

АМФИФИЛЬНЫЕ ФТОРСОДЕРЖАЩИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ СЕТКИ И ИХ ПОВЕДЕНИЕ В ВОДНЫХ СРЕДАХ

В.Н. Кижняев, Е.В. Акамова, И.Д. Балаховцев, Ф.А. Покатилов

Валерий Николаевич Кижняев (ORCID 0000-0003-0617-9972)*, Елена Владимировна Акамова (ORCID 0000-0003-0633-4469), Иван Дмитриевич Балаховцев (ORCID 0009-0002-2889-7713), Федор Анатольевич Покатилов (ORCID 0000-0002-8145-8499)

Иркутский государственный университет, ул. Карла Маркса, 1, Иркутск, Российская Федерация, 664003
E-mail: kizhnyaev@chem.isu.ru*, helen.akamova@gmail.com, ibalakhovtsev98@gmail.com, pfa72@rambler.ru

Осуществлено реакционное смешение сополимера 1,1,7-тригидро-додекафторгептилметакрилат – 5-винилтетразол с сополимерами N-винилпирролидона и N-винилкапролактама с 2-(винилоксиэтокси)- метилоксираном в среде ДМФА при 80 °С с образованием сетчатых парных полимеров. Тетразольные и оксирановые циклы выполняют роль «якорных» функциональных групп, реакция между которыми приводит к связыванию разнородных макромолекул в единую пространственную сетку типа “conetwork”. Установлено, что ускорению формирования сетчатой структуры способствует соблюдение массовой эквивалентности полимерных реагентов и увеличение содержания звеньев 5-винилтетразола во фторсодержащем сополимере. Последний фактор способствует и снижению суммарной концентрации полимерных реагентов, при которой процесс реакционного смешения сопровождается формированием полимерной сетки. В результате реакционного смешения во всех системах получены сетчатые парные полимеры, состав которых близок к составу исходной смеси полимерных реагентов. Амфифильная природа продуктов реакционного смешения фторсодержащего сополимера с поливиниллактамами обуславливает их способность к ограниченному набуханию в ДМФА и в воде. Сравнительная оценка термодинамического сродства ДМФА и воды по отношению к получаемым сетчатым парным полимерам по параметру Флори-Хаггинса, рассчитанному в соответствии с теорией Флори-Ренера для полимерных сеток, свидетельствует, что вода является термодинамически лучшим растворителем, чем ДМФА и по своему качеству приближается к θ -растворителю. Этим объясняются большие значения коэффициентов набухания в воде по сравнению с органическим растворителем. При этом, большим водопоглощением, ожидаемо, обладают полимерные сетки на основе поли-N-винилпирролидона. Получаемые при набухании в водной среде гидрогели сетчатых парных полимеров проявляют свойства pH- и термочувствительности.

Ключевые слова: сополимер 1,1,7-тригидрододекафторгептил-метакрилата с 5-винилтетразолом, сополимеры N-винилпирролидона и N-винилкапролактама с 2-(винилоксиэтокси)метилоксираном, реакционное смешение, сетчатые парные полимеры, стимул-чувствительные гидрогели

AMPHIPHILIC FLUORINE-CONTAINING POLYMER NETWORKS AND THEIR BEHAVIOR IN AQUEOUS ENVIRONMENTS

V.N. Kizhnyaev, E.V. Akamova, I.D. Balakhovtsev, F.A. Pokatilov

Valery N. Kizhnyaev (ORCID 0000-0003-0617-9972)*, Elena V. Akamova (ORCID 0000-0003-0633-4469), Ivan D. Balakhovtsev (ORCID 0009-0002-2889-7713), Fedor A. Pokatilov (ORCID 0000-0002-8145-8499)

Irkutsk State University, Karl Marks st., 1, Irkutsk, 664003, Russia

E-mail: kizhnyaev@chem.isu.ru*, helen.akamova@gmail.com, ibalakhovtsev98@gmail.com, pfa72@rambler.ru

Reactive mixing of 1,1,7-trihydro-dodecafluoroheptyl methacrylate – 5-vinyltetrazole copolymer with copolymers of N-vinylpyrrolidone and N-vinylcaprolactam with 2-(vinylxyethoxy)methyloxirane in DMF at 80°C resulted in the formation of paired crosslinked polymers. The tetrazole and oxirane rings act as anchor functional groups, the reaction between which leads to the binding of dissimilar macromolecules into a single spatial network of the "conetwork" type. It was found that maintaining the mass equivalence of the polymer reactants and increasing the content of 5-vinyltetrazole units in the fluorinated copolymer accelerate the formation of the cross-linked structure. The latter factor also contributes to a decrease in the total concentration of polymer reactants at which the reaction mixing process is accompanied by the formation of a polymer network. As a result of reactive mixing in all systems, cross-linked paired polymers were obtained, the composition of which is close to that of the initial mixture of polymer reactants. The amphiphilic nature of the products of reactive mixing of the fluorinated copolymer with polyvinyl lactams determines their ability to undergo limited swelling in DMF and water. A comparative assessment of the thermodynamic affinity of DMF and water with respect to the resulting cross-linked paired polymers using the Flory-Huggins parameter, calculated in accordance with the Flory-Rehner theory for polymer networks, indicates that water is a thermodynamically better solvent than DMF and approaches the quality of a θ -solvent. This explains the higher swelling coefficients in water compared to an organic solvent. Moreover, polymer networks based on poly-N-vinylpyrrolidone, as expected, exhibit higher water absorption. The hydrogels of cross-linked paired polymers obtained by swelling in an aqueous medium exhibit pH- and temperature-sensitive properties.

Keywords: 1,1,7-trihydrododecafluoroheptyl methacrylate copolymer with 5-vinyltetrazole, copolymers of N-vinylpyrrolidone and N-vinylcaprolactam with 2-(vinylxyethoxy)methyloxirane, reactive blending, networked paired polymers, stimulus-responsive hydrogels

Для цитирования:

Кижняев В.Н., Акамова Е.В., Балаховцев И.Д., Покатилов Ф.А. Амфифильные фторсодержащие полимерные сетки и их поведение в водных средах. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2026. Т. 69. Вып. 9. С. 79–88. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.6984.

For citation:

Kizhnyaev V.N., Akamova E.V., Balakhovtsev I.D., Pokatilov F.A. Amphiphilic fluorine-containing polymer networks and their behavior in aqueous environments. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2026. V. 69. N 9. P. 79–88. DOI: 10.6060/ivkkt.20266909.6984.

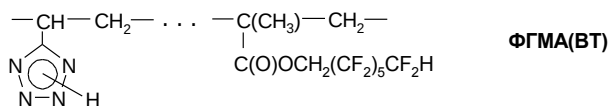
ВВЕДЕНИЕ

Амфифильные гидрогели, сочетающие в полимерной сетке гидрофобные и гидрофильные структурные фрагменты, широко используются в качестве систем доставки лекарств, биоматериала в тканевой инженерии, в производстве раневых повязок, контактных линз и других биомедицинских приложений, избирательно проницаемых мембран, носителей катализаторов, включая ферменты [1-6]. Гидрофобные фрагменты сетки (в особенности блочного типа) несут на себе важные функции: склонность к ассоциативным процессам в водных средах, нередко приводящим к повышению механической прочности гидрогелей, улучшение сорбционных свойств гидрогелей по отношению к различным гидрофобным субстратам (в частности, к лекарственным субстанциям), а также придание гидрогелям стимул-чувствительных свойств. В этой связи, непредельные фторсодержащие мономеры

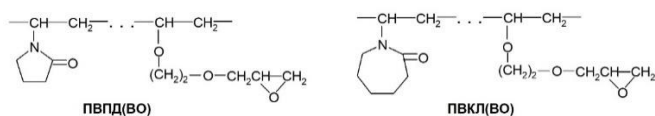
могут служить перспективными прекурсорами для формирования амфифильных полимерных сеток. Во-первых, существует широкий ряд указанных мономеров, представляющих фторированные производные виниловых эфиров [7, 8], стирола [9, 10], (мет)акрилатов [11-20], винилгетероциклов [21] и т. д. Во-вторых, указанные мономеры в большинстве своем склонны к радикальной (со)полимеризации, в том числе и к процессам с обратимой деактивацией растущих цепей. Последнее обстоятельство позволяет синтезировать на основе фторированных мономеров амфифильные блок-сополимеры [22-27], склонные к самоорганизации в различных по природе средах [28-33], обуславливая проявление полимерными материалами интересных в практическом плане свойств. Однако возможен и другой вариант синтеза амфифильных полимерных систем, в частности, полимерных сеток типа "conetwork" с участием фторсодержащих по-

лимеров. Реакционное смешение полимеров различной природы посредством взаимодействия «якорных» функциональных групп (например, оксирановых и тетразольных циклов), расположенных в структуре разнородных макромолекул случайным образом, приводит к их ковалентному связыванию в единую пространственную сетку [34, 35]. Одним из указанных высокомолекулярных реагентов может быть и гидрофобный фторсодержащий полимер, имеющий в структуре соответствующую «якорную» группу, например, тетразольный фрагмент. В литературе есть сведения о получении сополимера 1,1,7-тригидрододекафторгептилметакрилата с 5-винилтетразолом (ФГМА(ВТ)) [36]. Причем, радикальная сополимеризация указанных мономеров по характеру приближается к азеотропной, что позволяет легко управлять составом сополимеров, варьируя исходного соотношения сомономеров. Кроме того, кислотные N-H незамещенные тетразольные фрагменты помимо участия в реакциях с «якорными» оксирановыми циклами, принадлежащими контрагенту, обуславливают проявление pH-чувствительных свойств у продукта реакционного смешения, называемого парным полимером.

В настоящей работе представлены результаты получения посредством реакционного смешения фторсодержащего сополимера ФГМА(ВТ)



с поли-N-винилпирролидоном (ПВПД(ВО)) и поли-N-винилкапролактамом ПВКЛ(ВО), модифицированных введением в их структуру небольших количеств звеньев 2-(винилоксиэтокси)метилоксирана (ВО),



сетчатых парных полимеров и исследования поведения в водных средах амфифильных стимул-чувствительных гидрогелей на их основе.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе использовали образцы сополимера ФГМА(ВТ) с содержанием мономерных звеньев ВТ 0,41, 0,53, 0,63, 0,72, 0,89 мол. долей, сополимеров ПВПД(ВО) и ПВКЛ(ВО) с содержанием звеньев винилового эфира 0,085 и 0,12 мол. долей, соответственно, синтезированные и проанализированные в соответствии с методиками [34-36].

Взаимодействие между фторсодержащим ФГМА(ВТ) и лактамсодержащими ПВПД(ВО) или

ПВКЛ(ВО) сополимерами осуществляли ампульным способом в среде ДМФА при различных соотношениях компонентов, суммарных концентрациях полимерных реагентов 3-10 г/дл и температуре 80 °С. Для проведения процесса при комнатной температуре смешивали предварительно приготовленные растворы ФГМА(ВТ) и поливиниллактамов в ДМФА. Затем реакционную смесь загружали в ампулы, запаивали и выдерживали в термостате при соответствующей температуре. Во всех случаях процесс сопровождался гелеобразованием реакционной смеси; время потери текучести системой (τ) фиксировали визуально. За количественную величину времени τ принимали среднее значение результатов двух параллельных опытов. Для окончательного завершения процесса сшивания фтор- и лактамсодержащих полимеров смесь выдерживали при заданной температуре в течение 7 сут. после момента гелеобразования. Полученную в результате реакции гелеобразную массу выдерживали в течение недели под периодически заменяемым ДМФА для удаления непрореагировавших полимерных реагентов и достижения сетчатым парным полимером равновесного набухания. Далее, в зависимости от задачи исследования, из геля тщательно удаляли растворитель с целью определения степени его набухания в ДМФА и определения состава парного полимера, либо гели выдерживали в течение трех недель под периодически заменяемой дистиллированной водой с целью удаления ДМФА и получения образцов равновесно набухших гидрогелей. Полученные подобным способом гидрогели далее использовали для изучения их поведения при варьировании параметров окружающей среды (pH, температуры).

Состав продуктов реакционного смешения рассчитывали из данных элементного анализа, выполненного с использованием СНН-анализатора FLASH BA 1112 Series, по содержанию в образцах азота. Сорбционную способность сетчатых парных полимеров по отношению к ДМФА и воде характеризовали коэффициентом набухания ($K_{\text{наб}}$), который определяли гравиметрическим методом и вычисляли по формуле

$$K_{\text{наб}} = (m_{\text{г}} - m_{\text{п}}) / m_{\text{п}},$$

где $m_{\text{г}}$ и $m_{\text{п}}$ — масса равновесно набухшего гидрогеля и сухого полимера, соответственно. Требуемую температуру при проведении реакции между полимерными реагентами и исследовании процессов набухания гидрогелей поддерживали с использованием воздушного термостата Memmert (точность термостатирования $\pm 0,5$ °С). Вискозиметрическое титрование раствора ФГМА(ВТ) раствором

ПВПД(ВО) или ПВКЛ(ВО) в ДМФА (концентрация полимеров 1 г/дл) осуществляли с помощью вискозиметра с висязим уровнем при 25 °С.

Параметры Флори-Хаггинса (χ) для полимерных сеток рассчитывали в соответствии с теорией Флори-Ренера [37, 38] с использованием соответствующих уравнений.

$$\chi = \frac{\varphi(1-\varphi)^{-1} + N \ln(1-\varphi) + N\varphi}{2\varphi - \varphi^2 N - \varphi^2 T^{-1} (d\varphi/dT)^{-1}},$$

где χ – параметр Флори Хаггинса; T – температура, К; φ – доля полимера в набухшем образце, равная

$$\varphi = \left[1 + \frac{\rho_P}{\rho_S} \left(\frac{M_a}{M_b} \right) - \frac{\rho_P}{\rho_S} \right]^{-1},$$

ρ_P – плотность полимера, г/см³; ρ_S – плотность растворителя, г/см³; M_a – масса полимера после набухания, г; M_b – масса сухого полимера, г; N – безразмерный параметр, равный

$$N = \left(\frac{\varphi^{\frac{2}{3}}}{3} - \frac{2}{3} \right) \left(\varphi^{\frac{1}{3}} - \frac{2\varphi}{3} \right)^{-1}$$

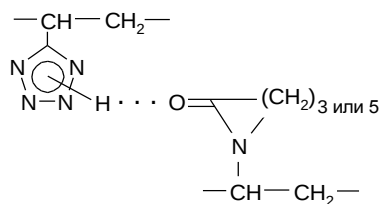
Плотности тщательно высушенных образцов сетчатых парных полимеров определяли пикнометрическим методом с использованием гексана, в котором полимеры не набухают и не растворяются. Расчет плотностей проводили по формуле:

$$\rho = \frac{G \cdot \frac{P_2 - P_0}{P_1 - P_0}}{G + P_2 - P_3},$$

где ρ – плотность полимера, г/см³; P_0 – масса пустого пикнометра, г; P_1 – масса пикнометра с водой, г; P_2 – масса пикнометра с гексаном, г; P_3 – масса пикнометра с веществом и жидкостью, г; G – навеска полимера, г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структура участников реакционного смешения предполагает два типа взаимодействия полимерных реагентов в зависимости от температуры окружающей среды. Несмотря на осуществление реакции в среде электронодонорного растворителя ДМФА, уже при комнатной температуре между макромолекулами полимерных реагентов проявляется межмолекулярное взаимодействие, обусловленное образованием кооперативной системы водородных связей между тетразольными и лактамными циклами.



Как следствие, экспериментально определяемые значения приведенной вязкости растворов смесей ФГМА(ВТ) с ПВПД(ВО) или ПВКЛ(ВО) в ДМФА превосходят расчетные аддитивные значения вязкости при любых соотношениях компонентов (рис. 1, кривые 1 и 4). Подобный факт может свидетельствовать об образовании агрегатов интерполимерного комплекса, превышающих по размерам макромолекулярные клубки исходных полимеров [39]. Эффективность интерполимерного взаимодействия между разнородными макромолекулами снижается с уменьшением содержания в структуре фторсодержащего сополимера мономерных звеньев ВТ (рис. 1, кривые 1-3).

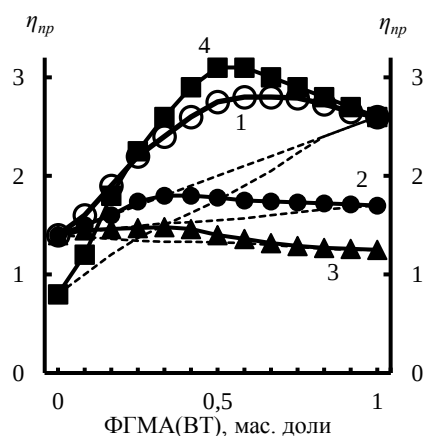
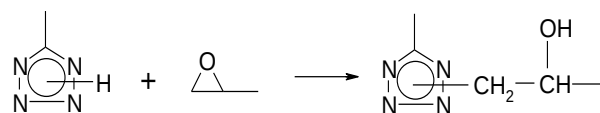


Рис. 1. Приведенная вязкость растворов смесей ФГМА(ВТ) с ПВПД(ВО) (1-3) и ПВКЛ(ВО) (4) в ДМФА при 25 °С в зависимости от массовой доли фторсодержащего сополимера. Содержание звеньев ВТ в ФГМА(ВТ): 0.73 (1, 4), 0.53 (2), 0.11 мол. долей (3). Пунктиром обозначены расчетные аддитивные зависимости

Fig. 1. Reduced viscosity of solutions of mixtures of FGMA(VT) with PVPD(VO) (1-3) and PVCL(VO) (4) in DMF at 25 °C depending on the mass fraction of the fluoropolymer. The content of VT units in FGMA(VT): 0.73 (1, 4), 0.53 (2), 0.11 mole fractions (3). The dotted lines indicate the calculated additive dependences

При температуре осуществления реакционного смешения полимеров (80 °С) система водородных связей разрушается, а имеет место реакция между тетразольными и оксирановыми циклами,



приводящая к формированию пространственной сетки уже из ковалентно связанных макромолекул фторсодержащего полимера и поливиниллактама. Этому способствует осуществление реакционного смешения ФГМА(ВТ) с ПВПД(ВО) или ПВКЛ(ВО) при суммарных концентрациях полимерных реагентов (3-10 г/дл), превышающих критическую

концентрацию кроссовера для данных смесей полимеров (0,5-0,8 г/дл).

Таким образом, взаимодействие между полимерами сопровождалось гелеобразованием реакционной смеси, причем, по временам потери текучести системой (τ) можно оценить влияние условий проведения реакции на скорость формирования пространственной сетки. В обеих системах ФГМА(ВТ)–ПВПД(ВО) и ФГМА(ВТ)–ПВКЛ(ВО) ускорению процесса гелеобразования способствует увеличение содержания тетразольных фрагментов во фторсодержащем сополимере (рис. 2, кривые 1, 2).

Кроме того, увеличение содержания «якорных» тетразольных фрагментов обуславливает и уменьшение значений минимальных суммарных концентраций полимерных реагентов, при которых процесс реакционного смешения сопровождается гелеобразованием системы. Так, в случае реакционного смешения ПВПД(ВО) с ФГМА(ВТ) с содер-

жанием звеньев ВТ 0,73, 0,53 и 0,11 мол. долей формирование пространственной сетки наблюдается при минимальной суммарной концентрации полимеров 3, 5 и 20 г/дл, соответственно. Для системы ФГМА(ВТ)–ПВПД(ВО) с наибольшей скоростью формирование пространственной сетки отмечено при эквивалентном по массе соотношении полимерных реагентов (рис. 2, кривая 3). При реакционном смешении ФГМА(ВТ) с ПВКЛ(ВО) подобного влияния соотношения компонентов на времена потери текучести не выявлено (рис. 2, кривая 4). Процесс формирования пространственной сетки не заканчивается в момент потери текучести реакционной системой, а завершается приблизительно на пятые сутки после гелеобразования. В результате реакционного смешения в обеих системах получены сетчатые парные полимеры, состав которых близок к составу исходной смеси полимерных реагентов (таблица).

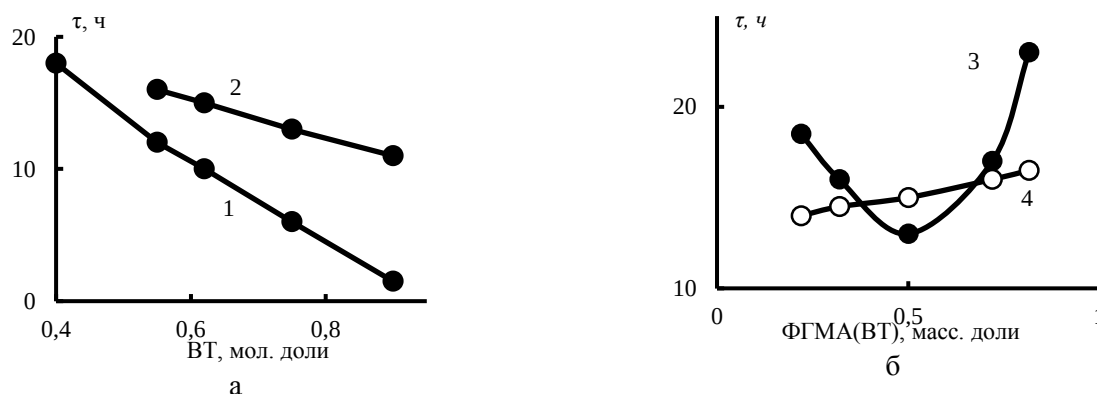


Рис. 2. Время потери текучести τ в системах ФГМА(ВТ)–ПВПД(ВО) (1, 3) и ФГМА(ВТ)–ПВКЛ(ВО) (2, 4) в зависимости от мольной доли звеньев ВТ в ФГМА(ВТ) (а) и от массовой доли поливиниллактама (б) в исходной смеси полимеров. ФГМА(ВТ): поливиниллактан = 1:1 (1, 2); $\Sigma C_{\text{ПЛ}} = 10$ г/дл; 80 °С

Fig. 2. The time of loss of pour point τ in the systems FGMA(VT)–PVPD(VO) (1, 3) and FGMA(VT)–PVKL(VO) (2, 4) depending on the molar fraction of VT units in FGMA(VT) (a) and on the mass fraction of polyvinyl lactam (b) in the initial polymer mixture. FGMA(VT): polyvinyl lactam = 1:1 (1, 2); $\Sigma C_{\text{PL}} = 10$ g/dl; 80 °C

Таблица

Параметр Флори-Хаггинса (χ) и коэффициенты набухания сетчатых парных полимеров ФГМА(ВТ)–ПВПД(ВО)

Table. Flory-Huggins parameter (χ) and swelling coefficients of cross-linked paired polymers FGMA(VT)–PVPD(VO)

Содержание ФГМА(ВТ), массовые доли		Плотность парного полимера, г/см ³	χ		К _{наб} при 25 °С	
в исходной смеси	в парном полимере		ДМФА	Н ₂ О	ДМФА	Н ₂ О
0,20	0,22	1,22	-	0,51	140	720
0,33	0,35	1,29	0,57	0,51	100	280
0,50	0,51	1,31	0,55	0,51	80	100
0,67	0,68	1,32	0,54	0,50	45	60
0,80	0,80	1,33	0,52	0,50	50	70

Амфифильная и полиэлектролитная природа продуктов реакционного смешения ФГМА(ВТ) с

ПВПД(ВО) и ПВКЛ(ВО) обуславливает их способность к ограниченному набуханию в ДМФА и в

воде как в неионизованном, так и в ионизованном (по тетразольным фрагментам) состоянии. Этим парные полимеры отличаются от исходного сополимера ФГМА(ВТ), который, независимо от состава, в неионизованном состоянии не растворим и не набухает в водной среде [40]. Оценку термодинамического сродства ДМФА и воды по отношению к получаемым сетчатым парным полимерам ФГМА(ВТ)–ПВПД(ВО) осуществляли по параметру Флори-Хаггинса, рассчитанному в соответствии с теорией Флори-Ренера для полимерных сеток. Полученные результаты свидетельствуют, что вода является термодинамически лучшим растворителем, чем ДМФА, и по своему качеству приближается к θ -растворителю (табл. 1). Этому способствует ионогенная природа тетразольного цикла и его способность к образованию водородных связей с водой. Как следствие, при набухании в водной среде отмечены большие значения коэффициентов набухания по сравнению с органическим растворителем, независимо от состава парного полимера. При этом равновесная степень набухания парных полимеров в обеих жидкостях уменьшается с увеличением в их структуре макромолекулярных цепей фторсодержащего сополимера.

Более интересным представляется процесс набухания в водной среде с образованием гидрогелей, свойства которых должны определяться амфифильной и полиэлектролитной природой полученных сетчатых продуктов реакционного смешения. При прочих равных условиях гидрогели на основе парных полимеров ФГМА(ВТ)–ПВПД(ВО), ожидаемо, отличаются повышенным водопоглощением по сравнению с гидрогелями парных полимеров ФГМА(ВТ)–ПВКЛ(ВО). Кроме того, для первого типа гидрогелей характерна более резко выраженная зависимость коэффициентов набухания от содержания ионогенных винилтетразольных звеньев в макромолекулах фторсодержащего сополимера (рис. 3).

Таким образом, тетразольные фрагменты в большей степени определяют сродство парных полимеров к воде, нежели лактамные циклы. Иными словами, тетразольные циклы играют роль не только «якорных» функциональных групп, участвующих в ковалентном связывании разнородных макромолекул, но и роль гидрофилизирующих фрагментов полимерной сетки.

Присутствие тетразольных фрагментов в структуре парных полимеров ФГМА(ВТ)–ПВПД(ВО) определяет и характер термочувствительности у гидрогелей на их основе; возрастание

степени ионизации тетразольных циклов с повышением температуры сопровождается повышением водопоглощения гидрогелем (рис. 4, кривая 1). Для гидрогелей парных полимеров ФГМА(ВТ)–ПВКЛ(ВО) проявляется явно выраженный эффект коллапсирования (рис. 4, кривая 2) в области температур, соответствующих значениям НКТР водных систем гомополимера ПВКЛ [41]. При дальнейшем повышении температуры эффект полиэлектролитного набухания полимерной сетки, обусловленный повышением ионизации тетразольных фрагментов, начинает превалировать над силами гидрофобных взаимодействий капролактамных циклов. Как следствие, наблюдается увеличение степени набухания гидрогеля.

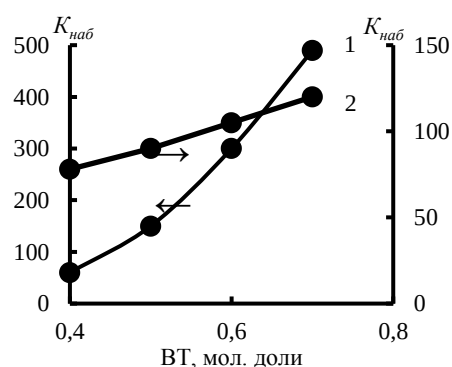


Рис. 3. Степень набухания в воде при 25 °С парных полимеров ФГМА(ВТ)–ПВПД(ВО) (1) и ФГМА(ВТ)–ПВКЛ(ВО) (2) в зависимости от мольной доли звеньев ВТ в ФГМА(ВТ). Условия получения парных полимеров: ФГМА(ВТ): поливиниллактам = 1:1; $\Sigma C_{ПЛ}$ = 10 г/дл; 80 °С

Fig. 3. The degree of swelling in water at 25°C of the paired polymers FGMA(VT)–PVPD(VO) (1) and FGMA(VT)–PVCL(VO) (2) depending on the molar fraction of VT units in FGMA(VT). Conditions for obtaining the paired polymers: FGMA(VT): polyvinyl lactam = 1:1; ΣC_{PL} = 10 g/dl; 80 °C

Присутствие в структуре пространственной сетки ионогенных кислотных тетразольных циклов обуславливает проявление гидрогелями парных полимеров рН-чувствительных свойств с максимумом водопоглощения в области значений рН 8,5–9,5, в которой тетразольные циклы находятся в ионизованном состоянии. В большей степени амплитуда изменения водопоглощения при варьировании рН среды отмечена для более гидрофильного парного полимера ФГМА(ВТ)–ПВПД(ВО). В свою очередь, присутствие в структуре сетки фрагментов фторированного метакрилата существенно повышает механическую прочность набухших гидрогелей парных полимеров ФГМА(ВТ) с ПВПД(ВО) или ПВКЛ(ВО) по сравнению с гидрогелями продуктов реакционного смешения поли-5-винилтетразола с соответствующими поливиниллактатами [34, 35].

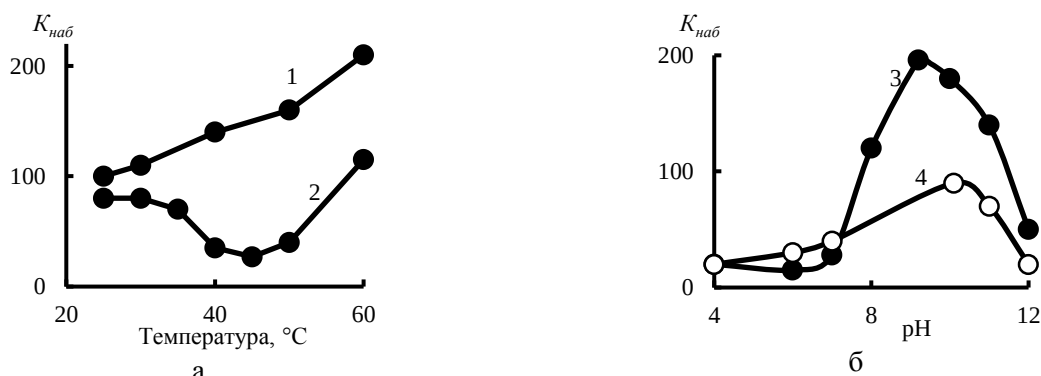


Рис. 4. Степень набухания в воде парных полимеров ФГМА(ВТ)–ПВПД(ВО) (1, 3) и ФГМА(ВТ)–ПВКЛ(ВО) (2, 4) в зависимости от температуры (а) и pH (б) водной среды. Условия получения парных полимеров: ФГМА(ВТ): поливиниллактам = 1:1; $\Sigma C_{ПЛ} = 10$ г/дл; 80 °C

Fig. 4. The degree of swelling in water of the paired polymers FGMA(VT)–PVPD(VO) (1, 3) and FGMA(VT)–PVCL(VO) (2, 4) depending on the temperature (a) and pH (б) of the aqueous medium. Conditions for obtaining the paired polymers: FGMA(VT): polyvinyl lactam = 1:1; $\Sigma C_{PL} = 10$ g/dl; 80 °C

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, введение в структуру гидрофобного фторсодержащего поли(мет)акрилата тетразольных фрагментов позволяет вовлечь его в процесс реакционного смешения с водорастворимыми оксирансодержащими поливиниллактатами с образованием амфифильных полимерных сеток. Сочетание гидрофильных и гидрофобных ковалентно связанных макромолекулярных цепей разнородных полимеров, наряду с наличием ионогенных тетразольных циклов, обеспечивает проявление гидрогелями получаемых сетчатых парных полимеров pH- и термочувствительных свойств.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности Минобрнауки России (код темы: FZZE-2023-0006; соглашение № 075-03-2023-036).

The study was carried out within the framework of the basic part of the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Education and Science of Russia (topic code: FZZE-2023-0006; agreement No. 075-03-2023-036).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chang H., Li Ch., Huang R., Su R., Qi W., He Z. Amphiphilic hydrogel for biomedical applications. *J. Mater. Chem. B*. 2019. V. 7. N 18. P. 2899-2910. DOI: 10.1039/C9TB00073A.
2. Dabbaghi A., Ramazani A., Farshchi N., Rezaei A., Bodaghi A., Rezayati S. Synthesis, physical and mechanical properties of amphiphilic hydrogels based on polycaprolactone and polyethylene glycol for bioapplications: A review. *J. Ind. Eng. Chem.* 2021. V. 101. P. 307-323. DOI: 10.1016/j.jiec.2021.05.051.
3. Hou X., Huang B., Zhou L., Liu S., Kong J., He Ch. An amphiphilic entangled network design toward ultratough hydrogels. *Adv. Mater.* 2023. V. 35. N 28. E2301532. DOI: 10.1002/adma.202301532.
4. Apostolides D.E., Michael G., Andronikou K., Patrickios C.S., Pasztor S., Szarka G., Petroczy A., Ivan B., Sakai N., Prevost S., Tsalikis D.G. Synthesis of highly ordered amphiphilic polymer conetwork hydrogels via the topologically precise interconnection of two highly incompatible polymers. *Chem. Mater.* 2025. V. 37. P. 5515-5528. DOI: 10.1021/acs.chemmater.5c00127.

REFERENCES

1. Chang H., Li Ch., Huang R., Su R., Qi W., He Z. Amphiphilic hydrogel for biomedical applications. *J. Mater. Chem. B*. 2019. V. 7. N 18. P. 2899-2910. DOI: 10.1039/C9TB00073A.
2. Dabbaghi A., Ramazani A., Farshchi N., Rezaei A., Bodaghi A., Rezayati S. Synthesis, physical and mechanical properties of amphiphilic hydrogels based on polycaprolactone and polyethylene glycol for bioapplications: A review. *J. Ind. Eng. Chem.* 2021. V. 101. P. 307-323. DOI: 10.1016/j.jiec.2021.05.051.
3. Hou X., Huang B., Zhou L., Liu S., Kong J., He Ch. An amphiphilic entangled network design toward ultratough hydrogels. *Adv. Mater.* 2023. V. 35. N 28. E2301532. DOI: 10.1002/adma.202301532.
4. Apostolides D.E., Michael G., Andronikou K., Patrickios C.S., Pasztor S., Szarka G., Petroczy A., Ivan B., Sakai N., Prevost S., Tsalikis D.G. Synthesis of highly ordered amphiphilic polymer conetwork hydrogels via the topologically precise interconnection of two highly incompatible polymers. *Chem. Mater.* 2025. V. 37. P. 5515-5528. DOI: 10.1021/acs.chemmater.5c00127.
5. Maslova N.V., Kochetova Zh.Yu., Sukhanov P.T., Zmeev A.V. Study of the swelling kinetics of hydrogels based on

5. **Маслова Н.В., Кочетова Ж.Ю., Суханов П.Т., Змеев А.В.** Исследование кинетики набухания гидрогелей на основе сополимеров акриламида и акрилата калия (натрия). *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 3. С. 27-34. DOI: 10.6060/ivkkt.20226503.6498.
6. **Липатова И.М., Юсова А.А., Макарова Л.И.** Формоустойчивые гидрогелевые носители на основе хитозана и альгината натрия для пролонгированного высвобождения лекарственных препаратов. *Рос. хим. ж.* 2026. Т. LXX. № 1. С. 88-95. DOI: 10.6060/rcj.2026701.10.
7. **Соколов В.И., Гордеева О.Ю., Горячук И.О., Молчанова С.И., Полунин Е.В.** Сополимеры перфтор-2,2-диметил-1,3-диоксола и перфторнонилвинилового эфира для изготовления световодящих покрытий. *Fluorine notes*. 2023. Т. 1. С. 146.
8. **Базанова О.С., Одинокоев А.С., Ирисова Е.В., Барабанов В.Г.** Способы получения фторсульфонил перфторвиниловых эфиров. *Fluorine notes*. 2024. Т. 1. С. 152.
9. **Чекуров К.Е., Барабанова А.И., Благодатских И.В., Локшин Б.В., Перегудов А.С., Абрамчук С.С., Хохлов А.Р.** Синтез и самоассоциация амфифильных diblock-сополимеров 2,3,4,5,6-пентафторстирола. *Докл. Росс. АН. Химия*. 2019. Т. 484. № 4. С. 431-435. DOI: 10.31857/S0869-56524844431-435.
10. **Чекуров К.Е., Барабанова А.И.** Направленный синтез сополимеров на основе фторсодержащих производных стирола. *Fluorine notes*. 2021. Т. 1. С. 134.
11. **Ameduri B.** Controlled radical (co)polymerization of fluoromonomers. *Macromolecules*. 2010. V. 43. P. 10163-10184. DOI: 10.1021/ma1019297.
12. **Koiry B.P., Klok H.A., Singha N.K.** Copolymerization of 2,2,3,3,4,4,4-Heptafluorobutyl acrylate with butyl acrylate via RAFT polymerization. *J. Fluor. Chem.* 2014. V. 165. P. 109-115. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2014.06.016.
13. **Guo L., Jiang Y., Qiu T., Meng Y., Li X.** One-pot synthesis of poly(methacrylic acid)-b-poly(2,2,2-trifluoroethyl methacrylate) diblock copolymers via RAFT polymerization. *Polymer*. 2014. V. 55. N 18. P. 4601-4610. DOI: 10.1016/j.polymer.2014.07.018.
14. **Li G., Xu A., Geng B., Yang S., Wu G., Zhang S.** Synthesis and characterization of fluorinated diblock copolymer of 2,2,2-trifluoroethyl methacrylate and methyl methacrylate based on RAFT polymerization. *J. Fluor. Chem.* 2014. V. 165. P. 132-137. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2014.06.029.
15. **Wang H., Zhou H., Chen Y., Zhang C.** Synthesis of fluorinated gradient copolymers by RAFT emulsifier-free emulsion polymerization and their compatibilization in copolymer blends. *Colloid Polym. Sci.* 2014. V. 292. N 11. P. 2803-2809. DOI: 10.1007/s00396-014-3310-0.
16. **Chen S., Binder W.H.** Controlled copolymerization of N-butyl acrylate with semifluorinated acrylates by RAFT polymerization. *Polym. Chem.* 2015. V. 6. N 3. P. 448-458. DOI: 10.1039/c4py01084a.
17. **Wang Ch., Li X., Deng H.** Synthesis of a fluoromethacrylate hydroxystyrene block copolymer capable of rapidly forming sub-5 nm domains at low temperature. *ACS Macro Lett.* 2019. V. 8. N 4. P. 368-373. DOI: 10.1021/acsmacrolett.9b00178.
18. **Barman T., Chen H., Liu J., Yang G., Zhao W., Peng C., Hou X.** Synthesis and characterization of styrene-based polyfluoroacrylate film for hydrophobic/icephobic applications. *Thin Solid Films*. 2019. V. 687. P. 137462. DOI: 10.1016/j.tsf.2019.137462.
19. **Banerjee S., Chakrabarty A., Singha N. K., Ameduri B.** 6. Recent advances in the reversible deactivation radical (co)polymerization of fluorinated alkenes/acrylates/ methacrylates/styrenes. In: *Reversible Deactivation Radical* acrylamide and potassium (sodium) acrylate copolymers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 3. P. 27-34 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226503.6498
6. **Lipatova I.M., Yusova A.A., Makarova L.I.** Dimensionally stable hydrogel carriers based on chitosan and sodium alginate for prolonged release of drugs. *Russ. Khim. Zhurn.* 2026. V. 70. N 1. P. 88-95 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2026701.10.
7. **Sokolov V.I., Gordeeva O.Yu., Goryachuk I.O., Molchanova S.I., Polunin E.V.** Copolymers of perfluoro-2,2-dimethyl-1,3-dioxol and perfluoronovinyl ether for producing of light-guiding coatings. *Fluorine notes*. 2023. V. 1. P. 146. DOI: 10.17677/fn20714807.2023.01.01.
8. **Bazanov O.S., Odinokov A.S., Irisova E.V., Baranov V.G.** Methods of synthesis of perfluorosulfonyl vinyl ethers (PSVE). *Fluorine notes*. 2024. V. 1. P. 152. DOI: 10.17677/fn20714807.2024.01.02.
9. **Chekurov K.E., Barabanova A.I., Blagodatskikh I.V., Lokshin B.V., Peregudov A.S., Abramchuk S.S., Khokhlov A.R.** Synthesis and self-assembling of amphiphilic diblock copolymers. *Dokl. Chem.* 2019. V. 484. P. 33-36. DOI: 10.1134/S0012500819020010.
10. **Chekurov K.E., Barabanova A.I.** Directed synthesis of copolymers based on fluorine-containing styrene derivatives. *Fluorine notes*. 2021. V. 2. P. 135. DOI: 10.17677/fn20714807.2021.02.01.
11. **Ameduri B.** Controlled radical (co)polymerization of fluoromonomers. *Macromolecules*. 2010. V. 43. P. 10163-10184. DOI: 10.1021/ma1019297.
12. **Koiry B.P., Klok H.A., Singha N.K.** Copolymerization of 2,2,3,3,4,4,4-Heptafluorobutyl acrylate with butyl acrylate via RAFT polymerization. *J. Fluor. Chem.* 2014. V. 165. P. 109-115. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2014.06.016.
13. **Guo L., Jiang Y., Qiu T., Meng Y., Li X.** One-pot synthesis of poly(methacrylic acid)-b-poly(2,2,2-trifluoroethyl methacrylate) diblock copolymers via RAFT polymerization. *Polymer*. 2014. V. 55. N 18. P. 4601-4610. DOI: 10.1016/j.polymer.2014.07.018.
14. **Li G., Xu A., Geng B., Yang S., Wu G., Zhang S.** Synthesis and characterization of fluorinated diblock copolymer of 2,2,2-trifluoroethyl methacrylate and methyl methacrylate based on RAFT polymerization. *J. Fluor. Chem.* 2014. V. 165. P. 132-137. DOI: 10.1016/j.jfluchem.2014.06.029.
15. **Wang H., Zhou H., Chen Y., Zhang C.** Synthesis of fluorinated gradient copolymers by RAFT emulsifier-free emulsion polymerization and their compatibilization in copolymer blends. *Colloid Polym. Sci.* 2014. V. 292. N 11. P. 2803-2809. DOI: 10.1007/s00396-014-3310-0.
16. **Chen S., Binder W.H.** Controlled copolymerization of N-butyl acrylate with semifluorinated acrylates by RAFT polymerization. *Polym. Chem.* 2015. V. 6. N 3. P. 448-458. DOI: 10.1039/c4py01084a.
17. **Wang Ch., Li X., Deng H.** Synthesis of a fluoromethacrylate hydroxystyrene block copolymer capable of rapidly forming sub-5 nm domains at low temperature. *ACS Macro Lett.* 2019. V. 8. N 4. P. 368-373. DOI: 10.1021/acsmacrolett.9b00178.
18. **Barman T., Chen H., Liu J., Yang G., Zhao W., Peng C., Hou X.** Synthesis and characterization of styrene-based polyfluoroacrylate film for hydrophobic/icephobic applications. *Thin Solid Films*. 2019. V. 687. P. 137462. DOI: 10.1016/j.tsf.2019.137462.
19. **Banerjee S., Chakrabarty A., Singha N. K., Ameduri B.** 6. Recent advances in the reversible deactivation radical (co)polymerization of fluorinated alkenes/acrylates/ methacrylates/styrenes. In: *Reversible Deactivation Radical*

19. **Banerjee S., Chakrabarty A., Singha N. K., Ameduri B.** 6. Recent advances in the reversible deactivation radical (co)polymerization of fluorinated alkenes/acrylates/methacrylates/styrenes. In: *Reversible Deactivation Radical Polymerization*. Ed. by N.K. Singha, J. Mays. De Gruyter. 2019. P. 183–220. DOI: 10.1515/9783110643695-006.
20. **Чекуров К.Е., Барабанова А.И.** Направленный синтез сополимеров на основе фторсодержащих (мет)акрилатов. *Fluorine notes*. 2021. Т. 4(137).
21. **Синько А.В., Дон В.Л., Игумнов С.М.** 2,4,6-Трис(1,1,3,3-тетрафтораллил)-1,3,5-триазин – перспективный мономер для получения фторированных полимеров. *Fluorine notes*. 2024. Т. 5. С. 156.
22. **Koiry B.P., Chakrabarty A., Singha N.K.** Fluorinated amphiphilic block copolymers via RAFT polymerization and their application as surf-RAFT agent in miniemulsion polymerization. *RSC Adv*. 2015. V. 5. N 20. P. 15461–15468. DOI: 10.1039/c4ra14151b.
23. **Koiry B.P., Singh L.K., Chakraborty A., Nath R.K.** Non-ionic fluorinated amphiphilic block copolymer via RAFT polymerization and their application as surfactant in emulsion polymerization. *Mater. Today Proc.* 2018. V. 5. N 1. P. 2040–2048. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.09.199.
24. **Grigoreva A., Polozov E., Zaitsev S.** Controlled synthesis and self-assembly of amphiphilic copolymers based on 2,2,3,3,4,4,5,5-octafluoropentyl acrylate and acrylic acid. *Colloid. Polym. Sci.* 2019. V. 297. P. 1423–1435. DOI: 10.1007/s00396-019-04559-6.
25. **Guerre M., Lopez G., Améduri B., Semsarilar M., Ladmiral V.** Solution self-assembly of fluorinated polymers, an overview. *Polym. Chem.* 2021. V. 12. P. 3852–3877. DOI: 10.1039/d1py00221j.
26. **Чекуров К.Е., Барабанова А.И., Благодатских И.Б., Кабаева Н.М., Бараковская И.Г., Буяновская А.Г., Хохлов А.Р.** Омнифобные покрытия из амфифильных диблок-сополимеров 2-(перфторгексилэтил)метакрилата и 2-гидроксизтилметакрилата. *Докл. Росс. АН. Химия*. 2021. V. 496. С. 30–36. DOI: 10.3187/S2686953521010040.
27. **Grigoreva A., Tarankova K., Zaitsev S.** RAFT (Co)Polymerization of 1,1,1,3,3,3-hexafluoroisopropyl acrylate as the synthesis technique of amphiphilic copolymers. *Macromol. Res.* 2021. V. 29. N 8. P. 524–533. DOI: 10.1007/s13233-021-9066-8.
28. **Koda Y., Terashima T., Sawamoto M.** Multimode Self-folding polymers via reversible and thermoresponsive self-assembly of amphiphilic/fluorous random copolymers. *Macromolecules*. 2016. V. 49. N 12. P. 4534–4543. DOI: 10.1021/acs.macromol.6b00998.
29. **Jiang B., Pang H.** Synthesis and self-assembly of thermoresponsive block-graft fluoropolymer as well as its tunable wettability surface. *J. Polym. Sci. Part Polym. Chem.* 2016. V. 54. N 7. P. 992–1002. DOI: 10.1002/pola.27936.
30. **Huo M., Zeng M., Li D., Liu L., Wei Y., Yuan J.** Tailoring the multicompartament anostructures of fluoro-containing ABC triblock terpolymer assemblies via polymerization-induced self-assembly. *Macromolecules*. 2017. V. 50. P. 8212–8220. DOI: 10.1021/acs.macromol.7b01629.
31. **Houvenagel S., Moine L., Picheth G., Dejean C., Brulet A., Chenneviere A., Faugeras V., Huang N., Couture O., Tsapis N.** Comb-like fluorophilic-lipophilic-hydrophilic polymers for nanocapsules as ultrasound contrast agents. *Biomacromolecules*. V. 2018. V. 19. N 8. P. 3244–3256. DOI: 10.1021/acs.biomac.8b00506.
32. **Ko J.H., Bhattacharya A., Terashima T., Sawamoto M., Maynard H.D.** Amphiphilic fluorous random copolymer self-assembly for encapsulation of a fluorinated agrochemical. *J. Polym. Sci. Part Polym. Chem.* 2019. V. 57. N 3. P. 352–359. DOI: 10.1002/pola.29187.
20. **Chekurov K.E., Barabanova A.I.** Directed synthesis of copolymers based on fluorine-containing (Meth)acrylate derivatives. *Fluorine notes*. 2021. V. 4. P. 137. DOI: 10.17677/fn20714807.2021.04.01.
21. **Sinko A.V., Don V.L., Igumnov S.M.** 2,4,6-Tris(1,1,3,3-tetrafluoroallyl)-1,3,5-triazine – promising monomer for producing fluorinated polymers. *Fluorine notes*. 2024. V. 5. P. 156. DOI: 10.17677/fn20714807.2024.05.01.
22. **Koiry B.P., Chakrabarty A., Singha N.K.** Fluorinated amphiphilic block copolymers via RAFT polymerization and their application as surf-RAFT agent in miniemulsion polymerization. *RSC Adv*. 2015. V. 5. N 20. P. 15461–15468. DOI: 10.1039/c4ra14151b.
23. **Koiry B.P., Singh L.K., Chakraborty A., Nath R.K.** Non-ionic fluorinated amphiphilic block copolymer via RAFT polymerization and their application as surfactant in emulsion polymerization. *Mater. Today Proc.* 2018. V. 5. N 1. P. 2040–2048. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.09.199.
24. **Grigoreva A., Polozov E., Zaitsev S.** Controlled synthesis and self-assembly of amphiphilic copolymers based on 2,2,3,3,4,4,5,5-octafluoropentyl acrylate and acrylic acid. *Colloid. Polym. Sci.* 2019. V. 297. P. 1423–1435. DOI: 10.1007/s00396-019-04559-6.
25. **Guerre M., Lopez G., Améduri B., Semsarilar M., Ladmiral V.** Solution self-assembly of fluorinated polymers, an overview. *Polym. Chem.* 2021. V. 12. P. 3852–3877. DOI: 10.1039/d1py00221j.
26. **Chekurov K.E., Barabanova A.I., Blagodatskikh I.V., Kabaeva N.M., Barakovskaya I.G., Buyanovskaya A.G., Khokhlov A.R.** Omniphobic coatings on amphiphilic diblock copolymers of 2-(perfluorohexyl)ethyl methacrylate and 2-hydroxyethyl methacrylate. *Dokl. Chem.* 2021. V. 496. P. 18–23. DOI: 10.1134/S0012500821010018.
27. **Grigoreva A., Tarankova K., Zaitsev S.** RAFT (Co)Polymerization of 1,1,1,3,3,3-hexafluoroisopropyl acrylate as the synthesis technique of amphiphilic copolymers. *Macromol. Res.* 2021. V. 29. N 8. P. 524–533. DOI: 10.1007/s13233-021-9066-8.
28. **Koda Y., Terashima T., Sawamoto M.** Multimode Self-folding polymers via reversible and thermoresponsive self-assembly of amphiphilic/fluorous random copolymers. *Macromolecules*. 2016. V. 49. N 12. P. 4534–4543. DOI: 10.1021/acs.macromol.6b00998.
29. **Jiang B., Pang H.** Synthesis and self-assembly of thermoresponsive block-graft fluoropolymer as well as its tunable wettability surface. *J. Polym. Sci. Part Polym. Chem.* 2016. V. 54. N 7. P. 992–1002. DOI: 10.1002/pola.27936.
30. **Huo M., Zeng M., Li D., Liu L., Wei Y., Yuan J.** Tailoring the multicompartament anostructures of fluoro-containing ABC triblock terpolymer assemblies via polymerization-induced self-assembly. *Macromolecules*. 2017. V. 50. P. 8212–8220. DOI: 10.1021/acs.macromol.7b01629.
31. **Houvenagel S., Moine L., Picheth G., Dejean C., Brulet A., Chenneviere A., Faugeras V., Huang N., Couture O., Tsapis N.** Comb-like fluorophilic-lipophilic-hydrophilic polymers for nanocapsules as ultrasound contrast agents. *Biomacromolecules*. V. 2018. V. 19. N 8. P. 3244–3256. DOI: 10.1021/acs.biomac.8b00506.
32. **Ko J.H., Bhattacharya A., Terashima T., Sawamoto M., Maynard H.D.** Amphiphilic fluorous random copolymer self-assembly for encapsulation of a fluorinated agrochemical. *J. Polym. Sci. Part Polym. Chem.* 2019. V. 57. N 3. P. 352–359. DOI: 10.1002/pola.29187.

- Polym. Sci. Part Polym. Chem.* 2019. V. 57. N 3. P. 352–359. DOI: 10.1002/pola.29187.
33. **Fu K., Luo F., Fang Zh., Liu H., Liu X., Zhou S., Luo J.** Amphipathic fluoroamine-functionalized hydrogels for enhanced selective removal of anionic pfas from water. *Nat. Commun.* 2025. V. 16. P. 10152. DOI: 10.1038/s41467-025-65031-4.
 34. **Кижняев В.Н., Pokatillov Ф.А., Житов Р.Г., Пройдаков А.Г., Голобокова Т.В., Верещагин Л.И.** Свойства сетчатых парных полимеров с капролактамными и тетразольными циклами. *Высокомолек. соед. Сер. Б.* 2020. Т. 62. № 5. С. 356–363. DOI: 10.31857/S2308113920040063.
 35. **Кижняев В.Н., Pokatillov Ф.А., Акамова Е.В.** Синтез и свойства сетчатых парных полимеров на основе поли-N-винилпирролидона. *Высокомолек. соед. Сер. Б.* 2015. Т. 57. № 5. С. 356–362. DOI: 10.7868/S23081139505006X.
 36. **Кашевский А.В., Мамалыга М.А., Петрова Т.Л., Сафронов А.Ю., Кижняев В.Н.** Синтез и электрохимическое приложения фторсодержащих сополимеров винилазолов для мониторинга оксида азота(II) в модельных и биосистемах. *Журн. прикл. химии.* 2007. Т. 80. № 2. С. 317–322.
 37. **Borges F.T.P., Papavasiliou G., Teymour F.** Characterizing the Molecular Architecture of Hydrogels and Crosslinked Polymer Networks beyond Flory–Rehner. I. Theory. *Biomacromolecules.* 2020. V. 21. N 12. P. 5104–5118. DOI: 10.1021/acs.biomac.0c01256.
 38. **Borges F.T.P., Papavasiliou G., Teymour F.** Characterizing the Molecular Architecture of Hydrogels and Crosslinked Polymer Networks beyond Flory–Rehner. II: Experiments. *Biomacromolecules.* 2023. V. 24. N 4. P. 1585–1603. DOI: 10.1021/acs.biomac.2c01339.
 39. **Бельникевич Н.Г., Будтова Т.В., Николаева О.В., Веснеболоцкая С.А.** О корректности использования вискозиметрии как теста на комплексобразования в смесях полимеров. *Высокомолек. соед. Сер. Б.* 2002. Т. 44. № 2. С. 341–346.
 40. **Кижняев В.Н., Адамова Л.В., Pokatillov Ф.А., Крахоткина Э.А., Петрова Т.Л., Смирнов А.И.** Термодинамика взаимодействия с водой сополимеров 5-винилтетразола с различным гидрофильно-гидрофобным балансом. *Высокомолек. соед. Сер. А.* 2009. Т. 51. № 2. С. 218–224.
 41. **Kirsh Y.E.** Water Soluble Poly-N-vinylamides. Wiley-VCH: Weinheim. 1998.
 33. **Fu K., Luo F., Fang Zh., Liu H., Liu X., Zhou S., Luo J.** Amphipathic fluoroamine-functionalized hydrogels for enhanced selective removal of anionic pfas from water. *Nat. Commun.* 2025. V. 16. P. 10152. DOI: 10.1038/s41467-025-65031-4.
 34. **Kizhnyayev V.N., Pokatillov F.A., Zhitov R.G., Proidakov A.G., Golobokova T.V., Vershchagin L.I.** The properties of network interpolymers with caprolactam and tetrazole cycle. *Polym. Sci. Ser. B.* 2015. V. 57. N 5. P. 497–503. DOI: 10.1134/S1560090415050061.
 35. **Kizhnyayev V.N., Pokatillov F.A., Akamova E.V.** Synthesis and properties of network paired polymers based on poly(N-vinylpyrrolidone). *Polym. Sci. Ser. B.* 2020. V. 62. N 5. P. 483–490. DOI: 10.1134/S1560090420040065.
 36. **Kashevskii A.V., Mamalyga M.A., Petrova T.L., Safonov A.Yu., Kizhnyayev V.N.** Synthesis and electrochemical applications of fluorinated vinylazole copolymers for monitoring nitrogen(II) oxide in model and biosystems. *Russ. J. Appl. Chem.* 2007. V. 80. N 2. P. 316–321. DOI: 10.1134/S1070427207020292.
 37. **Borges F.T.P., Papavasiliou G., Teymour F.** Characterizing the Molecular Architecture of Hydrogels and Crosslinked Polymer Networks beyond Flory–Rehner. I. Theory. *Biomacromolecules.* 2020. V. 21. N 12. P. 5104–5118. DOI: 10.1021/acs.biomac.0c01256.
 38. **Borges F.T.P., Papavasiliou G., Teymour F.** Characterizing the Molecular Architecture of Hydrogels and Crosslinked Polymer Networks beyond Flory–Rehner. II: Experiments. *Biomacromolecules.* 2023. V. 24. N 4. P. 1585–1603. DOI: 10.1021/acs.biomac.2c01339.
 39. **Bel'nikovich N.G., Budtova T.V., Nikolaeva O.V., Vesnebolotskaya S. A.** The correctness of using the viscometric method as a test on interpolymer complex formation in polymer mixtures. *Polym. Sci. Ser. B.* 2002. V. 44. N 1-2. P. 27–32.
 40. **Kizhnyayev V.N., Adamova L.V., Pokatillov F.A., Krahhotkina E.A., Petrova T.L., Smirnov A.I.** Thermodynamics of water interaction with 5-vinyltetrazole copolymers with different hydrophilic-hydrophobic balances. *Polym. Sci. Ser. A.* 2009. V. 51. N 2. P. 168–173. DOI: 10.1134/S0965545X09020047.
 41. **Kirsh Y.E.** Water Soluble Poly-N-vinylamides. Wiley-VCH: Weinheim. 1998.

Поступила в редакцию 12.01.2026

Принята к опубликованию 13.02.2026

Received 12.01.2026

Accepted 13.02.2026