

ХІМІЯ ВЫСОКАМАЛЕКУЛЯРНЫХ ЗЛУЧЭННЯЎ
POLYMER CHEMISTRY

УДК 541.64
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-2-188-195>

Поступила в редакцию 30.10.2018
Received 30.10.2018

**Д. Н. Давлюд, Ю. В. Матрунчик, Е. В. Воробьева,
Д. В. Чередниченко, П. Д. Воробьев**

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

**АНИОННЫЕ СОПОЛИМЕРЫ АКРИЛАМИДА И ПОЛИАКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ
В КАЧЕСТВЕ ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. Предложен способ получения гидрогелей путем образования сшитых бинарных полимерных комплексов. Определены необходимые условия синтеза, обеспечивающие высокую степень набухания гидроаккумулирующих полимерных материалов на основе анионных сополимеров акриламида и полиакриловой кислоты. Доказано химическое взаимодействие компонентов полимерного комплекса методами ИК-спектроскопии и потенциометрического титрования. Показана возможность регулирования влагопоглощения гидрогелей в результате изменений условий синтеза в зависимости от направления их использования.

Ключевые слова: сополимер, полиакриловая кислота, поливиниловый спирт, полимерный комплекс, сшивка, ИК-спектроскопия, степень набухания

Для цитирования. Гидроаккумулирующие полимерные материалы на основе анионных сополимеров акриламида и полиакриловой кислоты / Д. Н. Давлюд [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2019. – Т. 55, № 2. – С. 188–195. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-2-188-195>

D. N. Davlyud, Yu. V. Matrunchik, E. V. Vorobieva, D.V. Cherednichenko, P. D. Vorobiev

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

**ANIONIC COPOLYMERS OF ACRYLAMIDE AND POLYACRYLIC ACID
AS HYDROACCUMULATING POLYMERIC MATERIALS**

Abstract. A method for hydrogels production by the formation of cross-linked binary polymer complexes is proposed. Necessary conditions for synthesis were determined, providing a high degree of swelling of hydroaccumulating polymeric materials based on anionic copolymers of acrylamide and polyacrylic acid. Chemical interaction of components of polymer complex has been proved by the methods of infrared spectroscopy and potentiometric titration. The possibility of moisture absorption control of hydrogels depending on synthesis conditions and application purpose was shown.

Keywords: copolymer, polyacrylic acid, polyvinyl alcohol, polymer complex, cross-linking, infrared spectroscopy, degree of swelling

For citation. Davlyud D. N., Matrunchik Yu. V., Vorobieva E. V., Cherednichenko D. V., Vorobiev P. D. Anionic copolymers of acrylamide and polyacrylic acid as hydroaccumulating polymeric materials. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical series*, 2019, vol. 55, no. 2, pp. 188–195 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2019-55-2-188-195>

Введение. Гидроаккумулирующие материалы или полимерные гидрогели (ПГГ), состоящие из макромолекул полимеров, химически связанных друг с другом, имеют структуру трехмерной сетки, которая может деформироваться в значительных пределах. Способность к взаимодействию такой сетки с водой определяет уникальные свойства ПГГ: поглощение экстремально больших количеств воды и водных растворов; удерживание поглощенной жидкости в течение длительного времени и ее высвобождение в заранее заданном регулируемом режиме. В настоящее время известны полимерные гидрогели, способные поглощать и удерживать до 2000 г воды/г сухого полимера [1–3].

Основным способом синтеза ПГГ является сополимеризация мономеров под действием излучения или в присутствии инициаторов реакций. Чувствительность таких гидрогелей к тому или иному внешнему воздействию позволяет использовать их в различных областях, однако эти же качества являются причиной дестабилизации ПГГ и могут вызывать их разрушение при колебаниях pH, температуры, совмещении с солями, органическими растворителями, кислотами и т. д. В некоторых случаях представляется трудным достижение высокой влагоабсорбционной способности и сохранение устойчивости ПГГ без коллапса системы [4, 5].

Несмотря на большое количество работ, посвященных синтезу и применению гидроаккумулирующих материалов, в литературе практически не рассматриваются способы получения ПГГ путем химического взаимодействия полимеров через образование полимерных комплексов. В практическом плане такие способы получения более просты, а полимерные компоненты, в отличие от мономеров, нетоксичны. Физико-химические свойства таких гидрогелей в меньшей степени зависят от внешних параметров (pH, температуры, состава среды набухания), что обуславливает их преимущество при получении композиций, перспективных для использования в различных областях: медицине, сельском хозяйстве, строительстве, промышленности и т. д.

В настоящей статье рассматривается получение гидроаккумулирующих полимерных материалов с регулируемым влагопоглощением на основе сополимеров акриламида с акриловой кислотой с различным содержанием анионных групп, полиакриловой кислоты и поливинилового спирта.

Экспериментальная часть. В работе использовали образцы сополимера акриламида и акрилата натрия с содержанием карбоксилатных групп 10 (САА₁), 15 (САА₂), 20 (САА₃), 30 (САА₄) и 40 (САА₅) % от общего количества амидных групп, полиакриламида (ПАА) с молекулярной массой (ММ) $1,4 \cdot 10^7$, полиакриловой кислоты (ПАК) с ММ $1,9 \cdot 10^5$ и поливинилового спирта (ПВС, ММ = $0,4 \cdot 10^5$) (BASF, Германия). Термическую обработку образцов осуществляли в интервале температур 120–160 °С в течение различного времени.

Набухание шитых термообработкой образцов проводили в дистиллированной воде при комнатной температуре, контролируя изменение их массы через определенные промежутки времени. Значение степени набухания, рассчитанное на 1 г сухого продукта, находили по формуле

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

где m_n и m_c – масса равновесно набухшего и высушенного образцов соответственно.

ИК-спектры получали на спектрометре Avatar-330 с Фурье-преобразованием в спектральном диапазоне 4000–400 см⁻¹, используя приставку диффузного отражения. В качестве носителя и фонового образца использовали KCl и KBr. Методом потенциометрического титрования определяли количество карбоксильных групп ПАК, не вступивших в реакцию с ПВС (S , %). При расчетах усредняли результаты, полученные при измерении степени набухания трех параллельных опытов. Ошибка в определении не превышала 5 %.

Результаты исследований и их обсуждение. Начальной стадией растворения полимеров является набухание – процесс поглощения полимером низкомолекулярной жидкости, сопровождающийся увеличением массы, объема полимера и изменением конформации его макромолекул. Набухание обусловлено большой разницей в размерах и, следовательно, в скоростях диффузии молекул полимера и низкомолекулярного растворителя, а также сильным межмолекулярным взаимодействием в макромолекулах полимера [6, 7]. Результаты исследования набухания полиакриламида и сополимеров акриламида с различным содержанием ионогенных групп, полученные нами методом оптической микроскопии, показали, что последовательность и продолжительность стадий изменения состояния и формы частиц порошкообразного полимера после контакта с растворителем и степень набухания практически не зависят от типа полимера [8].

Степень набухания образцов исследуемых полимеров, полученных термообработкой их водных растворов при 120 и 140 °С, зависит от типа полимера. Максимальная степень набухания образца ПАА (120 °С) в воде составляет 40–45 г воды из расчета на 1 г сухого полимера. Масса образца ПАА, помещенного в воду, возрастает в течение первого получаса, затем в процессе набухания постепенно уменьшается. Образцы ПАА, обработанные при 140 °С, набухают в воде

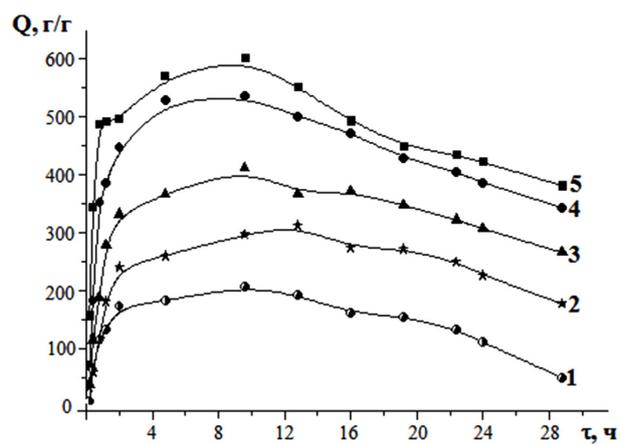


Рис. 1. Степень набухания образцов анионных сополимеров акриламида: 1 – САА₁; 2 – САА₂; 3 – САА₃; 4 – САА₄; 5 – САА₅

Fig. 1. The swelling degree of anionic copolymers of acrylamide samples: 1 – САА₁; 2 – САА₂; 3 – САА₃; 4 – САА₄; 5 – САА₅

от 10 до 40 % и достигает максимального значения для САА₅. Уменьшение степени набухания образцов сополимеров сопровождается изменением их состояния от гелеобразного к вязкотекучему, и образцы постепенно растворяются. Очевидно, сшивки в полимерной цепи, образовавшиеся при термообработке полимера, не могут обеспечить прочности пространственной структуры, достаточной для нерастворимого состояния образца в течение продолжительного времени.

Полученные результаты показали повышение степени набухания полимерных гидрогелей, полученных на основе ряда полиакриламидных соединений (ПАА – САА₁ – САА₂ – САА₃ – САА₄ – САА₅), в 12,6 раза по мере роста содержания ионогенных групп от 0 до 40 %, обусловленное увеличением степени диссоциации карбоксильных групп гидрогелей в процессе набухания, а также постепенное их растворение, связанное с низкой прочностью полимерной основы. В связи с тем что присутствие ионогенных групп является необходимым, но недостаточным условием получения полимерного гидрогеля, обладающего высокой влагоудерживающей способностью, целесообразно использование бинарной системы полимеров, в которой один из компонентов выполняет функцию сшивающего агента, а другой является полиэлектролитом.

Для дальнейших исследований использовали смесь полимеров с мольным соотношением компонентов САА₅ и ПВС, равным 5:1. Термообработку водных растворов проводили при 140 °С и рН 6,0. Экспериментально установлено, что повышение температуры выше 160 °С приводит к уменьшению степени набухания образцов. Гидрогель, синтезированный при температуре менее 140 °С, растворяется при набухании в воде.

Уменьшение рН смеси полимеров приводит к снижению степени набухания термообработанных образцов (рис. 2). В кислой среде диссоциация карбоксильных групп анионного сополимера уменьшается и увеличивается вероятность их взаимодействия с гидроксильными группами ПВС наряду с амидными. В этом случае доля «свободных» карбоксильных групп снижается, и степень набухания ПГГ падает.

Степень набухания ПГГ на основе сополимера и ПВС не превышает 300 г/г (рис. 2), а при увеличении количества ПВС в смеси до эквивольного соотношения САА₅ и ПВС снижается в 1,5 раза. Можно предположить, что химическое взаимодействие неионогенных групп полимеров при термообработке приводит к образованию сшитого продукта, который не обладает развитой пространственной структурой. В связи с этим ячейки полученного гидрогеля не могут «развернуться» даже при наличии достаточного количества ионизированных карбоксильных групп.

Для получения полимерного гидрогеля, обладающего высоким влагопоглощением, необходимо образование сшитого, не растворимого в воде продукта, обладающего пространственной структурой и имеющего достаточное количество ионизированных групп в «свободном» состоянии.

и не растворяются, сохраняя степень набухания около 40 г/г, что обусловлено более эффективным взаимодействием амидных групп ПАА при данной температуре.

Как показал анализ ИК-спектров ПАА, увеличение температуры выше 120 °С приводит к изменению спектра и некоторому уменьшению интенсивности полосы поглощения 1664 см⁻¹, характеризующей колебания связей амидных групп полимера, что свидетельствует об имидизации и появлении сшитых структур [9].

Степень набухания образцов сополимеров акриламида, содержащих различное количество анионных групп, термообработанных при 140 °С, резко увеличивается в течение первых двух часов набухания, затем рост поглощения воды замедляется и постепенно уменьшается (рис. 1). Степень набухания возрастает с увеличением содержания карбоксильных групп

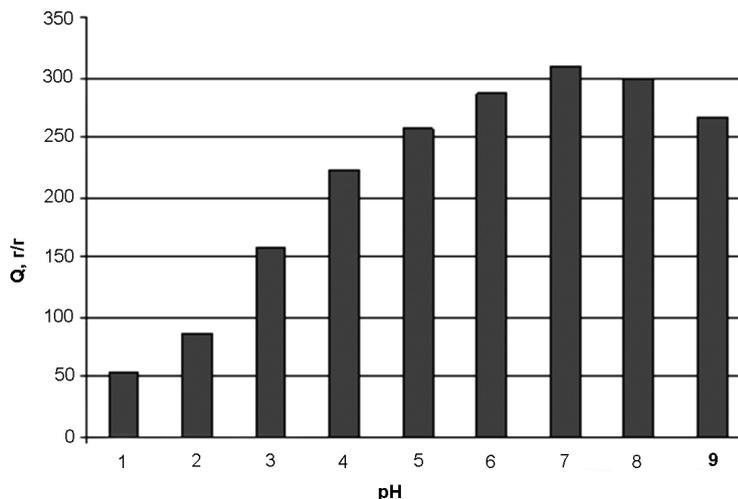
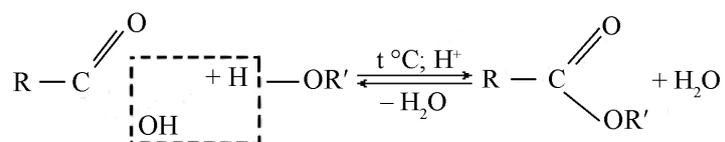


Рис. 2. Зависимость равновесной степени набухания гидрогелей на основе CAA₅ и ПВС от pH исходной смеси
 Fig. 2. Dependence of the equilibrium swelling degree of hydrogels based on CAA₅ and PVA on the pH of initial mixture

В связи с этим в работе вместо анионного сополимера акриламида использовали полиакриловую кислоту. Известно, что в водных растворах при низких значениях pH недиссоциированные карбоксильные группы слабой поликислоты (ПАК) образуют водородные связи с гидроксильными группами слабого основания – ПВС, вступают в реакцию этерификации, катализируемую ионами водорода по следующей схеме [10]:



При набухании полученного сшитого полимерного комплекса 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 образец синтезированного полимерного комплекса значительно увеличивается в размерах – набухает, поглощая растворитель.

Взаимодействие карбоксильных групп ПАК и гидроксильных групп ПВС в кислой среде при термообработке и образование полимерного комплекса подтверждены методами ИК-спектроскопии, дифференциально-термического анализа и кислотно-основного титрования.

Исходя из анализа спектров индивидуальных компонентов (ПАК, ПВС) и полимерного комплекса (термообработанная смесь водных растворов ПАК и ПВС) были рассчитаны значения коэффициентов сшивки [11]. Для полимерного комплекса коэффициент сшивки более чем в два раза выше в сравнении с механической смесью, а доля карбоксильных групп, не участвующих в процессе образования фрагментов сетки (–COOH–), т. е. эфирных связей, образующихся по реакции этерификации, больше для комплекса почти на 26 %. Учитывая, что после термообработки в образце механической смеси содержится ПАК и ПВС и взаимодействие компонентов исключается, доля вступивших в реакцию этерификации и оставшихся в «свободном» состоянии групп определяется присутствием ПАК. В таком случае разница между показателями для полимерного комплекса и механической смеси свидетельствует о взаимодействии полиакриловой кислоты с ПВС при термообработке. В результате взаимодействия компонентов происходит образование химически сшитого продукта, который не растворяется в воде.

Определена степень взаимодействия полимеров как доля карбоксильных групп ПАК, прореагировавших с гидроксильными группами ПВС, причем значения, полученные методом ИК-спектроскопии (28,8 %) и кислотно-основного титрования (28,5 %) для полимерного комплекса (ПАК:ПВС = 10:1), близки.

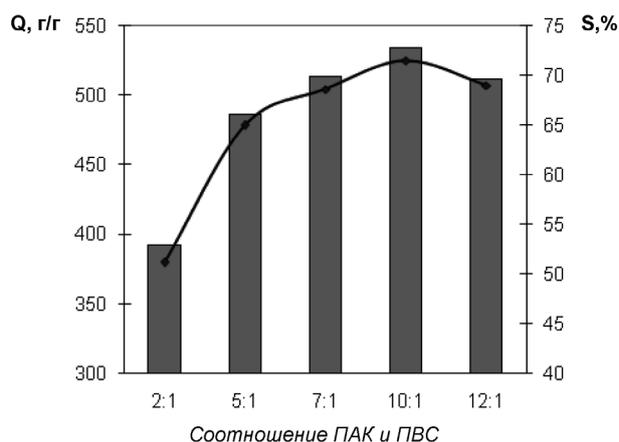


Рис. 3. Количество не прореагировавших карбоксильных групп (S , %) ПАК и равновесная степень набухания (Q , г/г) гидрогеля (ПАК–ПВС) при различном соотношении компонентов в исходной смеси

Fig. 3. The number of unreacted carboxyl groups (S , %) of PAA and the equilibrium swelling degree (Q , g/g) of hydrogel (PAA–PVA) with a different ratio of components in the initial mixture

Степень набухания гидроаккумулирующего комплекса (ПАК–ПВС) зависит от pH исходной смеси растворов полимеров. Изменение массы образцов комплекса, полученных в одинаковых условиях (температура синтеза $120\text{ }^{\circ}\text{C}$; соотношение ПАК:ПВС = 10:1), в течение 40 мин после набухания в дистиллированной воде максимально в интервале pH исходной смеси 1,2–1,4 (рис. 4). Полученные результаты позволили определить условия получения гидрогелей, обеспечивающие максимальную равновесную степень набухания (около 700 г воды/г полимерной основы): синтез осуществляется в кислой среде ($\text{pH} < 3$) при температуре $120\text{--}160\text{ }^{\circ}\text{C}$ до получения гелеобразного продукта с остаточным содержанием воды 20–23 %.

Результаты исследования зависимости равновесной степени набухания образцов комплекса на основе ПАК и ПВС от температуры и продолжительности синтеза приведены в таблице.

Экспериментальные данные, характеризующие равновесную степень набухания образцов, приготовленных в одинаковых условиях (pH исходной смеси 1,2; соотношение ПАК:ПВС = 10:1;

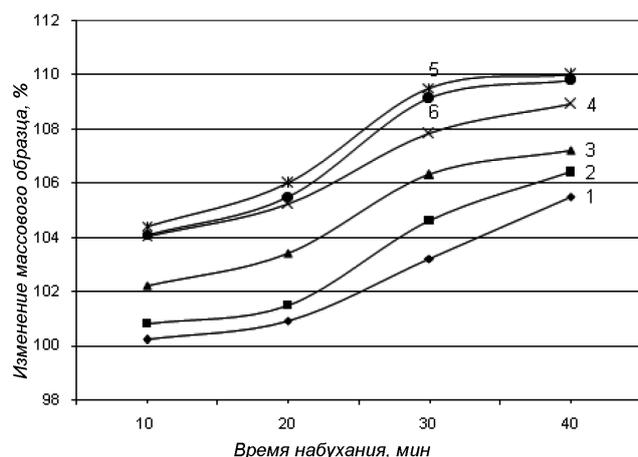


Рис. 4. Изменение массы образцов (ПАК–ПВС) при набухании в воде в зависимости от pH исходных растворов: 1 – 2,0; 2 – 1,8; 3 – 1,4; 4 – 1,3; 5 – 1,2; 6 – 1,05

Fig. 4. The change in sample mass (PAA–PVA) when swelling in water, depending on the pH of the original solutions: 1 – 2.0; 2 – 1.8; 3 – 1.4; 4 – 1.3; 5 – 1.2; 6 – 1.05

Равновесное влагосодержание гидрогеля при прочих равных условиях (pH исходной смеси < 3 ; температура синтеза $120\text{ }^{\circ}\text{C}$) зависит от содержания ПВС в исходной смеси. При эквимольном соотношении полимеров степень набухания имеет минимальное значение (рис. 3). Повышение количества ПАК в исходной смеси сопровождается ростом влагопоглощения и при увеличении содержания поликислоты в смеси в 10 раз (при изменении основомольного соотношения ПАК и ПВС от 1:1 до 10:1) степень набухания увеличивается в 1,6 раза.

Как видно из данных, представленных на рис. 3, степень взаимодействия реагирующих функциональных групп зависит от соотношения полимеров в исходной смеси: при изменении основомольного соотношения компонентов в 10 раз количество не прореагировавших карбоксильных групп меняется \sim на 20 %.

рН внешнего раствора 6,5) и обработанных при различных температурах, свидетельствуют о том, что понижение температуры синтеза ниже $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к получению продукта с низкой плотностью сшивок, со временем растворяющегося при набухании. При повышении температуры выше $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ и увеличении продолжительности синтеза жесткость гидрогеля возрастает, а его поглощающая способность снижается [12].

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

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что высокая способность поглощать воду обусловлена наличием в гидрогеле ионогенных групп, диссоциирующих с образованием заряженных звеньев макромолекул и низкомолекулярных противоионов. Степень набухания полиэлектролитного геля в воде зависит от распределения зарядов в двойном электрическом слое на границе гидрогель–раствор [13]. Образование двойного электрического слоя на поверхности полимерной матрицы в процессе набухания препятствует дальнейшему проникновению катионов в толщу гидрогеля. В связи с чем введение в систему щелочи и увеличение pH выше 7, как видно из рис. 5, практически не влияет на степень набухания гидрогеля.

Равновесная степень набухания образцов комплекса (ПАК–ПВС) в зависимости от температуры и продолжительности синтеза

Equilibrium swelling degree of the samples of the complex (PAA–PVA) depending on the temperature and duration of the synthesis

Температура, °С	Продолжительность термообработки, ч			
	0,5	1	2	3
110	растворяется	растворяется	растворяется	556,4
120	растворяется	растворяется	675,3	594,8
130	654,8	634,6	595,5	319,4
140	518,6	502,4	428,6	296,5
160	463,5	435,6	270,6	158,2

Таким образом установлено, что степень набухания гидроаккумулирующего полимерного комплекса на основе полиакриловой кислоты и поливинилового спирта увеличивается при выполнении следующих условий: pH исходной смеси растворов полимеров 1,2–1,4; температура синтеза 120–140 °С; избыток полиакриловой кислоты в комплексе (основомольное соотношение ПАК:ПВС = 7:1–12:1); диапазон pH внешнего раствора при набухании от 6 до 8.

Синтезированный ПГГ, аналогично известным полимерным гидрогелям, может быть использован в различных областях: в сельском хозяйстве – в качестве влагосодержащих добавок в почву; в строительстве; в медицине; в производстве предметов санитарно-гигиенического назначения;

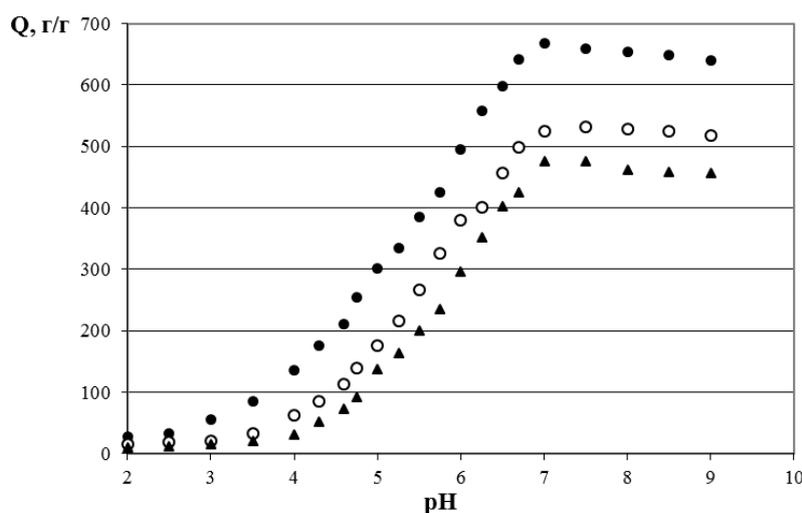


Рис. 5. Зависимость равновесной степени набухания образцов комплекса (ПАК–ПВС) от pH внешнего раствора при соотношении (ПАК:ПВС): 1 – 10:1; 2 – 7:1; 3 – 5:1

Fig. 5. Dependence of the equilibrium swelling degree of the complex (PAA–PVA) samples on the pH of the external solution at the ratio PAA: PVA: 1 – 10:1; 2 – 7:1; 3 – 5:1

в пожаротушении – для повышения огнетушащей эффективности и охлаждающей способности воды и т. д. Перспективным направлением является использование полимерных гидрогелей для получения композиций. Уникальные свойства ПГГ поглощать и удерживать воду и водные растворы в больших количествах позволяют вводить водорастворимые добавки (лекарства, экстракты растений, удобрения, средства защиты растений и т. д.) и получать материалы пролонгированного действия. Гидрогели, полученные на основе мономеров, нестабильны при изменении pH, состава растворителя, температуры. При получении композиций уменьшение или потеря стабильности является нежелательным: например, при его использовании в качестве основы для композиций фармакологического и косметического назначения (дезинфицирующих гелей, мазей, препаратов для очистки и защиты кожи рук и пр.) присутствие добавок (этанола, ПАВ, глицерина, каолина), колебания температуры при хранении могут вызвать расслоение готовых композиций.

Нами проведено сравнение стабильности (отсутствие расслаивания, выделения жидкой фазы) полимерного гидрогеля, полученного на основе мономеров акриловой кислоты, выпускаемого в промышленном масштабе, и разработанного ГПК на основе полиакриловой кислоты и поливинилового спирта при смешивании с раствором этанола (50 %), сульфата меди (0,1 %), кислоты (HCl, pH ≤ 3) и при повышении температуры (≥ 40 °C). В первом случае наблюдалось выделение жидкой фазы (расслаивание) из набухшего гидрогеля при добавлении кислоты, низкомолекулярной соли и этанола; при повышении температуры разделения фаз не происходило. Синтезированный нами ПГГ во всех исследованных случаях оставался в стабильном состоянии. Таким образом, разработанный ПГГ обладает хорошей совместимостью с различными средами, что обуславливает возможность и перспективность его использования в составе композиций.

Заключение. Показана возможность получения гидроаккумулирующих полимерных материалов (гидрогелей) на основе анионных сополимеров акриламида и полиакриловой кислоты. Установлены закономерности процесса получения ПГГ, характеризующие зависимость степени сшивки компонентов от химического строения и соотношения компонентов, условий химической реакции (pH, температуры). Разработан метод синтеза ПГГ с высоким влагопоглощением (до 700 г воды на 1 г полимера), влагоудерживающей способностью в течение длительного времени (несколько месяцев) и устойчивостью к изменению внешних параметров (температура, pH, состав среды набухания).

Список использованных источников

1. Успенская, М. В. Акриловые гидрогели / М. В. Успенская. – Саарбрюккен, Германия: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 324 с.
2. Филиппова, О. Е. «Умные» полимерные гидрогели / О. Е. Филиппова // Природа. – 2005. – № 5. – С. 71–73.
3. Хохлов, А. Р. Восприимчивые гели / А. Р. Хохлов // Сорос. Образоват. журн. – № 11. – 1998. – С. 138–142.
4. Получение сополимеров акриламида и 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислоты методом фронтальной полимеризации / Е. В. Гринюк [и др.] // Журн. прикл. химии – 2014. – Т. 87, № 12. – С. 1841–1845.
5. Бектуров, Е. А. Полимерные гидрогели / Е. А. Бектуров, И. Э. Сулейменов. – Алматы: Фылым, 1998. – 240 с.
6. Ширинов, Ш. Д. Исследование кинетики набухания синтезированных гидрогелей на основе гидролизованного полиакрилонитрила [Электронный ресурс] / Ш. Д., Ширинов, А. Т. Джалилов // Universum: Химия и биология. – 2018. – № 3 (45). – Режим доступа: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/5601>
7. Самченко, Ю. М. Набухание гидрогелей в неводных средах / Ю. М. Самченко // Коллоид. журн. – 2000. – Т. 62, № 2. – С. 228–231.
8. Растворение анионных (со)полимеров акриламида в водно-солевых средах / Д. Н. Давлюд [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 329–337. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-329-337>
9. Смит, А. Прикладная ИК-спектроскопия / А. Смит. – М.: Мир, 1982. – 328 с.
10. Изучение механизма синтеза гелеобразующего декстрана с фосфорнокислыми и карбаматными группами / Т. Л. Юркштович [и др.] // Труды Белорусского государственного университета. Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем. – 2014. – Т. 9, Ч. 2. – С. 164–172.
11. Полимерные комплексы на основе полиакриловой кислоты, полиэтиленгликоля и поливинилового спирта / Е. В. Воробьева [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2008. – № 1. – С. 28–32.
12. Гидроаккумулирующий полимерный комплекс на основе полиакриловой кислоты и поливинилового спирта / Ю. В. Матрунчик [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2008. – № 4. – С. 81–84.
13. Кабанов, В. А. Полиэлектrolитные комплексы в растворе и в конденсированной фазе / В. А. Кабанов // Успехи химии. – 2005. – Т. 74, № 1. – С. 5–23.

References

1. Uspenskaya M. V. *Acrylic hydrogels*. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 324 p.
2. Filippova O. E. “Smart” polymer hydrogels. *Priroda* [Nature], 2005, no. 8, pp. 71–73 (in Russian).
3. Khokhlov A. R. Susceptible gels. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal = Soros Educational Journal*, 1998, no. 11, pp. 138–142 (in Russian).
4. Grinyuk E. V., Duk O. G., Scheres I. V., Krul L. P. Synthesis of acrylamide and 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid copolymers by front polymerization method. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, vol. 87, № 12, pp. 1913–1917. <https://doi.org/10.1134/s1070427214120192>
5. Bekturov E. A., Suleimenov I. E. *Polymer hydrogels*. Almaty, Fylym Publ., 1998. 240 p. (in Russian).
6. Shirinov Sh. D., Dzhililov A.T. Investigation of the swelling kinetics of the synthesized hydrogels based on hydrolyzed polyacrylonitrile. *Universum: Khimiya i biologiya* [Universum: Chemistry and Biology], 2018, № 3 (45). Available at: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/5601> (in Russian).
7. Samchenko Yu. M. Hydrogels swelling in non-aqueous media. *Kolloidnyi zhurnal = Colloid Journal*, 2000, vol. 62, no. 2, pp. 228–231 (in Russian).
8. Davlyud D. N., Vorobiev P. D., Matrunchik Yu. V., Vorobieva E. V., Krutko N. P. Acrylamide (co)polymers dissolution in water-saline solutions. *Vesti Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 329–337 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-329-337>
9. Smith A. *Applied IR spectroscopy*. Moscow, Mir Publ., 1982. 328 p. (in Russian).
10. Yurkshtovich T. L., Solomevich S. O., Bychkovsky P. M., Golub N. V., Alinovskaya V. A., Kosterova R. I. The study of the mechanism of the synthesis of dextran gelling with phosphoric acid and carbamate groups. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziologicheskie, biokhimicheskie i molekulyarnye osnovy funktsionirovaniya biosistem* [Proceedings of the Belarusian State University. Physiological, biochemical and molecular basis of the functioning of biosystems], 2014, vol. 9, part 2, pp. 164–172 (in Russian).
11. Vorobieva E. V., Krutko N. P., Basalyga I. I., Matrunchik Yu. V. Polymer complexes based on polyacrylic acid, polyethylene glycol and polyvinyl alcohol. *Vesti Natsyynal'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).
12. Matrunchik Yu. V., Vorobieva E. V., Basalyga I. I., Krutko N. P. Hydroaccumulating polymer complex based on polyacrylic acid and polyvinyl alcohol. *Vesti Natsyynal'nai 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).
13. Kabanov V. A. Polyelectrolyte complexes in solution and in the condensed phase. *Russian Chemical Reviews*, 2005, vol. 74, no. 1, pp. 3–20. <https://doi.org/10.1070/rc2005v074n01abeh001165>

Информация об авторах

Давлюд Дарья Николаевна – науч. сотрудник, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: davlud.d@tut.by

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

Воробьева Елена Викторовна – д-р хим. наук, доцент, зав. лаб. полимерсодержащих дисперсных систем, Институт общей и неорганической химии, Национальная академия наук Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

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

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

Information about the authors

Daria N. Davlyud – Researcher, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: davlud.d@tut.by

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

Elena V. Vorobieva – D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory of Polymer-Containing Disperse Systems, Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

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

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