

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

УДК 541.64:536.7

DOI 10.26456/vtchem2025.3.1

РЕАКЦИОННОЕ СМЕШЕНИЕ ПОЛИ-N-ВИНИЛПИРРОЛИДОНА С ПОЛИ-N-ВИНИЛАЗОЛАМИ И СВОЙСТВА ПОЛУЧАЕМЫХ ПОЛИМЕРНЫХ СЕТОК

В.Н. Кижняев*, И.Д. Балаховцев*, Е.С. Чернышев*,
Ф.А. Покатилов*, М.Д. Гоцко**

**Иркутский государственный университет, Иркутск*

*** ФГБУН ФИЦ «Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН»,
Иркутск*

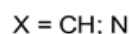
Продемонстрирована возможность использования оксирановых, имидазольных и 1,2,4-триазольных циклов в качестве «якорных» функциональных групп в структуре гибкоцепных полимеров для осуществления их реакционного смешения. Установлено, что обязательным условием сшивания оксиран- и азолсодержащих полимеров является присутствие воды в реакционной системе. Полимерные сетки, сформированные подобным образом из линейных водорастворимых лактам- и азолсодержащих полимеров, при набухании в воде образуют стимул-чувствительные гидрогели, обладающие ионной проводимостью.

Ключевые слова: Поли-N-винилпирролидон, поли-N-винилимидазол, поли-N-винил-1,2,4-триазол, реакционное смешение, гидрогели.

Сополимеры N-винилпирролидона (ВПД) с 1-винилимидазолом (ВИ) и 1-винил-1,2,4-триазолом (ВТ) привлекли внимание исследователей в качестве основы для создания лекарственных субстанций пролонгированного действия, мягких биосовместимых материалов или матриц направленной доставки лекарственных субстанций в живом организме [1-5]. Для этого у полимеров, содержащих в структуре лактамные и азольные циклы имеется набор необходимых свойств: гидрофильность, отсутствие токсичности, биосовместимость, комплексообразующая способность по отношению к объектам неорганического и органического происхождения. Несмотря на простоту получения сополимеров ВПД с ВИ и ВТ в условиях радикального инициирования, вследствие существенно более высокой полимеризационной активности винилазолов при совместной полимеризации [6-8] получить композиционно однородные,

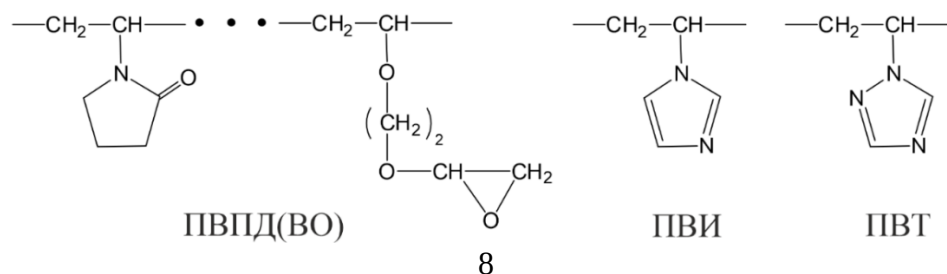
обогащенные звеньями ВП полимерные продукты, весьма затруднительно.

Альтернативным подходом синтеза полимерных продуктов, сочетающих в структуре лактамные и азольные циклы является реакционное смешение уже готовых высокомолекулярных соединений посредством ковалентного связывания разнородных макромолекул в результате реакций между «якорными» функциональными группами, присутствующими в структуре полимерных реагентов. Известно, что производные имидазола являются эффективными отвердителями эпоксидных смол [9]. Образование сетки приписывают анионной полимеризации с участием оксирановых циклов эпоксидного соединения, катализатором которой является цвиттер-ион, образующийся в результате реакции между имидазольным и оксирановым циклами [9, 10]. Сведений о подобном химизме процесса отверждения эпоксидных смол производными 1,2,4-триазола из анализа литературы найти не удалось. Однако, учитывая схожесть структуры и химических свойств имидазольного и триазольного циклов, можно предположить, что и во втором случае взаимодействие между азольным и оксирановым циклами будет сопровождаться образованием соответствующего цвиттер-иона.



Следовательно, присутствие оксирановых и азольных фрагментов в качестве «якорных» функциональных групп в структуре смешиваемых карбоцепных полимеров будет способствовать сшиванию разнородных макромолекул в единую пространственную сетку.

В настоящей работе приведен сравнительный анализ процесса реакционного смешения азолсодержащих полимеров – поли-N-винилимидазола (ПВИ) и поли-N-винил-1,2,4-триазола (ПВТ) с сополимером ВПД с винилглицидиловым эфиром этиленгликоля (ПВПД(ВО)),



а также рассмотрены некоторые свойства получаемых сетчатых продуктов.

Экспериментальная часть

Использованные в работе образцы оксирансодержащего ПВПД(ВО) были синтезированы в условиях радикального инициирования под действием ДАК (0.5 %) в среде этанола при 60 °С в течение 24 ч. Содержание винилового эфира в исходной смеси с N-винилпирролидоном составляло 0.1 и 0.3 мол. доли. Сополимеры высаживали и отмывали диэтиловым эфиром, сушили под вакуумом до постоянной массы. Выход составил 55 и 49 %, соответственно. Содержание азота в образце ПВПД(ВО) по данным элементного анализа, выполненного с использованием CHN-анализатора FLASH BA 1112 Series, составило 10.7 и 9.98 %, что отвечает содержанию звеньев ВО в сополимерах 0.11 и 0.17 мол. долей, соответственно. Нефракционированные образцы ПВИ и ПВТ с различной молекулярной массой (ММ) получали посредством радикальной полимеризации N-винилимидазола (ВИ) и N-винил-1,2,4-триазола (ВТ), варьируя природу реакционной среды и концентрацию инициатора (табл. 1).

Таблица 1.

Условия и результаты полимеризации ВИ и ВТ (60 °С)

Мономер	Растворитель	[ДАК], % от массы мономера	$[\eta]$ при 20 °С, дл/г	ММ
ВИ	Этанол – CCl ₄ (1:1)	1	0.15	7000
	Этанол	4	0.24	15000
	Этанол	1	0.43	37000
	Толуол	2	0.71	82000
ВТ	Этанол – CCl ₄ (1:1)	0.5	0.53	54000
	Ацетонитрил	0.5	1.02	202000
	Этанол	0.5	2.00	770000

Молекулярную массу образцов ПВИ и ПВТ рассчитывали из результатов вискозиметрии с использованием констант уравнения Марка-Куна:

$K = 5.1 \cdot 10^{-4}$ и $\alpha = 0.64$ (ПВИ, этанол, 20 °С) и $K = 2.27 \cdot 10^{-3}$ и $\alpha = 0.5$ (ПВТ, ДМФА, 25 °С [11]).

Реакцию оксирансодержащего ПВПД(ВО) с ПВИ и ПВТ осуществляли в водной среде или смеси воды с ДМФА (состава 1:1) при суммарных концентрациях полимерных реагентов 5÷20 г/дл, различных соотношениях компонентов и в диапазоне температур 25÷80 °С. Для

реакционного смешения с ПВИ использовали образец ПВПД(ВО) с содержанием звеньев ВО 0.11 мол. долей, а при реакции с ПВТ – образец ПВПД(ВО) с содержанием винилового эфира 0.17 мол. долей. Для проведения процесса при комнатной температуре смешивали предварительно приготовленные в соответствующем растворителе растворы оксирансодержащего ПВПД(ВО) и соответствующего поливинилазола. 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. Для окончательного завершения процесса сшивания оксиран- и имидазолсодержащих полимеров смесь выдерживали при заданной температуре в течении 7 суток после момента гелеобразования. Полученную в результате реакции гелеобразную массу выдерживали в течение недели под периодически заменяемой водой с целью удаления непрореагировавших исходных полимерных реагентов и достижения гидрогелем состояния равновесного набухания. Далее, в зависимости от целей исследования, из гидрогеля удаляли воду с целью определения выхода гель-фракции (выхода парного полимера) и степени его набухания, либо использовали для изучения влияния на указанный параметр рН, температуры водной среды и добавок низкомолекулярных солей.

Количество гель-фракции (парного полимера) рассчитывали по формуле

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

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 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 ± 0.5 °C).

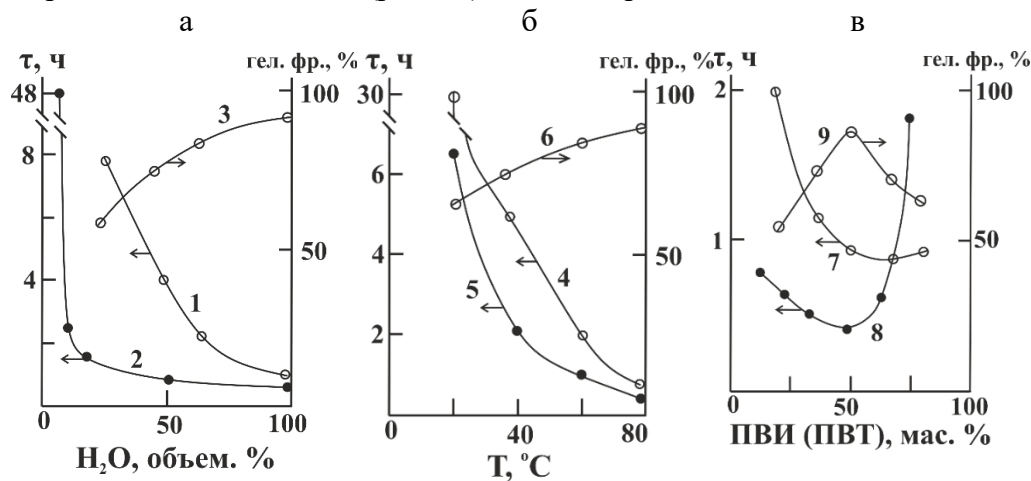
Термогравиметрический анализ продуктов реакции между полимерами проводили на дифференциальном сканирующем калориметре STA 449 F3 Jupiter (Netzsch). ИК-спектры регистрировали на спектрометре Infracum FT-801. Измерение электропроводности реакционной смеси проводили на потенциостате/гальваностате Autolab

PGSTAT 128N (Metrohm, Нидерланды) в трехэлектродной ячейке объемом 5 мл с рабочим платиновым дисковым электродом ($S=0,03 \text{ см}^2$), хлорсеребряным электродом сравнения и проволочным платиновым вспомогательным электродом.

Результаты и их обсуждение

Выбор объектов исследования обусловлен не только демонстрацией возможности реакционного смешения азол- и оксирансодержащих полимеров, но и практической стороной – получением сетчатых продуктов, набухающих в воде с образованием стимул-чувствительных гидрогелей и пригодных для дальнейшей модификации, например, допирования лекарственными субстанциями.

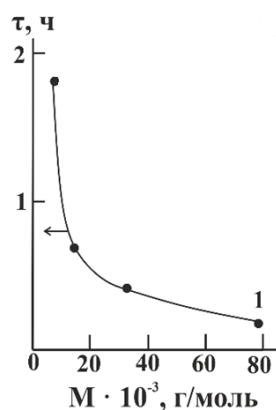
Для осуществления реакции между оксирансодержащим ПВПД(ВО) и поливинилазолами были опробованы общие для изученных полимеров растворители – вода и ДМФА. В обоих растворителях смеси полимеров гомогенны. Однако в среде органического растворителя реакции между полимерными реагентами и формирования пространственной сетки не было отмечено. Установлено, что обязательным условием протекания реакции между полимерами является присутствие в реакционной системе воды. Минимальное содержание воды в смешанном растворителе вода–ДМФА, в котором проявляется гелеобразование реакционной смеси при 80°C (т. е. образование пространственной сетки) для пар ПВПД(ВО) – ПВИ и ПВПД(ВО) – ПВТ составило, соответственно, 5 и 30 объемных %. С максимальной скоростью формирование пространственной сетки, характеризуемое временем потери текучести реакционной смеси, и наибольшим выходом гель-фракции (парного полимера) реакция протекает в чистой воде (рис. 1а). Таким образом,



Р и с. 1. Зависимость времени потери текучести τ (1, 2) и выхода гель-фракции (3) от объемной доли воды в смеси с ДМФА при 80 °С (а), температуры (б) и от соотношения исходных компонентов (в) реакции в воде для систем ПВПД(ВО) – ПВТ (1,3) и (ПВИ) (2)

вода является не только лучшей средой для осуществления процесса реакционного смешения, но и продуктом реакции является непосредственно гидрогель, не требующий дополнительной очистки от примесей органического растворителя. В водной среде реакционное смешение ПВПД(ВО) с ПВТ и ПВИ протекает в широком диапазоне температур и, вполне ожидаемо, скорость сшивания (уменьшение времени потери текучести системой) и выход парного полимера (гель-фракции) возрастают с повышением температуры (рис. 1б). В водной среде при 80 °С временные параметры формирования сетки в системах ПВПД(ВО)–ПВТ и ПВПД(ВО)–ПВИ приблизительно одинаковы; при всех остальных условиях осуществления реакционного смешения процесс формирования в системе с участием триазолсодержащего полимера идет гораздо медленнее.

Ускорению формирования полимерной сетки при реакционном смешении ПВПД(ВО) с ПВТ и ПВИ способствует как соблюдение массовой эквивалентности реагирующих полимерных реагентов (рис. 1в), так увеличение молекулярной массы поливинилазола (табл. 2 и рис. 2).



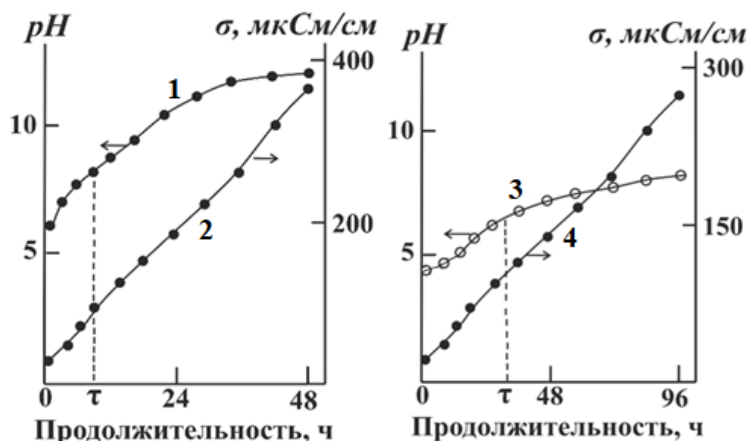
Р и с. 2. Зависимость времени потери текучести системы ПВПД(ВО) – ПВИ от молекулярной массы ПВИ. Условия реакции: вода; 1:1; 10 г/дл; 80 °С.

Т а б л. 2. Влияние молекулярной массы (ММ) ПВТ и суммарной концентрации полимеров ($C_{пл}$) на время потери текучести и выход гель-фракции при реакции с ПВПД(ВО) в воде при 80 °С.

ММ	$C_{пл}$, г/дл	τ , ч	Гел. фр., %
770000	5	1	87
202000	5	2	70
	10	0,6	85
54000	5	гел.	44 47
	10	нет	
	15	гел.	
	20	нет	
	1.5	нет	
	0.6	0.6	

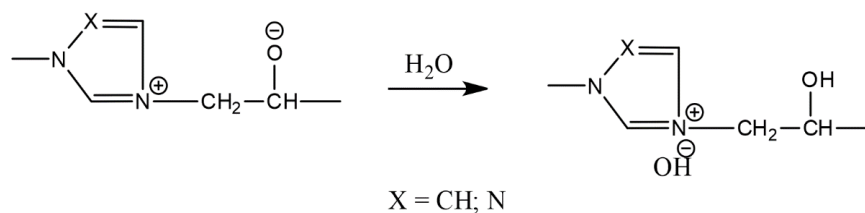
Однако диапазон значений молекулярных масс ПВТ, при которых реакционное смешение с ПВПД(ВО) сопровождается образованием сетчатых парных полимеров, на порядок выше аналогичных характеристик ПВИ. Кроме того, для осуществления реакционного смешения ПВТ с молекулярной массой 54000 требуется минимальная суммарная концентрация полимерных реагентов не ниже 15 г/дл, но и при этом реакция сопровождается низким выходом сетчатого парного полимера. В целом, можно отметить, что реакция ПВПД(ВО) с ПВТ и ПВИ характеризуется неколичественным связыванием разнородных полимеров; выход гель-фракции для обеих систем при оптимальных условиях осуществления процесса реакционного смешения лежит в диапазоне 60÷90 % (табл. 3).

Еще одна общая закономерность характеризует процесс реакционного смешения ПВПД(ВО) с поливинилазолами в водной среде. Как до, так и после точки потери текучести наблюдается возрастание значений pH и электропроводности реакционной среды (рис. 3), что указывает на

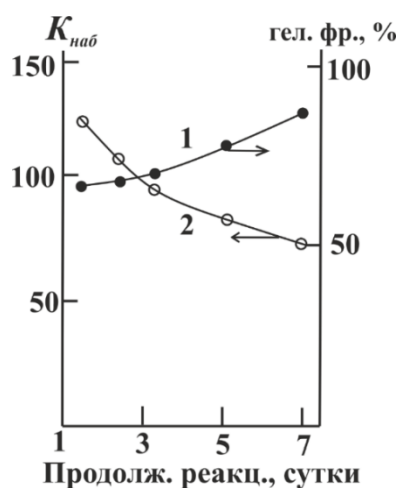


Р и с. 3. Зависимость изменения pH и электропроводности в системах ПВПД(ВО) – ПВИ (1, 2) и ПВПД(ВО) – ПВТ (3, 4) от времени реакции в воде при 25 °С.

одинаковую природу взаимодействий между полимерными реагентами в системах с имидазол- и триазолсодержащими полимерами. Получающиеся в результате реакции азольных и оксирановых циклов цвиттер-ионные фрагменты способны к взаимодействию с молекулами воды с образованием гидроксид-ионов в качестве противоионов азолиевым катионам. Накопление



подвижных гидроксид-ионов в ходе формирования сетки способствуют как возрастанию значений pH, так и электропроводности получаемых гидрогелей. Однако меньшая амплитуда изменения параметров, характеризующих pH и электропроводность среды в системе с участием ПВТ, указывает меньшую степень превращения якорных групп при реакционном смешении ПВПД(ВО) с триазолсодержащим полимером, нежели с ПВИ. Кроме того, приведенные выше результаты указывают еще на один аспект реакционного смешения полимеров. Реакция между полимерами и процесс формирования пространственной сетки не заканчивается на стадии потери текучести (гелеобразования) реакционной системой, а протекает еще продолжительное время уже внутри гидрогеля, приводя к ужесточению полимерной сетки. Об этом свидетельствует и уменьшение коэффициентов набухания гидрогелей парных полимеров с увеличением продолжительности выдерживания реакционной массы при заданной температуре (рис. 4).



Р и с. 4. Зависимость степени набухания в воде при 25 °С и выхода парных полимеров ПВПД(ВО) – ПВТ от продолжительности реакции

Таким образом, продуктом реакционного смешения в водной среде в обеих системах является гидрогель, обладающий ионной электропроводностью. Пространственная сетка типа «conetwork» [11-13] получаемых парных полимеров построена из макромолекул лактам- и азолсодержащих полимеров, ковалентно связанных ионогенными мостиковыми группами. Независимо от условий осуществления

реакционного смешения и не количественный выход, получаемые парные полимеры ПВПД(ВО) – ПВТ характеризуются составами, близкими к исходным соотношениям полимерных реагентов, в то время как, парные полимеры ПВПД(ВО) – ПВИ обогащены макромолекулами поливиниллактама (табл. 3).

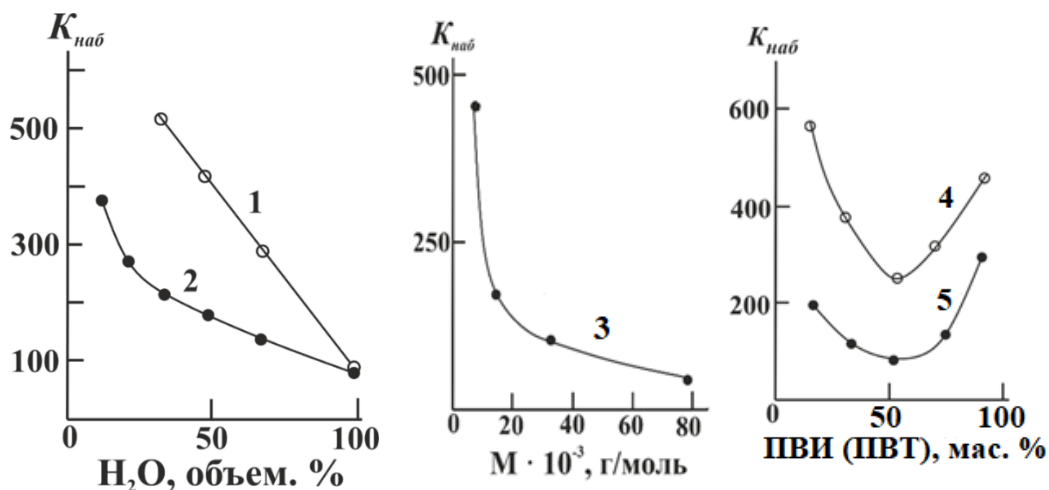
Условия синтеза парных полимеров оказывают существенное влияние на их степень водопоглощения. Формированию более плотной сетки, следовательно, уменьшению степеней равновесного набухания гидрогелей, в обеих системах способствует увеличение доли воды в реакционной среде при синтезе парного полимера. Вода не только ускоряет процесс сшивания, но и способствует образованию большего количества связей между макромолекулами (Рис. 5а).

Таблица 3.

Условия и результаты реакционного смешения ПВПД(ВО) с поливинилазолами (ПВА): ПВИ (37000) и ПВТ (202000) ($\Sigma C_{\text{пл}} = 10$ г/дл)

Состав исходной смеси полимеров, масс. доли		Раство- ритель	Темпе- ратура , °С	Выход гель- фрак- ции, %	% N в парном поли- мере	Состав парного полимера, масс. доли	
ПВПД (ВО)	ПВА					ПВЛ	ПВА
ПВПД(ВО) – ПВИ							
0.50	0.50	H ₂ O	25	80	17.34	0.63	0.37
0.50	0.50	ДМФА- H ₂ O (1:1)	25	69	16.73	0.64	0.36
0.90	0.10		H ₂ O	25	74	10.33	0.95
0.50	0.50	H ₂ O	80	92	17.27	0.63	0.37
0.50	0.50	ДМФА- H ₂ O (1:1)	80	66	16.55	0.66	0.34
0.40	0.60		H ₂ O	80	85	18.00	0.59

ПВПД(ВО) – ПВТ							
0.50	0.50	H ₂ O	25	61	27.27	0.50	0.50
0.50	0.50	H ₂ O	80	85	27.36	0.49	0.51
0.50	0.50	ДМФА- H ₂ O	80	81	26.78	0.52	0.48
0.80	0.20	(1:1)	80	55	17.40	0.79	0.21
0.67	0.33	H ₂ O	80	71	22.47	0.64	0.36
0.33	0.67	H ₂ O	80	69	29.28	0.40	0.60
0.20	0.80	H ₂ O	80	62	34.65	0.28	0.72
а		б			в		

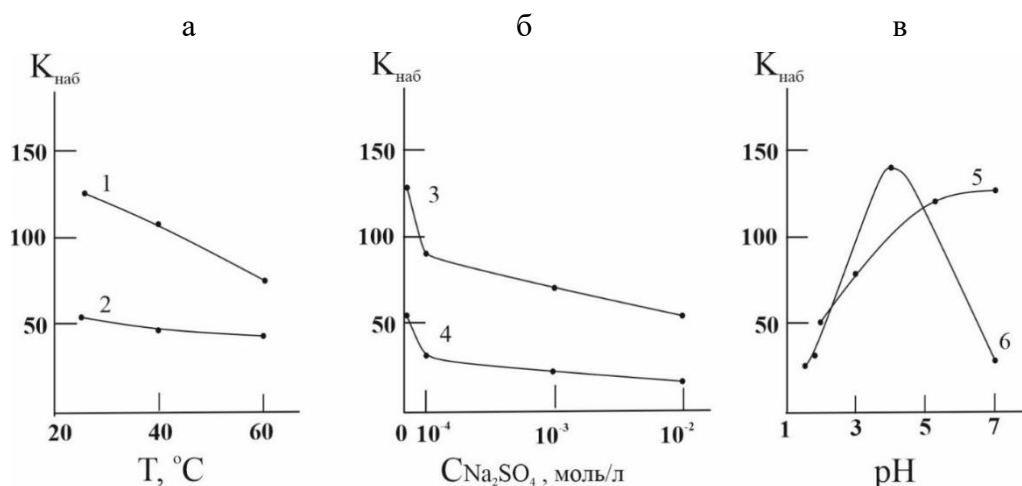


Р и с. 5. Зависимость степени набухания гидрогелей парных полимеров в воде при 25 °С от объемной доли воды в смеси ДМФА-Н₂О (а), молекулярной массы ПВИ (б) и от соотношения полимерных реагентов (в) при реакционном смешении ПВПД(ВО) с ПВТ (1, 4) и ПВИ (2, 3, 5)

Аналогичный эффект ускорения процесса сшивки и формирования более плотной полимерной сетки оказывает увеличение молекулярной массы поливинилазолов (рис. 5б) (в случае ПВТ с молекулярными массами 770000 и 202000 $K_{наб}$ гидрогелей парных полимеров равно, 140 и 304, соответственно) и соблюдение массовой

эквивалентности полимерных реагентов при реакционном смешении (рис. 5в). Температура же осуществления реакционного смешения ПВПД(ВО) с поливинилазолами весьма незначительно сказывается на набухаемости получаемых парных полимеров.

Присутствие в структуре пространственной сетки парных полимеров триазольных, имидазольных циклов в нативной и заряженной формах, лактамных фрагментов придает гидрогелям некоторую амфифильность, что обуславливает проявление ими стимул-чувствительных свойств. Так, повышение температуры окружающей среды способствует 2-х кратному уменьшению коэффициентов набухания гидрогелей парного полимера ПВПД(ВО)–ПВТ (рис. 6а), что связано с усилением гидрофобных взаимодействий, присущих пирролидоновым циклам, и компактизации макромолекулярных клубков. Увеличение ионной силы раствора, обусловленное добавлением к воде низкомолекулярного электролита с концентрацией 10^{-4} моль/л, вызывает коллапс гидрогелей обоого типа (рис. 6б). Разница в основных свойствах триазольных и имидазольных циклов проявляется в отличии реакции гидрогелей триазол- и имидазолсодержащих парных полимеров на изменение рН среды (рис. 6в).



Р и с. 6. Зависимость степени набухания гидрогелей парных полимеров в воде от температуры (1, 2), концентрации низкомолекулярной соли (3, 4) и рН среды (5, 6) гидрогелей парных полимеров ПВПД(ВО) – ПВТ (1, 3, 5) и ПВПД(ВО) – ПВИ (2, 4, 6)

Вид экстремальной кривой зависимости $K_{наб}$ от рН среды в случае гидрогелей парного полимера ПВПД(ВО)–ПВИ можно считать

классическим для полиэлектролитных гидрогелей. Максимальное набухание гидрогеля проявляется в кислотной области значений pH (4.2), при которых достигается полная ионизация имидазольных циклов (рис. 6, кривая 6). В случае же парного полимера ПВПД(ВО) с менее основным ПВТ усиление кислотных свойств окружающей среды приводит к монотонному уменьшению сорбционных характеристик гидрогелей (рис. 6, кривая 5). Возможно, при сочетании в полимерной сетке триазол- и пирролидонсодержащих макромолекул появление положительных зарядов, вызванных протонированием триазольных циклов, как и повышение температуры среды, способствует усилению гидрофобных взаимодействий, присущих лактамным фрагментам. Подобные ассоциативные гидрофобные взаимодействия способны превышать силу электростатического отталкивания одноименных зарядов, тем самым вызывая коллапс макромолекулярных клубков. Подобный эффект коллапсирования амфифильных полиэлектролитных гидрогелей, связанный с усилением гидрофобных взаимодействий при возникновении одноименных зарядов в полимерной сетке описан и теоретически обоснован в работах [35, 36].

Таким образом, представленные результаты продемонстрировали возможность использования сочетания оксирановых, имидазольных и 1,2,4-триазольных циклов в качестве якорных функциональных групп в структуре гибкоцепных полимеров для осуществления их реакционного смешения. Важным аспектом подобного сочетания якорных групп является возможность использования воды в качестве реакционной среды. Полимерные сетки, сформированные подобным образом из линейных водорастворимых пирролидон-, имидазол- и триазолсодержащих полимеров, при набухании в воде образуют стимул-чувствительные гидрогели.

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

Список литературы

1. 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.
2. Кижняев В.Н., Смирнов А.И., Бирюкова Е.И., Новиков А.И., Апарин П.Г. // Хим.-фарм. журн. 1992. № 11-12. С. 55.
3. Кирш Ю.Э. Поли-N-винилпирролидон и другие поли-N-виниламиды. М.: Наука, 1998. 252 с.

4. Ермакова Т.Г., Кузнецова Н.П. // Наука производству. 2003. № 6. С. 55.
5. Chaterji S., Kwon I. K., Park K. // Prog. Polym. Sci. 2007. T.32. C.1083.
6. Николаенко В.В., Некрасов А.В., Меркушов А.В., Татарова Л.А., Ермакова Т.Г. // Высокомолек. соед. Б. 1989. Т. 31. №8. С. 622.
7. Ратовский Г.В., Бирюкова Е.И., Смирнов А.И. // Журн. общ. химии. 1996. Т.66. № 4. С. 648.
8. Горбунова М.Н., Воробьева А.И., Толстиков А.Г., Монаков Ю.Б. // Изв. ВУЗ. Химия и хим. технол. 2006. Т. 49. № 2. С. 3.
9. Иржак В.И. Эпоксидные полимеры и нанокompозиты. Черноголовка: Редакционно-издательский отдел ИПХФ РАН, 2021. 319 с.
10. Heise M.S., Martin G.C. // J. Appl. Polym. Sci. 1990. V. 39. № 3. P. 721.
11. Татарова Л.А., Ермакова Т.Г., Кедрина Н.Ф., Касаикин В.А., Новиков Д.Д., Лопырев В.А. // Высокомолек. соед. Б. 1982. Т. 24. № 9. С. 697.
12. Erdodi G., Kennedy J. P. // Progr. Polym. Sci. 2006. V.31. № 1. P. 1.
13. Tobis J., Thomann Y., Tiller J. C. // Polymer. 2010. V. 51. № 1. P. 35.
14. Rikkou M. D., Loizou E., Patrickios C.S., Porcar L. // Eur. Polym. J. 2010. V. 46. № 3. P. 441.
15. Kramarenko E.Yu., Philippova O.E., Khokhlov A.R. // Polym. Sci., Ser. C. 2006. V. 48. №. 1. P. 1.
16. Kozhunova E.Y., Makhaeva E.E., Khokhlov A.R. // Polym. Sci., Ser. A. 2011. V. 53. №. 12. P. 1135.

Об авторах:

КИЖНЯЕВ Валерий Николаевич – доктор химических наук, профессор, зав. кафедрой органической химии и высокомолекулярных соединений ИГУ (664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1); e-mail: kizhnyayev@chem.isu.ru

БАЛАХОВЦЕВ Иван Дмитриевич – аспирант химического факультета ИГУ (664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1); e-mail: ibalakhovtsev98@gmail.com

ЧЕРНЫШЕВ Евгений Сергеевич – магистрант химического факультета ИГУ (664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1); e-mail: chsergio@mail.ru

ПОКАТИЛОВ Федор Анатольевич – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института нефте- и углехимического синтеза при ИГУ (664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1); e-mail: pfa72@rambler.ru

ГОЦКО Максим Дмитриевич – кандидат химических наук, зав. лабораторией плазмохимических технологий в винилировании Иркутского института химии СО РАН им. А.Е. Фаворского (664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1); e-mail: gotsko@irioch.irk.ru

REACTIVE MIXING OF POLY-N-VINYLPYRROLIDONE WITH POLY-N-VINYLAZOLES AND PROPERTIES OF THE RESULTING POLYMER NETWORKS

V.N. Kizhnyaev*, I.D. Balakhovtsev*, E.S. Chernyshev*,
F.A. Pokatilov*, M.D. Gotsko**

**Irkutsk State University, Irkutsk*

*** Irkutsk Institute of Chemistry named after A.E. Favorsky SB RAS, Irkutsk*

The possibility of using oxirane, imidazole and 1,2,4-triazole cycles as "anchor" functional groups in the structure of flexible-chain polymers for their reaction mixing has been demonstrated. It has been established that the presence of water in the reaction system is a prerequisite for crosslinking oxirane- and azole-containing polymers. Polymer networks formed in this way from linear water-soluble lactam- and azole-containing polymers, when swollen in water, form stimulus-sensitive hydrogels with ionic conductivity.

Keywords: *Poly-N-vinylpyrrolidone, poly-N-vinylimidazole, poly-N-vinyl-1,2,4-triazole, reaction mixing, hydrogels.*

Дата поступления в редакцию: 09.06.2025.

Дата принятия в печать: 16.08.2025.