

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

УДК 541.64
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-55-62>

Поступило в редакцию 16.12.2019
Received 16.12.2019

Е. В. Воробьева

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

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ГИДРОГЕЛИ НА ОСНОВЕ ПОЛИАКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ И ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА

(Представлено академиком Н. П. Крутько)

Аннотация. В водном растворе в кислой среде ($\text{pH} < 3$) образуются водорастворимые комплексы на основе полиакриловой кислоты (ПАК) и полиэтиленгликоля с молекулярной массой более 6000 или поливинилового спирта (ПВС). Определены условия получения гидрогеля на основе полиакриловой кислоты и поливинилового спирта с высокой степенью набухания (около 500 г воды/г полимера): $\text{pH} < 3$, температура 120–140 °С. Степень взаимодействия полимеров прямо пропорциональна содержанию поливинилового спирта в исходной смеси в интервале мольных соотношений ПВС и ПАК от 1 : 1 до 10 : 1, температуре и продолжительности термообработки и обратно пропорциональна молекулярной массе полиакриловой кислоты. Равновесная степень набухания гидрогеля увеличивается при pH среды набухания выше 6, а скорость набухания зависит от диффузии растворителя в гидрогель и определяется размером его частиц и условиями набухания (промывание, перемешивание и т. д.).

Ключевые слова: полиакриловая кислота, поливиниловый спирт, полиэтиленгликоль, полимерные комплексы, гидрогели

Для цитирования: Воробьева, Е. В. Полимерные комплексы и гидрогели на основе полиакриловой кислоты и поливинилового спирта / Е. В. Воробьева // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 1. – С. 55–62. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-55-62>

Elena V. Vorobieva

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

POLYACRYLIC ACID AND POLYVINYL ALCOHOL-BASED POLYMER COMPLEXES AND HYDROGELS

(Communicated by Academician Nikolai P. Krutko)

Abstract. In aqueous solution, in the acidic environment ($\text{pH} < 3$), water-soluble complexes are formed based on polyacrylic acid (PAA) and polyethyleneglycol with a molecular weight of more than 6000 or on polyvinyl alcohol (PVA). The conditions for obtaining hydrogel based on polyacrylic acid and polyvinyl alcohol with a high degree of swelling (about 500 g of water/g of polymer) were determined: $\text{pH} < 3$, temperature 120–140 °C. The degree of interaction of polymers is directly proportional to the content of polyvinyl alcohol in the initial mixture in the range of the molar PVA and PAA ratios from 1 : 1 to 10 : 1, the temperature and duration of heat treatment and is inversely proportional to the molecular weight of polyacrylic acid. The equilibrium degree of hydrogel swelling increases at the pH of the swelling medium above 6, and the swelling rate depends on the solvent diffusion into the hydrogel and is determined by the size of its particles and the swelling conditions (washing, mixing, etc.).

Keywords: polyacrylic acid, polyvinyl alcohol, polyethyleneglycol, polymer complexes, hydrogels

For citation: Vorobieva E. V. Polyacrylic acid and polyvinyl alcohol-based polymer complexes and hydrogels. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 1, pp. 55–62 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-1-55-62>

Введение. Развитие представлений о природе химической связи, внутри- и межмолекулярных взаимодействий, о процессах, протекающих на границе раздела фаз, позволило химикам в настоящее время сделать новый шаг в дизайне молекулярных систем: перейти к созданию ор-

ганизованных полимолекулярных (супрамолекулярных) ансамблей, образующихся за счет ассоциации двух и более индивидуальных химических частиц и удерживаемых вместе посредством как ковалентных, так и нековалентных взаимодействий. Увеличение структурной сложности системы ведет к появлению принципиально новых свойств, которые нельзя предвидеть на основании свойств отдельных составляющих структурных единиц. К самоорганизующимся системам можно отнести интерполимерные комплексы и полимерные гидрогели [1–3].

Изучение принципов и механизмов формирования таких систем представляет интерес для разнообразных практических целей, прежде всего, для создания новых полимерных материалов, проявляющих высокую эффективность при использовании их в качестве сорбентов, модификаторов, стабилизаторов, коагулянтов и флокулянтов природных и синтетических дисперсных систем, экстрагентов, модельных объектов при изучении регуляторных процессов, протекающих в живых клетках с участием биополимеров, материалов медицинского назначения [4–6].

Образование интерполимерных комплексов в водных растворах обусловлено способностью молекул к «самосборке» (self-assembled), которая определяется как спонтанная межмолекулярная ассоциация через нековалентные связи (электростатические, водородные, донорно-акцепторные, гидрофобные взаимодействия) [1; 2; 7]. Ассоциация через нековалентные связи имеет целый ряд преимуществ перед химическим синтезом: не требуются сложные препаративные процедуры, реакции протекают очень быстро, образующиеся структуры способны к обратимым изменениям в ответ на изменения в окружающей среде (растворители, pH, температура). Регулирование этих процессов открывает широкие возможности по управлению свойствами материалов на молекулярном уровне.

Полимерные гидрогели состоят из химически связанных макромолекул, имеют структуру трехмерной сетки, которая может деформироваться в значительных пределах. Способность к взаимодействию такой сетки с водой определяет уникальные свойства гидрогелей: поглощение экстремально больших количеств воды и водных растворов; удерживание поглощенной жидкости в течение длительного времени; выделение поглощенной жидкости в регулируемом режиме [8; 9].

Несмотря на то что в высокомолекулярной химии логичным является переход от водорастворимых полимеров к интерполимерным комплексам и гидрогелям, на практике трехмерные полимерные сетки практически не получают прямым «сшиванием» макромолекул полимеров друг с другом. Обычно полимерные гидрогели получают способами, аналогичными синтезу полимеров, соблюдая условие образования поперечных сшивок, что приводит к формированию пространственной структуры конечного продукта. В исходную мономерную смесь вводят сшивающий агент, обладающий функциональными группами, способными встраиваться в полимерную цепь, благодаря чему макромолекулярные цепи оказываются химически связанными друг с другом. Наиболее распространенными являются способы синтеза полимеризацией мономеров в присутствии инициаторов реакции или под воздействием внешнего излучения, а также прививкой мономеров к полимерам, чаще природным (крахмал, целлюлоза и ее эфиры, желатин) [8; 10; 11]. Несмотря на большое количество работ, посвященных синтезу, свойствам и применению полимерных гидрогелей, в литературе практически не рассматриваются более простые в исполнении способы их получения через образование интерполимерных комплексов и химические реакции между полимерами.

В данной работе приведены результаты исследования свойств системы на основе полиакриловой кислоты и полиэтиленгликоля или поливинилового спирта в водном растворе в зависимости от молекулярной массы компонентов, их соотношения, pH раствора, температуры. Изучение химических превращений комплекса полиакриловой кислоты с поливиниловым спиртом при термообработке представляет интерес в практическом плане для получения гидрогелей.

Материалы и методы исследования. В работе использовали образцы полиакриловой кислоты (ПАК) с молекулярной массой (ММ) $0,4 \cdot 10^5$; $0,6 \cdot 10^5$; $0,8 \cdot 10^5$; $1,2 \cdot 10^5$; $1,9 \cdot 10^5$, полиэтиленгликоля (ПЭГ) с ММ 2000, 4000, 6000, 8000, 12000 (BASF, Германия) и поливинилового спирта (ПВС) с ММ $4,0 \cdot 10^4$, $0,9 \cdot 10^5$ (JVP, Япония) без дополнительной очистки.

Вискозиметрические измерения разбавленных водных растворов полимеров и их смесей (концентрация 0,1 г/дл) проводили в капиллярном вискозиметре Уббелодде с диаметром капил-

ляра 0,86 мм. Изменение вязкости S рассчитывали как отношение приведенной вязкости растворов ПАК и ее смеси с ПЭГ при различных осново-мольных соотношениях компонентов. Вязкость концентрированных растворов измеряли на вискозиметре Брукфильда LV-DV II+ Pro. Прочность предельно разрушенной структуры (P) определяли используя зависимость логарифма вязкости от напряжения сдвига; изменение прочности предельно разрушенной структуры (ΔP) смеси ПАК и ПВС по сравнению с полиакриловой кислотой рассчитывали по формуле

$$\Delta P = (P_{\text{ПК}} - P_{\text{ПАК}} / P_{\text{ПАК}}) 100 \%,$$

где $P_{\text{ПК}}$ – прочность предельно разрушенной структуры для комплекса ПАК–ПВС; $P_{\text{ПАК}}$ – прочность предельно разрушенной структуры для ПАК.

Для получения сшитых продуктов водные растворы полимеров (концентрация 4,0 г/дл) смешивали, понижали pH смеси добавлением соляной кислоты, проводили термообработку. Исследования показали, что концентрация водных растворов исходных компонентов не оказывает существенного влияния на влагопоглощение сшитых продуктов.

Полученный продукт отмывали дистиллированной водой на протяжении 3–5 суток с многократной заменой воды для удаления кислоты и непрореагировавших компонентов, высушивали на воздухе при температуре 60 °С. Набухание гидрогеля проводили в воде при различных значениях pH. Степень набухания определяли по формуле

$$Q = (m_{\text{н}} - m_{\text{в}}) / m_{\text{в}},$$

где $m_{\text{н}}$ и $m_{\text{в}}$ – массы равновесно набухшего и высушенного образца.

При вычислениях усредняли результаты, полученные при измерении набухания трех параллельных измерений; ошибка в определении не превышала 5 %.

Результаты и их обсуждение. Наличие в макромолекулах поликислот недиссоциированных карбоксильных групп при низких значениях pH обеспечивает возможность образования водородных связей с участием функциональных групп электронодонорных полимеров, в частности полиэтиленгликоля, поливинилового спирта, поливинилпирролидона¹. Процесс комплексообразования можно контролировать методом потенциометрии в связи с тем, что взаимодействие компонентов сопровождается понижением концентрации несвязанных в комплекс карбоксильных групп и повышением pH раствора [12].

Результаты потенциометрического титрования полиакриловой кислоты полиэтиленгликолем показывают, что добавление ПЭГ с ММ 2000 и 4000 к раствору полиакриловой кислоты не влияет на значение pH. Добавление полиэтиленгликоля с ММ 6000, 8000, 12000 и увеличение его содержания в смеси приводит к постепенному росту значений pH. При достижении эквимольного соотношения компонентов и дальнейшем росте содержания ПЭГ pH практически не меняется.

Сравнение значений pH при соотношении компонентов 1 : 1 позволяет учесть влияние молекулярной массы ПАК и ПЭГ на интенсивность взаимодействия компонентов: эффект увеличения pH выражен сильнее при переходе к более высокомолекулярным образцам (рис. 1).

Взаимодействие полимеров и экранирование гидрофильных групп приводит к изменению размеров макромолекул поликислоты, о чем свидетельствуют результаты вискозиметрических исследований (рис. 2). При небольшом содержании ПЭГ его молекулы достаточно равномерно распределяются по макромолекулам поликислоты. Этой стадии ассоциации соответствует начальный участок кривой вязкости на рис. 2 (соотношение ПЭГ и ПАК от 0 до 0,1). На следующем этапе взаимодействия, которому соответствует резкое снижение вязкости, макромолекулы поликислоты неравномерно взаимодействуют с ПЭГ. Такой принцип ассоциации полимеров и олигомеров приводит к конформационным превращениям макромолекул и их компактизации [2; 3].

При увеличении pH растворов смесей полимеров происходит ионизация поликислоты и разрушение водородных связей в комплексе, что сопровождается увеличением вязкости растворов. С увеличением молекулярной массы компонентов возрастает pH смесей ПАК–ПЭГ, при котором наблюдается рост вязкости (рис. 3).

¹ Каргов, С. И. Конформационные изменения полиэлектролитов и интерполиэлектролитные взаимодействия в водных растворах: автореф. дис. ... д-ра хим. наук / С. И. Каргов. – Москва, 2008.

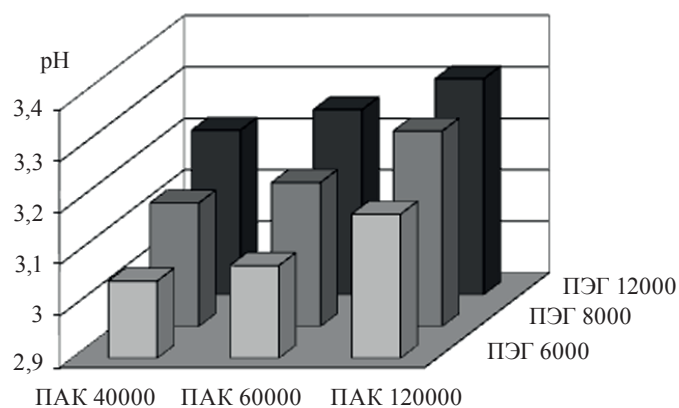


Рис. 1. Зависимость pH растворов смесей ПАК–ПЭГ от молекулярной массы компонентов

Fig. 1. The pH dependence of the solutions of mixtures PAA–PEG on molecular weight of components

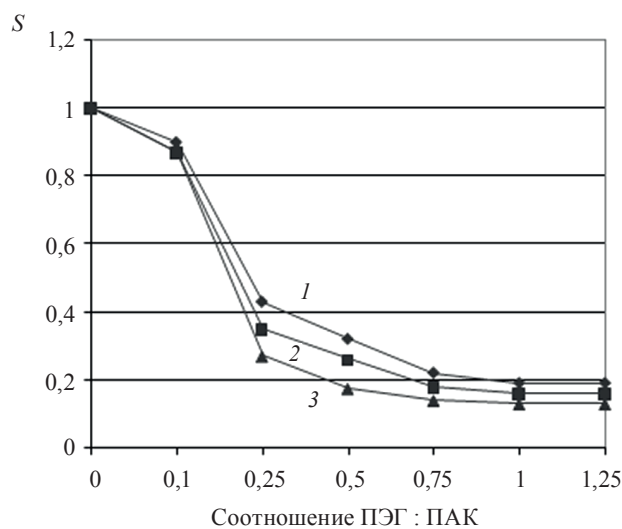


Рис. 2. Изменение вязкости (S) растворов смесей ПАК с различной ММ и ПЭГ (ММ 12000) от соотношения компонентов. ММ ПАК: 1 – $0,4 \cdot 10^5$; 2 – $0,6 \cdot 10^5$; 3 – $1,2 \cdot 10^5$

Fig. 2. Change in viscosity (S) of solutions of mixtures of PAA with different MM and PEG (MM 12000) from the ratio of components. MM PAA: 1 – $0,4 \cdot 10^5$; 2 – $0,6 \cdot 10^5$; 3 – $1,2 \cdot 10^5$

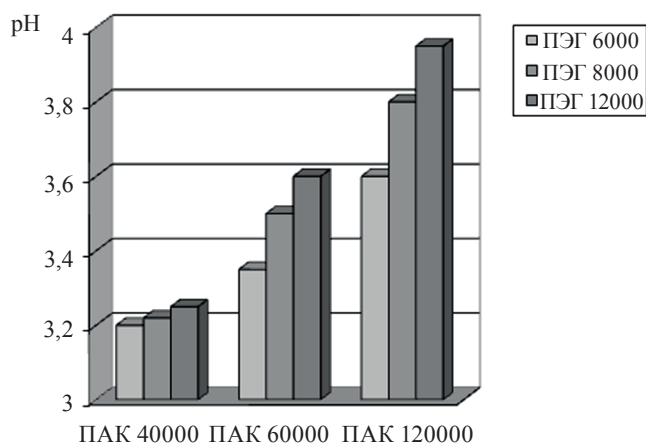


Рис. 3. Зависимость значений pH, характеризующих рост вязкости растворов смесей ПАК–ПЭГ

Fig. 3. The dependence of the pH values characterizing the increase in viscosity solutions of PAA–PEG mixtures

Методами вискозиметрии, потенциометрии и ИК-спектроскопии показано, что при смешивании ПАК и ПВС в кислой среде компоненты взаимодействуют между собой с участием недиссоциированных карбоксильных групп поликислоты и гидроксильных групп ПВС аналогично рассмотренной выше системе на основе ПАК и ПЭГ. При исследовании взаимодействия полимеров в области более концентрированных растворов (2 г/дл и выше), используя зависимость логарифма вязкости от напряжения сдвига, были рассчитаны значения прочности предельно разрушенной структуры (P) для ПАК с различной молекулярной массой, ПВС и их смеси (осново-мольное соотношение компонентов 1 : 1).

В таблице приведены данные, характеризующие изменение прочности предельно разрушенной структуры (ΔP) смеси ПАК и ПВС по сравнению с полиакриловой кислотой. Значение прочности предельно разрушенной структуры для ПАК в индивидуальном состоянии во всех случаях ниже, чем для смесей поликислоты с ПВС, что позволяет сделать вывод о взаимодействии полимеров в водном растворе при различных температурах. Характер зависимости ΔP от температуры аналогичен для поликислот различной молекулярной массы. Максимальные значения ΔP наблюдаются при температурах 70–80 °С, что свидетельствует об образовании при термообработке наиболее прочных пространственных структур.

Изменение прочности предельно разрушенной структуры (ΔP , %) смеси ПАК и ПВС по сравнению с полиакриловой кислотой

The change in the strength of the extremely destroyed structure (ΔP , %) of a mixture of PAA and PVA compared with polyacrylic acid

ММ ПАК в смеси с ПВС ММ PAA in PVA mixture	Температура, °С Temperature, °C						
	20	30	40	50	60	70	80
40000	5,2	5,4	5,8	6,3	6,5	16,4	33,1
60000	5,0	5,6	6,0	6,7	6,9	18,2	33,5
120000	5,4	5,7	6,0	6,5	7,2	18,9	33,9

Таким образом, в кислой среде (рН <3) ПАК и ПВС взаимодействуют между собой с участием недиссоциированных карбоксильных групп поликислоты и гидроксильных групп ПВС. При повышенной температуре макромолекулы образуют химические связи, что приводит к получению сшитого, не растворимого в воде продукта, способного поглощать воду.

Учитывая глобулированное состояние макромолекул ПАК в кислой среде, можно предположить, что образующийся полимерный комплекс представляет собой совокупность клубков макромолекул поликислоты, сшитых цепочками ПВС в единую пространственную сетку. При набухании полученного сшитого комплекса в воде происходит диссоциация карбоксильных групп ПАК; одноименно заряженные звенья полимерной сетки отталкиваются друг от друга и цепи, изначально свернутые в клубки, вытягиваются и распрямляются. В результате образец синтезированного полимерного комплекса значительно увеличивается в размерах – набухает, поглощая воду.

Показано, что равновесное влагосодержание гидрогеля при прочих равных условиях (рН исходной смеси 1,2; температура синтеза 120 °С) зависит от содержания ПВС и рН исходной смеси. При эквимольном соотношении полимеров степень набухания имеет минимальное значение. Увеличение содержания ПАК в исходной смеси сопровождается ростом влагопоглощения и при изменении соотношения ПАК и ПВС от 1 : 1 до 10 : 1 степень набухания увеличивается в 1,6 раза. Степень взаимодействия реагирующих функциональных групп также зависит от соотношения полимеров в исходной смеси: при изменении соотношения компонентов в 10 раз количество не прореагировавших карбоксильных групп меняется приблизительно на 20 %.

Изменение массы образцов при одинаковом соотношении ПАК и ПВС (10 : 1) в течение 40 мин после набухания в дистиллированной воде максимально в интервале рН исходной смеси 1,2–1,4 (рис. 4).

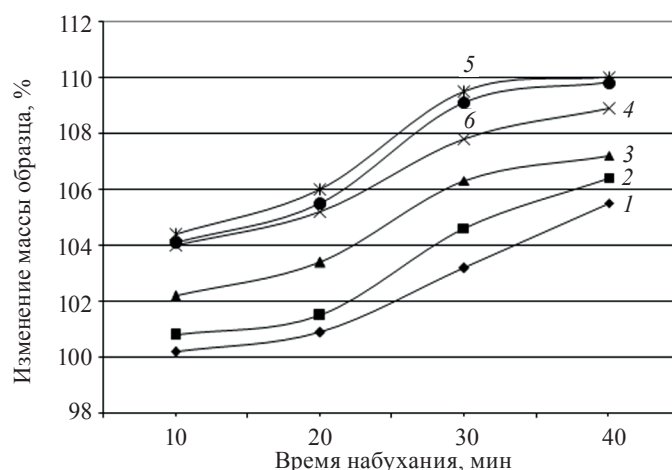


Рис. 4. Изменение массы образцов при набухании в воде в зависимости от pH исходных растворов. pH раствора смеси полимеров: 1 – 2,0; 2 – 1,8; 3 – 1,4; 4 – 1,3; 5 – 1,2; 6 – 1,05

Fig. 4. The change in mass of the samples during swelling in water, depending from pH of stock solutions. The pH of the solution of the mixture of polymers: 1 – 2.0; 2 – 1.8; 3 – 1.4; 4 – 1.3; 5 – 1.2; 6 – 1.05

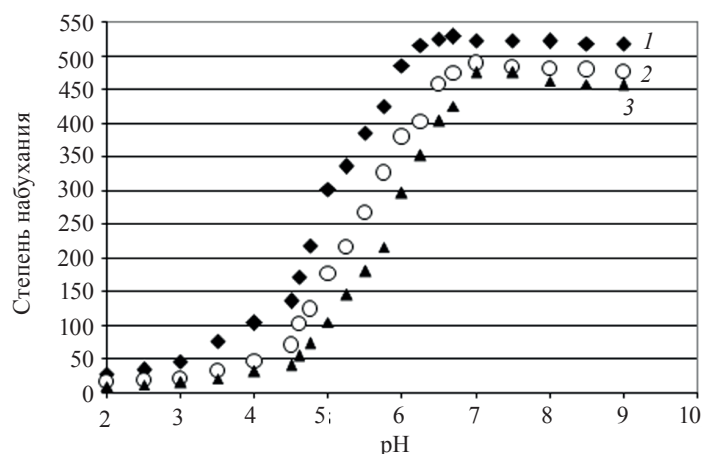


Рис. 5. Степень набухания гидрогеля в зависимости от pH внешнего раствора. ПАК : ПВС: 1 – (10 : 1); 2 – (7 : 1); 3 – (5 : 1)

Fig. 5. The degree of swelling of the hydrogel depending on the pH of the external solution. PAA : PVA: 1 – (10 : 1); 2 – (7 : 1); 3 – (5 : 1)

Экспериментальные данные, характеризующие равновесную степень набухания образцов, приготовленных в одинаковых условиях (pH исходной смеси 1,2; ПАК : ПВС = 10 : 1; pH внешнего раствора 6,5) и обработанных при различных температурах, свидетельствуют о том, что уменьшение температуры синтеза ниже 120 °С приводит к получению продукта с низкой плотностью сшивок, со временем растворяющегося при набухании. При повышении температуры выше 140 °С и увеличении продолжительности синтеза жесткость гидрогеля возрастает, а его поглощающая способность снижается. Определены условия, обеспечивающие получение гидрогеля на основе полиакриловой кислоты и поливинилового спирта с высокой степенью набухания (около 500 г воды/г полимера): pH < 3, температура 120–140 °С.

Карбоксильные группы полиакриловой кислоты, оставшиеся в «свободном» состоянии после взаимодействия с ПВС, способны к ионизации при изменении кислотности внешнего раствора. Ионизация карбоксильных групп вызывает электростатическое отталкивание одноименно заряженных звеньев макромолекул полимеров и набухание гидрогеля. При набухании в кислой среде, где ионизация групп подавлена, степень набухания минимальна (рис. 5). Гидрогели начи-

нают набухать по мере повышения pH, причем, раньше других набухает комплекс с избытком поликислоты (ПАК : ПВС = 10 : 1).

Заключение. В водном растворе в кислой среде (pH <3) образуются обратимые водорастворимые комплексы на основе полиакриловой кислоты и полиэтиленгликоля или поливинилового спирта. Взаимодействие полимеров сопровождается повышением pH раствора, уменьшением вязкости смеси и зависит от молекулярной массы компонентов. Способность к образованию гидрогеля при термообработке проявляет комплекс на основе полиакриловой кислоты и поливинилового спирта. Основное свойство гидрогеля – поглощение и удерживание большого количества воды без растворения – не проявляют исходные полимеры в индивидуальном состоянии. Замена высокомолекулярного компонента (поливиниловый спирт) в полимерном гидрогеле на низкомолекулярный (полиэтиленгликоль) приводит к получению соединения, растворяющегося при набухании в воде.

Список использованных источников

1. Сид, Дж. В. Супрамолекулярная химия / Дж. В. Сид, Дж. Л. Этвуд. – М., 2007. – 480 с.
2. Хохлов, А. Р. Самоорганизация в ион-содержащих полимерных системах / А. Р. Хохлов, Е. Е. Дормидонтова // Успехи физ. наук. – 1997. – Т. 167, № 2. – С. 27–35. <https://doi.org/10.3367/ufnr.0167.199702a.0113>
3. Кабанов, В. А. Полиэлектродитные комплексы в растворе и в конденсированной фазе / В. А. Кабанов // Успехи химии. – 2005. – Т. 74, № 1. – С. 5–23.
4. Галаев, И. Ю. «Умные» полимеры в биотехнологии и медицине / И. Ю. Галаев // Успехи химии. – 1995. – Т. 64, № 5. – С. 505–524.
5. Филиппова, О. Е. «Восприимчивые» полимерные гели / О. Е. Филиппова // Высокомолекулярные соединения. – 2000. – Т. 42, № 12. – С. 2328–2352.
6. Zeng, Y. Dependence of mechanical properties of macroporous hydrogels polyvinylformal from the maintenance of water / Y. Zeng, R. Wang, B. Zhou // Acta Polym. Sin. – 2005. – N 3. – P. 363–367.
7. MacKnight, W. J. Self-Assembled Polyelectrolyte–Surfactant Complexes in Nonaqueous Solvents and in the Solid State / W. J. MacKnight, E. A. Ponomarenko, D. A. Tirrell // Acc. of Chem. Res. – 1998. – Vol. 31, N 12. – P. 781–788. <https://doi.org/10.1021/ar960309g>
8. Бектуров, Е. А. Полимерные гидрогели / Е. А. Бектуров, И. Э. Сулейменов. – Алматы, 1998. – 237 с.
9. Belma, I. Swelling behavior and determination of diffusion characteristics of acrylamide-acrylic acid hydrogels / I. Belma // J. Appl. Polym. Sci. – 2004. – Vol. 91, N 2. – P. 1289–1293. <https://doi.org/10.1002/app.13270>
10. Reception of hydrogels of copolymers N-isopropylacrylamide/acrylic acid, sensitive to pH with fast reaction and kinetics their swellings / C. Zhao-Wei [et al.] // J. Appl. Chem. – 2004. – Vol. 21, N 9. – P. 884–889.
11. El-Neser, E. M. Effect of chemical structure on the properties of some hydrogels prepared by using gamma radiation polymerization / E. M. El-Neser // Polym. Adv. Technol. – 2005. – Vol. 16, N 6. – P. 489–494. <https://doi.org/10.1002/pat.607>
12. Поверхностные свойства комплексов на основе поликислота – поли-N-винилпирролидон / Е. М. Шайхутдинов [и др.] // Коллоидный журн. – 2001. – Т. 63, № 6. – С. 850–854.

References

1. Steed J. V., Atwood J. L. *Supramolecular chemistry*. John Wiley & Sons, 2009. <https://doi.org/10.1002/9780470740880>
2. Khokhlov A. R., Dormidontova E. E. Self-organization in ion-containing polymer systems. *Physics-Uspokhi*, 1997, vol. 40, no. 2, pp. 109–124. <https://doi.org/10.1070/pu1997v040n02abeh000191>
3. Kabanov V. A. Polyelectrolyte complexes in solution and in bulk. *Russian Chemical Reviews*, 2005, vol. 74, no. 1, pp. 3–20. <https://doi.org/10.1070/rc2005v074n01abeh001165>
4. Galaev I. Yu. Smart polymers in biotechnology and medicine. *Russian Chemical Reviews*, 1995, vol. 64, no. 5, pp. 471–489. <https://doi.org/10.1070/rc1995v064n05abeh000161>
5. Filippova O. E. Responsive polymer gels. *Vysokomolekulyarnye soedineniya = Polymer Sciences*, 2000, vol. 42, no. 12, pp. 2328–2352 (in Russian).
6. Zeng Y., Wang R., Zhou B. Dependence of mechanical properties of macroporous hydrogels polyvinylformal from the maintenance of water. *Acta Polymerica Sinica*, 2005, no. 3, pp. 363–367.
7. MacKnight W. J., Ponomarenko E. A., Tirrell D. A. Self-Assembled Polyelectrolyte–Surfactant Complexes in Nonaqueous Solvents and in the Solid State. *Accounts of Chemical Research*, 1998, vol. 31, no. 12, pp. 781–788. <https://doi.org/10.1021/ar960309g>
8. Bekturov E. A., Suleimenov I. E. *Polymer hydrogels*. Almaty, 1998. 237 p. (in Russian).
9. Belma I. Swelling behavior and determination of diffusion characteristics of acrylamide-acrylic acid hydrogels. *Journal of Applied Polymer Science*, 2004, vol. 91, no. 2, pp. 1289–1293. <https://doi.org/10.1002/app.13270>

10. Zhao-Wei C., Ming-Qing C., Xiao-Ya L., Yingyong Y. C. Reception of hydrogels of copolymers N-isopropylacrylamide/acrylic acid, sensitive to pH with fast reaction and kinetics their swellings. *Journal of Applied Chemistry*, 2004, vol. 21, no. 9, pp. 884–889.

11. El-Neser E. M. Effect of chemical structure on the properties of some hydrogels prepared by using gamma radiation polymerization. *Polymers for Advanced Technologies*, 2005, vol. 16, no. 6, pp. 489–494. <https://doi.org/10.1002/pat.607>

12. Shaikhutdinov E. M., Abdiev K. Zh., Zhursumbaeva M. B., Khusain S. Kh. Surface Properties of Polyacid–Poly(N-Vinyl Pyrrolidone) Complexes. *Colloid Journal*, 2001, vol. 63, no. 6, pp. 779–783. <https://doi.org/10.1023/a:1013240423994>

Информация об авторе

Воробьёва 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 authors

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