойствами. Для бентонитов, состоящих, в основном, из набухающих минералов монтмориллонита и беделита, характерно слоистое строение кристаллической решетки, что обуславливает их способность к поглощению воды [7; 8]. Использование бентонита в качестве наполнителя полимерной матрицы гидрогеля позволяет получать материалы с улучшенными сорбционными и физико-механическими свойствами, однако недостаток данных о взаимосвязи между составом и физико-химическими свойствами сорбирующих материалов препятствует расширению возможностей их практического применения.

В настоящем сообщении описаны условия получения композиционного материала на основе гидрогеля полиакриловой кислоты с поливиниловым спиртом с включенным (импрегнированным) в полимерную матрицу бентонитом, приведены результаты исследования влияния бентонита на сорбционные и реологические свойства гидрогеля.

Материалы и методы исследования. Для получения гидрогеля в работе использовали образцы полиакриловой кислоты (ПАК) с молекулярной массой (ММ) $0,8 \cdot 10^5$ и поливинилового спирта (ПВС) (ММ $0,95 \cdot 10^5$) (Aldrich). Водные растворы полимеров смешивали, понижали pH смеси добавлением соляной кислоты, проводили термообработку при различных температурах до образования нерастворимого в воде продукта. Методом потенциметрического титрования определяли количество карбоксильных групп ПАК, не вступивших в реакцию с ПВС.

Для получения композиционного материала готовили суспензию бентонита в воде, добавляли приготовленную смесь растворов ПАК и ПВС ($\text{pH} < 3$) и проводили термообработку при 120°C . Содержание бентонита в материале от 1,0 до 5,0 мас. %.

Полученные гидрогели и композиционные материалы многократно промывали дистиллированной водой, сушили при температуре 60 или 110°C . Набухание образцов гидрогеля и композиционного материала с бентонитом определяли в воде при различных значениях pH и в водных растворах (концентрация 0,001 и 0,01 М) сульфатов калия, меди, железа (III). Для вычислений усредняли результаты, полученные при измерении набухания трех параллельных измерений; ошибка в определении не превышала 5 %. Степень набухания (Q , г/г) определяли по формуле

$$Q = (m_n - m_c) / m_c,$$

где m_n (г) и m_c (г) – масса равновесно набухшего и высушенного образца.

Для исследования кинетики коллапса в растворах солей равновесно набухшие в дистиллированной воде образцы гидрогеля и композиционного материала с бентонитом помещали в водный раствор (1 М) сульфата меди. Через определенные промежутки времени образцы гидрогелей доставали и взвешивали. Степень выделения жидкости из геля в процессе его коллапса (S , г/г) определяли по формуле

$$S = (m_b - m_{\text{сол}}) / m_{\text{сол}},$$

где m_b (г) – масса равновесно набухшего в дистиллированной воде образца; $m_{\text{сол}}$ (г) – масса образца в водном растворе соли.

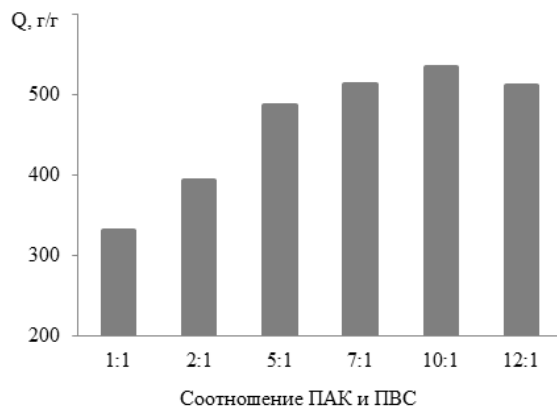


Рис. 1. Степень набухания полимерного гидрогеля в зависимости от соотношения полимеров

Fig. 1. The degree of the polymer hydrogel swelling depending on the polymer ratio

происходит образование сшитого полимерного продукта. Предполагается, что его структура формируется в виде совокупности клубков макромолекул поликислоты, сшитых цепочками ПВС в единую пространственную сетку. При набухании в воде происходит диссоциация карбоксильных групп ПАК, одноименно заряженные звенья полимерной сетки отталкиваются друг от друга и цепи, изначально свернутые в клубки – распрямляются. В результате синтезированный полимерный продукт значительно увеличивается в размерах, набухает, поглощая растворитель.

Как видно из рис. 1, степень набухания полученного сшитого продукта зависит от содержания ПВС в исходной смеси. Увеличение мольного соотношения ПАК и ПВС от 1 : 1 до 10 : 1 при прочих равных условиях (рН смеси 1,2; температура синтеза 120 °С) в смеси в 10 раз приводит к повышению степени набухания гидрогеля в дистиллированной воде в 1,6 раза.

Степень набухания гидрогеля в растворах солей уменьшается по сравнению с дистиллированной водой. Присутствие низкомолекулярных электролитов в поглощаемом растворе приводит к подавлению диссоциации групп полимерной сетки геля и увеличивает плотность двойного электрического слоя, вследствие чего диффузия растворителя в массу геля уменьшается. Перераспределение противоионов в поглощенной жидкости и их фиксация около противоположно заряженных функциональных групп полимерной сетки приводит к снижению осмотического давления, создаваемого внутри сетки геля противоионами. Общая концентрация подвижных ионов в геле выше, но разность между концентрациями ионов внутри и снаружи уменьшается. Следовательно, движущая сила набухания постепенно уменьшается с увеличением концентрации соли. Уменьшение степени набухания образцов с ростом содержания электролита может быть обусловлено несколькими причинами: во-первых, ухудшается термодинамическое качество растворителя – воды, в которой образцы находятся в максимально набухом состоянии; во-вторых, возможно, происходит подавление полиэлектролитного эффекта как результат экранирования заряженных ионов низкомолекулярными ионами.

Из таблицы следует, что набухание геля ПАК–ПВС в водных растворах сульфатов уменьшается в 1,1–1,3 раза в ряду $K^+ \rightarrow Cu^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ и возрастает во столько же раз с уменьшением на порядок концентрации соли. Можно предположить, что с увеличением концентрации низкомолекулярных ионов и взаимодействующих с катионами карбоксилат-ионов уменьшается количество групп, обеспечивающих набухание полимерной матрицы. Кроме того, на поверхности частиц гидрогеля возможно формирование «слоя», образованного молекулами полиакрилатов, препятствующего проникновению раствора внутрь полимерной сетки, что ограничивает набухание геля.

Для получения композиционного материала готовили суспензию бентонита в воде, добавляли приготовленную смесь растворов ПАК и ПВС (рН < 3) и проводили термообработку при 120 °С.

Синтез композиционного материала проводили в описанных выше условиях получения гидрогеля (мольное соотношение ПАК и ПВС 10 : 1; рН смеси 1,2; температура синтеза 120 °С).

Для исследования реологических свойств использовали дисперсию гидрогеля на основе ПАК и ПВС (соотношение ПАК и ПВС 10 : 1) и композиционного материала с бентонитом (содержание бентонита 1,0–3,0 мас. %), в которой дисперсной фазой (50 мас. %) являлись частицы набухшего материала размером от 0,2 до 0,8 мм, дисперсионной средой – вода.

Результаты и их обсуждение. В водных растворах в области низких значений рН карбоксильные группы ПАК взаимодействуют с функциональными группами электронодонорных полимеров, в частности, поливинилового спирта и полиэтиленгликоля [9; 10]. При повышенной температуре в результате реакции между карбоксильными группами поликислоты и гидроксильными группами ПВС, катализируемой протонами водорода,

Изменение степени набухания (ΔQ , %) образцов гидрогеля в растворах солей различной концентрации (Q за 3 ч набухания принята за 100 %)

Change of the swelling degree (ΔQ , %) of hydrogel samples in the solutions of salts of various concentrations (Q for 3 hours of swelling is taken as 100 %)

Концентрация соли, М Salt concentration, M	Время набухания, ч Swelling time, h	ΔQ , %		
		K_2SO_4	$CuSO_4$	$Fe_2(SO_4)_3$
0,001	0,5	75,2	65,4	60,4
	1,0	83,4	72,3	66,5
	1,5	86,6	75,6	69,8
	2,0	90,3	78,8	72,7
	2,5	98,5	85,6	78,6
0,01	0,5	63,6	57,5	55,4
	1,0	66,7	60,4	58,6
	1,5	69,2	63,2	60,4
	2,0	72,2	66,8	63,2
	2,5	76,0	69,1	66,1

Установлено, что набухание гидрогеля в воде и водных растворах солей практически не зависит от присутствия бентонита. Отсутствие дополнительного набухания гидрогеля в присутствии бентонита в водно-солевых растворах можно объяснить наличием дополнительных сшивок за счет координационных взаимодействий между катионами и карбоксилат-звеньями, в результате чего противоионы натрия не могут внести свой вклад в осмотическое давление [11; 12]. Увеличение доли бентонита более 5 мас. % приводит к снижению значений набухания полимерного материала, что объясняется ростом среднего эффективного числа физических узлов сетки при взаимодействии цепей полимера с увеличивающейся суммарно поверхностью и частиц модификатора – бентонита и, как следствие, ограничению подвижности цепей в процессе формирования поверхностного слоя [13].

Как видно из рис. 2, в водных растворах сульфата меди в течение первых нескольких минут содержание влаги уменьшается более чем в 5 раз в набухшем геле с бентонитом и без него.

Можно отметить, что присутствие бентонита в некоторой степени препятствует коллапсу, уменьшая степень выделения жидкости из полимерного гидрогеля. Этот эффект наиболее характерен для полимерных гидрогелей с более высоким содержанием бентонита (5 мас. %): на рис. 2 кривые коллапса имеют более крутой спуск для геля, чем для полимерного материала с бентонитом. Вероятное объяснение состоит в том, что пространственные взаимодействия между пластинами бентонита уменьшают коллапс гелей.

Наличие бентонита в составе полимерного гидрогеля приводит к повышенному в 1,5–2 раза влагосодержанию материалов после коллапса. При этом количество растворителя – воды, удерживаемой полимерным гелем при его набухании, в сколлапсированном состоянии материала увеличивается с ростом содержания бентонита. Это можно объяснить как стерическими взаимодействиями между частицами бентонита, так и нарушением однородности структуры полимерной сетки, препятствующим коллапсу гидрогеля.

Присутствие бентонита оказывает влияние на реологические свойства дисперсии полимерного гидрогеля. Как видно из рис. 3, вязкость дисперсии гидрогеля резко уменьшается в области небольших изменений напряжения сдвига. На реологических кривых композиционного материала

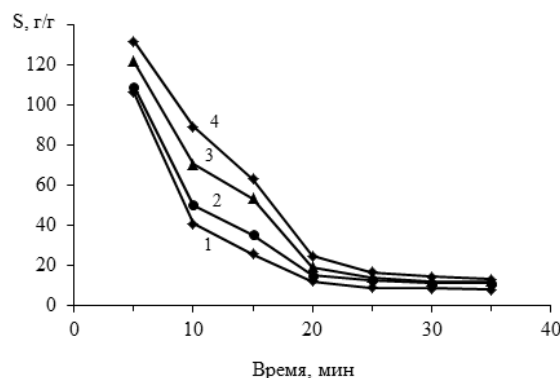


Рис. 2. Степень выделения жидкости (S , г/г) из полимерного гидрогеля ПАА–ПВС (1), содержащего 1,0 (2), 3,0 (3) и 5,0 (4) мас. % бентонита, в растворе сульфата меди

Fig. 2. The degree of liquid separation (S , g/g) from the polymer hydrogel PAA–PVA (1), containing 1.0 (2), 3.0 (3) and 5.0 (4) wt % bentonite, in copper sulfate solution

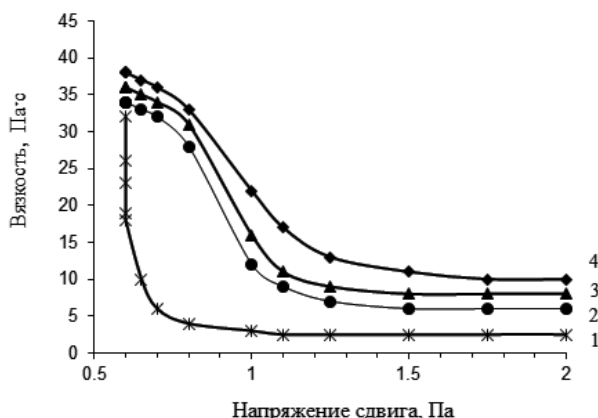


Рис. 3. Зависимость вязкости от напряжения сдвига дисперсии гидрогеля (1) и композиционного материала с бентонитом (2–4). Содержание бентонита, мас. %: 1 – 0; 2 – 1,0; 3 – 3,0; 4 – 5,0

Fig. 3. The dependence of the viscosity on the shear stress of the hydrogel dispersion (1) and the composite material with bentonite (2–4). Bentonite content, wt %: 1 – 0; 2 – 1.0; 3 – 3.0; 4 – 5.0

Дисперсию набухшего гидрогеля и композиционного материала с бентонитом сушили при температуре 60 или 110 °С, затем насыщали водой; цикл «сушка–набухание» проводили несколько раз. Результаты данного эксперимента показали (рис. 4), что степень набухания геля и композита после четырех циклов набухания и сушки при 60 °С уменьшается на 8–10 %. При температуре сушки 110 °С степень набухания геля уменьшается в 1,5 раза, композиционного материала – в 1,3 раза.

Обратимость индуцированного температурой процесса влагоотдачи геля подтверждает высказанное ранее предположение о структуре полимерной сетки в виде агрегатов из макромолекул ПАК, сшитых цепочками ПВС. Усиление гидрофобных взаимодействий с ростом температуры инициирует ассоциацию агрегатов. Степень набухания композиционного материала в циклах «сушка–набухание» выше по сравнению с гидрогелем, что обусловлено изменением структуры полимерной сетки при введении бентонита. Благодаря малому размеру частиц бентонита одно и то же количество полимера в композиционном материале обладает более развитой поверхностью, чем в форме макрогеля, что создает благоприятные условия для сорбции. Вследствие этого с увеличением количества циклов «сушка–набухание» влагопоглощение композиционного материала выше по сравнению с гидрогелем без наполнителя.

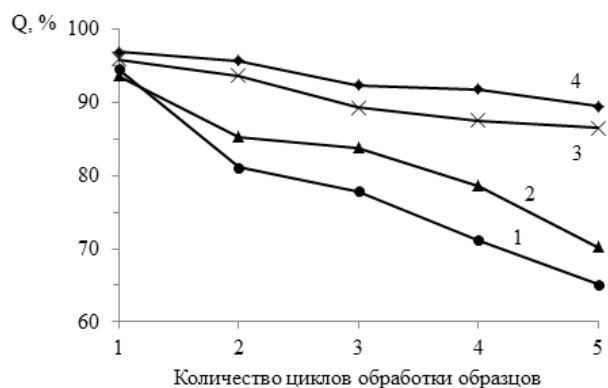


Рис. 4. Степень набухания образцов гидрогеля (1, 3) и композиционного материала с бентонитом (5,0 мас. %) (2, 4) в цикле «сушка–набухание». Температура сушки, °С: 1, 2 – 110; 3, 4 – 60

Fig. 4. The degree of the samples swelling of hydrogel (1, 3) and composite material with bentonite (5.0 mas. %) (2, 4) in the cycle «drying–swelling». Drying temperature, °С: 1, 2 – 110; 3, 4 – 60

с бентонитом появляется начальный участок, когда вязкость мало зависит от напряжения сдвига, что свидетельствует о сохранении структуры дисперсии. В этом случае вязкость с увеличением напряжения сдвига уменьшается менее резко по сравнению с гидрогелем, а значения вязкости выше.

Характер течения гидрогеля определяется скольжением дисперсной фазы (частиц дисперсии) и дисперсионной среды (межчастичной воды) относительно друг друга. В области низких значений напряжения сдвига (0,6–0,8 Па) одной из причин реологического поведения гидрогеля на начальном участке кривой является ориентация частиц в направлении сдвига и некоторое упорядочение взаимного расположения молекул, что снижает сопротивление течению. Частицы бентонита в водной дисперсии окружены гидратными оболочками, через которые возможно взаимодействие с гидрофильными частицами гидрогеля, что приводит к увеличению прочности структуры системы [14].

В интервале температур от 20 до 40 °С полимерный гидрогель и композиционный материал способны выдерживать не менее десяти циклов «сушка–набухание» без изменения степени набухания. Это позволяет использовать материалы с высокими показателями влагоудержания для улучшения водно-физического баланса засушливых почв.

Закключение. Синтезированы гидрогель на основе полиакриловой кислоты с поливиниловым спиртом и композиционный гидрогелевый материал с бентонитом. Гравиметрическим методом исследована кинетика набухания и коллапса полимерного геля и его композитов с бентонитом в воде и водных растворах солей одно-, би- и трехвалентных металлов. Показано, что набухание геля в водных растворах сульфатов уменьшается в 1,1–1,3 раза в ряду $K^+ \rightarrow Cu^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$ и практически не зависит от присутствия бентонита в интервале концентраций от 1 до 5 мас. %. Бентонит препятствует коллапсу композитов в водных растворах электролитов и приводит к увеличению влагосодержания после коллапса в 1,5–2 раза по сравнению с гелем.

Обнаружено, что степень набухания после четырех циклов набухания и сушки при 60 и 110 °С уменьшается в меньшей степени для композиционного материала, чем гидрогеля. В интервале температур от 20 до 40 °С полимерный гидрогель и композиционный материал способны выдерживать не менее десяти циклов набухания и сушки без изменения степени набухания.

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. Osada, Y. Polymer gels / Y. Osada, J. P. Gong, Y. Tanaka // Journal of Macromolecular Science. – 2004. – Vol. 44, N 1. – P. 87–112. <https://doi.org/10.1081/mc-120027935>
3. Filippova, O. E. Responsive polymer gels / O. E. Filippova // Высокомолекулярные соединения. – 2000. – Т. 42, № 12. – С. 2328–2352.
4. Hydrogels in biology and medicine: From molecular principles to bionanotechnology / N. A. Peppas [et al.] // Advanced materials. – 2006. – Vol. 18, N 11. – P. 1345–1360. <https://doi.org/10.1002/adma.200501612>
5. Abd El-Mohdy, H. L. Radiation synthesis of nanosilver/polyvinyl alcohol/celluloseacetate/gelatin hydrogels for wound dressing / H. L. Abd El-Mohdy // Journal of Polymer Research. – 2013. – Vol. 20, N 6. – P. 177–189. <https://doi.org/10.1007/s10965-013-0177-6>
6. Евсикова, О. В. Синтез, набухание и адсорбционные свойства композитов на основе полиакриламидного геля и бентонита натрия / О. В. Евсикова, С. Г. Стародубцев, А. Р. Хохлов // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. – 2002. – Т. 44, № 5. – С. 802–808.
7. Соколов, В. Н. Глинистые породы и их свойства / В. Н. Соколов // Соросовский образовательный журн. – 2000. – Т. 6, № 9. – С. 59–65.
8. Осипов, В. И. Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств / В. И. Осипов, В. Н. Соколов. – М., 2013. – 576 с.
9. Полимерные комплексы на основе полиакриловой кислоты, полиэтиленгликоля и поливинилового спирта / Е. В. Воробьева [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2008. – № 1. – С. 28–32.
10. Poly(vinyl alcohol)/poly(acrylic acid) hydrogels: FT-IR spectroscopic characterization of crosslinking reaction and work at transition point / K. F. Arndt [et al.] // Acta Polymerica. – 1999. – Vol. 50, N 11–12. – P. 383–390. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-4044\(19991201\)50:11/12%3C383::aid-apol383%3E3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-4044(19991201)50:11/12%3C383::aid-apol383%3E3.0.co;2-z)
11. Equilibrium swelling and kinetics of pH-responsive hydrogels: models, experiments, and simulations / S. K. De [et al.] // Journal of Microelectromechanical Systems. – 2002. – Vol. 11, N 5. – P. 544–555. <https://doi.org/10.1109/jmems.2002.803281>
12. Horkay, F. Osmotic swelling of polyacrylate hydrogels in physiological salt solutions / F. Horkay, I. Tasaki, P. J. Basser // Biomacromolecules. – 2000. – Vol. 1, N 1. – P. 84–90. <https://doi.org/10.1021/bm9905031>
13. Исследование сорбционных характеристик полимерных минерал-наполненных композитов для медицины / Ю. А. Игнатъева [и др.] // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – Т. 5, № 93. – С. 52–56.
14. Шрамм, Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм. – М., 2003. – 312 с.

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. Osada Y., Gong J. P., Tanaka Y. Polymer gels. *Journal of Macromolecular Science*, 2004, vol. 44, no. 1, pp. 87–112. <https://doi.org/10.1081/mc-120027935>
3. Filippova O. E. Responsive polymer gels. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya C = Polymer Science, Series C*, 2000, vol. 42, no. 12, pp. 2328–2352.
4. Peppas N. A., Hilt J. Z., Khademhosseini A., Langer R. Hydrogels in biology and medicine: from molecular principles to bionanotechnology. *Advanced materials*, 2006, vol. 18, no. 11, pp. 1345–1360. <https://doi.org/10.1002/adma.200501612>
5. Abd El-Mohdy H. L. Radiation synthesis of nanosilver/poly vinyl alcohol/cellulose acetate/gelatin hydrogels for wound dressing. *Journal of Polymer Research*, 2013, vol. 20, no. 6, pp. 177–189. <https://doi.org/10.1007/s10965-013-0177-6>
6. Evsikova O. V., Starodubtsev S. G., Khokhlov A. R. synthesis, swelling, and adsorption properties of composites based on poly(acrylamide) gel and sodium bentonite. *Polymer Science. Series A*, 2002, vol. 44, no. 5, pp. 491–496 (in Russian).

7. Sokolov V. N. Clay rocks and their properties. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal* [Soros Educational Journal], 2000, vol. 6, no. 9, pp. 59–65 (in Russian).
8. Osipov V. I., Sokolov V. N. *Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties*. Moscow, 2013. 576 p. (in Russian).
9. Vorobieva E. V., Krutko N. P., Basalyga I. I., Matrunchik Yu. V. Polymer complexes based on polyacrylic acid, polyethylene glycol and polyvinyl alcohol. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2008, no. 1, pp. 28–32 (in Russian).
10. Arndt K. F., Richter A., Ludwig S., Zimmermann J., Kressler J., Kuckling D., Adler H.-J. Poly(vinyl alcohol)/poly(acrylic acid) hydrogels: FT-IR spectroscopic characterization of crosslinking reaction and work at transition point. *Acta Polymerica*, 1999, vol. 50, no. 11–12, pp. 383–390. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1521-4044\(19991201\)50:11/12%3C383::aid-apol383%3E3.0.co;2-z](https://doi.org/10.1002/(sici)1521-4044(19991201)50:11/12%3C383::aid-apol383%3E3.0.co;2-z)
11. De S. K., Aluru N. R., Johnson B., Crone W. C., Beebe D. J., Moore J. Equilibrium swelling and kinetics of pH-responsive hydrogels: models, experiments, and simulations. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, vol. 11, no. 5, pp. 544–555. <https://doi.org/10.1109/jmems.2002.803281>
12. Horkay F., Tasaki I., Basser P. J. Osmotic swelling of polyacrylate hydrogels in physiological salt solutions. *Biomacromolecules*, 2000, vol. 1, no. 1, pp. 84–90. <https://doi.org/10.1021/bm9905031>
13. Ignatieva Yu. A., Uspenskaya M. V., Borisov O. V., Olekhovich R. O., Evseev R. A., Kasanov K. N. Investigation of sorption characteristics of polymeric mineral-filled composites for medicine. *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics], 2014, vol. 5, no. 93, pp. 52–56 (in Russian).
14. Schramm G. *Fundamentals of practical rheology and rheometry*. Moscow, 2003. 312 p. (in Russian).

Информация об авторе

Воробьева Елена Викторовна – д-р хим. наук, доцент, заведующая 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), 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.