

DOI: 10.32864/polymmattech-2019-5-1-63-69

УДК 678.6/7:544.23.057;544.25.057

ФРОНТАЛЬНАЯ СОПОЛИМЕРИЗАЦИЯ АКРИЛАМИДА С 2-АКРИЛАМИДО-2-МЕТИЛПРОПАНСУЛЬФОКИСЛОТОЙ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИАКРИЛАМИДА

Е. О. СОЛОМЕВИЧ⁺, Е. В. ГРИНЮК, Л. П. КРУЛЬ

Белорусский государственный университет, ул. Ленинградская, 14, 220050, г. Минск, Беларусь

Фронтальная полимеризация имеет ряд преимуществ, по сравнению с традиционными методами синтеза полимеров, таких как: высокая скорость процесса, низкие энергозатраты. В настоящей работе исследовали процесс фронтальной сополимеризации акриламида с 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислотой (АМПС) и ее натриевой солью в водных растворах высокомолекулярного полиакриламида, а также полученные при этом полиэлектролитные гидрогели. В результате впервые показано, что проведение процесса фронтальной сополимеризации акриламида с АМПС и ее натриевой солью, иницируемой персульфатом аммония, в растворе полиакриламида позволяет стабилизировать полимеризационный фронт и снизить концентрацию инициатора, необходимую для осуществления самопроизвольного процесса. Установлено, что продукты фронтальной сополимеризации акриламида с АМПС представляют собой сшитые полимерные системы – гидрогели. Определено влияние концентрации инициатора персульфата аммония на такие макрокинетические параметры процесса фронтальной сополимеризации, как температура и скорость движения фронта, а также на физико-химические свойства образующихся гидрогелей. Показано, что увеличение концентрации водного раствора промышленного полиакриламида, используемого в качестве реакционной среды, с 0,1% до 0,2 % не приводит к дополнительной стабилизации фронта.

Ключевые слова: фронтальная сополимеризация, акриламид, 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислота, полиэлектролитный гидрогель, водопоглощение, гель-фракция.

FRONTAL COPOLYMERIZATION OF ACRYLAMIDE AND 2-ACRYLAMIDO-2-METHYL-PROPANESULF ACID IN AQUEOUS SOLUTIONS OF HIGH-MOLECULAR POLYACRYLAMIDE

A. A. SALAMEVICH⁺, Y. V. HRYNIUK, L. P. KRUL

Belarusian State University, Leningradskaya St., 14, 220050, Minsk, Belarus

Frontal polymerization has several advantages compared with traditional methods of polymer synthesis. Such advantages, in particular, are the high speed of the process, low energy costs. The objects of investigation in this work were the process of frontal copolymerization of acrylamide with 2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid in aqueous solutions, as well as the resulting copolymers and hydrogels. As a result of this work, it was shown for the first time that carrying out the process of frontal copolymerization of acrylamide with 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid and its sodium salt in a viscous solution of high molecular weight polyacrylamide allows to stabilize the polymerization front and reduce the concentration of the initiator, necessary for the implementation of a spontaneous process. It was established that the copolymerization products in all experiments were cross-linked polymer systems — hydrogels. The effect of ammonium persulfate initiator concentration on the macrokinetic parameters of the frontal copolymerization of

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: elena.solomevich@mail.ru

acrylamide with 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid and its sodium salt in aqueous solutions of high molecular weight polyacrylamide and the physical and chemical properties of the resulting hydrogels has been established. It is shown that an increase in the concentration of an aqueous solution of industrial high molecular weight polyacrylamide used as a reaction medium from 0.1 to 0.2% does not lead to an additional stabilization of the front.

Keywords: frontal copolymerization, acrylamide, 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid, polyelectrolyte hydrogel, water absorption, gel fraction.

Введение

Среди огромного количества известных природных и синтетических полимерных соединений лишь немногие обладают способностью растворяться в воде. Для водорастворимых полимеров характерно наличие в цепи макромолекул гидрофильных функциональных групп (гидроксильных, карбоксильных, амидных, сульфогрупп и др.). Многие из них относятся к классу полиэлектролитов [1].

Полимеры на основе акриламида (АА) широко используются в различных областях промышленности. Для улучшения физико-химических свойств полимеров и гидрогелей на основе АА используют ионный сомономер, такой как, например, 2-акриламидо-2-метилпропансульфонокислота (АМПС) [2].

Одним из основных показателей, характеризующих интенсивность протекания процесса полимеризации во фронтальном режиме, является скорость распространения фронта. В случае тепловой фронтальной сополимеризации (ФП) этот параметр в первую очередь определяется тепловым эффектом полимеризации того или иного мономера. Известно, что тепловой эффект полимеризации АА составляет около 84 кДж/моль, что позволяет проводить ФП с его участием без особых затруднений [3]. Однако в случае осуществления фронтальной сополимеризации АА с другими мономерами следует учитывать не только тепловой эффект полимеризации, но и различия в реакционной способности мономеров. На ФП в растворах мономеров оказывает влияние еще ряд факторов, наиболее существенными из которых являются концентрация мономеров, температура кипения растворителя и его вязкость [4–7].

Анализ литературы показал, что исследователи ФП недостаточно внимания уделяют ее осуществлению в водных растворах [8–11]. Отчасти это объясняется низкой вязкостью воды и относительно невысокой температурой ее кипения, что приводит к возникновению теплопереноса вблизи движущегося полимеризационного фронта и его искажению вследствие конвективного массопереноса. В конечном итоге это может привести к затуханию самопроизвольного процесса полимеризации. Однако, учитывая хорошую растворимость АА и АМПС в воде и их доступность, несомненный интерес представляет изучение процессов их фронтальной сополимеризации в водных растворах.

Цель работы — изучение процесса фронтальной сополимеризации АА с АМПС, инициированной персульфатом аммония и стабилизированной за

счет ее осуществления в водном растворе полиакриламида; анализ физико-химических свойств полученных продуктов.

Материалы и методы исследования

Мономеры производства фирмы «Sigma-Aldrich» (США) марки х.ч. были использованы без предварительной очистки: АА с содержанием основного вещества 98,0%; АМПС с содержанием основного вещества 99,0%. Термический инициатор — персульфат аммония (ПСА) в соответствии с ГОСТ 20478. В качестве реакционной среды использовали водные растворы промышленного полиакриламида (ПАА) производства «SNF Floerger» (Франция) марки *FP-307*. Концентрация ПАА в растворах составляла 0,1 мас.% и 0,2 мас.%.

Все реакции ФП проводили при комнатной температуре и атмосферном давлении. Изначально АА растворяли в заранее отмеренном количестве растворителя. Затем к полученному раствору добавляли рассчитанное количество АМПС. К гомогенному раствору мономеров добавляли инициатор.

Для исследования влияния содержания каждого из компонентов на физико-химические характеристики сополимеров, варьировали мольную концентрацию инициатора в реакционной смеси. В качестве инициатора использовали ПСА, который при разложении не образует побочных летучих продуктов, и, следовательно, не образует пузырьков, которые могут мешать измерению скорости реакции и влиять на стабильность фронта. Концентрации ПСА составляли 0,01%; 0,025%; 0,05%; 0,1%; 0,2% от общего мольного содержания мономеров в системе. Мольное соотношение мономеров АА : АМПС во всех экспериментах составляло 75 : 25.

Все эксперименты проводили в запаянных с одного конца стеклянных трубках с внутренним диаметром 5 мм. Реакции инициировали путем точечного нагрева верхних слоев раствора мономеров в трубке до начала самопроизвольного процесса полимеризации. Из-за наличия конвекции в случае восходящего или горизонтально распространяющегося фронта, которая мешает его продвижению [12], все эксперименты проводили для нисходящих фронтов реакции. Скорость фронтов определяли измерением расстояния, пройденного фронтом за определенный временной интервал. Температуры полимеризационных фронтов измеряли при помощи термомпары К-типа, погруженной в раствор мономеров. Водопоглощающую способность гелей определяли гравиметрическим методом на ана-

литических весах («ОНАУС», Китай).

ИК спектры полиэлектролитных гидрогелей (ПЭГГ) записывали на ИК-Фурье спектрометре «BRUKER ALPHA» с приставкой НПВО «ATR Di» («BRUKER», Германия). Образцы для записи спектров готовили измельчением и последующим их высушиванием при 40 °С. Гель предварительно очищался от примесей и непрореагировавших мономеров многократным набуханием в дистиллированной воде и фильтрованием.

Результаты и их обсуждение

Предполагали, что проведение процесса ФП в относительно высоковязком растворе высокомолекулярного ПАА позволит стабилизировать фронт за счет ослабления эффектов конвективного массо- и теплопереноса. На начальном этапе работы в качестве реакционной среды использовали ПАА с концентрацией 0,1%.

При сополимеризации АА с АМПС и концентрациях инициатора от 0,025% до 0,2% получили нерастворимые в воде ПЭГГ. При концентрации инициатора 0,01% реакция сополимеризации во фронтальном режиме не протекала. Следует отметить, что в работе [12], в которой изучали процесс фронтальной сополимеризации АА с АМПС в водном растворе мономеров, минимальная концентрация ПСА, при которой сополимеризация была осуществима, составляла 0,05%. В настоящей работе при проведении процесса в растворе ПАА минимальная концентрация ПСА составила 0,025 %. По-видимому, снижение минимальной концентрации ПСА обусловлено дополнительной стабилизацией фронта за счет снижения влияния конвективного тепло- и массопереноса при проведении процесса сополимеризации в вязком растворе ПАА.

На рис. 1 представлена зависимость скорости распространения фронта сополимеризации от концентрации ПСА при проведении процесса в 0,1% растворе ПАА.

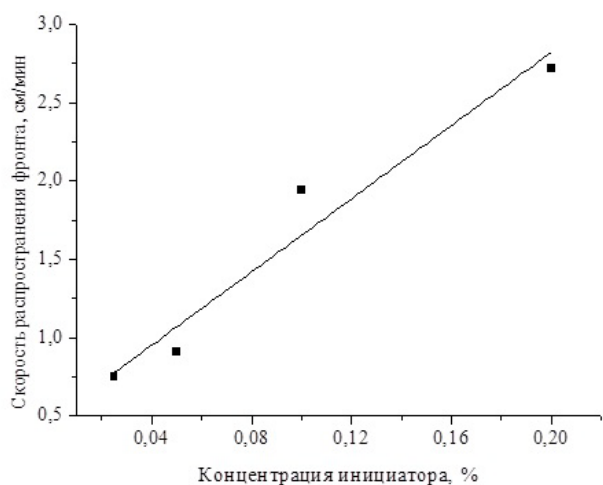


Рисунок 1 — Зависимость скорости распространения фронта от концентрации инициатора при сополимеризации АА с АМПС в 0,1%-ном растворе ПАА

Fig. 1 — The dependence of front velocity on the concentration of initiator in the copolymerization of AA with AMPS in 0.1% solution of PAA

Одними из наиболее важных характеристик ПЭГГ, учитывая области их применения, являются водопоглощающая способность и величина гелевых фракций. Эти характеристики определили гравиметрическим методом для всех полученных в работе ПЭГГ.

В табл. 1 представлены величины водопоглощения и гелевых фракций ПЭГГ, полученных при различных концентрациях инициатора.

Таблица 1 — Величины водопоглощения и гелевых фракций для ПЭГГ, полученных в 0,1%-ном растворе ПАА
Table 1 — Value of water absorption and gel fractions for PEGG obtained in 0.1% solution of PAA

Концентрация инициатора, %	Водопоглощение, г/г	Гель-фракция
0,025	2121	0,70
0,05	2083	0,61
0,1	1678	0,58
0,2	683	0,36

Из табл. 1 видно, что увеличение концентрации инициатора в исходной реакционной смеси приводит к снижению величин водопоглощения и гелевых фракций получаемых ПЭГГ. Таким образом, при соотношении мономеров 75 : 25 сополимеризация АА с АМПС во фронтальном режиме протекает даже при концентрации инициатора 0,025%. При этом продуктами реакции являются ПЭГГ.

Далее в качестве растворителя использовали водный раствор ПАА с концентрацией 0,2%. При сополимеризации АА с АМПС с мольным соотношением мономеров 75 : 25 и концентрациях инициатора от 0,025% до 0,2% получили нерастворимые в воде ПЭГГ. При концентрации инициатора 0,01% реакция сополимеризации во фронтальном режиме не протекала. Из рис. 2 видно, что скорость распространения фронта практически линейно возрастает с увеличением концентрации инициатора.

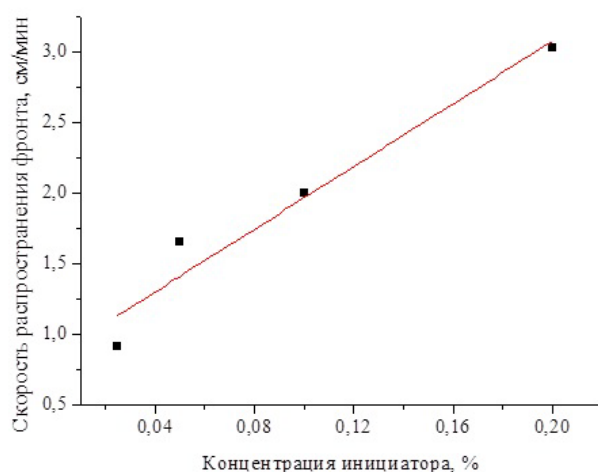


Рисунок 2 — Зависимость скорости распространения фронта от концентрации инициатора при сополимеризации АА с АМПС в 0,2%-ном растворе ПАА

Fig. 2 — The dependence of front velocity on the concentration of initiator in the copolymerization of AA with AMPS in 0.2% solution of PAA

В табл. 2 представлено изменение температуры фронта полимеризации при изменении концентрации инициатора. Видно, что температура фронта повышается с увеличением концентрации инициатора.

Таблица 2 — Зависимость температуры фронта от концентрации инициатора при сополимеризации АА с АМПС

Table 2 — The dependence of the front temperature on the concentration of initiator in the copolymerization of AA with AMPS

Концентрация инициатора, %	Концентрации растворов ПАА, %	
	0,1	0,2
	Температура фронта, °С	
0,025	130	136
0,05	131	151
0,1	150	151
0,2	151	156

В табл. 3 представлены величины водопоглощения и гель-фракции ПЭГГ, полученные при различных концентрациях инициатора полимеризации. Видно, что увеличение концентрации инициатора в исходной реакционной смеси приводит к снижению величин водопоглощения и гель-фракции получаемых ПЭГГ. По-видимому, уменьшение гель-фракции с увеличением концентрации инициатора связано с тем, что при высокой температуре фронта происходит частичная деструкция образующегося сополимера. Кроме того, как известно [13], более высокие концентрации инициатора способствуют образованию более коротких цепей полимера.

Таблица 3 — Величины водопоглощения и гель-фракции для ПЭГГ, полученных в 0,2%-ном растворе ПАА
Table 3 — Value of water absorption and gel fractions for PEGG obtained in 0.2 % solution of PAA

Концентрация инициатора, %	Водопоглощение, г/г	Гель-фракция
0,025	1721	0,99
0,05	1453	0,69
0,1	1169	0,56
0,2	1012	0,48

Дальнейшие эксперименты по сополимеризации АА с АМПС решили проводить в нейтральных растворах, для чего АМПС в мономерной смеси нейтрализовали эквимолярным количеством NaOH, переводя его в натриевую форму (АМПСNa). В результате получили нерастворимые в воде ПЭГГ даже при концентрации инициатора 0,01%. На рис. 3 представлена зависимость скорости распространения фронта от концентрации инициатора при проведении сополимеризации АА с АМПСNa. Аналогично экспериментам сополимеризации АА с АМПС скорость распространения фронта линейно возрастает с увеличением концентрации инициатора.

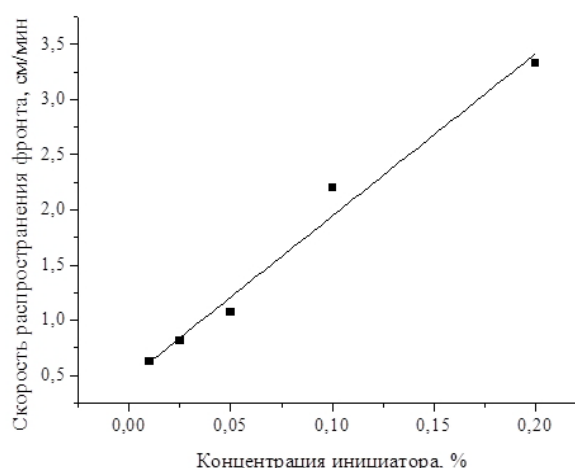


Рисунок 3 — Зависимость скорости распространения фронта от концентрации инициатора при сополимеризации АА с АМПСNa в 0,1%-ном растворе ПАА

Fig. 3 — The dependence of front velocity on the concentration of initiator in the copolymerization of AA with AMPSNa in 0.1% solution of PAA

Анализируя данные о температуре фронта (табл. 4), установили, что также как и при процессе сополимеризации АА с АМПС, температура фронта повышается с увеличением концентрации инициатора.

Таблица 4 — Зависимость температуры фронта от концентрации инициатора при сополимеризации АА с АМПСNa

Table 4 — The dependence of the front temperature on the concentration of initiator in the copolymerization of AA with AMPSNa

Концентрация инициатора, %	Концентрации растворов ПАА, %	
	0,1	0,2
	Температура фронта, °С	
0,01	131	113
0,025	133	119
0,05	146	127
0,1	153	138
0,2	154	154

В табл. 5 представлены величины водопоглощения и гель-фракции ПЭГГ, полученных при различных концентрациях инициатора полимеризации. Видно, что увеличение концентрации инициатора в исходной реакционной смеси приводит к снижению величин водопоглощения и гель-фракции получаемых ПЭГГ.

Таблица 5 — Величины водопоглощения и гель-фракции для ПЭГГ, полученных в 0,1%-ном растворе ПАА
Table 5 — Value of water absorption and gel fractions for PEGG obtained in 0.1% solution of PAA

Концентрация инициатора, %	Водопоглощение, г/г	Гель-фракция
0,01	1721	0,70
0,025	1234	0,59
0,05	1058	0,44
0,1	934	0,18
0,2	505	0,06

Далее в экспериментах по сополимеризации в качестве растворителя использовали раствор ПАА с концентрацией 0,2% и прежним соотношением мономеров и NaOH. В процессе сополимеризации АА с АМПСNa получили нерастворимые в воде ПЭГГ при всех выбранных концентрациях инициатора. Сополимеризацию также наблюдали при минимальном количестве инициатора — 0,01% (табл. 6). Из табл. 6 видно, что увеличение концентрации инициатора в исходной реакционной смеси приводит к снижению величин гель-фракции и водопоглощения получаемых ПЭГГ.

Таблица 6 — Величины водопоглощения и гель-фракции для ПЭГГ, полученных в 0,2%-ном растворе ПАА
Table 6 — Value of water absorption and gel fractions for PEGG obtained in 0.2% solution of PAA

Концентрация инициатора, %	Водопоглощение, г/г	Гель-фракция
0,01	1593	0,51
0,025	1332	0,46
0,05	1132	0,35
0,1	933	0,24
0,2	370	0,09

В результате полученных данных можно с уверенностью утверждать, что увеличение концентрации инициатора в исходной реакционной смеси приводит к увеличению температуры фронта, увеличению скорости распространения фронта, снижению величин гель-фракции и водопоглощения получаемых гелей.

Для подтверждения образования в качестве продуктов реакции именно сополимеров АА с

АМПС провели анализ ИК-спектров полученных образцов (рис. 4, 5). Спектры имеют сложную структуру и содержат ярко выраженные полосы поглощения в области 1649 (1610) и 1036 (1037) см^{-1} , отвечающие колебаниям связей C=O амидной группы и связей S=O сульфогруппы соответственно, что подтверждает участие АМПС в процессе фронтальной сополимеризации.

Выводы

В процессе изучения фронтальной сополимеризации АА с АМПС и ее натриевой солью, инициируемой персульфатом аммония, в водных растворах ПАА установлено, что температура и скорость распространения фронта полимеризации обусловлены концентрацией инициатора.

Минимальная концентрация инициатора составляет 0,025% и 0,01% в случае осуществления процесса фронтальной сополимеризации в кислых и нейтральных растворах соответственно.

Установлено, что продукты фронтальной сополимеризации АА с АМПС, образующиеся при ее проведении в водном растворе высокомолекулярного ПАА, представляют собой сшитые полимерные системы — гидрогели. Определены величины водопоглощения и гель-фракции гидрогелей, получаемых при фронтальной сополимеризации АА с АМПС и ее натриевой солью в зависимости от концентрации инициатора.

Показано, что увеличение концентрации водного раствора промышленного ПАА, используемого в качестве реакционной среды, с 0,1% до 0,2% не приводит к дополнительной стабилизации фронта.

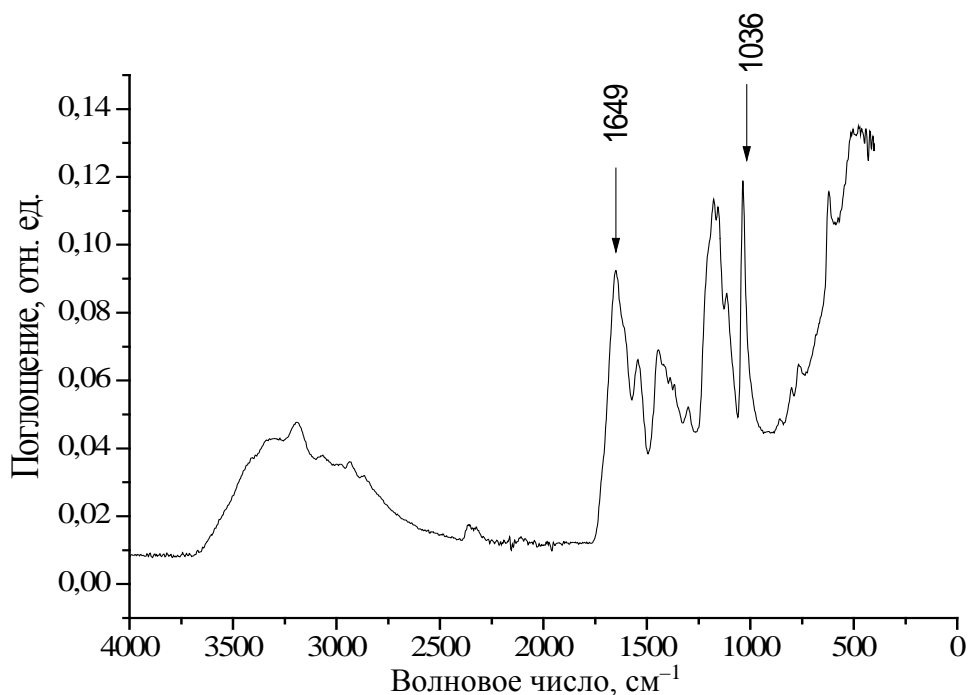


Рисунок 4 — ИК-спектр поглощения образца, полученного при концентрации ПСА 0,05% в 0,1%-ном растворе ПАА
Fig. 4 — Absorption IR spectrum of the sample obtained at 0.05% of PSA concentration in 0.1% solution of PAA

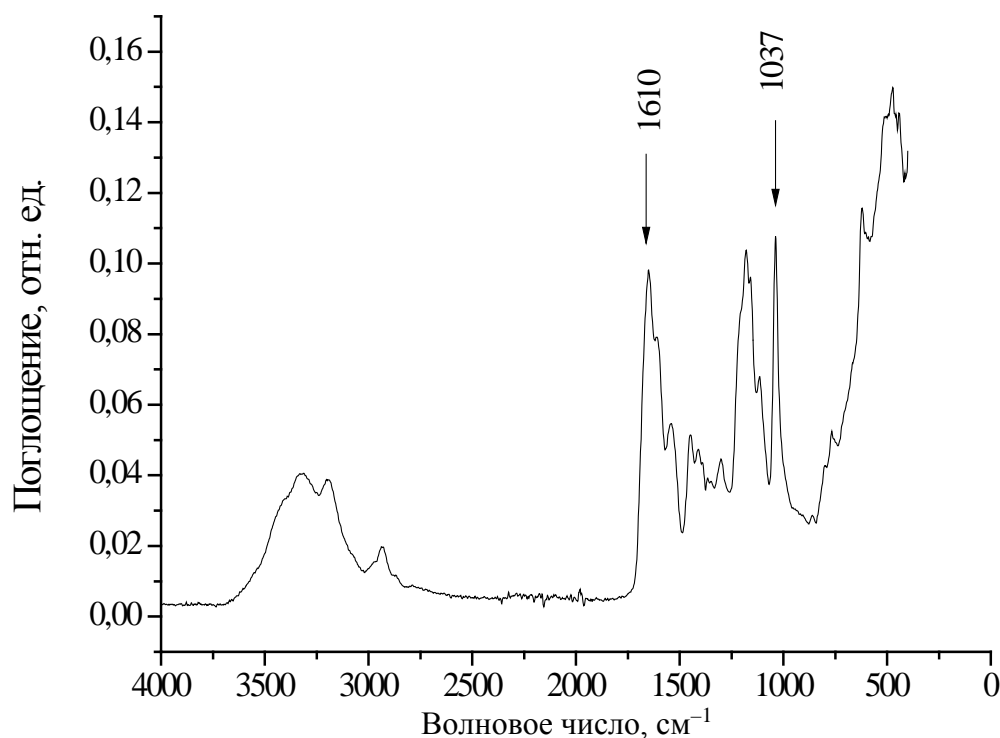


Рисунок 5 — ИК-спектр поглощения образца, полученного при концентрации ПСА 0,2% в 0,2%-ном растворе ПАА
 Fig. 5 — Absorption IR spectrum of the sample obtained at 0.2% of PSA concentration in 0.2 % solution of PAA

Обозначения

АА — акриламид; АМПС — 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислота; АМПСNa — натриевая соль 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислоты; ИК-спектры — инфракрасные спектры; ПАА — полиакриламид; ПСА — персульфат аммония; ПЭГТ — полиэлектролитные гидрогели; ФП — фронтальная полимеризация.

Литература

1. Josue D. Mota-Morales, Maria C. Gutierrez, M. Luisa Ferrer, Isaac C. Sanchez, Eduardo A. Elizalde-Pena, John A. Pojman, Francisco Del Monte, Gabriel Luna-Barcenas. Deep Eutectic Solvents as Both Active Fillers and Monomers for Frontal Polymerization // *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, 2013, vol. 51, no. 8, pp. 1767–1773.
2. Гринюк Е. В., Круль Л. П. Фронтальная сополимеризация акриламида с 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислотой и с акрилатом натрия в водных растворах // *Полимерные материалы и технологии*. 2016. Т. 2, № 1. С. 48–53.
3. Вардерсян А. З., Арутюнян А. Л., Торосян Г. О., Тоноян А. О. Кинетика термической полимеризации акриламида в адиабатическом режиме // *Химический журнал Армении*. 2007. Т. 60, №1. С. 19–27.
4. Слюсар О. И., Калмыкова Т. П., Керманиан Ф. Изучение влияния различных факторов на структурно-механические характеристики гидрогелевых основ полимера акриловой кислоты // *Химико-фармацевтический журнал*. 2003. Т. 37, № 5. С. 51–53.
5. Гринюк Е. В., Фомина Е. К., Якимцова Л. Б., Круль Л. П. Новые пленкообразующие биотехнические средства сельскохозяйственного назначения на основе химически сшитых функционализированных полиакриламидов // *Свиридовские чтения: сб.ст. Минск, 2012. Вып. 8. С. 194–202.*
6. Мамаев О. И., Гринюк Е. В., Круль Л. П. Выбор исходного

сырья для реализации технологического процесса получения полиэлектролитных гидрогелей растениеводческого назначения // *Материалы. Технологии. Инструменты*. 2014. Т. 19, №1. С. 94–97.

7. Дьячков И. А. Особенности физико-механического поведения полиметилметакрилата, полученного методом фронтальной полимеризации // *Вестник Московского Университета. Сер. 2. Химия*. 2010. Т. 51, № 5. С. 369–374.
8. Gulzhian I. Dzhardimalieva, Anatolii D. Pomogailo, and Vitaly A. Volpert. Frontal Polymerization of Metal-Containing Monomers: A Topical Review // *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers*, 2002, vol. 12, no. 1–2, pp. 1–21.
9. Pojman J. A. Frontal Polymerization // *Polymer Science: A Comprehensive Reference* / ed. K. Matyjaszewski, M. Möller. Amsterdam: Elsevier BV, 2012, vol. 4, pp. 957–980.
10. Javier Illescas, Roberta Sanna, Valeria Alzari, Daniele Nuvoli, Mariano Casu, Roberta Sanna, Ernesto Rivera, Alberto Mariani. Organic–Inorganic Interpenetrating Polymer Networks and Hybrid Polymer Materials Prepared by Frontal Polymerization // *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, 2013, vol. 51, no. 21, pp. 4618–4625.
11. Roberta Sanna, Valeria Alzari, Daniele Nuvoli, Sergio Scognamillo, Salvatore Marceddu, Alberto Mariani. Polymer Hydrogels of 2-Hydroxyethyl Acrylate and Acrylic Acid Obtained by Frontal Polymerization // *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, 2012, vol. 50, no. 8, pp. 1515–1520.
12. Гринюк Е. В., Дук О. Г., Шереш И. В., Круль Л. П. Получение сополимеров акриламида и 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислоты методом фронтальной полимеризации // *Журнал прикладной химии*. 2014. Т. 87, № 12. С. 1841–1845.
13. Семчиков Ю. Д. *Высокомолекулярные соединения*. М.: Академия, 2003. 368 с.

References

1. Josue D. Mota-Morales, Maria C. Gutierrez, M. Luisa Ferrer, Isaac C. Sanchez, Eduardo A. Elizalde-Pena, John A. Pojman, Francisco Del Monte, Gabriel Luna-Barcenas. Deep Eutectic Solvents as Both Active Fillers and Monomers for Frontal

- Polymerization. *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, 2013, vol. 51, no. 8, pp. 1767–1773.
- Grinyuk E. V., Krul' L. P. Frontal'naya sopolimerizatsiya akrilamida s 2-akrilamido-2-metilpropansul'fokislotoy i s akrilatom natriya v vodnykh rastvorakh [Frontal copolymerization of acrylamide with 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid and sodium acrylate in aqueous solutions]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer materials and technologies], 2016, vol. 2, no. 1, pp. 48–53.
 - Varderesjan A. Z., Arutjunjan A. L., Torosjan G. O., Tonojan A. O. Kinetika termicheskoj polimerizatsii akrilamida v adiabaticheskom rezhime [Kinetics of thermal polymerization of acrylamide in the adiabatic mode]. *Himicheskij zhurnal Armenii* [Chemical journal of Armenia], 2007, vol. 60, no. 1, pp. 19–27.
 - Clyusar O. I., Kalmykova T. P., Kermanian F. Izuchenie vliyaniya razlichnykh faktorov na strukturno-mekhanicheskie kharakteristiki gidrogelevykh osnov polimera akrilovoy kisloty [The study of the influence of various factors on the structural and mechanical characteristics of the hydrogel bases of acrylic acid polymer]. *Khimiko-farmatsevticheskiy zhurnal* [Chemical Pharmaceutical Journal], 2003, vol. 37, no. 5, pp. 51–53.
 - Grinyuk E. V., Fomina E. K., Yakimtsova L. B., Krul' L. P. Novee plenkoobrazuyushchie biotekhnicheskie sredstva sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya na osnove khimicheski sshitykh funktsionalizirovannykh poliakrilamidov [New film-forming biotechnological agricultural products based on chemically cross-linked functionalized polyacrylamides]. *Sviridovskie chteniya* [Sviridov readings]. Minsk, 2012, pp. 194–202.
 - Mamaev O. I., Grinyuk E. V., Krul' L. P. Vybor iskhodnogo syr'ya dlya realizatsii tekhnologicheskogo protsessa polucheniya polielektrolitnykh gidrogeley rastenievodcheskogo naznacheniya [The choice of raw materials for the implementation of the process of obtaining polyelectrolyte hydrogels of plant use]. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technologies. Tools], 2014, vol. 19, no. 1, pp. 94–97.
 - D'yachkov I. A. Osobennosti fiziko-mekhanicheskogo povedeniya polimetilmetakrilata, poluchennogo metodom frontal'noy polimerizatsii [Features of the physicochemical behavior of polymethyl methacrylate, obtained by the method of frontal polymerization]. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 2. Khimiya* [Moscow University Bulletin], 2010, vol. 51, no. 5, pp. 369–374.
 - Gulzhian I. Dzhardimalieva, Anatolii D. Pomogailo, and Vitaly A. Volpert. Frontal Polymerization of Metal-Containing Monomers: A Topical Review. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers*, 2002, vol. 12, no. 1–2, pp. 1–21.
 - Pojman J. A. Frontal Polymerization. *Polymer Science: A Comprehensive Reference / ed. K. Matyjaszewski, M. Möller*. Amsterdam: Elsevier BV, 2012, vol. 4, pp. 957–980.
 - Javier Illescas, Roberta Sanna, Valeria Alzari, Daniele Nuvoli, Mariano Casu, Roberta Sanna, Ernesto Rivera, Alberto Mariani. Organic-Inorganic Interpenetrating Polymer Networks and Hybrid Polymer Materials Prepared by Frontal Polymerization. *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, 2013, vol. 51, no. 21, pp. 4618–4625.
 - Roberta Sanna, Valeria Alzari, Daniele Nuvoli, Sergio Scognamiglio, Salvatore Marceddu, Alberto Mariani. Polymer Hydrogels of 2-Hydroxyethyl Acrylate and Acrylic Acid Obtained by Frontal Polymerization. *Journal of Polymer Science. Part A: Polymer Chemistry*, 2012, vol. 50, no. 8, pp. 1515–1520.
 - Grinyuk E. V., Duk O. G., Shereshe I. V., Krul' L. P. Poluchenie sopolimerov akrilamida i 2-akrilamido-2-metilpropansul'fokislotoy metodom frontal'noy polimerizatsii [Obtaining copolymers of acrylamide and 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid by the method of front polymerization]. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Russian Journal of Applied Chemistry], 2014, vol. 87, no. 12, pp. 1841–1845.
 - Semchikov Ju. D. *Vysokomolekuljarnye soedineniya* [Polymers]. Moscow: Akademija Publ., 2003. 368 p.

Поступила в редакцию 27.02.2019

© Е. О. Соломевич, Е. В. Гринюк, Л. П. Круль, 2019