

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 541.64

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ ПОЛИМЕРНОГО СТАБИЛИЗАТОРА
НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕЖФАЗНЫХ
АДСОРБЦИОННЫХ СЛОЕВ

© 2020 г. И. А. Грицкова^{a,*}, А. В. Андреева^a, Е. С. Ключин^b, О. А. Сацкевич^a,
Л. Ю. Басырева^c, С. М. Левачев^d

^a МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий
имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

^b Акционерное общество “Научно-исследовательский институт химии и технологии полимеров имени академика
В.А. Каргина с опытным заводом”, Нижегородская область, Дзержинск 606000, Россия

^c Федеральное государственное бюджетное учреждение “Федеральный научно-клинический центр физико-
химической медицины федерального медико-биологического агентства”, Москва 119435, Россия

^d Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Химический факультет, Москва 119899, Россия

*e-mail: anna_artisyuk@mail.ru

Поступила в редакцию 25.11.2019 г.

После доработки 10.01.2020 г.

Принята к публикации 21.01.2020 г.

Проведен комплекс реологических испытаний межфазных адсорбционных слоев на границе вода/бутилметакрилат, сформированных высокомолекулярными поверхностно-активными веществами (ВПАВ) (поливиниловым спиртом с различным содержанием ацетилованных групп (ПВС) и сополимером 2-акриламидо-2-метил-пропансульфокислоты с метилметакрилатом (АМПСК-ММА) с различным содержанием ММА звеньев). Показано, что увеличение содержания ацетилованных групп и звеньев ММА, соответственно, в исследованных ВПАВ приводит к образованию на межфазной границе структур, отличающихся более высокими значениями вязкости и модуля упругости адсорбционного слоя. Агрегативная устойчивость дисперсии в процессе суспензионной полимеризации акриловых мономеров возрастает с увеличением содержания гидрофобных звеньев в полимерной цепи ВПАВ.

Ключевые слова: высокомолекулярные поверхностно-активные вещества, стабилизация, адсорбционный слой, модуль упругости, вязкость

DOI: 10.31857/S0044453720090101

Неотъемлемым условием проведения суспензионной полимеризации с сохранением устойчивости реакционной системы в процессе синтеза в присутствии высокомолекулярных поверхностно-активных веществ (ВПАВ) [1–4] является использование ВПАВ, позволяющих создать на поверхности частиц межфазный слой, характеризующийся высокими значениями реологических параметров (структурно-механический барьер), препятствующий коалесценции капель мономера на начальной стадии полимеризации и коагуляции полимерных частиц (образование коагулюма) в процессе полимеризации. Структура молекул ВПАВ представляет собой сополимерную цепь, состоящую из полярных (гидрофильных) и неполярных (гидрофобных) звеньев, отличающихся величинами недисперсионных и дисперсионных взаимодействий [5, 6]. Данное разделе-

ние звеньев в макромолекуле задается химическим строением исходных мономерных молекул, а именно, сочетанием гидрофильных и гидрофобных групп в каждой из них. Актуальным направлением исследований является поиск корреляции между химическим составом ВПАВ и их вкладом в стабилизацию дисперсных систем. Одним из параметров структуры ВПАВ, позволяющим найти общие закономерности в их поведении, может быть выбран термин “гидрофобность”, характеризующий относительное содержание гидрофильных и гидрофобных звеньев в сополимерной цепи ВПАВ.

По классификации, предложенной Ребиндером [7, 8], образование на границе раздела фаз в межфазном слое структурно-механического барьера может происходить по двум механизмам. Первый механизм заключается в образовании на

межфазной границе адсорбционного слоя полимера, характеризующегося высокими значениями эффективного модуля поверхностной упругости (более 5.0 мН/м) и повышенной поверхностной вязкостью (более 10.0 Н с/м). Второй механизм реализации структурно-механического барьера основан на энтропийном факторе, а именно понижении энтропии системы при возможном перекрытии адсорбционных слоев, сформированных ВПАВ.

На выбор стабилизатора суспензионных частиц оказывает влияние не только их химическое строение, которое определяет формирование структурно-механического барьера по первому и второму механизмам, но и возможность ассимиляции этих веществ в полимере без ухудшения его свойств. Так, вещества, образующие прочные адсорбционные слои, могут сохранять их структуру в форме кластеров или кристаллов, статистически распределенных в объеме синтезированного полимера. Для обеспечения необходимых свойств стабилизирующих слоев на поверхности частиц полимерных дисперсий были выбраны высокомолекулярные ПАВ винилового ряда, относящиеся к гибкоцепным полимерам и способные формировать оптимальные структуры, обеспечивающие агрегативную устойчивость системы.

В работе [9] было показано, что некоторые водорастворимые ВПАВ обеспечивают устойчивость реакционной системы, и при диспергировании мономера в их присутствии исходная эмульсия содержит минимальное количество высокодисперсной фракции капель мономера. Для этих ВПАВ были определены реологические параметры межфазных слоев, сформированных на границе водный раствор ВПАВ/бутилметакрилат. Исследования двумерных аналогов объемных характеристик реологического поведения проводили двумя методами: торсионной ротационной вискозиметрии на приборе Ребиндера–Трапезникова [10–17]; осциллирующей вискозиметрии (ОДМ-метод) [18–22]. Первый метод основан на исследовании поведения межфазного слоя в поле тангенциальных сдвиговых напряжений и позволяет определить модуль упругости (G), прочность (P_{rs} разрывную), а так же вязкость (η) разрушенного межфазного слоя. Вторым методом, отнесенным к неразрушающим видам исследования, позволяет определить эффективный модуль эластичности (E) – модуль Гиббса неразрушенной структуры межфазного слоя в поле переменного действия растягивающих-сжимающих напряжений. Таким образом, выбранный набор методов позволяет провести комплексное исследование неразрушенных и разрушенных межфазных слоев ВПАВ на границе водный раствор–бутилметакрилат.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использованы ВПАВ: поливиниловый спирт (ПВС) (ФГУП “НИИ полимеров” г. Дзержинск) – гидролизованный поливинилацетат, с остаточным содержанием ацетилированных групп 0 мас. % – ПВС-0 с молекулярной массой 60 кДа; групп 1 мас. % – ПВС-1 с молекулярной массой 85 кДа; 12 мас. % – ПВС-12 с молекулярной массой 70 кДа; сополимер 2-акриламидо-2-метил-пропансульфокислоты с метилметакрилатом (АМПСК-ММА) (ФГУП “НИИ полимеров” г. Дзержинск), содержащий 75 мас. % звеньев ММА – АМПСК-ММА-75 с молекулярным весом 219 кДа; содержащий 50 мас. % звеньев ММА – АМПСК-ММА-50 с молекулярным весом 210 кДа; 25 мас. % звеньев ММА – АМПСК-ММА-25 с молекулярным весом 190 кДа; частично гидролизованный полиакрилонитрил – Реагент ВПРГ (гипан) (ФГУП “НИИ полимеров” г. Дзержинск), представляющий собой (сополимер акрилонитрила с акриламидом и акрилатом натрия) с молекулярной массой 217.5 кДа. В качестве неполярной фазы был использован бутиловый эфир метакриловой кислоты – БМА (Evonik, Германия) CAS 97-88-1, предварительно очищенный методом перегонки в вакууме. NaOH марки “ч.”, HCl марки “ч.”. Вода дистиллированная.

Измерение реологических параметров межфазных адсорбционных слоев на границе раздела водный раствор ВПАВ/неполярная фаза проводили на ротационном поверхностном эластозиметре, разработанном Ребиндером и Трапезниковым [10–17]. Эффективный модуль упругости неразрушенных межфазных адсорбционных слоев ВПАВ определяли методом вискозиметрии осциллирующей ее объема (ОДМ-метод) с помощью тензиометра DSA-30 (Krüss, Германия) по стандартной методике [18–22].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Увеличение прочности адсорбционных слоев на поверхности капель мономера с увеличением содержания метилметакрилатных звеньев в сополимерном ВПАВ в работе [23] объясняли образованием прочных межмолекулярных узлов связывания. Считали, что природа этих контактов (узлов связывания) обусловлена возникновением гидрофобных взаимодействий между углеводородными сегментами полимерной цепи.

Варьирование остаточных ацетатных групп в макромолекуле ПВС является одним из простых путей изменения ее гидрофильно-липофильного баланса. Кроме изменения поверхностной активности, варьирование количества гидрофобных мономерных звеньев может изменять вклад гидрофобных взаимодействий между сегментами и отдельными макромолекулами в межфазном

слое. Такие изменения могут, безусловно, привести к изменению параметров, характеризующих реологическое поведение слоев ВПАВ. Свойства межфазных слоев ВПАВ зависят и от исходной концентрации ВПАВ в водном растворе.

В табл. 1 представлены результаты расчета прочности и модуля упругости межфазных слоев, сформированных ПВС с различным содержанием ацетилованных групп при варьировании концентрации полимера в водной фазе. Представленные результаты показывают, что межфазные адсорбционные слои, сформированные ПВС с различным содержанием ацетилованных звеньев, способны формировать двумерную межфазную пленку, обладающую упругими характеристиками. Это свойство межфазного адсорбционного слоя ВПАВ может определять возможность реализации структурно-механического барьера по Ребиндеру, что обеспечивает агрегативную устойчивость системы, в которой протекает процесс суспензионной полимеризации. Причем, необходимо отметить, что образующийся адсорбционный слой ВПАВ на энергетически однородной границе раздела вода–бутилметакрилат, во многом будет сохранять свои свойства при переходе капель мономера в полимер-мономерные частицы, а затем, и в полимерную дисперсию. Такое поведение адсорбционного слоя определяется, заторможенностью процессов десорбции ВПАВ с межфазной поверхности и разрушения структуры слоя при изменении физико-химических параметров одной из контактирующих фаз.

Увеличение концентрации ПВС в водной фазе приводит к росту адсорбции ВПАВ на межфазной поверхности. При этом возрастают величины G (модуль упругости) и P_{rs} (модуль разрывной прочности), характеризующие способность к сопротивлению межфазного слоя деформированию и разрушению под действием тангенциальных сдвиговых напряжений. При увеличении концентрации ПВС от 0.05 до 0.8% в независимости от содержания ацетилованных звеньев в цепи макромолекул величина G увеличивается, примерно, в 2–2.5 раза. В этих условиях P_{rs} возрастает всего на 10–15%.

Данный результат показывает, что прочность и упругость межфазного адсорбционного слоя лимитируется различными факторами. Если прочность межфазного адсорбционного слоя зависит от плотности упаковки макромолекул в нем и числа гидрофобных контактов между ними, то упругость неразрушенной структуры, зависит от способности упакованных и связанных друг с другом макромолекул запасать и выделять энергию при наложении внешнего силового поля на структуру межфазного адсорбционного слоя. В этом случае большое количество гидрофобных

Таблица 1. Зависимость модуля упругости (G) и разрывной прочности (P_{rs}) межфазных адсорбционных слоев, сформированных ПВС с различным содержанием ацетатных групп в зависимости от концентрации полимера в водной фазе. Граница раздела фаз вода–бутилметакрилат, время формирования 1 ч, pH 4.5, $T = 298$ К

Образец	ВПАВ, %	G , мН/м	P_{rs} , мН/м
ПВС-0	0.05	1.12 ± 0.03	0.67 ± 0.02
	0.4	1.73 ± 0.05	0.79 ± 0.05
	0.8	2.15 ± 0.02	0.86 ± 0.02
ПВС-1	0.05	1.41 ± 0.05	0.73 ± 0.05
	0.4	3.04 ± 0.09	0.88 ± 0.08
	0.8	8.10 ± 0.09	0.97 ± 0.03
ПВС-12	0.01	1.64 ± 0.03	0.71 ± 0.07
	0.05	2.17 ± 0.07	0.84 ± 0.09
	0.4	4.95 ± 0.08	0.95 ± 0.09
	0.8	5.41 ± 0.05	1.01 ± 0.02

групп, оставшихся в макромолекуле ПВС, может оказать негативное воздействие на способность макромолекулы изменять конформационное состояние. То есть, большое количество гидрофобных связей внутри макромолекулярной глобулы делают ее более жесткой относительно молекулы, что сопровождается увеличением числа гидрофобных звеньев в полимерной цепи.

Общая закономерность для ВПАВ, связывающая увеличение гидрофобности макромолекул и реологических свойств, структур, сформированных ими, подтверждается на примере исследованных систем. Рост содержания гидрофобных звеньев в макроцепи ПВС приводит к увеличению значений как G , так и P_{rs} .

Кривые течения разрушенных структур межфазных адсорбционных слоев, представленные на рис. 1 показывают, что в системах, содержащих ПВС, реализуются закономерности влияния общей концентрации ВПАВ в водной фазе, а так же содержания гидрофобных звеньев в полимерных макромолекулах, приводящих к росту вязкости системы. Представленные результаты показывают, что снижение концентрации ПВС в водной фазе приводит к резкому уменьшению значений реологических параметров межфазного адсорбционного слоя.

Таким образом, проведенные исследования показали, что существует минимальное значение концентрации ПВС, ниже которого невозможно

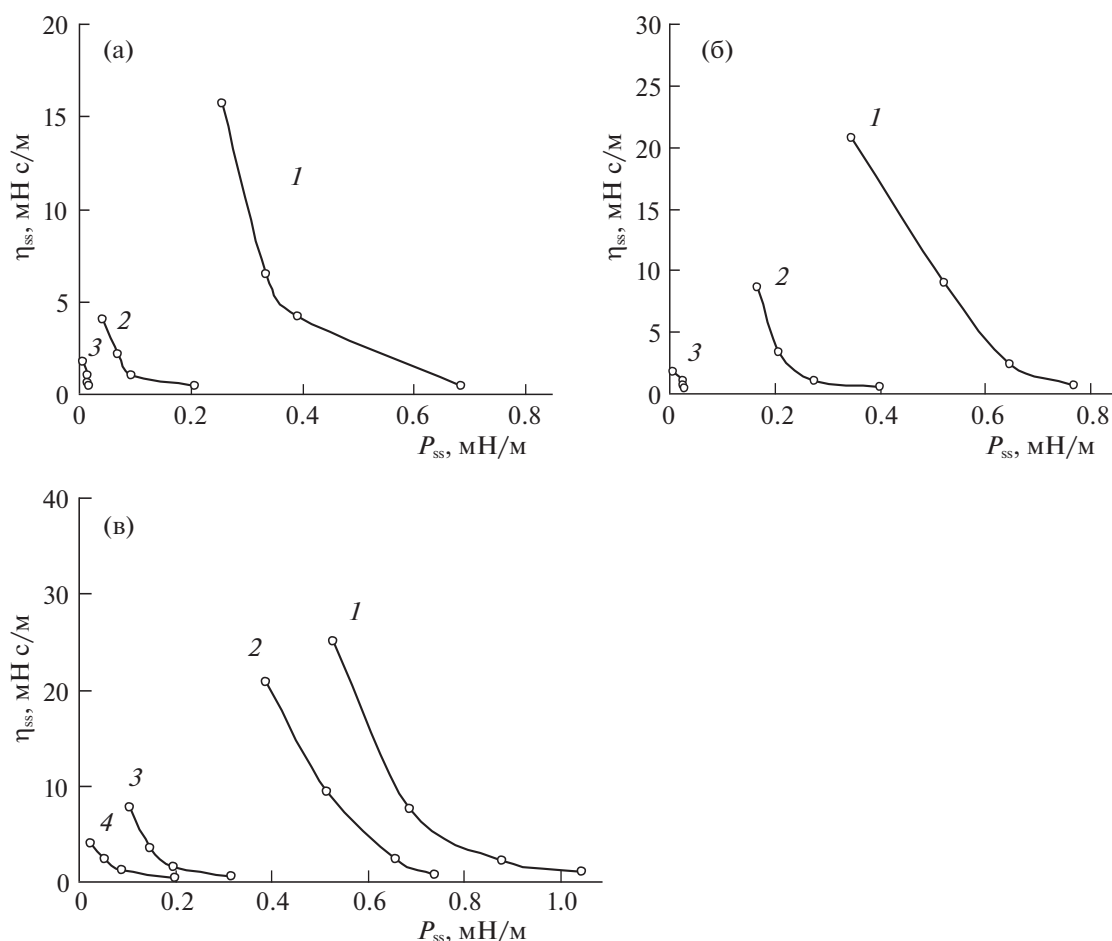


Рис. 1. Кривые течения межфазных адсорбционных слоев, сформированных на границе водный раствор ПВС с различным содержанием ацетилированных групп: ПВС-0 (а), ПВС-1 (б), ПВС-12 (в) – бутилметакрилат для различных концентраций (%) полимера: 1 – 0.8, 2 – 0.4, 3 – 0.05, 4 – 0.01, рН 4.5, $T = 298$ К.

осуществление стабилизирующей роли данного полимера в процессе суспензионной полимеризации.

Обнаруженная закономерность демонстрирует ведущую роль гидрофобных взаимодействий между отдельными полимерными макромолекулами стабилизатора в процессе формирования структурно-механического барьера, обеспечивающего устойчивость дисперсии в суспензионной полимеризации акриловых мономеров.

В табл. 2 представлены результаты расчета прочности и модуля упругости межфазных слоев, сформированных АМПСК-ММА с различным содержанием ММА звеньев при варьировании концентрации полимера в водной фазе. Представленные результаты показывают, что межфазные адсорбционные слои, сформированные АМПСК-ММА с различным содержанием ММА звеньев, способен формировать двумерную межфазную пленку, обладающую упругими характеристиками.

Представленные результаты демонстрируют увеличение значения G межфазных адсорбционных слоев, при переходе от ПВС к АМПСК-ММА в независимости от содержания гидрофобных звеньев в случае этих ВПАВ. Причем, абсолютные значения G для систем, содержащих АМПСК-ММА в 2–5 раз выше, относительно систем, содержащих ПВС. Это соотношение в значительной степени зависит от концентрации полимеров в водном растворе. Обнаружено, что в области низких концентраций различия систем по этому параметру более значительны, чем при высокой концентрации. Другим отличием в характеристиках межфазных слоев, сформированных ПВС и АМПСК-ММА, является относительный рост значений G при увеличении концентрации полимера в водном растворе. Для АМПСК-ММА в исследованном интервале концентраций увеличение G составляет только 30–90%, когда для ПВС наблюдался рост в 2–2.5 раза. Для величины P_{rs} наблюдается обратное изменение соотношения относительно систем, содержащих

ПВС. При увеличении концентрации полимера в растворе значение P_{rs} возрастает примерно в 2 раза в независимости от содержания звеньев ММА в полимерной цепи. Зафиксированное различие влияния концентрации на относительное изменение параметров G и P_{rs} межфазного адсорбционного слоя, сформированного ПВС и АМПСК-ММА, вероятно, отражает специфические особенности строения как гидрофильных, так и гидрофобных звеньев полимерных цепей (табл. 3). Общим для этих ВПАВ является увеличение абсолютных значений G и P_{rs} при росте массовой концентрации полимеров в растворе, хотя их молекулярные массы различаются более чем в 2.5 раза. Следовательно, несмотря на уменьшение числа структурных единиц в случае с АМПСК-ММА относительно ПВС, большее влияние на параметры G и P_{rs} межфазных адсорбционных слоев оказывает влияние абсолютное содержание гидрофобных групп в полимерной цепи. Увеличение гидрофобности макромолекул ВПАВ приводит к повышению их поверхностной активности, адсорбции и возможности реализации гидрофобных взаимодействий между отдельными полимерными молекулами в адсорбционном слое.

Кривые течения разрушенных межфазных адсорбционных слоев сформированных АМПСК-ММА с различным содержанием ММА имеют аналогичный вид кривым, полученным для систем, содержащих ПВС. Полученные результаты демонстрируют общие закономерности по увеличению вязкости для ПВС и АМПСК-ММА. Для АМПСК-ММА абсолютные значения вязкости превосходят значения, характерные для систем содержащих ПВС. Такое отличие, вероятно, связано с большей молекулярной массой и гидрофобностью АМПСК-ММА.

На рис. 2 представлены изотермы эффективного модуля упругости межфазного слоя, сформированного на границе водного раствора ПВС и бутилакрилат. Эффективный модуль упругости, рассчитанный по формуле $E_{эф} = d\sigma/d\ln S$, где S — площадь границы раздела фаз, отражает способность адсорбционного слоя сопротивляться растягивающим напряжением в условиях латерального всестороннего растяжения. Для образцов ПВС, отличающихся различным содержанием ацетилированных звеньев в макромолекуле, обнаружено расхождение в значениях модуля при концентрации ПВС выше 0.6%. Данная закономерность показывает, что различия строения и соответствующих реологических характеристик межфазных слоев наблюдаются при высоких степенях заполнения межфазной поверхности макромолекулами ПВС.

Увеличение содержания гидрофобных групп приводит к образованию структур, отличающихся более высокими значениями модуля. Сочета-

Таблица 2. Зависимость модуля упругости (G) и разрывной прочности (P_{rs}) межфазных адсорбционных слоев, сформированных АМПСК-ММА с различным содержанием ММА звеньев в зависимости от концентрации полимера в водной фазе. Граница раздела фаз вода–бутилметакрилат, время формирования 1 ч, pH 4.5, $T = 298$ К

Образец	ВПАВ, %	G , мН/м	P_{rs} , мН/м
АМПСК-ММА-25	0.05	5.27 ± 0.04	0.43 ± 0.01
	0.4	6.54 ± 0.05	0.92 ± 0.03
	0.8	8.11 ± 0.03	1.17 ± 0.02
АМПСК-ММА-50	0.05	8.27 ± 0.05	0.84 ± 0.03
	0.4	12.3 ± 0.1	0.96 ± 0.07
	0.8	15.5 ± 0.2	1.23 ± 0.04
АМПСК-ММА-75	0.05	7.90 ± 0.07	0.65 ± 0.06
	0.4	9.61 ± 0.08	1.17 ± 0.04
	0.8	11.3 ± 0.1	1.38 ± 0.05

Таблица 3. Зависимость модуля упругости (G) и разрывной прочности (P_{rs}) межфазных адсорбционных слоев, сформированных ВПРГ в зависимости от концентрации полимера в водной фазе. Граница раздела фаз вода–бутилметакрилат, время формирования 1 ч, pH 4.5, $T = 298$ К

Образец	ВПАВ, %	G , мН/м	P_{rs} , мН/м
ВПРГ	0.01	3.28 ± 0.04	0.33 ± 0.04
	0.2	4.74 ± 0.06	0.52 ± 0.07
	0.5	6.46 ± 0.04	0.61 ± 0.05

ние максимального снижения межфазного натяжения и максимального значения эффективного модуля упругости межфазного слоя позволяет предполагать реализацию в этой системе наиболее благоприятных условий для обеспечения устойчивости эмульсии бутилметакрилата в водном растворе ПВС.

На рис. 3 представлены изотермы эффективного модуля упругости межфазного слоя, сформированного на границе водного раствора АМПСК-ММА/бутилакрилат. Как и для ПВС, так и для АМПСК-ММА, различия между характеристиками адсорбционных слоев обнаруживаются только, начиная с концентрации 0.2%, отвечающей, вероятно, за формирование межфазного слоя с высокой степенью заполнения поверхно-

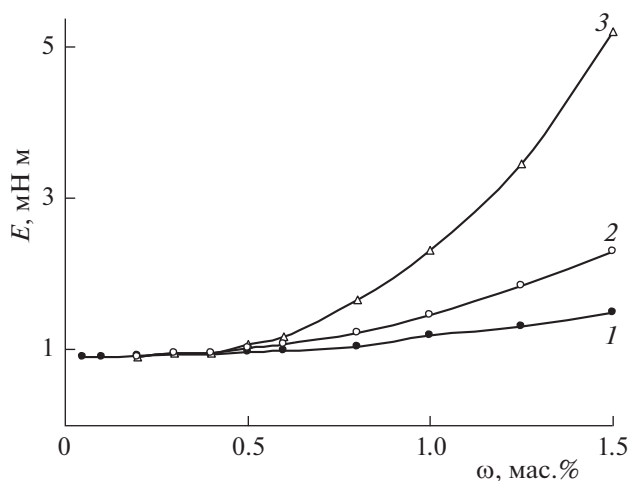


Рис. 2. Изотермы эффективного модуля упругости межфазного адсорбционного слоя, сформированного на границе водного раствора ПВС и бутилметакрилата для образцов, характеризующихся различным содержанием ацетилированных звеньев полимерной цепи: 1 – 0% (ПВС-0), 2 – 1% (ПВС-1), 3 – 12% (ПВС-12), $T = 293$ К, время выдерживания капли 1 ч, pH 4.5.

сти макромолекулами АМПСК-ММА. Увеличение гидрофобности макромолекул АМПСК-ММА приводит к максимальным значениям эффективного модуля упругости.

На рис. 4 представлены изотермы эффективного модуля упругости межфазного слоя, сформированного на границе водного раствора ВПРГ/бутилакрилат. Для ВПРГ, полимера, имеющего большую поверхностную активность, чем у ПВС-0 и ПВС-1, эффективный модуль упругости имеет промежуточные значения между значениями для систем с ПВС и АМПСК-ММА. Для АМПСК-ММА наблюдаются максимальные значения этой величины.

Значения эффективных модулей упругости, определенные двумя различными методами, отличающимися видом напряженного состояния и формой реализации “упругости”, показали сходные закономерности влияния концентрации полимеров в водной фазе и содержания гидрофобных звеньев в полимерной цепи. Полученные результаты показывают, что существует оптимальный химический состав высокомолекулярного стабилизатора, обеспечивающий максимальную стабилизирующую способность выбранного ПАВ.

Таким образом, проведенный комплекс реологических испытаний межфазных адсорбционных слоев, сформированных исследуемыми высокомолекулярными стабилизаторами, на границе вода/бутилметакрилат, показал, что для обеспечения эффективной агрегативной устойчивости дисперсии в процессе суспензионной полимеризации акриловых мономеров, необхо-

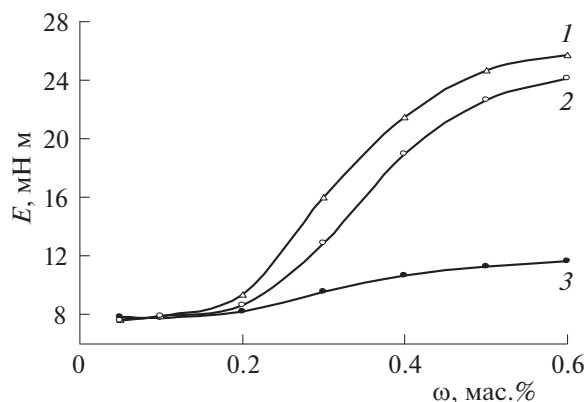


Рис. 3. Изотермы эффективного модуля упругости (G) межфазного адсорбционного слоя, сформированного на границе водного раствора АМПСК-ММА и бутилметакрилата для образцов, характеризующихся различным содержанием MMA групп: 1 – 75, 2 – 50, 3 – 25%, $T = 293$ К, время выдерживания капли 1 ч, pH 4.5.

димо использовать ВПАВ с наибольшим содержанием гидрофобных звеньев в полимерной цепи: ПВС с содержанием ацетилированных звеньев от 1 до 12%; АМПСК-ММА с содержанием MMA от 50 до 75%. Наряду с этим, ВПАВ, содержащие минимальное количество гидрофобных звеньев, способны так же формировать межфазные адсорбционные слои, характеризующиеся упругостью, прочностью и повышенной вязкостью относительно водного раствора полимера.

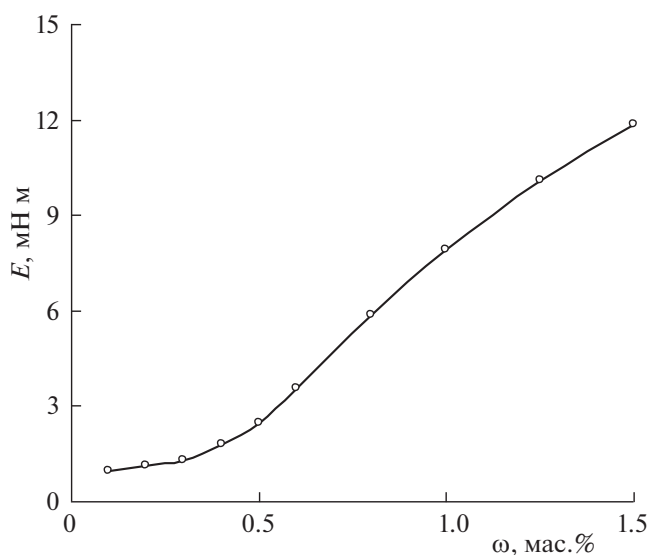


Рис. 4. Изотермы эффективного модуля упругости (G) межфазного адсорбционного слоя, сформированного на границе водного раствора ВПРГ и бутилметакрилата, $T = 293$ К, время выдерживания капли 1 ч, pH 4.5.

Работа поддержана грантом № АААА-А16-116030250108-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Холмберг К., Йёнссон Б., Кронберг Б., Линдман Б. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / Пер. с англ. М.: БИНОМ, 2015. 531 с.
2. Raffa P., Wever D.A., Picchioni F. et al. // Chem. Rev. 2015. V. 115. P. 8504.
3. Ключин Е.С., Грицкова И.А., Левачев С.М. // Пласт. массы. 2012. № 4. С. 20.
4. Ключин Е.С., Грицкова И.А., Левачев С.М. // Там же. 2012. № 5. С. 33.
5. Тиноко И. Физическая химия. Принципы и применение в биологических науках / Пер. с англ. Е.Р. Разумовой под ред. В.И. Горшкова. М., 2005. 743 с.
6. Сафонова Е.Ф., Назарова А.А., Семенов В.Ф. и др. // Химико-фармацевтический журнал. 2002. Т. 36. № 4. С. 41.
7. Измайлова В.Н., Ребиндер П.А. Структурообразование в белковых системах М.: Наука, 1974. 268 с.
8. Ролдугин В.И. Физикохимия поверхности Долгопрудный: ИД "Интеллект", 2011. 564 с.
9. Грицкова И.А., Сацкевич О.А., Ключин Е.С. и др. // Тонкие хим. тех. 2019. Т. 14. № 2. С. 51.
10. Derkach S.R., Kolotova D.S., Milyaeva O.Y. et al. // Colloids and Surfaces A. 2016. V. 508. № 2. P. 251.
11. Derkach S.R. // Adv. in Colloid and Interface Sci. 2015. V. 222. P. 172.
12. Derkach S.R., Kuhkushkina A.N., Levachov S.M. et al. // Colloids and Surfaces A. 2011. V. 391. № 1–3. P. 105.
13. Krägel J., Derkach S.R. // Curr. Opin. in Colloid & Interface Sci. 2010. V. 15. № 4. P. 246.
14. Derkach S.R., Dyakina T.A., Levachov S.M. // Prog. in Colloid and Polymer Sci. 2010. V. 138. P. 109.
15. Levachev S.M., Yampol'skaya G.P., Derkach S.R. et al. // Polymer Sci. Series C. 2004. V. 46. № 1. P. 73.
16. Измайлова В.Н., Камышны А., Левачев С.М. и др. // Коллоидн. журн. 2003. Т. 65. № 6. С. 856.
17. Shchukin E.D., Amelina E.A., Parfenova A.M. // Colloids and Surfaces A. 2000. V. 176. № 1. P. 35.
18. Kendra A.E., Jeffrey D.M., Jonathan T.S. et al. // J. Colloid and Interface Sci. 2012. V. 377. P. 442.
19. Brent S.M. // Curr. Opin. in Colloid & Interface Sci. 2002. V. 7. № 4. P. 426.
20. Zamora J.M., Marquez R., Forgiarini A.M. et al. // J. Colloid and Interface Sci. 2018. V. 519. P. 27.
21. Maldonado-Valderrama J., Patino J.M.R. // Curr. Opin. in Colloid & Interface Sci. 2010. V. 15. P. 271.
22. Dan A., Gochev G., Krägel J. et al. // Ibid. 2013. V. 18. P. 302.
23. Ma G., Jinghai Li J. // Chem. Eng. Sci. 2004. V. 59. № 8–9. P. 1711.