

УДК 678.6/7:544.23.057;544.25.057

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ФРОНТА ПРИ ФРОНТАЛЬНОЙ СОПОЛИМЕРИЗАЦИИ АКРИЛАМИДА С АКРИЛАТОМ НАТРИЯ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

Е. О. СОЛОМЕВИЧ<sup>1)</sup>, Е. В. ГРИНЮК<sup>1)</sup>, Л. П. КРУЛЬ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Объекты исследования – процесс фронтальной сополимеризации акриламида с акрилатом натрия в водных растворах и полученные при этом сополимеры и гидрогели. Показано, что проведение указанной сополимеризации в водном растворе высокомолекулярного полиакриламида способствует снижению концентрации инициатора, необходимой для осуществления процесса, и образованию несшитых сополимеров. Изучено влияние добавки аэросила в исходную реакционную смесь на параметры протекания сополимеризации и на свойства образующихся продуктов. Определены величины водопоглощения и гель-фракции полученных гидрогелей.

**Ключевые слова:** фронтальная полимеризация; акриламид; акрилат натрия; акриловая кислота; полиэлектролитный гидрогель; водопоглощение.

## STABILIZATION OF THE FRONT AT FRONTAL COPOLYMERIZATION OF ACRYLAMIDE WITH SODIUM ACRYLATE IN AQUEOUS SOLUTIONS

A. A. SALAMEVICH<sup>a</sup>, Y. V. HRYNIUK<sup>a</sup>, L. P. KRUL<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: A. A. Salamevich (elena.solomevich@mail.ru)

The objects of research were the process of frontal copolymerization of acrylamide with sodium acrylate in aqueous solutions, as well as the copolymers and hydrogels thus obtained. It has been shown that the frontal polymerization of acrylamide with sodium acrylate in an aqueous solution of high molecular weight polyacrylamide helps to reduce the initiator concentration necessary for the process and the formation of non-crosslinked copolymers. The effect of the addition of aerosil in the initial reaction mixture on the parameters of the copolymerization process and on the properties of the products formed is studied. The values of water absorption and gel fractions of the obtained hydrogels were determined.

**Keywords:** frontal polymerization; acrylamide; sodium acrylate; acrylic acid; polyelectrolyte hydrogel; water absorption.

### Образец цитирования:

Соломевич ЕО, Гринюк ЕВ, Круль ЛП. Стабилизация фронта при фронтальной сополимеризации акриламида с акрилатом натрия в водных растворах. *Журнал Белорусского государственного университета. Химия.* 2020;1:40–47.  
<https://doi.org/10.33581/2520-257X-2020-1-40-47>

### For citation:

Salamevich AA, Hryniuk YV, Krul LP. Stabilization of the front at frontal copolymerization of acrylamide with sodium acrylate in aqueous solutions. *Journal of the Belarusian State University. Chemistry.* 2020;1:40–47. Russian.  
<https://doi.org/10.33581/2520-257X-2020-1-40-47>

### Авторы:

**Елена Олеговна Соломевич** – аспирантка кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета. Научный руководитель – Е. В. Гринюк.  
**Евгений Валерьевич Гринюк** – кандидат химических наук; доцент кафедры радиационной химии и химико-фармацевтических технологий химического факультета.  
**Леонид Петрович Круль** – доктор химических наук; профессор кафедры высокомолекулярных соединений.

### Authors:

**Alena A. Salamevich**, postgraduate student at the department of high molecular weight compounds, faculty of chemistry.  
[elena.solomevich@mail.ru](mailto:elena.solomevich@mail.ru)  
**Yauheni V. Hryniuk**, PhD (chemistry); associate professor at the department of radiation chemistry and chemical technology, faculty of chemistry.  
[grinyuk@tut.by](mailto:grinyuk@tut.by)  
**Leonid P. Krul**, doctor of science (chemistry); professor at the department of high molecular weight compounds, faculty of chemistry.  
[krul@bsu.by](mailto:krul@bsu.by)

## Введение

Полимеры на основе акриламида (АА) широко применяются в различных областях промышленности. Они могут быть использованы для точечной доставки лекарств в фармацевтической промышленности [1], в сельском хозяйстве [2], в качестве флокулянтов для очистки сточных вод [3] и в нефтеперерабатывающей промышленности [4]. Для улучшения физико-химических свойств полимеров и гидрогелей на основе АА применяют ионный сомономер, например акрилат натрия [5].

Основным методом получения сополимеров АА в настоящее время является традиционный способ радикальной полимеризации. В гораздо меньшей степени используется фронтальная полимеризация (ФП) [6]. Последняя представляет собой способ синтеза полимеров, отличающийся от других режимов полимеризации наличием подвижной узкой (обычно плоской) пространственной границы, в которой происходит реакция (фронт полимеризации) и которая отделяет исходный мономер от конечного продукта. За последние 30 лет сформировалось активно развивающееся научное направление по изучению ФП [7; 8]. Необходимые условия ее протекания: во-первых, экзотермичность реакции полимеризации, а во-вторых, низкая скорость протекания реакции полимеризации мономеров (или ее отсутствие) при начальной (комнатной) температуре и высокая скорость реакции при температуре фронта, так чтобы скорость тепловыделения превышала скорость теплопотерь. При соблюдении этих условий реакция ФП после инициирования не требует дополнительного нагревания, что уменьшает энергозатраты. В этой связи ФП является очень перспективным подходом к синтезу полимеров и гидрогелей.

Анализ литературы показал, что исследователи ФП недостаточно внимания уделяют ее осуществлению в водных растворах. Отчасти это объясняется низкой вязкостью воды и относительно невысокой температурой ее кипения, что приводит к возникновению конвективного массопереноса и, следовательно, теплопереноса вблизи движущегося полимеризационного фронта и его искажению. В конечном итоге это может обусловить затухание самопроизвольного процесса полимеризации. Избежать затухания фронта полимеризации можно путем применения различных способов его стабилизации.

Цель работы – изучение процесса ФП АА с акрилатом натрия (ANa), стабилизированной за счет ее осуществления в растворе высокомолекулярного полиакриламида и в присутствии добавок аэросила, а также физико-химических свойств полученных продуктов.

## Материалы и методы

При выполнении работы использовались следующие соединения: АА с содержанием основного вещества 98,0 % производства фирмы *Sigma-Aldrich* (Германия); акриловая кислота (АК) фирмы *Sigma-Aldrich* марки «ч.»; персульфат аммония (ПСА) по ГОСТ 20478-75 (с изменениями 1, 2, 3) марки «х. ч.» без предварительной очистки; гидроксид натрия производства ЗАО «Пять океанов» марки «ч. д. а.»; аэросил фирмы *Sigma-Aldrich*, средний размер частиц наполнителя 12 нм. В качестве реакционной среды применялись водные растворы промышленного полиакриламида (ПАА) с молекулярной массой  $4 \cdot 10^6$  производства компании *SNF Floerger* (Франция) марки «FP-307», концентрация растворов ПАА составляла 0,5 и 1,0 %.

Все реакции ФП проводились при комнатной температуре и атмосферном давлении. Растворы готовились весовым методом, т. е. путем растворения точно взвешенных навесок в мерной посуде. Изначально АА растворяли в заранее отмеренном количестве ПАА. Затем полученный раствор смешивали с рассчитанным количеством АК. В целях нейтрализации последней вводили эквивалентное количество NaOH. К гомогенному раствору мономеров добавляли инициатор. Мольная доля мономеров в растворе составляла 25 %.

Для исследования влияния содержания каждого из компонентов на протекание процесса сополимеризации и физико-химические характеристики сополимеров варьировались мольные соотношения мономеров, мольная концентрация инициатора в реакционной смеси, концентрация водных растворов высокомолекулярного ПАА.

В качестве инициатора использовался ПСА, который при разложении не образует побочных летучих продуктов, следовательно, не возникают пузырьки, которые могут мешать измерению скорости реакции и влиять на стабильность фронта. Концентрации ПСА составляли 0,01–1,0 % от общего мольного содержания мономеров в системе. Мольное соотношение мономеров АА и ANa варьировалось от 95 : 5 до 75 : 25.

Все эксперименты проводились в запаянных с одного конца стеклянных трубках с внутренним диаметром 5 мм. Реакции инициировались путем нагрева верхних слоев раствора мономеров в трубке. Из-за наличия конвекции в случае восходящего или горизонтально распространяющегося фронта,

которая мешает его продвижению [9], все эксперименты проводились для нисходящих фронтов реакции, скорость которых находили измерением расстояния, пройденного фронтом за определенный временной интервал. Температуры полимеризационных фронтов находили при помощи термодпары К-типа, погруженной в раствор мономеров. Для определения водопоглощающей способности геля навеску высушенного при 40 °С образца массой 0,05–0,2 г помещали в 600 мл дистиллированной воды и выдерживали в течение не менее 48 ч при 20 °С, после чего набухший гель отфильтровывали через тканевый фильтр и взвешивали. Степень набухания вычисляли как отношение разности масс полученного геля и высушенного геля к массе высушенного геля после набухания. Для определения величины гель-фракции полиэлектролитного гидрогеля (ПЭГГ) после вымывания из него золь-фракции и неорганических примесей ПЭГГ отделяли от не связанной с ним воды и высушивали при 80 °С. Искомую величину вычисляли как отношение массы высушенного геля к массе исходной навески, взятой для набухания. Определение молекулярной массы (ММ) полученных сополимеров проводили вискозиметрическим методом [9].

### Результаты и их обсуждение

Изучались процесс ФП АА с АNa в водном растворе высокомолекулярного ПАА и в присутствии добавок аэросила, а также продукты сополимеризации. Ранее в Белорусском государственном университете были выполнены исследования по сополимеризации АА с 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислотой и АА с АNa во фронтальном режиме в водных растворах при отсутствии стабилизирующих фронт добавок [6; 9]. Предполагалось, что проведение ФП в относительно высоковязком растворе высокомолекулярного ПАА и в присутствии добавок аэросила позволит стабилизировать фронт за счет ослабления эффектов конвективного массо- и теплопереноса и снизить необходимую для осуществления процесса концентрацию инициатора [10].

При осуществлении ФП для каждой реакции отмечалось изменение температуры в определенной точке реакционной трубки с течением времени. На основании этих данных строились температурные профили процесса сополимеризации. Типичный вид такого профиля в одном из экспериментов представлен на рис. 1, из которого видно, что температура резко возрастает при приближении полимеризационного фронта к термодпаре, что подтверждает протекание процесса во фронтальном режиме. Аналогичные по виду температурные профили были получены для всех проведенных в работе экспериментов по ФП.

Еще одним подтверждением протекания сополимеризации во фронтальном режиме является зависимость пройденного фронтом расстояния от времени (рис. 2), которая свидетельствует о том, что скорость распространения фронта в ходе процесса остается постоянной.

На начальном этапе работы в качестве реакционной среды был выбран водный раствор ПАА в концентрации 0,5 %. Результаты определения температуры и скорости фронтов при проведении фронтальной сополимеризации АА с АNa при различных мольных соотношениях мономеров и концентрациях инициатора представлены в табл. 1.

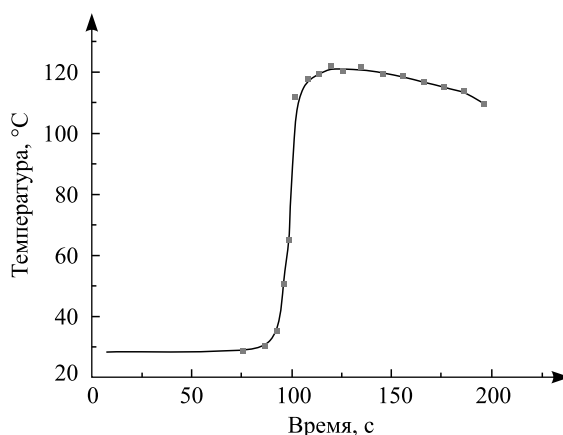


Рис. 1. Температурный профиль ФП АА с АNa в 1 % водном растворе ПАА. Мольное соотношение АА и АNa составляет 90 : 10, концентрация инициатора 1 %  
Fig. 1. The temperature profile of the FP of AA with ANa in a 1 % aqueous solution of PAA. The molar ratio of AA and ANa is 90 : 10, the initiator concentration is 1 %

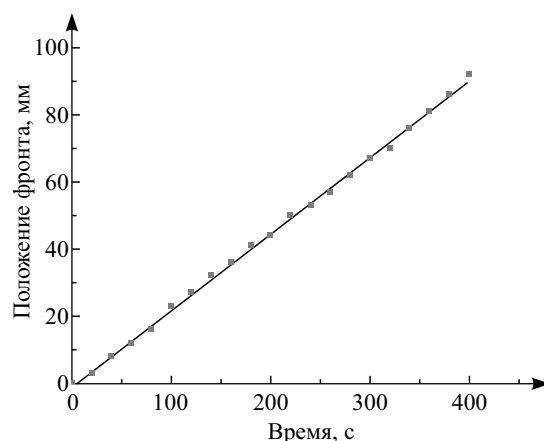


Рис. 2. Зависимость пройденного фронтом расстояния от времени при ФП АА с АNa в 1 % водном растворе ПАА. Мольное соотношение АА и АNa составляет 90 : 10, концентрация инициатора 1 %

Fig. 2. Dependence of the distance traveled by the front on time with FP AA with ANa in a 1 % aqueous PAA solution. The molar ratio of AA : ANa is 90 : 10, the initiator concentration is 1 %

Таблица 1

**Макрокинетические параметры фронта при сополимеризации АА с АNa в водном растворе ПАА марки «FP-307» с концентрацией 0,5 % при различном мольном соотношении мономеров**

Table 1

**Macrokinetic parameters of the front during copolymerization of acrylamide with sodium acrylate in an aqueous solution of polyacrylamide FP-307 with a concentration of 0.5 % at different molar ratios of monomers**

Концентрация инициатора, %	Мольное соотношение АА и АNa							
	95 : 5		90 : 10		85 : 15		75 : 25	
	$v$ , см/мин	$T$ , °C	$v$ , см/мин	$T$ , °C	$v$ , см/мин	$T$ , °C	$v$ , см/мин	$T$ , °C
0,10	0,47	113	0,28	112	–	–	–	–
0,20	0,60	114	0,57	114	0,49	125	–	–
0,50	1,21	118	0,80	122	1,09	128	0,81	119
1,00	1,37	123	0,90	127	1,27	129	1,69	122

Примечание.  $v$  и  $T$  – скорость и температура фронта соответственно.

Из табл. 1 видно, что при увеличении концентрации инициатора наблюдается повышение скорости и температуры фронта. Также видно, что при концентрации инициатора 0,1 % и соотношении мономеров 85 : 15 и 75 : 25 реакция сополимеризации во фронтальном режиме не протекала. При соотношении мономеров 75 : 25 ФП была осуществлена только при концентрации ПСА 0,5 % и более. Это говорит о том, что увеличение содержания АNa в исходной смеси мономеров негативно отражается на возможности осуществления сополимеризации во фронтальном режиме.

Во всех экспериментах, проведенных в растворах ПАА с концентрацией 0,5 %, были получены нерастворимые в воде ПЭГГ. Образование последних обусловлено сшиванием образующихся сополимеров за счет межмолекулярной имидизации, протекающей при относительно высоких температурах (рис. 3) [11].

Учитывая области применения ПЭГГ, можно выделить их наиболее важные характеристики: водопоглощающую способность и величины гель-фракций. Как видно из табл. 2, не наблюдается однозначной зависимости водопоглощения полученных ПЭГГ от концентрации инициатора. При этом величины гель-фракций, особенно при низких концентрациях инициатора, остаются относительно невысокими. Связано это, по-видимому, с тем, что из-за более низких скоростей и температур фронта продуктами реакции сополимеризации в большей мере являются несшитые сополимеры АА с АNa.

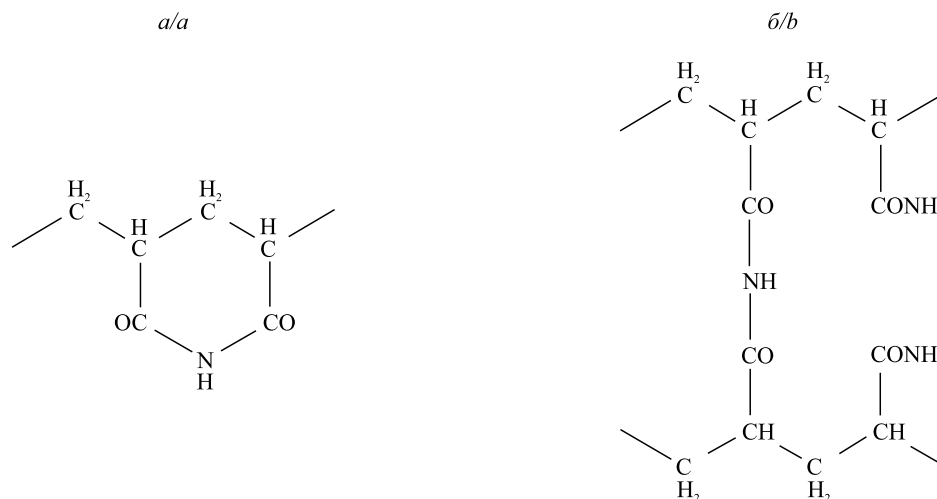


Рис. 3. Схематическое изображение внутримолекулярной (а) и межмолекулярной (б) имидной связи

Fig. 3. Schematic representation of intramolecular (a) and intermolecular (b) imide bonds

В дальнейших экспериментах в качестве реакционной среды использовали водный раствор ПАА в концентрации 1 %. Из табл. 3 видно, что при увеличении концентрации инициатора наблюдается рост скорости фронта, так же как и в предыдущих опытах. При концентрации инициатора 0,1 % и соотношении мономеров 95 : 5 и 90 : 10 реакция сополимеризации во фронтальном режиме не протекала, в отличие от реакций, проведенных в растворах с более низкой концентрацией ПАА, а именно 0,5 %.

Таблица 2

**Водопоглощение и гель-фракции ПЭГГ,  
полученных при сополимеризации АА с АNa  
в водном растворе ПАА марки «FP-307» с концентрацией 0,5 %**

Table 2

**The values of water absorption and gel fraction of polyelectrolyte hydrogel  
obtained by copolymerization of AA with ANa in an aqueous  
solution of polyacrylamide FP-307 with a concentration of 0.5 %**

Характеристики ПЭГГ	Мольное соотношение мономеров АА и АNa			
	95 : 5	90 : 10	85 : 15	75 : 25
Концентрация инициатора 0,10 %				
Водопоглощение, г/г	830	1359	–	–
Гель-фракция	0,12	0,24	–	–
Концентрация инициатора 0,20 %				
Водопоглощение, г/г	1437	1393	594	–
Гель-фракция	0,16	0,33	0,65	–
Концентрация инициатора 0,50 %				
Водопоглощение, г/г	1085	2090	1555	2138
Гель-фракция	0,38	0,36	0,47	0,55
Концентрация инициатора 1,00 %				
Водопоглощение, г/г	531	679	1114	284
Гель-фракция	0,48	0,55	0,42	0,81

Таблица 3

**Макрокинетические параметры фронта при сополимеризации АА с АNa в водном растворе ПАА марки «FP-307» с концентрацией 1 % при различном мольном соотношении мономеров**

Table 3

**Macrokinetic parameters of the front during copolymerization of acrylamide with sodium acrylate in an aqueous solution of polyacrylamide FP-307 with a concentration of 1 % at different molar ratios of monomers**

Концентрация инициатора, %	Мольное соотношение мономеров АА и АNa			
	95 : 5		90 : 10	
	<i>v</i> , см/мин	<i>T</i> , °С	<i>v</i> , см/мин	<i>T</i> , °С
0,10	–	–	–	–
0,20	0,70	120	–	–
0,50	1,65	116	1,01	122
1,00	1,76	125	1,42	121

Примечание. *v* и *T* – скорость и температура фронта соответственно.

Продуктами этих экспериментов также являлись ПЭГГ, водопоглощающая способность и величины гель-фракций которых представлены в табл. 4.

Таблица 4

**Водопоглощения и гель-фракции ПЭГГ, полученных при сополимеризации АА с АNa в водном растворе ПАА марки «FP-307» с концентрацией 1 %**

Table 4

**The values of water absorption and gel fraction of polyelectrolyte hydrogel obtained by copolymerization of acrylamide with sodium acrylate in an aqueous solution of polyacrylamide FP-307 with a concentration of 1 %**

Концентрация инициатора, %	Мольное соотношение мономеров АА и АNa			
	95 : 5		90 : 10	
	Водопоглощение, г/г	Гель-фракция	Водопоглощение, г/г	Гель-фракция
0,10	–	–	–	–
0,20	1378	0,25	–	–
0,50	1017	0,41	1907	0,47
1,00	403	0,39	938	0,45

Сравнивая данные табл. 1 и 2 с данными табл. 3 и 4, можно заключить, что повышение концентрации раствора ПАА, используемого в качестве реакционной среды для ФП, не приводит к желаемому снижению необходимой минимальной концентрации инициатора. Так, при соотношении мономеров АА и АNa, равном 90 : 10, в 0,5 % растворе ПАА процесс протекает при 0,1 % концентрации ПСА, а в 1 % растворе ПАА реакция во фронтальном режиме идет только при концентрации инициатора 0,5 %.

В дальнейшем для стабилизации фронта при сополимеризации АА с АNa использовали добавку аэросила. При этом в качестве реакционной среды применялся 0,5 % водный раствор ПАА. Концентрация добавки аэросила составляла 1,5–3,0 %.

Из табл. 5 видно, что осуществление фронтальной сополимеризации АА с АNa в присутствии добавки аэросила позволило провести реакцию при такой концентрации инициатора, при которой она не протекала в отсутствие указанной добавки. Также видно, что скорость фронта немного снижается с повышением концентрации аэросила, что связано, по-видимому, с увеличением вязкости реакционной смеси и уменьшением влияния конвективного массопереноса.



Таблица 5

**Макрокинетические параметры фронта при сополимеризации АА с АNa (90 : 10)  
в присутствии добавок аэросила различной концентрации**

Table 5

**Macrokinetic parameters of the front during  
copolymerization of acrylamide with sodium acrylate (90 : 10)  
in the presence of aerosil additives of various concentrations**

Параметры фронта	Концентрация аэросила, %			
	1,5	2,0	2,5	3,0
Концентрация инициатора 0,010 %				
Скорость, см/мин	–	1,53	1,31	–
Время, °С	–	151	162	–
Концентрация инициатора 0,025 %				
Скорость, см/мин	1,25	1,10	0,89	–
Время, °С	164	168	145	–

Предполагалось, что аналогично предыдущим экспериментам продуктами реакций сополимеризации в присутствии добавок аэросила будут ПЭГГ. В связи с этим для всех продуктов реакции были определены водопоглощающие характеристики и гель-фракции (табл. 6).

Таблица 6

**Водопоглощение и гель-фракции ПЭГГ, полученных  
при сополимеризации АА с АNa (90 : 10) в присутствии добавки аэросила**

Table 6

**The values of water absorption and gel fractions of polyelectrolyte hydrogels  
during copolymerization of acrylamide with sodium acrylate (90 : 10) obtained with the addition of aerosil**

Характеристики ПЭГГ	Концентрация аэросила, %			
	1,5	2,0	2,5	3,0
Концентрация инициатора 0,010 %				
Водопоглощение, г/г	–	2900	2010	–
Гель-фракция	–	0,02	0,10	–
Концентрация инициатора 0,025 %				
Водопоглощение, г/г	2100	4600	1950	–
Гель-фракция	0,007	0,005	0,14	–

Из табл. 6 следует, что ПЭГГ обладают очень низкими величинами гель-фракций, т. е. продукты, образованные при фронтальной сополимеризации в присутствии добавок аэросила, представляют собой практически полностью несшитые сополимеры АА с АNa.

Для полученных сополимеров вискозиметрическим методом были определены молекулярные массы. Так, для концентрации добавки аэросила 1,5 % при сополимеризации АА с АNa в мольном соотношении 95 : 5 и 90 : 10 средневискозиметрические молекулярные массы сополимеров составили  $5,7 \cdot 10^5$  и  $4,1 \cdot 10^5$  соответственно.

Таким образом, при сополимеризации АА с АNa во фронтальном режиме в водном растворе ПАА марки «FP-307» в присутствии аэросила, несмотря на высокую температуру процесса, образуются сополимеры с относительно высокой молекулярной массой. Поскольку массовая доля ПАА в навеске сополимера, взятой для приготовления раствора для вискозиметрических измерений, составляла менее 0,1 %, такое небольшое его количество не могло оказать существенного влияния на результаты определения молекулярной массы.

## Заключение

Изучен процесс фронтальной сополимеризации акриламида с акрилатом натрия в водном растворе высокомолекулярного карбоксилированного полиакриламида и в присутствии добавок аэросила. Показано, что проведение такой сополимеризации способствует стабилизации движущегося фронта и снижению минимальной концентрации инициатора персульфата аммония, необходимой для осуществления процесса. При этом концентрация водного раствора полиакриламида не должна превышать 0,5 %, а содержание добавки аэросила – не превосходить 2,5 %. Установлено, что присутствие аэросила способствует также образованию преимущественно несшитых сополимеров.

## Библиографические ссылки

1. Gavini E, Mariani A, Rassu G, Bidali S, Spada G, Bonferoni MC, Giunchedi P. Frontal polymerization as a new method for developing drug controlled release systems (DCRS) based on polyacrylamide. *European Polymer Journal*. 2009;45(3):690–699. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2008.12.017.
2. Rudzinski WE, Dave AM, Vaishnav UH, Kumbar SG, Kulkarni AR, Aminahavi TM. Hydrogels as controlled release devices in agriculture. *Designed Monomers and Polymers*. 2002;5(1):39–65. DOI: 10.1163/156855502760151580.
3. Куренков ВФ. Полиакриламидные флокулянты. *Соросовский образовательный журнал*. 1997;3(7):57–63.
4. Sydansk RD, Smith TB. Field testing of a new conformance-improvement-treatment chromium(III) gel technology. In: *Proceedings of SPE/DOE Sixth Symposium on Enhanced Oil Recovery; 1988 April 17–20; Tulsa, Oklahoma, USA*. Tulsa: Society of Petroleum Engineers; 1988. Article ID: 17383.
5. Bomze D, Knaack P, Liska R. Successful radical induced cationic frontal polymerization of epoxy-based monomers by C—C labile compounds. *Polymer Chemistry*. 2015;6:8161–8167. DOI: 10.1039/C5PY01451D.
6. Гринюк ЕВ, Круль ЛП. Фронтальная сополимеризация акриламида с 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислотой и с акрилатом натрия в водных растворах. *Полимерные материалы и технологии*. 2016;2(1):48–53.
7. Li S, Wang H, Huang W. Facile preparation of pH-sensitive poly(acrylic acid-co-acrylamide)/SiO<sub>2</sub> hybrid hydrogels with high strength by in situ frontal polymerization. *Colloid and Polymer Science*. 2013;292(1):107–113. DOI: 10.1007/s00396-013-3050-6.
8. Scognamillo S, Bounds Ch, Thakuri S, Mariani A, Wu Q, Pojman JA. Frontal cationic curing of epoxy resins in the presence of defoaming or expanding compounds. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014;131(11):40339. DOI: 10.1002/app.40339.
9. Гринюк ЕВ, Дук ОГ, Шереш ИВ, Круль ЛП. Получение сополимеров акриламида и 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислоты методом фронтальной полимеризации. *Журнал прикладной химии*. 2014;87(12):1841–1845.
10. Тоноян АО, Шахназарян МА, Антонян СБ, Хачатрян АГ, Давтян СП. Фронтальная сополимеризация акриламида с метилметакрилатом и стиролом в присутствии наночастиц SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>. Теплофизические свойства полученных нанокомпозитов. *Известия Национальной академии наук Республики Армения и Государственного инженерного университета Армении. Серия технических наук*. 2013;66(1):45–52.
11. Куренков ВФ. Водорастворимые полимеры акриламида. *Соросовский образовательный журнал*. 1997;3(5):48–53.

## References

1. Gavini E, Mariani A, Rassu G, Bidali S, Spada G, Bonferoni MC, Giunchedi P. Frontal polymerization as a new method for developing drug controlled release systems (DCRS) based on polyacrylamide. *European Polymer Journal*. 2009;45(3):690–699. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2008.12.017.
2. Rudzinski WE, Dave AM, Vaishnav UH, Kumbar SG, Kulkarni AR, Aminahavi TM. Hydrogels as controlled release devices in agriculture. *Designed Monomers and Polymers*. 2002;5(1):39–65. DOI: 10.1163/156855502760151580.
3. Kurenkov VF. Polyacrylamides flocculants. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*. 1997;3(7):57–63. Russian.
4. Sydansk RD, Smith TB. Field testing of a new conformance-improvement-treatment chromium(III) gel technology. In: *Proceedings of SPE/DOE Sixth Symposium on Enhanced Oil Recovery; 1988 April 17–20; Tulsa, Oklahoma, USA*. Tulsa: Society of Petroleum Engineers; 1988. Article ID: 17383.
5. Bomze D, Knaack P, Liska R. Successful radical induced cationic frontal polymerization of epoxy-based monomers by C—C labile compounds. *Polymer Chemistry*. 2015;6:8161–8167. DOI: 10.1039/C5PY01451D.
6. Grinyuk EV, Krul LP. Frontal copolymerization of acrylamide with 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid and sodium acrylate in aqueous solutions. *Polimernye materialy i tekhnologii*. 2016;2(1):48–53. Russian.
7. Li S, Wang H, Huang W. Facile preparation of pH-sensitive poly(acrylic acid-co-acrylamide)/SiO<sub>2</sub> hybrid hydrogels with high strength by in situ frontal polymerization. *Colloid and Polymer Science*. 2013;292(1):107–113. DOI: 10.1007/s00396-013-3050-6.
8. Scognamillo S, Bounds Ch, Thakuri S, Mariani A, Wu Q, Pojman JA. Frontal cationic curing of epoxy resins in the presence of defoaming or expanding compounds. *Journal of Applied Polymer Science*. 2014;131(11):40339. DOI: 10.1002/app.40339.
9. Grinyuk EV, Duk OG, Sheres IV, Krul LP. Preparation of copolymers of acrylamide and 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid by frontal polymerization. *Zhurnal prikladnoi khimii*. 2014;87(12):1841–1845. Russian.
10. Tonoyan AO, Shakhnazaryan MA, Antonyan SB, Khachatryan AG, Davtyan SP. Frontal copolymerization of acrylamide with methyl methacrylate and styrene in the presence of nanoparticles SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Respubliki Armeniya i Gosudarstvennogo inzhenernogo universiteta Armenii. Seriya tekhnicheskikh nauk*. 2013;66(1):45–52. Russian.
11. Kurenkov VF. Water-soluble polymers of acrylamide. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*. 1997;3(5):48–53. Russian.

Статья поступила в редакцию 03.12.2019.  
Received by editorial board 03.12.2019.