———— ПОЛИМЕРНЫЕ СЕТКИ ——

УДК 541.64:532.7

ПОВЕДЕНИЕ В ВОДНЫХ СРЕДАХ ГИДРОГЕЛЕЙ ПАРНЫХ ПОЛИМЕРОВ С ЛАКТАМНЫМИ И ТРИАЗОЛЬНЫМИ ЦИКЛАМИ

© 2022 г. В. Н. Кижняев^{а,*}, Ф. А. Покатилов^а, Е. В. Акамова^а, О. А. Эдельштейн^а

 ^а Иркутский государственный университет 664003 Иркутск, ул. К. Маркса, 1, Россия *e-mail: kizhnyaev@chem.isu.ru Поступила в редакцию 07.07.2021 г. После доработки 02.09.2021 г. Принята к публикации 08.10.2021 г.

Продемонстрировано влияние pH, ионной силы и температуры внешней среды на поведение гидрогелей сетчатых парных полимеров, получаемых реакционным смешением поли-N-винилпирролидона и поли-N-винилкапролактама с поли-1-винил-3-амино-1,2,4-триазолом. Установлено, что гидрофобные взаимодействия фрагментов полимерных цепей играют существенную роль в изменении сорбционных свойств гидрогелей при варьировании свойств растворителя.

DOI: 10.31857/S2308112022010059

Парные полимеры представляют собой продукты реакционного смешения высокомолекулярных соединений, образующиеся в результате химических реакций между "якорными" функциональными группами, расположенными случайным образом в структуре разнородных макромолекул [1, 2]. Осуществление реакционного смешения при суммарных концентрациях полимерных реагентов выше концентрации кроссовера, т.е. в условиях существования в исходной реакционной системе физической сетки зацеплений полимерных клубков, приводит к формированию единой пространственной сетки ковалентно связанных разнородных макромолекул [3, 4]. Вследствие того, что термодинамическая совместимость разных по природе полимеров, как правило, является плохой, область взаимопроникновения, где протекают реакции сшивания между "якорными" группами, весьма незначительна по сравнению с объемом самих полимерных клубков. Таким образом, образующиеся сетчатые парные полимеры по структуре можно отнести к блок-сополимерным сеткам, содержащим между узлами сшивки цепочечные фрагменты разнородных макромолекул [5-7].

При использовании в качестве участников реакционного смешения хотя бы одного водорастворимого полимера образующиеся сетчатые продукты также обладают термодинамическим сродством к воде, что выражается в способности к ограниченному набуханию с образованием гидрогелей [8]. Гидрогели часто используются при

создании так называемых "умных" материалов, в том числе и медицинского назначения, способных направленно и обратимо изменять свои свойства, реагируя на изменения характеристик окружающей среды [9-16]. Соответственно сетчатые парные полимеры, получаемые реакционным смешением водорастворимых линейных полимеров с лактамными (пирролидоновым и капролактамным) и амино-1,2,4-триазольными циклами в структуре могут представлять интерес при создании мягких биосовместимых материалов или матриц направленной доставки лекарственных субстанций в живом организме. Для этого у исходных полимерных реагентов - поли-N-винилпирролидона (**ПВП**), поли-N-винилкапролактама (ПВКЛ) и поли-1-винил-3-амино-1,2,4-триазола (ПВАТ) имеется набор необходимых свойств: гидрофильность, отсутствие токсичности, биосовместимость, комплексообразующая способность по отношению к объектам неорганического и органического происхождения [17-19]. Для водных систем на основе ПВКЛ (включая гидрогели) характерно наличие нижней критической температуры фазового разделения [20, 21], что важно при создании термочувствительных материалов самого разного назначения. Аминогруппа в триазольном фрагменте ПВАТ может служить в качестве "якорной" функциональной группы для осуществления процесса реакционного смешения с модифицированными соответствующим образом ПВП и ПВКЛ, а также для подшивки различных лекарственных субстанций к полимерной матрице.

В настоящей работе продемонстрирована возможность синтеза сетчатых парных полимеров, сочетающих в структуре лактамные и аминотриазольные циклы, и исследовано влияние температуры, pH и ионной силы водной среды на поведение гидрогелей синтезированных парных полимеров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Модифицированные посредством введения в структуру макромолекул небольших количеств "якорных" оксирановых циклов ПВП и ПВКЛ получали радикальной сополимеризацией соответствующих мономеров с 2-(винилоксиэтокси)метилоксираном (**BO**) согласно методикам [8, 22]. В работе использовали образцы ПВПД(**BO**) и ПВКЛ(**BO**) с мольной долей звеньев **BO** 0.09 и 0.05 соответственно:



синтезировали полимеризацией 1-винил-3-амино-1,2,4-триазола под действием ДАК (0.5 мас. %) в среде ацетонитрила при 60°С и продолжительности реакции 24 ч. Выпавший полимер промывали последовательно горячим ацетонитрилом и диэтиловым эфиром, затем сушили под вакуумом до постоянной массы. Конверсия составила 98%.

Реакцию между ПВП(ВО) или ПВКЛ(ВО) и ПВАТ осуществляли в водной среде при различных суммарных концентрациях *с*, соотношениях полимерных реагентов и разных температурах. Сначала при комнатной температуре смешивали предварительно приготовленные водные растворы реагентов, затем реакционную смесь загружали в ампулы, продували аргоном, запаивали и выдерживали при заданной температуре в течение недели. Реакция между полимерами сопровождалась образованием геля; время потери текучести системы τ фиксировали визуально. Полученную в результате гелеобразную массу выдерживали под периодически заменяемой дистиллированной водой с целью удаления несвязанных полимеров и достижения гидрогелем состояния равновесного набухания. Обработанные подобным способом гидрогели использовали для определения выхода гель-фракции (выхода парного полимера), степени набухания парных полимеров и изучения влияния на степень набухания температуры, рН водной среды и присутствия низкомолекулярных солей. Количество гель-фракции рассчитывали по формуле

 $Q = (m_1/m_0) \times 100\%$,

ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ. Серия А том 64 № 2 2022

где m_0 и m_1 — суммарная масса взятых в реакцию полимерных реагентов и масса сухого остатка отмытого гидрогеля соответственно. Сорбционную способность полимерных образцов по отношению к воде характеризовали степенью набухания $K_{\rm наб}$, которую определяли гравиметрическим методом и вычисляли как

$$K_{\text{Hab}} = (m_{\text{T}} - m_{\text{T}})/m_{\text{T}}$$

 $(m_r u m_n - масса равновесно набухшего гидрогеля и сухого полимера соответственно). Требуемую температуру при исследовании процессов набухания поддерживали воздушным термостатом (точность термостатирования <math>\pm 0.5$ °C). Варьирование рН водной среды осуществляли добавлением соляной кислоты или гидроксида натрия; рН растворов контролировали с помощью иономера ЭВ-74. При изучении влияния низкомолекулярных солей на степень набухания гидрогелей в водных средах использовали Na₂SO₄, КС1 и NaSCN квалификации х.ч. без дополнительной очистки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Как отмечено выше, формирование парных полимеров сопряжено с реакцией "якорных" групп, принадлежащих разнородным макромолекулам. В этой связи выбор такой пары функциональных групп, как оксирановый цикл и аминогруппа, является весьма удачным. С одной стороны, введение в структуру карбоцепного полимера

Система	Массовое соотношение компонентов	с, г/дл	T, °C	τ, ч	Гель- фракция, %	<i>К</i> _{наб} при 25°С	
						в воде	в ДМФА
ΠΒΠ(ΒΟ)-ΠΒΑΤ	1:1	10	25	14	91	200	_
	1:1	10	80	3	98	111	18
ПВКЛ(ВО)-ПВАТ	1:1	5	25	28	88	175	_
	1:1	10	25	16	95	30	5
	1:2	10	25	20	93	40	14

Таблица 1. Условия синтеза и свойства парных полимеров

заданного количества оксирановых циклов посредством сополимеризации соответствующих виниловых мономеров с ВО не вызывает затруднений. С другой стороны, реакция, лежащая в основе сшивания разнородных макромолекул, между оксиран- и аминосодержащими соединениями (в том числе и с 3-амино-1,2,4-триазолом) протекает в мягких условиях [23].

При взаимодействии полимерных реагентов ПВП(ВО) или ПВКЛ(ВО) с ПВАТ в водной среде образование парных полимеров с высоким выходом протекает уже при комнатной температуре (табл. 1). Выбор волы в качестве реакционной среды был не случаен. Вода – единственный растворитель для ПВАТ (в органических жидкостях полимер не растворим) и она же, будучи общим растворителем для реагирующих полимеров, обеспечивает гомогенность реакционной системы на протяжении всего процесса. Система ПВКЛ(ВО)-ПВАТ гомогенна только при температурах ниже 35°C, при более высоких температурах ПВКЛ(ВО), выпадает из реакционной смеси. Еще одним преимуществом водной среды является то, что при ее использовании непосредственно получаются гидрогели, т.е. не требуются дополнительные операции по удалению органического растворителя.

Анализируя результаты реакционного смешения изучаемых полимеров (табл. 1), можно отметить, что повышение температуры осуществления реакции, увеличение суммарной концентрации полимерных реагентов и соблюдение эквивалентности массового соотношения реагентов сопровождаются ускорением образования сетчатых парных полимеров, увеличением их выхода и формированием более жесткой сетчатой структуры, что выражается в уменьшении равновесной степени набухания в воде. Высокий выход гель-фракции при реакционном смешении полимеров (более 90%) предполагает, что соотношение компонентов в полимерной сетке приблизительно соответствует исходному соотношению полимерных реагентов.

Таким образом, в результате реакционного смешения в обеих парах линейных полимеров получены сетчатые парные полимеры, способные к образованию стабильных в водной среде оптически прозрачных гидрогелей. При идентичных условиях синтеза степень набухания у парных полимеров ПВП(ВО)-ПВАТ выше, чем у парных полимеров на основе ПВКЛ(ВО) (табл. 1). Это вполне ожидаемо, учитывая большую степень гидрофильности пирролидонового цикла по сравнению с капролактамным. Именно данная причина обусловливает некоторое различие в поведении гидрогелей на основе ПВП(ВО) и ПВКЛ(ВО) при варьировании параметров внешней среды. Так, гидрогели ПВКЛ(ВО)-ПВАТ проявляют более выраженную термочувствительность; амплитуда уменьшения степени набухания при повышении температуры у них больше (рис. 1, кривые 2-4), чем у гидрогеля ПВП(ВО)-ПВАТ (рис. 1, кривая 1).

В целом снижение сорбционных характеристик гидрогелей по отношению к воде (уменьшение $K_{\text{наб}}$) с повышением температуры для обоих типов парных полимеров связано с усилением гидрофобных взаимодействий метиленовых цепочек лактамных циклов с температурой, что приводит к ужесточению трехмерной полимерной сетки. В большей степени подобный эффект, и, как следствие, более выраженная термочувствительность, проявляется для гидрогелей парных полимеров с капролактамным циклом в структуре. Более того, для гидрогелей ПВКЛ(ВО)–ПВАТ



Рис. 1. Степень набухания парных полимеров ПВП(ВО)–ПВАТ (1) и ПВКЛ(ВО)–ПВАТ состава 1 : 1 (2, 3) и 2 : 1 (4) в воде в зависимости от температуры. Условия получения парных полимеров: c = 10 (1, 3, 4) и 5 г/дл (2); T = 80 (1) и 25°С (2–4).

при температурах выше 50°С характерно интенсивное помутнение, свидетельствующее о микрофазовом разделении. При избытке капролактамсодержащего полимера помутнение сопровождается резким коллапсом гидрогеля. Таким образом, для гидрогелей парных полимеров проявляется характерный для водных систем на основе ПВКЛ температурный эффект фазового разделения. Однако для гидрогеля парного полимера критическая температура, при которой наблюдается указанный эффект, несколько выше НКТР водного раствора исходного линейного ПВКЛ(ВО) (33.5°С). Здесь сказывается влияние второго компонента, участвующего в формировании пространственной сетки, — гидрофильного ПВАТ.

Учитывая слабые основные свойства аминотриазольного цикла (у аналога мономерного звена ПВАТ р $K_{\rm BH}$ + = 4.29 [24]), можно было ожидать, что гидрогели парных полимеров будут pH-чувствительными подобно гидрогелям на основе сетчатых полимеров, содержащих капролактамные и имидазольные циклы [25]. Однако для гидрогеля ПВП(ВО)–ПВАТ сорбционные характеристики от pH не зависят (рис. 2, кривая *I*), а для гидрогеля ПВКЛ(ВО)–ПВАТ зависимость степени набухания от pH противоположна ожидаемой (рис. 2, кривая *2*).

Предполагалось, что при возрастании кислотности среды вследствие протонирования аминот-



Рис. 2. Степень набухания парных полимеров ПВП(ВО)-ПВАТ (*1*) и ПВКЛ(ВО)-ПВАТ состава 1 : 1 (*2*) в воде при 25°С в зависимости от pH среды. Условия получения парных полимеров: c = 10 (*1*) и 5 г/дл (*2*); T = 80 (*1*) и 25°С (*2*).

риазольных циклов и ионизации макромолекулярных цепей ПВАТ



будет проявляться эффект полиэлектролитного набухания, характерный для гидрогелей на основе ионизующихся сетчатых полимеров. В реальности при повышении кислотности водного раствора наблюдается обратная тенденция — коллапс гидрогеля. Вероятно, и в этом случае превалирует эффект усиления гидрофобных взаимодействий капролактамных циклов, вызванный появлением зарядов в цепочечных фрагментах ПВАТ и возрастанием ионной силы водного раствора при увеличении концентрации HCl. Как и при повышении температуры, это приводит к коллапсу гидрогеля.

Еще одним фактором, определяющим состояние водных систем на основе ПВП и ПВКЛ, является присутствие низкомолекулярных солей. Причем в зависимости от природы составляющих ионов влияние соли может быть стабилизирующим или дестабилизирующим по отношению к полимер-гидратному комплексу, т.е. улучшающим термодинамическое сродство между растворителем и полимером или, наоборот, ухудшающим термодинамическое качество растворителя по отношению к полимеру. В случае растворов ПВКЛ влияние вводимых солей сказывается на изменении НКТР в большую сторону (стабили-



Рис. 3. Степень набухания парных полимеров ПВП(ВО)–ПВАТ (1, 2, 7) и ПВКЛ(ВО)–ПВАТ состава 2 : 1 (3, 4, 8) и 1 : 1 (5, 6, 9) при 25°С в водных растворах Na_2SO_4 (1, 3, 5), KCl (2, 4, 6) и NaSCN (7–9) в зависимости от концентрации соли в воде. Условия получения парных полимеров: c = 10 г/дл; T = 80 (1, 2, 7) и 25°С (3–6, 8, 9).

зирующий эффект) или в меньшую сторону (дестабилизирующий эффект) [26–28]. Для водных растворов ПВП, являющихся однофазными во всем диапазоне температур от 0 до 100°С, добавление ряда низкомолекулярных солей сопровождается появлением критической температуры фазового разделения [29-32]. Можно ожидать, что присутствие низкомолекулярных солей в водной среде будет воздействовать и на поведение гидрогелей сетчатых парных полимеров на основе лактамсодержащих полимеров. Однако при переходе от водных растворов к гидрогелевым системам необходимо учитывать еще один важный эффект, определяющий сорбционные характеристики гидрогелей, — распирающее осмотическое давление, создаваемое сорбированными гелем ионами, составляющими соль [9, 33].

Для оценки влияния солей на поведение гидрогелей парных полимеров были выбраны Na_2SO_4 и KCl - соли, которые оказывают дестабилизирующее действие на водные растворы ПВП и ПВКЛ,уменьшая термодинамическую совместимостькомпонентов (подобное действие называют "высаливающим эффектом"). Другим типом исследованной соли был роданид натрия (NaSCN),оказывающий на водные растворы лактамсодержащих полимеров обратное действие, т.е. улучшающий совместимость растворителя и растворенного вещества ("всаливающий эффект"). Реакция гидрогелей парных полимеров ПВП(ВО)–ПВАТ и ПВКЛ(ВО)–ПВАТ на введение указанных солей оказалась несколько отличной. Присутствие в водной среде уже в незначительной концентрации (0.001 моль/л) КСІ и Na₂SO₄ вызывает резкий (практически двукратный) коллапс гидрогелей. При этом влияние соли при добавлении Na₂SO₄ выражено в большей степени. Однако, если для гидрогелей парных полимеров на основе ПВКЛ дальнейшее увеличение концентрации водно-солевого раствора сопровождается очень незначительным монотонных снижением степени набухания (рис. 3, кривые 3-6), то для гидрогелей ПВП(ВО)-ПВАТ при концентрациях соли выше 0.005 моль/л отмечен рост сорбционной способности (рис. 3, кривые 1, 2) с приближением к таковой у бессолевой среды. Вероятно, при низких концентрациях низкомолекулярного электролита проявляется "высаливающий эффект" соли по отношению к полимерной матрице, что сопровождается коллапсом геля. С повышением концентрации неорганических ионов в водном растворе для гидрогелей ПВП(ВО)-ПВАТ превалирует эффект распирающего осмотического давления малых ионов, содержание которых внутри гидрогеля за счет сорбции возрастает. Подобное поведение в водно-солевых средах отмечено и для гидрогелей на основе другого неионогенного гидрофильного полимера - сетчатого полиакриламида [34]. В случае гидрогелей ПВКЛ(ВО)-ПВАТ преобладает эффект усиления гидрофобных взаимодействий капролактамных циклов, вызванный увеличением ионной силы водного раствора при повышении концентрации соли. Очень похожая картина наблюдается и при



Рис. 4. Степень набухания парных полимеров ПВПД(ВО)–ПВАТ (*1*–6) и ПВКЛ(ВО)–ПВАТ состава 2:1 (*7*, *8*, *11*, *13*) и 1:1 (*9*, *10*, *12*, *14*) в водных растворах Na₂SO₄ (*1*, *3*, *7*, *9*), КСІ (*2*, *4*, *8*, *10*) и NaSCN (*5*, *6*, *11–14*) в зависимости от температуры. Концентрация соли в воде 0.001 (*1*, *2*, *7–10*), 0.025 (*5*, *11*, *12*), 0.1 (*3*, *4*) и 4 моль/л (*6*, *13*, *14*). Образцы парных полимеров идентичны таковым на рис. 3.

набухании гидрогелей парных полимеров в водных растворах NaSCN, только в другом диапазоне больших концентраций соли (рис. 3, кривые 7–9).

Это неожиданный результат, учитывая различное воздействие разных по природе низкомолекулярных солей на водные растворы линейных лактамсодержаших полимеров. Возможно, присутствие в структуре парных полимеров цепочечных фрагментов ПВАТ, наряду с эффектом осмотического давления малых ионов, нивелирует различное влияние "всаливающих" и "высаливающих" солей на термодинамическую совместимость полимерной сетки и растворителя, тем самым, и на сорбционные характеристики гидрогелей. Как КСІ и Na₂SO₄, так и NaSCN оказывают одинаковое влияние на термочувствительность гидрогелей изученных парных полимеров в водно-солевых средах. Во всех случаях происходит монотонное снижение степени набухания с возрастанием температуры (рис. 4), причем с гораздо меньшей амплитудой изменения $K_{\text{наб}}$ по сравнению с таковой в бессолевой среде.

Существенное снижение степени набухания парных полимеров происходит при замене общего для обоих компонентов (исходных линейных

смешения лактам- и триазолсодержащих полимеров получены сетчатые полимеры, склонные к образованию в водных средах гидрогелей, чувствительных к изменению свойств окружающей среды. Отличия в характере и амплитуде изменения степени набухания гидрогелей парных полимеров на основе ПВП и ПВКЛ при варьировании характеристик водной среды во многом определяется различием гидрофильно-гидрофобного баланса в пирролидоновом и капролактамном циклах.

полимеров) растворителя на жидкость, являющу-

юся растворителем только для одного компонен-

та. Так, при замещении воды диметилформами-

Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности Министерства образования и науки России (Соглашение № 075-03-2020-176/3; код проекта в Парусе 8: FZZE-2020-0022).

2022

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Baranov A.O., Kotova A.V., Zelenetskii A.N., Prut E.V. // Russ. Chem. Rev. 1997. V. 66. № 10. P. 877.
- Askadskii A.A. // Russ. Chem. Rev. 1999. V. 68. № 4. P. 317.
- 3. *Plate N.A., Litmanovich A.D., Kudryavtsev Ya.V.* Macromolecular Reactions in Polymer Melts and Blends. Moscow: Nauka, 2008.
- Kizhnyaev V.N., Pokatilov F.A., Zhitov R.G., Proidakov A.G., Krakhotkina E.A. // Polymer Science B. 2015. V. 57. № 5. P. 504.
- Erdodi G., Kennedy J.P. // Progr. Polym. Sci. 2006. V.31. № 1. P. 1.
- 6. *Tobis J., Thomann Y., Tiller J.C.* // Polymer. 2010. V. 51. № 1. P. 35.
- Rikkou M.D., Loizou E., Patrickios C.S., Porcar L. // Eur. Polym. J. 2010. V. 46. № 3. P. 441.
- Kizhnyaev V.N., Pokatilov F.A., Akamova E.V. // Polymer Science B. 2020. V. 62. № 5. P. 483.
- 9. *Philippova O.E.* // Polymer Science C. 2000. V. 42. № 2. P. 208.
- 10. *Horkay F., Tasaki I., Basser P. //* Biomacromolecules. 2000. V. 1. № 1. P. 84.
- Aseyev V.O., Tenhu H., Winnik F.M. // Adv. Polym. Sci. 2006. V. 196. P. 1.
- 12. Kramarenko E.Yu., Philippova O.E., Khokhlov A.R. // Polymer Science C. 2006. V. 48. № 1. P. 1.
- 13. *Chaterji S., Kwon I.K., Park K. //* Prog. Polym. Sci. 2007. T. 32. C. 1083.
- Galaev I., Mattiasson B. Smart Polymers: Applications in Biotechnology and Biomedicine. New York: CRC Press, 2007.
- 15. Aguilar M.R., Elvira C., Gallardo A., Vazquez B., Roman J.S. // Topics Tissue Eng. 2007. V. 3. P. 1.
- 16. *Rogovina L.Z., Vasil'ev V.G., Braudo E.E.* // Polymer Science C. 2008. V. 50. № 1. P. 85.
- 17. *Kirsh Y.E.* Water Soluble Poly-N-vinylamides. Weinheim: Wiley-VCH, 1998.
- Chaterji S., Kwon I.K., Park K. // Prog. Polym. Sci. 2007. T. 32. C. 1083.

- Kruglova V.A., Annenkov V.V., Vereshchagin L.I., Pavlenko V.V., Kazimirovskaya V.B., Moskvitina L.G., Boiko N.M., Mansurova L.A., Skornyakova A.B., Kalmykov S.V. // Pharmaceut. Chem. J. 1987. V. 21. № 2. P. 87.
- Makhaeva E.E., Le Thi Minh Thanh, Starodoubtsev S.G., Khokhlov A.R. // Macromol. Chem. Phys. 1996. V. 197. № 6. P. 1973.
- Bakeeva I.V., Pashkin I.I., Kirsh Yu.E., Tverskoi V.A., Zubov V.P. // Polymer Science A. 2000. V. 42. № 6. P. 673.
- Kizhnyaev V.N., Pokatilov F.A., Zhitov R.G., Proidakov A.G., Golobokova T.V., Vereshchagin L.I. // Polymer Science B. 2015. V. 57. № 5. P. 497.
- Golobokova T.V., Vereshchagin L I., Ratovskii G.V., Proidakov A.G., Kizhnyaev V.N. // Russ. J. Org. Chem. 2016. V. 52. № 7. P. 1039.
- 24. Schofield K., Grimmett M.R., Keene B. // Heteroaromatic Nitrogen Compounds. The Azoles. London; New York, 1976.
- 25. Pich A., Tessier A., Boyko V., Lu Y., Adler H.-J.P. // Macromolecules. 2006. V. 39. № 22. P. 7701.
- 26. Kirsh Yu.E., Yanul N.A., Kalninsh K.K., Maslov V.G. // J. Molec. Liq. 1999. V. 82. № 1–2. P. 117.
- 27. Kirsh Yu.E., Yanul N.A., Popkov Yu.M., Timashev S.F. // Russ. J. Phys. Chem. 1999. V. 73. № 2. P. 253.
- 28. Kirsh Yu.E., Popkov Yu.M., Timashev S. // Russ. J. Phys. Chem. 1999. V. 73. № 3. P. 415.
- 29. De Queiroz A.A.A., Gallardo A., Roman J.S. // Biomaterials. 2000. V. 21. № 16. P. 1631.
- Maeda Y., Nakamura T., Ikeda I. // Macromolecules. 2002. V. 35. № 1. P. 217.
- Nakhmanovich B.I., Pakuro N I., Akhmet'eva E.I., Litvinenko G.I., Arest-Yakubovich A.A. // Polymer Science B. 2007. V. 49. № 5–6. P. 136.
- 32. Pakuro N.I., Nakhmanovich B.I., Pergushov D.V., Chibirova F.Kh. // Polymer Science B. 2011. V. 53. № 1. P. 6.
- 33. *Sing Ch.E., Zwanikken J.W., Cruz M.O.* // Macromolecules. 2013. V. 46. № 12. P. 5053.
- Vorobieva E.V. // Dokl. Nation. Acad. Sci. Belarus. 2020. V. 64. № 3. P. 293.
- 35. *Kirsh Yu.E., Popkov Yu.M., Timashev S.F.* // Russ. J. Phys. Chem. 1999. V. 73. № 3. P. 486.