

УДК 541(64+27):547.39

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОБРАТНОЙ ЭМУЛЬСИОННОЙ СОПОЛИМЕРИЗАЦИИ АКРИЛАМИДА И НАТРИЕВОЙ СОЛИ 2-АКРИЛАМИДО-2-МЕТИЛПРОПАНСУЛЬФОНОВОЙ КИСЛОТЫ

© 2022 г. А. И. Нечаев^{а,*}, Н. С. Воронина^а, В. Н. Стрельников^а, В. А. Вальцифер^а

^а Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук 614013 Пермь, ул. Академика Королева, 3, Россия

*e-mail: nechaev.a@itcras.ru

Поступила в редакцию 11.01.2022 г.

После доработки 12.03.2022 г.

Принята к публикации 22.03.2022 г.

Изучено влияние условий реакции на кинетику радикальной обратной эмульсионной сополимеризации акриламида и натриевой соли 2-акриламидо-2-метилпропансульфонокислоты. Сополимеризацию проводили в изооктане, растворяя мономеры в воде, используя в качестве ПАВ сорбитан моноолеат и полиоксиэтилен сорбитан моноолеат и инициатор – ДАК. Установлено, что закономерности обратной эмульсионной сополимеризации близки к растворной сополимеризации. Исследовано влияние гидротермального воздействия до 180°C на устойчивость синтезированных сополимеров. Степень гидролиза сополимера уменьшается с ростом содержания в сополимере натриевой соли 2-акриламидо-2-метилпропансульфонокислоты.

DOI: 10.31857/S2308113922200037

ВВЕДЕНИЕ

Полиакриламид и его производные, будучи водорастворимыми полимерами, находят широкое применение, например, в качестве коагулянтов и флокулянтов при очистке сточных вод [1], агентов для снижения гидравлического сопротивления [2], полимерных добавок в буровых растворах [3], вытесняющих жидкостях при увеличении нефтеотдачи [4], добавок в производстве бумаги [5] и средств доставки лекарств [6–9].

Один из перспективных методов синтеза водорастворимых полимеров на основе акриламида – обратная эмульсионная полимеризация. Данный метод является наиболее изученным способом получения водорастворимых полимеров с высокой молекулярной массой и низкой вязкостью [10–22]. Дисперсионной средой в обратной эмульсионной полимеризации акриламида служит широкий спектр различных малополярных растворителей, таких как толуол [15–18], гептан [17], изооктан [13], или ксилол [19]. В литературе описано влияние гидрофильно-липофильного баланса используемых поверхностно-активных веществ [19, 20], их типа и концентрации [19, 21], концентрации инициатора [19, 21, 22], температуры [19] и скорости перемешивания [19] на кинетику полимеризации и характеристики образу-

ющихся полимеров. Было показано, что наиболее стабильные обратные эмульсии были получены в присутствии ПАВ с гидрофильно-липофильным балансом порядка 5.6 единицы, при этом конверсия, молекулярная масса и размер частиц не зависят от гидрофильно-липофильного баланса [19, 22]. Однако отмечено, что при постоянном значении гидрофильно-липофильного баланса размер частиц и скорость полимеризации понижаются по мере повышения концентрации ПАВ [21, 22], в то время как молекулярная масса полимера увеличивается до определенной концентрации ПАВ, а степень конверсии остается одинаковой. Повышение скорости перемешивания в процессе полимеризации вызывает уменьшение среднего размера полимерных частиц, что, по мнению авторов исследований, является результатом баланса между коалесценцией и диспергированием капель эмульсии [19, 21, 22]. Также было исследовано влияние маслорастворимого инициатора ДАК и водорастворимого персульфата калия на закономерности обратной эмульсионной полимеризации акриламида. Было отмечено одинаковое кинетическое поведение обоих инициаторов даже с учетом диффузии образующихся радикалов через межфазную границу [21]. Увеличение концентрации персульфата калия приводило к уменьшению размера частиц и конверсии моно-

мера и, наоборот, к повышению начальной скорости полимеризации [19, 21].

Указанные исследования, а также работы [11, 23–25] посвящены исключительно гомополимеризации акриламида в обратных эмульсиях. Включение же звеньев натриевой соли 2-акриламидо-2-метилпропансульфонокислоты (АМПС- Na) в цепь полиакриламида может дополнительно улучшить характеристики сополимеров за счет повышения температурной стабильности, устойчивости к кислотам и солям двухвалентных металлов [26–28]. Это позволяет применять такие сополимеры в условиях полиминеральной и сероводородной агрессии, а также при высоких температурах (более 100°C).

Ранее авторами была изучена радикальная сополимеризация акриламида, акрилонитрила и АМПС- Na в водных растворах для разработки противотурбулентных добавок [29], однако бинарная сополимеризация акриламида и АМПС- Na в обратных эмульсиях ранее не описана. Данное исследование направлено на изучение кинетических параметров обратной эмульсионной сополимеризации акриламида и натриевой соли 2-акриламидо-2-метилпропансульфонокислоты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве мономеров использовали акриламид (98%, “Alfa Aesar”) и 2-акриламидо-2-метилпропансульфоновою кислоту (АМПСК) (98%, “Alfa Aesar”). Натрия гидроксид (ч.д.а., Акционерное общество “ЭКОС-1”), изооктан (эталонный, Акционерное общество “ВЕКТОН”); поверхностно-активные вещества – сорбитан моноолеат (Span 80, “Alfa Aesar”), полиэтиленгликоль сорбитан моноолеат (Tween 80, “Alfa Aesar”), ДАК (98.5%, “Mody Chemi”) применяли без дополнительной очистки. Для получения обратных эмульсий во всех экспериментах брали бидистиллированную воду с удельной проводимостью 1.6 мкСм/см .

Чтобы получить дисперсную фазу, акриламид и АМПСК растворяли в воде, затем АМПСК нейтрализовали 4 М раствором NaOH и получали АМПС- Na . Массовое соотношение мономеров акриламид : АМПС- Na , равное 70 : 30, выбирали с учетом ранее проведенных исследований в водной среде [29]. Суммарную мольную концентрацию мономеров варьировали от 1 до 3.5 моль/л. Для эмульгирования использовали смесь неионогенных ПАВ – Span 80 со значением гидрофильно-липофильного баланса 4.3 и Tween 80 со значением гидрофильно-липофильного баланса 15 в массовом соотношении Tween 80 : Span 80 = 10 : 90, обеспечивающим гидрофильно-липофильный баланс смеси ~ 6 . Содержание ПАВ изменяли в диапазоне от 1 до 5 мас. %.

Эмульгирование осуществляли с помощью высокоскоростного гомогенизатора WiseTis HG-15A-Set-A (DAIHAN Scientific) при добавлении водно-мономерной фазы в неполярную среду (изооктан) при скорости 15–20 тыс. об/мин в течение 5 мин. Объемное соотношение фаз вода : изооктан составляло 55 : 45. Tween 80 вводили в водную фазу, Span 80 – в масляную. Выбранные условия обеспечили стабильность полученных обратных эмульсий [16, 30].

Обратную эмульсию помещали в реактор высокого давления с перемешиванием “Parr 4560”, продували азотом в течение 30 мин, после чего добавляли инициатор ДАК в виде его раствора в изооктане в количестве от 0.01 до 0.5 мас. % от массы мономеров. Температуру сополимеризации варьировали в диапазоне $50\text{--}65^\circ\text{C}$; скорость перемешивания изменяли от 50 до 500 об/мин. Сополимер осаждали из обратной эмульсии в десятикратный избыток ацетона. Для удаления воды, ПАВ, остаточных мономеров и инициатора промывку осуществляли 4 раза, чередуя ацетон с этанолом. Осажденный и промытый полимер сушили под вакуумом при 60°C до постоянной массы.

Кинетические закономерности обратной эмульсионной сополимеризации акриламида и АМПС- Na изучали гравиметрически при отборе образцов из реактора через заданные промежутки времени. Скорость полимеризации рассчитывали по тангенсу угла наклона кинетических кривых.

Методом динамического светорассеяния на приборе “ZetaPALS” (“Brookhaven Inst.”) определяли средний диаметр частиц дисперсной фазы до и после процесса полимеризации. Элементарный анализ проводили на элементном анализаторе “Vario EL cube” (“Elementar”). Навеска образца составляла 2 мг, коэффициент вариации значений находился в диапазоне 0.05–0.29%. ИК-спектры получали на спектрометре “IFS 66/S” (“Bruker”). Образцы для анализа готовили прессованием таблеток с KBr (1 мг образца к 299 мг KBr). Спектры ЯМР ^1H регистрировали на спектрометре “Bruker Avance IIIHD 400” (рабочая частота 300 и 75.5 МГц соответственно). В качестве растворителя использовали $\text{DMSO-}d_6$.

Характеристическую вязкость полимера $[\eta]$ определяли капиллярной вискозиметрией в 0.5 М растворе NaCl при $T = 30^\circ\text{C}$, используя стеклянный вискозиметр ВПЖ-1 с диаметром капилляра $d_k = 0.54 \text{ мм}$. На основании измерений строили линейные концентрационные зависимости $\eta_{\text{уд}}/c_p = f(c_p)$, где c_p – концентрация сополимера. При экстраполяции полученных прямых к нулевой концентрации находили характеристическую вязкость полимера: $[\eta] = \lim (\eta_{\text{уд}}/c_p)$, при $c_p \rightarrow 0$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Конечная эмульсия после полимеризации представляет собой низковязкую коллоидную систему молочно-белого цвета, стабильную в течение нескольких дней при комнатной температуре. В качестве примера влияния процесса полимеризации на размер и ширину распределения по размеру дисперсионной фазы представлены данные образца, полученного в ходе полимеризации в следующих условиях: суммарная концентрация мономеров 3 моль/л, $[\text{акриламид}]_0 : [\text{АМПС-Na}]_0 = 70 : 30$ мас. %, $\omega_{\text{ПАВ}} = 5$ мас. %, ГЛБ = 5.35, отношение вода : изооктан = 55 : 45 об. %, $T = 60^\circ\text{C}$; $C_{\text{ДАК}} = 0.01$ мас. % от суммы мономеров, скорость перемешивания 300 об/мин. До полимеризации эффективный диаметр частиц исходной обратной эмульсии составил 115 нм, а после полимеризации – 50 нм (рис. 1). Быстрое зарождение и рост частиц приводит к узкому распределению частиц по размерам. Уменьшение размеров частиц, вероятно, обусловлено усадкой полимеризующейся системы в ходе реакции. Протеканием сополимеризации в неполярной фазе можно пренебречь ввиду очень низкой растворимости используемых мономеров в изооктане.

Первоначально была исследована зависимость состава сополимера от состава исходной мономерной смеси акриламид и АМПС-Na. Во всем диапазоне соотношений исходной мономерной смеси сополимеры незначительно обогащены звеньями акриламида, что связано с его большей активностью по сравнению с АМПС-Na. Значения эффективных констант сополимеризации r акриламида с АМПС-Na составляют 1.03 ± 0.09 и 0.51 ± 0.06 соответственно. Данные значения констант сополимеризации соизмеримы с полученными при сополимеризации акриламида с АМПС-Na в водной среде.

Влияние концентрации ДАК на конверсию мономеров и общую скорость сополимеризации в условиях, аналогичных описанным выше, иллюстрирует рис. 2. По начальным линейным участкам кривых определена начальная скорость сополимеризации при малых конверсиях (менее 10%). Рассчитанные кинетические параметры сополимеризации и характеристическая вязкость сополимеров представлены в табл. 1. Повышение концентрации инициатора от 0.01 до 0.5 мас. % от массы мономеров приводит к увеличению начальной и максимальной скорости процесса. Медленное иницирование обусловлено тем, что ДАК находится изначально в неполярной фазе, и образующимся при его распаде радикалам необходимо сначала преодолеть границу раздела фаз, и только при контакте с молекулами мономеров, находящимся в водной фазе, начинается рост полимерной цепи. Одновременно с этим уменьша-

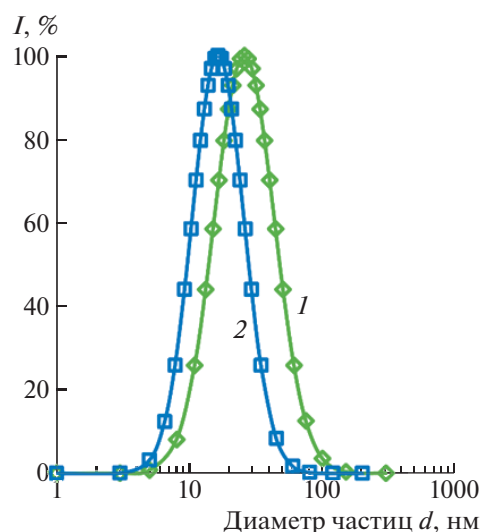


Рис. 1. Распределение частиц дисперсионной фазы по размерам (в единицах интенсивности) до (1) и после (2) радикальной сополимеризации акриламида и АМПС-Na. Цветные рисунки можно посмотреть в электронной версии.

ется значение характеристической вязкости сополимера.

Влияние суммарной концентрации мономеров при их постоянном массовом соотношении 70 : 30 и фиксированной концентрации ДАК (0.1 мас. %) на кинетику сополимеризации, характеристики дисперсии и сополимеров продемонстрировано в табл. 2. Видно, что скорость сополимеризации, диаметр частиц и характеристическая вязкость увеличиваются с ростом концентрации мономера.

На основании данных табл. 1 и 2 были рассчитаны значения порядка скорости сополимеризации по концентрации инициатора и мономера, которые составили 0.3 и 1.5 соответственно. Приведенные величины типичны для радикальной полимеризации ионогенных мономеров.

Данные по влиянию температуры на кинетику сополимеризации при постоянных концентрациях компонентов представлены в табл. 3. Видно, что скорость реакции увеличивается с повыше-

Таблица 1. Влияние концентрации ДАК на кинетические параметры сополимеризации акриламида и АМПС-Na и характеристическую вязкость сополимеров

$C_{\text{ДАК}}$, мас. %	Конверсия, %	$R_0 \times 10^4$, моль/л с	$R_{\text{max}} \times 10^4$, моль/л с	$[\eta]$, дл/г
0.01	77.7	1.6	4.7	8.5
0.05	88.3	2.5	7.2	4.8
0.10	92.4	3.3	9.4	4.4
0.50	96.9	6.3	18.2	4.1

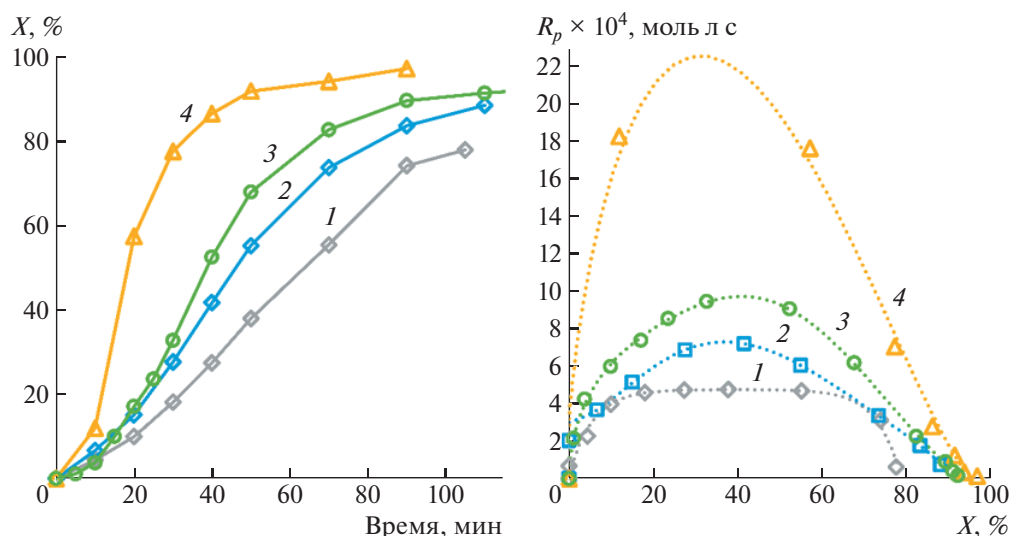


Рис. 2. Зависимость конверсии X от времени сополимеризации акриламида и АМПС-На (а) и скорости сополимеризации R_p от конверсии (б) при концентрации ДАК, равной 0.01 (1), 0.05 (2), 0.1 (3) и 0.5 мас. % (4).

нием температуры, а характеристическая вязкость понижается, что типично для радикальной полимеризации. При этом размер частиц готовой дисперсии практически не изменяется. Суммарная энергия активации полимеризации, определенная из зависимости логарифма начальной скорости полимеризации от обратной температуры, составляет 67 кДж/моль.

Данные по влиянию общего содержания ПАВ (Span 80 и Tween 80) и скорости перемешивания в реакторе на кинетику полимеризации представлены в табл. 4 и 5.

Видно, что ПАВ не оказывает какого-либо влияния на скорость реакции, но увеличение его содержания приводит к уменьшению размера частиц дисперсии и некоторому снижению характеристической вязкости сополимеров. С повыше-

Таблица 2. Влияние суммарной концентрации мономеров на кинетику сополимеризации, характеристики дисперсии и сополимера

[M], моль/л	Конверсия, %	$R_0 \times 10^4$, моль/л с	$R_{\max} \times 10^4$, моль/л с	Средний диаметр частиц d , нм	$[\eta]$, дл/г
1.0	87.0	0.4	1.7	7	3.5
1.6	89.8	1.0	3.3	12	4.0
3.0	92.4	2.3	9.4	160	4.4
3.5	96.3	2.6	9.3	622	4.7

Таблица 3. Влияние температуры реакции на параметры полимеризации акриламида и АМПС-На

T , °C	Конверсия, %	$R_0 \times 10^4$, моль/л с	$R_{\max} \times 10^4$, моль/л с	Средний диаметр частиц d , нм	$[\eta]$, дл/г
50	92.7	1.2	4.2	23	5.5
55	86.3	2.4	6.1	24	5.0
60	92.4	3.2	9.4	25	4.4
65	96.8	9.2	19.3	26	4.5

Таблица 4. Влияние количества ПАВ на параметры полимеризации акриламида и АМПС-На

$c_{\text{ПАВ}}$, мас. %	Конверсия, %	$R_0 \times 10^4$, моль/л с	$R_{\text{max}} \times 10^4$, моль/л с	Средний диаметр частиц d , нм	$[\eta]$, дл/г
1	98.6	2.9	9.3	270	5.3
2	96.8	3.8	10.0	60	4.7
3	82.2	3.9	8.6	30	4.7
5	98.4	3.2	9.4	20	4.4

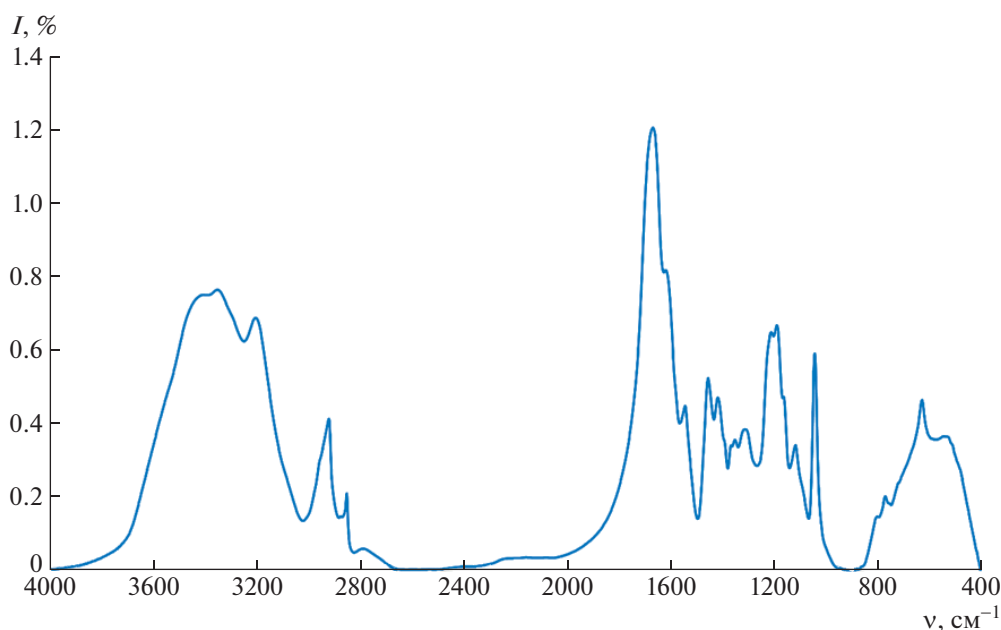
нием скорости перемешивания незначительно понижается как начальная, так и максимальная скорость полимеризации. При этом происходит увеличение характеристической вязкости сополимеров.

На основании проведенных исследований и полученных данных видно, что процесс обратной эмульсионной сополимеризации акриламида и АМПС-На в присутствии инициатора ДАК имеет черты близкие с растворной сополимеризацией, но осложняется влиянием на процесс поверхностно-активных веществ, вводимых для создания устойчивой обратной эмульсии и, соответственно, наличием межфазной поверхности. Можно предположить, что процесс протекает в микрореакторах в водной фазе, диспергированной в неполярной фазе, из которой через межфазную границу диффундируют радикалы инициатора ДАК.

Таблица 5. Влияние скорости перемешивания v на параметры полимеризации акриламида и АМПС-На

v , об/мин	Конверсия, %	$R_0 \times 10^4$, моль/л с	$R_0 \times 10^4$, моль/л с	$[\eta]$, дл/г
50	91.0	3.4	16.4	4.2
100	99.0	3.0	10.8	4.4
300	92.4	3.2	9.4	4.4
500	83.8	2.8	9.7	5.0

Состав синтезированных сополимеров исследовали методами ИК- и ЯМР-спектроскопии и элементного анализа. В ИК-спектре сополимера можно выделить полосы поглощения, характерные для акриламида и АМПС-На (рис. 3). Полоса

**Рис. 3.** ИК-спектр сополимера акриламид–АМПС-На.

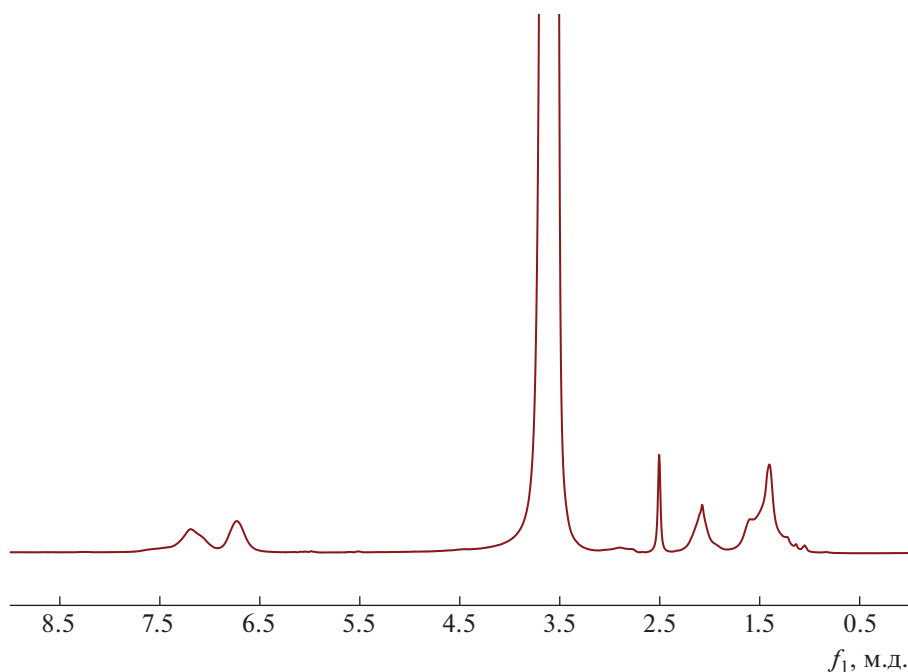


Рис. 4. Спектр ЯМР ^1H сополимера акриламид–АМПС-На.

поглощения при 1667 см^{-1} отвечает валентным колебаниям карбонильной группы $\text{C}=\text{O}$ (полоса Амид I), при 3351 и 3204 см^{-1} – валентным асимметричным и симметричным колебаниям группы $\text{N}-\text{H}$, при 1615 см^{-1} – деформационным колебаниям $\text{N}-\text{H}$ (полоса Амид II), при 1542 см^{-1} – деформационным колебаниям $\text{N}-\text{H}$ (полоса Амид II), при 1412 см^{-1} – колебаниям группы $\text{C}-\text{N}$, при 771 см^{-1} – деформационным внеплоскостным колебаниям $\text{N}-\text{H}$ (Амид V), при 1185 и 1041 см^{-1} – валентным симметричным и асимметричным колебаниям $\text{S}=\text{O}$, при 626 см^{-1} – валентным колебаниям $\text{S}-\text{O}$, при 1212 см^{-1} – валентным колебаниям SO_2 , при $\sim 3500\text{ см}^{-1}$ – валентным колебаниям групп OH и при 2918 см^{-1} – валентным колебаниям CH_3 .

Состав сополимера был рассчитан из данных элементного анализа: содержание звеньев акриламида и АМПС-На составило 74 и 26 мас. %.

Структуру сополимера дополнительно подтверждали методом спектроскопии ЯМР ^1H . Спектр ЯМР ^1H за вычетом спектра растворителя ДМСО- d_6 представлен на рис. 4. В спектре сополимера химические сдвиги δ сигналов метиленовых протонов в основной цепи наблюдаются в области 1.40–1.60 м.д. Пики в области 1.05–1.22 м.д., соответствуют протонам CH_3 -группы АМПС-На. В спектре также содержатся сигналы при 2.08 м.д.,

относящиеся к протонам группы $-\text{CH}_2-\text{CH}-$ в полимерной цепи акриламида и АМПС-На. Пик при 3.34 м.д. соответствует метиленовым протонам звена $\text{C}-\text{CH}_2-\text{S}$. Широкий пик при 3.60 м.д. относится к сигналам протонов воды. Химические сдвиги сигналов протонов NH_2 группы акриламида и NH - группы АМПС-На наблюдаются в области 6.73–7.20 м.д.

Исследование влияния количества АМПС-На в сополимере на степень гидролиза сополимера после гидротермальной обработки при 180°C в течение 5 ч было осуществлено методом элементного анализа. Обработке подвергались 1%-ные водные растворы сополимеров. Полученная зависимость степени гидролиза сополимера от содержания в нем мономера АМПС-На представлена на рис. 5. Видно, что при увеличении доли АМПС-На в сополимере снижается степень гидролиза. Так, повышение АМПС-На в составе сополимера от 5 до 20 мол. % приводит к уменьшению степени гидролиза от 71 до 36%. Это может быть вызвано электростатическим эффектом, обусловленным наличием заряженных сульфогрупп в звеньях АМПС.

При этом происходит не только изменение состава сополимера за счет гидролиза звеньев акриламида, но и его частичная деструкция, что подтверждается резким падением характеристической вязкости выше 160°C (рис. 6).

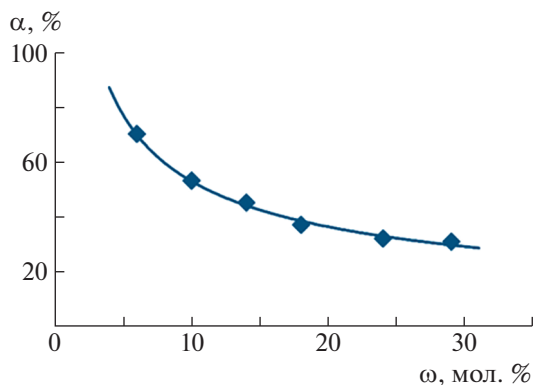


Рис. 5. Зависимость степени гидролиза α после гидротермальной обработки сополимера от содержания АМПС-На при 180°C в течение 5 ч.

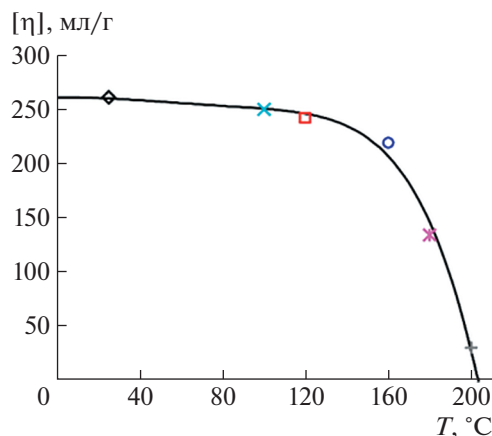


Рис. 6. Изменение характеристической вязкости сополимера акриламид-АМПС-На от температуры гидролиза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены основные кинетические закономерности процесса радикальной сополимеризации акриламида и АМПС-На в обратных эмульсиях. Показано, что закономерности обратной эмульсионной сополимеризации АА и АМПС-На в присутствии инициатора ДАК имеет черты, близкие к растворной сополимеризации. Можно предположить, что процесс протекает в микрореакторах в водной фазе, диспергированной в неполярной фазе, из которой через межфазную границу диффундируют радикалы инициатора ДАК.

Установлено, что при нагревании водных растворов сополимеров происходит их частичный гидролиз, который сопровождается падением характеристической вязкости при температуре выше 160°C.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Исследования материалов и вещества" Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Пермского края в рамках научного проекта 19-43-590013 p_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wada T., Sekiya H., Machi S. // J. Appl. Polym. Sci. 1976. V. 20. № 12. P. 3233.
2. Virk P.S. // J. Fluid Mech. 1971. V. 45. № 2. P. 225.
3. Sadeghalvaad M., Sabbaghi S. // Powder Technol. 2015. V. 272. P. 113.
4. Wever D.A.Z., Picchioni F., Broekhuis A.A. // Prog. Polym. Sci. 2011. V. 36. № 11. P. 1558.
5. Dence Reeve, Douglas W. Pulp Bleaching: Principles and Practice. Atlanta: TAPPI, 1996.
6. Al-Karawi A.J.M., Al-Daraji A.H.R. // Carbohydr. Polym. 2010. V. 79. № 3. P. 769.
7. Salehi R., Davaran S., Rashidi M.R., Entezami A.A. // J. Appl. Polym. Sci. 2009. V. 111. № 4. P. 1905.
8. Buck S., Pennefather P.S., Xue H.Y., Grant J., Cheng Y.-L., Allen C.J. // Biomacromolecules. 2004. V. 5. № 6. P. 2230.
9. Chaw C.-S., Chooi K.-W., Liu X.-M., Tan C., Wang L., Yang Y.-Y. // Biomaterials. 2004. V. 25. № 18. P. 4297.
10. Lovell Peter A., El-Aasser Mohamed S. Emulsion Polymerization and Emulsion Polymers. New York: Wiley, 1997.
11. Ouyang L., Wang L., Schork F.J. // Polymer (Guildf). 2011. V. 52. № 1. P. 63.
12. Hunkeler D. // Polym. Int. 1992. V. 27. № 1. P. 23.
13. Pross A., Platkowski K., Reichert K.-H. // Polym. Int. 1998. V. 45. № 1. P. 22.
14. Platkowski K., Pross A., Reichert K.-H. // Polym. Int. 1998. V. 45. № 2. P. 229.
15. Куренков В.Ф., Верижникова А.М., Мягченков В.А. // Высокомолек. соед. А 1986. Т. 28. № 3. С. 488.
16. Zhang D., Song X., Liang F., Li Z., Liu F. // J. Phys. Chem. B. 2006. V. 110. № 18. P. 9079.
17. Liu L., Yang W. // J. Polym. Sci., Polym. Chem. 2004. V. 42. № 4. P. 846.
18. Baade W., Reichert K.-H. // Makromol. Chem., Rapid Commun. 1986. V. 7. № 5. P. 235.
19. Barari M., Abdollahi M., Hemmati M. // Iran. Polym. J. 2011. V. 20. № 1. P. 65.
20. Graillat C., Pichot C., Guyot A., El Aasser M.S. // J. Polym. Sci., Polym. Chem. 1986. V. 24. № 3. P. 427.
21. Capek I. // Polym. J. 2004. V. 36. № 10. P. 793.

22. *Blagodatskikh I., Tikhonov V., Ivanova E., Landfester K., Khokhlov A.* // *Macromol. Rapid Commun.* 2006. V. 27. № 22. P. 1900.
23. *CAPEK I., FIALOVÁ L., BEREK D.* // *Des. Monomers Polym.* 2008. V. 11. № 2. P. 123.
24. *CAPEK I.* // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2010. V. 156. № 1–2. P. 35.
25. *Hunkeler D., Hamielec A.E., Baade W.* // *Polymer (Guildf).* 1989. V. 30. № 1. P. 127.
26. *Jouenne S.* // *J. Pet. Sci. Eng.* 2020. V. 195. P. 107545.
27. *Pei Y., Zhao L., Du G., Li N., Xu K., Yang H.* // *Petroleum.* 2016. V. 2. № 4. P. 399.
28. *Le Brun N., Zadrazil I., Norman L., Bismarck A., Markides C.N.* // *Chem. Eng. Sci.* 2016. V. 146. P. 135.
29. *Nechaev A.I., Gorbunova M.N., Lebedeva I.I., Val'sifer V.A., Strel'nikov V.N.* // *Russ. J. Appl. Chem.* 2017. V. 90. № 9. P. 1524.
30. *Nechaev A.I., Voronina N.S., Valtsifer V.A., Strel'nikov V.N.* // *Colloid Polym. Sci.* 2021. V. 299. № 7. P. 1127.