

**Амфифильные свойства 2-(акриламидо)додекансульфокислоты
и ее водорастворимых сополимеров с алкоксиолиго(этиленгликоль)метакрилатами**
**Amphiphilic properties of 2-(acrylamido)dodecanesulfonic acid and its water-soluble
copolymers with alkoxyoligo(ethylene glycol)methacrylates**

*М.В. САВИНОВА, И.Р. АРИФУЛЛИН, О.А. КАЗАНЦЕВ,
М.Н. ЧУБЕНКО, Н.С. КАМОРИНА, Е.А. ТИМЧЕНКО*

*M.V. SAVINOVA, I.R. ARIFULLIN, O.A. KAZANTSEV,
M.N. CHUBENKO, N.S. KAMORINA, E.A. TIMCHENKO*

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russia
mash91@mail.ru

Для амфифильного сульфосодержащего макромономера – 2-(акриламидо)додекансульфокислоты (AAC₁₂СК) – исследованы поверхностно-активные свойства (в водных растворах и водно-гексановых смесях), синтезированы сополимеры этого сурфопера с олиго(этиленгликоль)метакрилатами и определено влияние содержания сульфозвеньев в полученных молекулярных щетках на их термочувствительные свойства в водных и водно-солевых растворах.

Ключевые слова: 2-акриламидоалкансульфокислота, олиго(этиленгликоль)метакрилаты, амфифильные свойства, гидрофильно-липофильный баланс, водные растворы, фазовые переходы

The surface-active properties (in aqueous solutions and water-hexane mixtures) of the amphiphilic sulfo-containing macromonomer 2-(acrylamido)dodecanesulfonic acid (AAC₁₂SA) were studied; copolymers of this surfomer with oligo(ethylene glycol)methacrylates were synthesized. The effect of the content of sulfonic units in the obtained molecular brushes on their thermosensitive properties in water and water-salt solutions was determined.

Keywords: 2-acrylamidoalkanesulfonic acid, oligo(ethylene glycol)methacrylates, amphiphilic properties, hydrophilic-lipophilic balance, aqueous solutions, phase transitions

DOI: 10.35164/0554-2901-2023-7-8-26-30

Введение

В последние десятилетия интенсивно исследуются водорастворимые сополимеры на основе метоксиолиго(этиленгликоль)метакрилатов (МОЭГМ) и высших алкоксиолиго(этиленгликоль)метакрилатов (АОЭГМ) [1–4]. Интерес к указанным сополимерам связан с их термочувствительными свойствами и широкими возможностями варьирования их амфифильных свойств (путем регулирования архитектуры макромолекул, строения и соотношения гидрофильных и гидрофобных фрагментов в боковых цепочках) [4, 5]. В частности, сополимеры МОЭГМ и высших АОЭГМ, содержащих *n*-алкильные группы C₁₂ и выше, при определенных условиях образуют в водных растворах устойчивые мономолекулярные мицеллы «цветочного» типа [4, 6], предлагаемые в качестве наноконтейнеров для доставки лекарственных средств в организм человека [7]. Наиболее перспективным способом синтеза таких полимерных щеток является подход, известный как «прививка через» (радикальная (со)полимеризация амфифильных макромономеров), позволяющий получать молекулярные щетки с заданной, в том числе высокой, плотностью прививки боковых цепей [8–10]. Макромономеры МОЭГМ и АОЭГМ относятся к классу сурфоперов, т.е. мономеров, обладающих поверхностно-активными свойствами, что влияет на особенности их полимеризации. В работах [11, 12] показана связь амфифильных характеристик МОЭГМ и высших АОЭГМ и их способности к ассоциации в водных растворах, а также выявлена хорошая корреляция между температурами фазовых переходов (значениями низшей критической температуры растворения) их сополимеров в водных растворах и количественными амфифильными характеристиками исходных сурфоперов.

Введение в (со)полимеры АОЭГМ и МОЭГМ сульфокислотных групп может придать молекулярным щеткам дополнительные ин-

тересные свойства, например, pH-чувствительные [13]. Для этого может быть использована сополимеризация АОЭГМ и МОЭГМ с акриламидосульфокислотными производными. Наиболее известным из них является 2-акриламидо-2-метилпропансульфокислота, водорастворимые сополимеры которой применяются в качестве флокулянтов [14], стабилизаторов дисперсных систем [15, 16], суперпластификаторов для бетонов [17], а также в процессах нефтедобычи [18–20]. В последние годы повысился интерес к более амфифильным мономерам такого типа – высшим акриламидоалкансульфокислотам, которые получают взаимодействием высших α -олефинов, акрилонитрила и серной кислоты или олеума [21–25]. Сообщается о синтезе гидрофобно-модифицированных сополимеров акриламида и натриевой соли 2-(акриламидо)тетрадекансульфокислоты [24], стимулчувствительных «умных» флокулянтов на основе акриламида и 2-(акриламидо)додекансульфоната натрия [21], их терполимеров с метилакрилатом, потенциально применимых в процессах нефтедобычи [26].

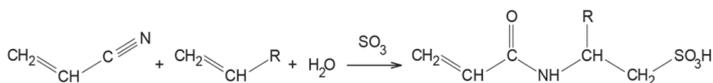
Высшие акриламидоалкансульфокислоты являются амфифильными соединениями, что должно влиять на свойства как самих мономеров, так и сополимеров, содержащих такие звенья. Целью данной работы является исследование амфифильных свойств одного из представителей высших акриламидных сульфокислот – 2-(акриламидо)додекансульфокислоты (AAC₁₂СК), а также определение влияния введения звеньев этого сурфопера на амфифильные свойства молекулярных щеток на основе (со)полимеров МОЭГМ и АОЭГМ.

Экспериментальная часть

В работе были использованы оксигетилированные метакрилаты общей формулы C_nE_mM, где *n* – число атомов углерода алкильного радикала спиртовой части молекулы, *m* – среднее число олигоэтиленгликолевых звеньев: МОЭГМ (C₁E₁₁M, *n* = 11) марки

Bisomer MPEG550MA фирмы Cognis (Германия) и высший АОЭГМ с алкильным фрагментом C12–C14 (C₁₂₋₁₄E₇M, $n = 7$), синтезированный из промышленных оксипропанов спиртов марки АЛМ-7 производства ООО «Завод синтанолов» (Россия) методом этерификации метакриловой кислоты по методике [12]. В качестве низкомолекулярного сульфосодержащего ПАВ был использован промышленный продукт – алкилбензолсульфокислота (АБСК, R_CH₄SO₃H, R=C₁₂H₂₅) марки А производства ООО «КИНЕФ» ПО НПЗ «Киришинефтеоргсинтез», а также ее натриевая соль (АБСК-Na).

Смесь акриламидоалкансульфокислот общего строения CH₂=CHCONHCH(R)CH₂SO₃H, где R=C₁₀H₂₁-C₁₂H₂₅, была синтезирована взаимодействием акрилонитрила с высшими α-олефинами фракции C12–C14 (70:30) и олеумом (реакция представлена на рис. 1) по методике [27]. С учетом преобладания в замещенной амидной группе алкильной группы C12, для упрощения смесь мономерных кислот названа 2-(акриламидо)додекансульфокислота и обозначена AAC₁₂СК. Полученная смесь мономерных сульфокислот представляет собой кристаллический порошок белого цвета, хорошо растворимый в воде, ДМФА, ДМСО, и нерастворимый в ацетонитриле, толуоле, гексане, 1,4-диоксане.



где R = C₁₀H₂₁-C₁₂H₂₅

Рис. 1. Реакция синтеза AAC₁₂СК взаимодействием высших α-олефинов фракции C12–C14 (70:30) с акрилонитрилом и олеумом.

Для анализа синтезированного продукта были использованы ¹H ЯМР- и ИК-спектроскопия, соответствующие спектры представлены на рисунках 2 и 3. На ¹H-ЯМР спектре в D₂O наблюдаются следующие сигналы: H₂C= (6,1–5,96 м.д. – сигнал а), =CH– (5,58–5,55 м.д. – сигнал б), протон при третичном атоме углерода (4,15 м.д. – сигнал г), –CH₂–S– (2,95–2,84 м.д. – сигнал д), –CH–CH₂–CH₂– (1,52 м.д. – сигнал е), метиленовые протоны алкильной группы – сигнал ж (1,08–1,02 м.д.), –CH₂–CH₂–CH₃ (1,37 м.д. – сигнал з) и –CH₃ (0,63–0,60 м.д. – сигнал и). На ИК-спектре AAC₁₂СК идентифицированы следующие характерные сигналы: 3100–3500, 2854–2952 (О–Н, N–H), 2900–2880 (C_{трет}), 1667 (C=O), 1617 (C=C), 1560 (N–H), 1380 (C_{трет}), 1104, 1004 (–SO₃H), 720 (–(CH₂)_n) см⁻¹. Таким образом, данные ИК и ¹H-ЯМР спектров подтверждают структуру полученного продукта.

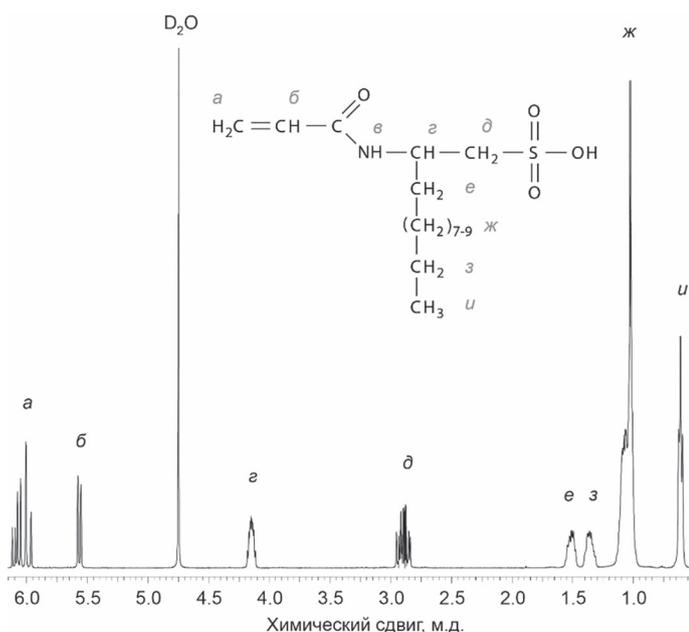


Рис. 2. ¹H ЯМР-спектр AAC₁₂СК в D₂O.

Все исследуемые молекулярные щетки, за исключением C₁E₁₁M-AAC₁₂СК (50:50), были получены методом фотоиндуцированной контролируемой радикальной полимеризации (КРПИ) по механизму обратимого присоединения-фрагментации (RAFT-полимеризация). Синтез проводился под действием синего

светодиодного света с использованием 4-циано-4-(додецилсульфанилтиокарбонил)сульфанилпентановой кислоты (ЦДК) в качестве агента обратной передачи цепи в смеси 1,4-диоксан-вода (95:5 масс.%) в течение 2 ч. Общая концентрация мономеров составила 50 масс.%, молярное соотношение [M]₀:[ЦДК]₀ = 200:1. Источником света служили светодиоды 5050 SMD (60 светодиодов на метр, максимальная мощность 14,4 Вт/м при 12 В) синего цвета (λ_{max} = 470 нм).

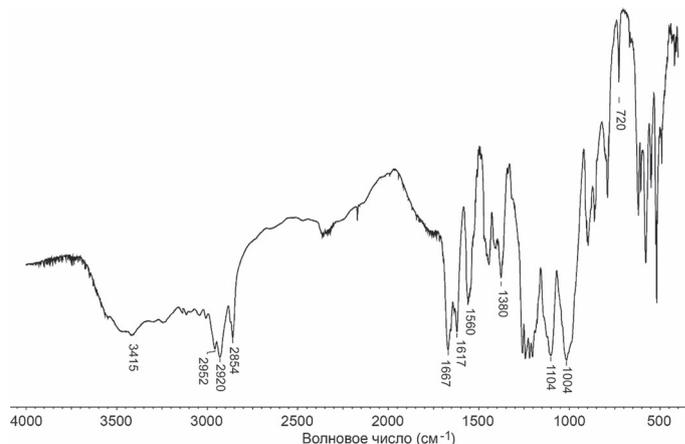


Рис. 3. ИК-спектр AAC₁₂СК.

Синтез сополимера C₁E₁₁M-AAC₁₂СК (50:50) осуществлялся методом неконтролируемой (НРП) сополимеризации в воде в присутствии 0,5 мол.% персульфата калия в качестве инициатора и 0,8 масс.% триглицеролевой кислоты в качестве регулятора молекулярной массы при температуре 60°C и начальной концентрации мономеров 35 масс.% в течение 4 ч.

Схема реакции синтеза полимерных молекулярных щеток на основе МОЭГМ, АОЭГМ и сульфосодержащего мономера в общем виде представлена на рис. 4. Конверсия сомономеров составила 53–85%, очистка полученных сополимеров от непрореагировавших мономеров осуществлялась с помощью диализа против воды.

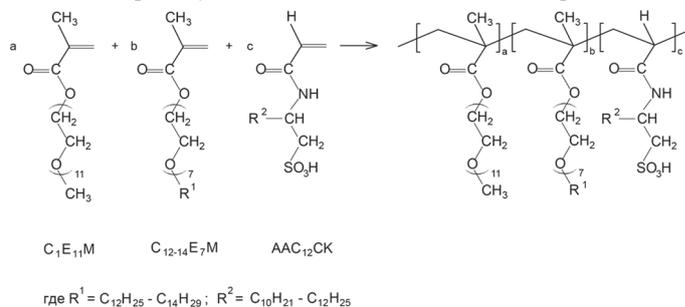


Рис. 4. Реакция синтеза сополимеров C₁E₁₁M-C₁₂₋₁₄E₇M-AAC₁₂СК.

Молекулярно-массовые характеристики полимеров определялись методом гель-проникающей хроматографии с использованием прибора «Хромос ЖК-301», оснащенного рефрактометрическим детектором и колонками Phenogel фирмы Phenomenex (элюент – тетрагидрофуран), для калибровки использовались полистирольные стандарты.

Поверхностное натяжение водных растворов исследованных сурфомеров определялось стагмометрическим методом [28]. Измерения межфазного натяжения сурфомеров и их сополимеров на границе раздела гексан–вода проводились согласно [29]. Значения температуры фазового перехода (ТФП) молекулярных щеток, а именно нижней критической температуры растворения, определялись по положению максимума первой производной S-образной зависимости оптического пропускания водных растворов полимеров от температуры. Оптическое светопропускание измеряли с использованием фотоколориметра КФК-2 на длине волны 670 нм при скорости нагревания растворов 1–2°C/мин. Измерения осуществлялись в воде и 0,1 М NaCl при концентрации полимеров 1 масс.%.

Обсуждение результатов

Для оценки амфифильных свойств AAC₁₂СК были получены изотермы поверхностного натяжения водных растворов этого

мономера и изотермы межфазного натяжения на границе вода–гексан в его присутствии (рис. 5). Стоит отметить, что в отделенной гексановой фазе ААС₁₂СК практически не был обнаружен, что говорит о его низкой растворимости в данном растворителе.

Для сравнения в аналогичных условиях были получены данные для широко применяемого сульфосодержащего промышленного ПАВ – АБСК, также имеющего длину алкильного радикала С₁₂. Показано, что ААС₁₂СК проявляет довольно высокую поверхностную активность, однако она менее выражена по сравнению с АБСК. Так, введение АБСК снижает поверхностное натяжение водного раствора с 72 до 33 мН/м, в то время как в присутствии ААС₁₂СК данный показатель снижается до 43 мН/м (рис. 5а). Причем стоит отметить более резкий характер изотермы поверхностного натяжения водного раствора классического ПАВ, что говорит о меньшем значении ККМ по сравнению с сурфомером ААС₁₂СК – около 1,2 и 6,1 ммоль/л соответственно.

Сравнительный анализ данных по поверхностному натяжению, полученных для ААС₁₂СК, и результатов, ранее найденных для других сурфомеров (метоксилиго(этиленгликоль)метакрилатов) [11], показал, что синтезированный сульфосодержащий мономер обладает более сильными поверхностно-активными свойствами по сравнению с С₁Е₁₁М по степени снижения поверхностного натяжения. Аналогичная зависимость наблюдается для межфазного натяжения исследованных сульфосодержащих и оксиэтилированных ПАВ в системе вода–гексан (рис. 5б).

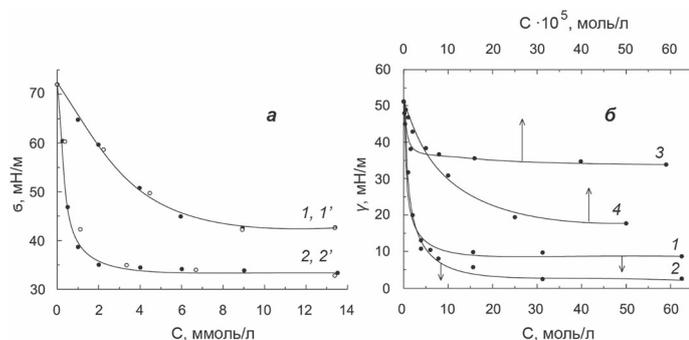


Рис. 5. Зависимости поверхностного натяжения водных растворов (а) и межфазного натяжения на границе вода–гексан (б) от концентрации исследуемых сульфокислот и олиго(этиленгликоль)метакрилатов в водной (1–3, 5, 6) или гексановой (4) фазах. 1 – ААС₁₂СК, 1' – ААС₁₂СК-Na, 2 – АБСК, 2' – АБСК-Na (R=C₁₂H₂₅), 3 – С₁Е₁₁М, 4 – С₁₂₋₁₄Е₇М. Температура 25°C.

На основе рассмотренных олиго(этиленгликоль)- и сульфосодержащих сурфомеров были получены амфифильные молекулярные полимерные щетки, состав которых приведен в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики и свойства синтезированных полимеров.

№	Содержание звеньев, мол. %			Метод синтеза	M _n	ТФП _в ¹	ТФП _{с.р.} ²
	С ₁ Е ₁₁ М	С ₁₂₋₁₄ Е ₇ М	ААС ₁₂ СК				
1	100	0	0	КРП	3000	>90	>90
2	50	0	50	НРП	-	>90	не раств.
3	30	70	0	КРП	28000	36,9	32,6
4	28	67	5	КРП	33000	>90	34,5
5	27	63	10	КРП	29000	>90	35,9

¹ ТФП_в – ТФП в водном растворе.

² ТФП_{с.р.} – ТФП в солевом растворе.

Фактически синтезированные в данной работе сополимеры можно рассматривать как полимерные ПАВ или «полимыла», поскольку исходные олиго(этиленгликоль)метакрилаты и 2-(акриламидо)додекансульфокислота являются амфифильными мономерами и проявляют поверхностно-активные свойства. На рис. 6 для сополимеров №2 и 5 (табл. 1) приведены примеры изотерм межфазного натяжения в системе вода–гексан. Для построения зависимости в полулогарифмических координатах (рис. 6б) за «нулевую» точку принимался логарифм концентрации 10⁻⁹ масс.%. На данном рисунке наблюдается явный перегиб, характерный для поверхностно-активных веществ. Причем для обоих сульфосодержащих сополимеров кривые совпадают, независимо от ко-

личества кислотных групп и наличия звеньев гидрофобного сомономера (АОЭГМ).

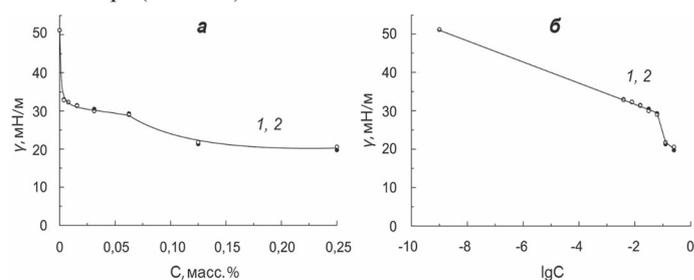


Рис. 6. Изотермы межфазного натяжения на границе вода–гексан в зависимости от массовой концентрации водных растворов полимеров №2 (1) и №5 (2) в водной фазе (а) или от ее логарифма (б). Температура 25°C. Номера полимеров соответствуют табл. 1.

Как было отмечено выше, одной из характеристик амфифильности полимеров оксиэтилированных метакрилатов является их способность проявлять термочувствительные свойства в водных растворах. Установлено, что гомополимер С₁Е₁₁М не обладает термочувствительностью и является водорастворимым вплоть до температуры кипения растворителя (воды), что объясняется высокой гидрофильностью полимера благодаря наличию длинных оксиэтильных фрагментов боковых цепей. Поэтому для придания таким молекулярным щеткам термочувствительных свойств необходимо введение в состав макромолекул звеньев с гидрофобными алкильными радикалами – ААС₁₂СК или С₁₂₋₁₄Е₇М.

Однако эксперименты показали, что полученный при сополимеризации С₁Е₁₁М с эквимольным количеством ААС₁₂СК полимер также полностью растворим в воде (табл. 1, №2). Вероятной причиной этого является наличие сильной гидрофильной сульфокислотной группы, которая «компенсирует» эффект гидрофобного алкильного радикала в звеньях акриламидного сурфомера.

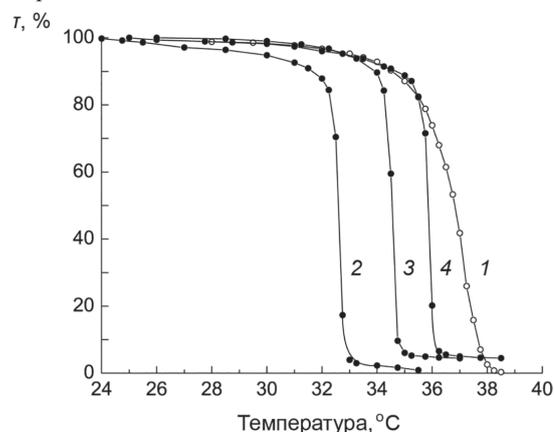


Рис. 7. Кривые светопропускания 1%-ных растворов сополимеров в воде (1) или 0,1 М NaCl (2–4): 1, 2 – С₁Е₁₁М-С₁₂₋₁₄Е₇М (30:70), 3 – С₁Е₁₁М-С₁₂₋₁₄Е₇М-ААС₁₂СК (28:67:5), 4 – С₁Е₁₁М-С₁₂₋₁₄Е₇М-ААС₁₂СК (27:63:10).

В то же время сополимеризация С₁Е₁₁М с высшим АОЭГМ, содержащим длинные гидрофобные n-алкильные концевые группы (С₁₂₋₁₄Е₇М), приводит к смещению гидрофильно-липофильного баланса полимерных макромолекул и получению термочувствительного полимера, который при нагреве подвергается обратимым фазовым переходам, переходя из растворимого состояния в нерастворимое. Для характеристики термочувствительных свойств полимеров в водных растворах была определена температура фазового перехода (ТФП) или нижняя критическая температура растворения, которая для 1%-ного водного раствора сополимера С₁Е₁₁М-С₁₂₋₁₄Е₇М (30:70) составила 36,9°C (таблица 1, №3). Полученная кривая светопропускания представлена на рис. 7. Следует отметить довольно широкий температурный интервал фазового перехода, который, вероятно, связан с градиентным строением полимера. Указанный амфифильный неионогенный сополимер был выбран в качестве базового для дальнейшей оценки влияния введения звеньев 2-(акриламидо)

додекансульфоукислоты на термочувствительность сополимеров олиго(этиленгликоль)метакрилатов.

Ожидаемым эффектом от введения небольшого количества сульфокислотных звеньев в состав полимерных щеток (при неизменном соотношении звеньев $C_{11}E_{11}M$ и $C_{12-14}E_7M$) должно было стать некоторое повышение ТФП в результате увеличения гидрофильности сополимера. Однако для 1%-ных водных растворов терполимеров №4 и 5 (табл. 1), которые по сравнению с базовым полимером №3 содержат 5 и 10 мол.% звеньев ААС₁₂СК, не удалось измерить температуру фазового перехода, поскольку введение сульфогрупп привело к потере термочувствительных свойств в интервале температур 20–90°C.

Для подавления электростатических взаимодействий сульфокислотных звеньев были приготовлены водные растворы полимеров №4 и 5 (в сравнении с базовым полимером) с добавлением сильного электролита (0,1 М NaCl). При этом в водно-солевых растворах сульфосодержащих полимерных щеток были найдены резкие термочувствительные переходы при температурах выше, чем у полимера №3, не имеющего кислотных групп (рис. 7). Численные данные по температурам фазовых переходов для указанных полимеров даны в табл. 1. Следует отметить, что найденные значения ТФП для сополимеров в водно-солевых растворах хорошо коррелируются с долей звеньев сульфокислоты – с увеличением содержания количества ААС₁₂СК критическая температура растворения закономерно повышается (табл. 1), что свидетельствует о влиянии сульфогрупп на гидрофильно-гидрофобный баланс синтезированных сополимеров и смещение его в сторону гидрофильности.

Таким образом, показан амфифильный характер ионогенного сурфомера – 2-(акриламидо)додекансульфоукислоты; исследованы ее поверхностная и межфазная активность в сравнении с классическим сульфосодержащим ПАВ (АБСК) и оксипропилированными сурфомерами. Установлено, что введение в состав термочувствительного базового неионогенного сополимера на основе олиго(этиленгликоль)метакрилатов звеньев сульфосодержащих акриламидов в количестве 5–10 мол.% приводит к потере их термочувствительных свойств в водных растворах вплоть до температуры 90°C. Однако в растворе сильного электролита (0,1 М NaCl) для данных сополимеров наблюдаются резкие фазовые переходы, температура которых хорошо коррелируется с долей звеньев сульфокислоты.

Исследования сульфосодержащих макромономеров и полимерных щеток проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках выполнения проекта № 21-73-00271; исследования неионогенных молекулярных щеток получили финансовую поддержку в форме стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (СП-954.2021.4).

Литература

- Badi, N. Non-linear PEG-based thermoresponsive polymer systems / N. Badi // *Prog. Polym. Sci.* – 2017. – Vol. 66. – P. 54–79.
- Liu, M. Conformation-function relationships for the comb-shaped polymer pOEGMA / M. Liu, J.C. Leroux, M.A. Gauthier // *Prog. Polym. Sci.* – 2015. – Vol. 48. – P. 111–121.
- Orekhov, D.V. Molecular brushes based on copolymers of alkoxy oligo(ethylene glycol) methacrylates and dodecyl(meth) acrylate: features of synthesis by conventional free radical polymerization / D.V. Orekhov, D.M. Kamorin, A.S. Simagin // *Polymer Bulletin.* – 2021. – Vol. 78. – P. 5833–5850.
- Sivokhin, A.P. Amphiphilic thermoresponsive copolymer bottlebrushes: synthesis, characterization, and study of their self-assembly into flower-like micelles / A.P. Sivokhin, D.V. Orekhov, O.A. Kazantsev et al. // *Polymer Journal.* – 2021. – Vol. 53. – P. 655–665.
- Lutz, J.-F. Thermo-Switchable Materials Prepared Using the OEGMA-Platform / J.-F. Lutz // *Adv. Mater.* – 2011. – Vol. 23, N19. – P. 2237–2243.
- Matsumoto, M. Self-assembly of amphiphilic block pendant polymers as microphase separation materials and folded flower micelles / M. Matsumoto, M. Takenaka, M. Sawamoto, T. Terashima // *Polym. Chem.* – 2019. – Vol. 10. – P. 4954–4961.
- Sun, L. Synthesis of polymeric micelles with dual-functional sheddable PEG stealth for enhanced tumor-targeted drug delivery / L. Sun, H. Wei, X.S. Zhang et al. // *Polym. Chem.* – 2020. – Vol. 11. – P. 4469–4476.
- Cho, H.Y. Synthesis of Poly(OEOMA) Using Macromonomers via “Grafting-Through” ATRP / H.Y. Cho, P. Krys, K. Szczesniak et al. // *Macromolecules.* – 2015. – Vol. 48, N18. – P. 6385–6395.
- Ильгач, Д.М. Использование методов контролируемой радикальной полимеризации для синтеза полимерных щеток / Д.М. Ильгач, Т.К. Мелешко, А.В. Якиманский // *Высокомолекулярные соединения. Серия С.* – 2015. – Т. 57, №1. – С. 6–24.
- Pelras, T. Synthesis and applications of compartmentalised molecular polymer brushes / T. Pelras, C.S. Mahon, M. Mullner // *Angewandte Chemie International Edition.* – 2018. – Vol. 57, N 24. – P. 6982–6994.
- Orekhov, D.V. Assembly of oligo(ethylene glycol)- and amine-containing methacrylic esters in water and water-hexane mixtures / D.V. Orekhov, D.M. Kamorin, M. Rumyantsev et al. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* – 2015. – Vol. 481. – P. 20–30.
- Орехов, Д.В. Амфифильные свойства алкоксиолигоэтиленгликольметакрилатов и сополимеров на их основе / Д.В. Орехов, К.В. Ширшин, М.В. Савинова и др. // *Пластические массы.* – 2019. – №7-8. – С. 38–41.
- Goh, E. Cross-Linked Poly(methacrylic acid-co-poly(ethylene oxide) methyl ether methacrylate) Microspheres and Microgels Prepared by Precipitation Polymerization: A Morphology Study / E. Goh, H. Stöver // *Macromolecules.* – 2002. – Vol. 35, N 27. – P. 9983–9989.
- Куренков В.Ф. Полиакриламидные флокулянты // *Соровский образовательный журнал.* – 1997. – №7. – С. 55–63.
- Куренков, А.В. Седиментация суспензии каолина сополимерами 2-акриламидо-2-метилпропансульфоната натрия с акрилатом натрия / А.В. Куренков, В.Ф. Куренков, Ф.И. Лобанов // *Журнал прикладной химии.* – 2009. – Т. 82, №11. – С. 1894–1898.
- Bouhamed, H. Alumina interaction with AMPS–MPEG copolymers produced by RAFT polymerization: Stability and rheological behavior / H. Bouhamed, S. Boufi, A. Magnin // *Journal of Colloid and Interface Science.* – 2009. – Vol. 333, N1. – P. 209–220.
- Erzengin, S. G. Applications of sulfonate-carboxylate copolymers in cement / S.G. Erzengin, A. Bodur, S.P. Ozkorucuklu et al. // *Advances in Cement Research.* – 2016. – Vol. 28, N 10. – P. 630–642.
- Xue, J. The Development and Application of the Acrylamide Kind Polymers for Tertiary Oil Recovery in China / J. Xue, D. Guo, Q. Hou // *International Journal of Petroleum Technology.* – 2018. – Vol. 5. – P. 19–29.
- Якимцова, Л.Б. Термическая устойчивость сополимеров метакриламида и 2-акриламидо-2-метилпропансульфоната натрия / Л.Б. Якимцова, П.А. Никишев, А.П. Бочко // *Полимерные материалы и технологии.* – 2020. – Т. 6, №3. – С. 60–65.
- Chen, L. Experimental study of calcium-enhancing terpolymer hydrogel for improved oil recovery in ultradeep carbonate reservoir / L. Chen, X. Zhu, M. Fu et al. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* – 2019. – Vol. 570. – P. 251–259.
- Cai, S. Molecular interaction of poly (acrylamide-co-2-acrylamido-dodecyl sulfonate) with dual responsiveness and application in oily emulsion wastewater / S. Cai, Y. Wang, X. He // *Journal of Applied Polymer Science.* – 2021. – Vol. 139, N 4. – P. 51528.
- Sun, J. Synthesis and evaluation of a novel hydrophobically associating polymer based on acrylamide for enhanced oil recovery / J. Sun, W. Du, X. Pu et al. // *Chemical Papers.* – 2015. – Vol. 69, N12. – P. 1598–1607.
- Wu, X. Self-assembly of a series of random copolymers bearing amphiphilic side chains / X. Wu, Y. Qiao, H. Yang, J. Wang // *Journal of Colloid and Interface Science.* – 2010. – Vol. 349, N2. – P. 560–564.

24. Gao, B. Microstructure and association property of hydrophobically modified polyacrylamide of a new family / B. Gao, L. Jiang, K. Liu // *European Polymer Journal*. – 2007. – Vol. 43. – P. 4530–4540.
25. NaAMC₁₄S on copolymerization process / Y. Yu, Z. Wang, B. Gao, R. Wang // *Acta Phys.-Chim. Sin.* – 2006. – Vol. 22, N4. – P. 496–501.
26. Chen M., Synthesis and Evaluation of a Low Molecular Weight Amphiphilic Polymer for Enhanced Oil Recovery / M. Chen, H. Deng, X. Geng // *J. Surfact. Deterg.* – 2021. – Vol. 24, N6. – P. 991–1002.
27. Ye, Z. An Efficient Synthesis of Long-Chain Alkyl Sulphonated Acrylamides / Z. Ye, Z. Wang, H. Chen, Y. Zou // *Asian Journal of Chemistry*. – 2013. – Vol. 25, N6. – P. 3521–3522.
28. Чичканов, С.В. Оценка критической концентрации мицеллообразования ионогенных и неионогенных ПАВ по данным модифицированного метода сталагмометрии // С.В. Чичканов, В.Е. Проскурина, В.А. Мягченков // *Химия и компьютерное моделирование. Бултеровские сообщения*. – 2002. – Т. 2, №9. – С. 33–36.
29. ГОСТ 50097-92. Вещества поверхностно-активные. Определение межфазного натяжения. Метод объема капли.