

Агрегационное поведение и солюбилизационные свойства 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ*

А. Б. Миргородская,* Р. А. Кушназарова, С. С. Лукашенко, Л. Я. Захарова

Институт органической и физической химии им. А. Е. Арбузова,
Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»,
Российская Федерация, 420088 Казань, ул. Акад. Арбузова, 8.
E-mail: mirgoralla@mail.ru

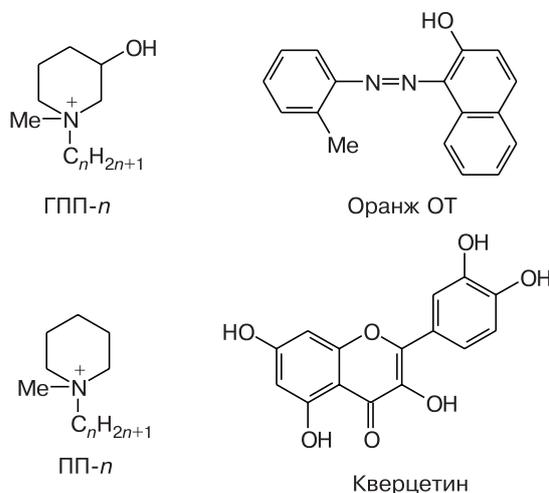
Получены системные данные об агрегационном поведении новых 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ в водных растворах. Охарактеризована их способность солюбилизовать гидрофобные соединения, в том числе краситель Оранж ОТ и биологически активное вещество группы флавоноидов — кверцетин. Достижимое предельное содержание этих веществ в мицеллярных растворах 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ в 2–3 раза выше, чем в растворах их нефункционализированных аналогов. Растворимость кверцетина зависит от pH среды, и наибольший эффект, наблюдаемый при переходе из воды в мицеллярные растворы исследуемых ПАВ, достигает двух порядков.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, агрегация, солюбилизация, лекарственные вещества.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) и системы на их основе находят широкое и разнообразное применение во многих технологических процессах химической, нефтехимической, химико-фармацевтической и пищевой промышленности. Они используются в качестве моющих средств, стабилизаторов эмульсий, катализаторов, ингибиторов коррозии, реагентов для нефтедобычи и нефтепереработки, флотореагентов, солюбилизаторов, систем доставки лекарственных и диагностических средств^{1–5}. Мировое производство ПАВ постоянно возрастает, причем доля катионных веществ в общем выпуске все время увеличивается. Поиск катионных ПАВ, сочетающих высокую эффективность и направленность действия с низкой токсичностью, безотходностью и экономичностью производства, приводит к появлению в литературе большого числа публикаций, посвященных разработке и синтезу новых соединений этого класса. Анализ имеющихся сведений показал, что наряду со случаями соединений, имеющих сложную структуру молекул, значимых результатов достигают и при незначительной функционализации соединений. Так, переход от ПАВ триметиламмониевого ряда к циклическим (морфолиниевым или пирролидиниевым) производным позволяет получать соединения с высокой антимикробной активностью, которые проявляют существенный защитный эффект при использовании в качестве ингибиторов коррозии^{6–8}. Введение в молекулы ПАВ гидроксильного фрагмента, способного к образованию водородных связей, в ряде случаев приводит к изменению агрегационного

поведения и функциональных свойств ПАВ. В частности, улучшается растворимость ПАВ в воде, облегчаются процессы мицеллообразования, усиливается каталитическое действие и солюбилизационная способность^{9–13}.

В настоящей работе синтезирован ряд новых ПАВ, производных 3-гидроксипиперидина, определены концентрационные границы мицеллообразования этих соединений, оценено их солюбилизационное действие в отношении гидрофобных соединений — красителя Оранж ОТ и природного антиокислительного и противовоспалительного препарата кверцетина, а также проведено сравнение бромидов 1-алкил-1-метил-3-гидроксипиперидиния (ГПП-*n*) с их аналогами (ПП-*n*), в структуре которых не содержится гидроксильный фрагмент.



* Посвящается академику Российской академии наук А. И. Коновалову в связи с его 85-летием.

Экспериментальная часть

3-Гидроксипиперидиниевые ПАВ синтезировали при взаимодействии *N*-метил-3-гидроксипиперидина с соответствующим алкилбромидом в этаноле с последующей перекристаллизацией реакционной смеси. Выходы целевых продуктов составили 60–90%. Для подтверждения структуры соединений использовали данные элементного анализа, ИК-спектроскопии, ЯМР и масс-спектрометрии.

ИК-спектры регистрировали на спектрометре «Bruker Vector-27 IR» в таблетках с KBr, спектры ЯМР ^1H — на спектрометре «Bruker Avance» (400 МГц, внутренний стандарт — Me_4Si , растворитель — CDCl_3). Масс-спектральный анализ проводили на приборе «Amazon X» («Bruker Daltonics GmbH») методом электрораспылительной ионизации (ESI). Элементный анализ выполняли на CHNS-анализаторе «Euro EA 300» («EURO VECTOR»). Содержание брома определяли по методу Шёнигера¹⁴.

Бромид 1-додецил-1-метил-3-гидроксипиперидиния (ГПП-12). Т.пл. 176–178 °С. Найдено (%): С, 59.08; Н, 10.88; Br, 21.35; N, 3.80. $\text{C}_{18}\text{H}_{38}\text{BrNO}$. Вычислено (%): С, 59.33; Н, 10.51; Br, 21.92; N, 3.84. ИК-спектр, $\nu/\text{см}^{-1}$: 3256, 2919, 2851, 1468, 1373, 1277, 1081, 1056, 926, 887, 721, 629, 631. Спектр ЯМР ^1H (δ , м.д.): 0.87 (т, 3 H, Me, $J = 6.7$ Гц); 1.25–2.16 (м, 20 H, CH_2); 1.87–2.24 и 3.47–3.92 (оба м, 9 H, цикл); 3.20 и 3.39 (оба с, 3 H, MeN); 3.47–3.92 (м, 2 H, N^+CH_2); 4.33 (уш.с, 1 H, OH). Масс-спектр, найдено m/z : 284.4 $[\text{M} - \text{Br}]^+$. $\text{C}_{18}\text{H}_{38}\text{NO}$. $M = 284.41$.

Бромид 1-метил-1-тетрадецил-3-гидроксипиперидиния (ГПП-14). Т.пл. 190–192 °С. Найдено (%): С, 61.39; Н, 10.92; Br, 20.16; N, 3.58. $\text{C}_{20}\text{H}_{42}\text{BrNO}$. Вычислено (%): С, 61.19; Н, 10.78; Br, 20.35; N, 3.57. ИК-спектр, $\nu/\text{см}^{-1}$: 3265, 2919, 2851, 1469, 1376, 1279, 1081, 1023, 916, 887, 721, 624. Спектр ЯМР ^1H (δ , м.д.): 0.86 (т, 3 H, Me, $J = 7.0$ Гц); 1.24–2.10 (м, 24 H, CH_2); 1.87–2.23 и 3.46–4.13 (оба м, 9 H, цикл); 3.20 и 3.39 (оба с, 3 H, MeN); 3.46–4.13 (м, 2 H, N^+CH_2); 4.32 (уш.с, 1 H, OH). Масс-спектр, найдено m/z : 312.4 $[\text{M} - \text{Br}]^+$. $\text{C}_{20}\text{H}_{42}\text{NO}$. $M = 312.26$.

Бромид 1-гексадецил-1-метил-3-гидроксипиперидиния (ГПП-16). Т.пл. 208–210 °С. Найдено (%): С, 62.67; Н, 11.51; Br, 18.63; N, 3.12. $\text{C}_{22}\text{H}_{46}\text{BrNO}$. Вычислено (%): С, 62.83; Н, 11.03; Br, 19.00; N, 3.33. ИК-спектр, $\nu/\text{см}^{-1}$: 3272, 2919, 2851, 1469, 1377, 1280, 1081, 1025, 914, 887, 721, 616. Спектр ЯМР ^1H (δ , м.д.): 0.88 (т, 3 H, Me, $J = 6.6$ Гц); 1.25–2.10 (м, 28 H, CH_2); 1.67–2.24 и 3.47–3.92 (оба м, 9 H, цикл); 3.20 и 3.39 (оба с, 3 H, MeN); 3.47–3.92 (м, 2 H, N^+CH_2); 4.33 (уш.с, 1 H, OH). Масс-спектр, найдено m/z : 340.6 $[\text{M} - \text{Br}]^+$. $\text{C}_{22}\text{H}_{46}\text{NO}$. $M = 340.52$.

Бромид 1-метил-1-октадецил-3-гидроксипиперидиния (ГПП-18). Т.пл. 210–212 °С. Найдено (%): С, 64.43; Н, 11.68; Br, 17.42; N, 3.33. $\text{C}_{24}\text{H}_{50}\text{BrNO}$. Вычислено (%): С, 64.26; Н, 11.24; Br, 17.81; N, 3.12. ИК-спектр, $\nu/\text{см}^{-1}$: 3283, 2918, 2850, 1469, 1377, 1081, 1020, 918, 887, 721, 599. Спектр ЯМР ^1H (δ , м.д.): 0.87 (т, 3 H, Me, $J = 7.3$ Гц); 1.25–2.16 (м, 32 H, CH_2); 1.86–2.22 и 3.46–3.90 (оба м, 9 H, цикл); 3.20 и 3.39 (оба с, 3 H, MeN); 3.46–3.90 (м, 2 H, N^+CH_2); 4.32 (уш.с, 1 H, OH). Масс-спектр, найдено m/z : 368.5 $[\text{M} - \text{Br}]^+$. $\text{C}_{24}\text{H}_{50}\text{NO}$. $M = 368.56$.

В качестве солюбилизаторов исследовали коммерческие образцы («Sigma—Aldrich») **Оранжевый OT** и **кверцетин**, содержащие более 99% основного вещества. Растворы готовили с использованием бидистиллированной воды, полученной на установке «Direct-Q 5 UV» (сопротивление воды 18.2 Мом·см⁻¹ при 25 °С).

Агрегационные свойства пиперидиниевых ПАВ изучали тензиометрическим методом на тензиометре К6 фирмы «KRUSS» в условиях термостатирования растворов при

25 °С. Величину максимальной адсорбции (Γ_{max}) и значение минимальной поверхности, приходящейся на молекулу ПАВ (A_{min}), оценивали согласно уравнениям (1) и (2):

$$\Gamma_{\text{max}} = 1/(2.3nRT)\lim_{C \rightarrow \text{СМС}}(d\pi/\lg C), \quad (1)$$

$$A_{\text{min}} = 10^{18}/(N_A\Gamma_{\text{max}}), \quad (2)$$

где $R = 8.31$ Дж·моль⁻¹·К⁻¹ (газовая постоянная), π — поверхностное давление, равное разности поверхностного натяжения растворителя и раствора при заданной концентрации ПАВ (C), T — абсолютная температура (К), СМС — критическая концентрация мицеллообразования, параметр n принимает значение 2 для ионных ПАВ, состоящих из одновалентного мицеллообразующего иона и противоиона; N_A — число Авогадро ($6.02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹). Величины свободной энергии мицеллообразования (ΔG_m) и стандартной свободной энергии адсорбции (ΔG_{ad}) рассчитывали по уравнениям (3) и (4):

$$\Delta G_m = (1 + \beta)RT \ln(\text{СМС}), \quad (3)$$

$$\Delta G_{\text{ad}} = \Delta G_m - \pi_{\text{СМС}}/\Gamma_{\text{max}}, \quad (4)$$

где β — степень связывания противоионов.

Солюбилизирующее действие мицеллярных систем по отношению к гидрофобным соединениям определяли, готовя серию их насыщенных растворов в условиях варьирования концентрации ПАВ. Для этого избыток кристаллического солюбилизатора заливали раствором исследуемого ПАВ в буферном растворе (ацетатный буфер pH 4.9, фосфатный буфер pH 6.9, боратный буфер pH 9.2); все используемые буферы были солями натрия), интенсивно перемешивали 1 ч и для достижения равновесия выдерживали 24 ч при термостатировании (25 °С). Затем нерастворившийся осадок отфильтровывали, фильтрат наливали в кювету и спектрофотометрическим методом с помощью прибора «Specord 250 Plus» определяли значение оптической плотности (A) образца в максимуме поглощения. Концентрацию солюбилизатора (C) в растворе рассчитывали с учетом его коэффициента экстинкции (ϵ) по уравнению $C = A/(L\epsilon)$, где L — толщина поглощающего слоя.

Обсуждение полученных результатов

На первом этапе работы изучали агрегационное поведение синтезированных соединений из серии бромидов 1-алкил-1-метил-3-гидроксипиперидиния (ГПП- n). Критическая концентрация мицеллообразования (СМС) является одной из основных характеристик мицеллярных систем, которая в большинстве случаев определяет границы функциональной активности ПАВ. Значения СМС исследуемых 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ определяли на основании изотерм поверхностного натяжения (рис. 1).

Из полученных данных (табл. 1) следует, что СМС этих соединений мало отличаются от значений для их аналогов, не содержащих гидроксильную группу, и согласуются с уравнением Стауфф—Клевенса:

$$\lg(\text{СМС}) = 1.02 - 0.25n,$$

где n — число атомов углерода в радикале ($R = 0.999$). Значения свободного члена и углового коэффициента

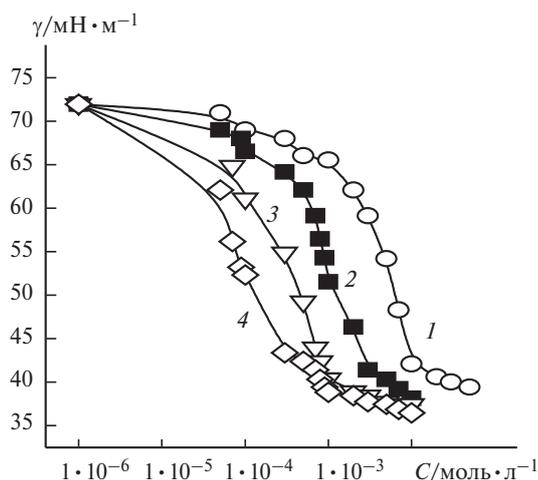


Рис. 1. Изотермы поверхностного натяжения (γ) 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ (25 °С): ГПП-12 (1), ГПП-14 (2), ГПП-16 (3), ГПП-18 (4).

для ПАВ несколько иные, чем типичные для ионных ПАВ (обычно они составляют¹⁶ $A = 1.5-1.9$ и $B = 0.3$). Следует добавить, что для нефункционализированных пиперидиниевых ПАВ (ряд ПП- n , см. табл. 1) уравнение Стауфф—Клевенса имеет следующий вид:

$$\lg(\text{СМС}) = 1.70 - 0.302n \quad (R = 0.995).$$

Итак, именно присутствие гидроксильной группы вносит специфику взаимодействия 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ с диполями воды по сравнению с триметиламмониевыми аналогами.

На основании тензиометрических данных (см. рис. 1) проведены расчеты адсорбционных параметров изучаемых систем. Полученные результаты представлены в таблице 1. Как и для большинства ПАВ, адсорбция и мицеллообразование исследуемых соединений являются термодинамически выгодными процессами и протекают самопроизвольно в водных растворах (свободные энергии адсорбции и мицеллообразования принимают отрицательные значения). По мере удлинения гидрофобного радикала 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ эти процессы облегчаются, что проявляется в росте абсолютных величин ΔG_m и ΔG_{ad} . Значения максимальной адсорбции и площадь, занимаемая молекулой ПАВ в насыщенном адсорб-

ционном слое, меняются мало и близки к таковым для соединений ряда ПП- n ¹⁷.

Важным свойством мицеллярных систем, определяющим их успешное использование в биомедицинских протоколах и каталитических композициях, является способность к солюбилизации гидрофобных соединений. Нами изучена солюбилизация гидрофобного красителя Оранж ОТ в растворах 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ. Этот краситель часто используется в качестве спектрального зонда для определения солюбилизационной емкости мицеллярных растворов, и существующая информационная база позволяет оценивать место исследуемых ПАВ в ряду аналогичных соединений. В воде Оранж ОТ практически нерастворим. Наблюдаемое резкое увеличение оптической плотности при концентрации ПАВ, превышающей СМС, отражает солюбилизацию красителя и рост его содержания в мицеллярных растворах. В качестве примера на рисунке 2 приведены спектры мицеллярных растворов ГПП-18, насыщенных Оранж ОТ, которые зарегистрированы при различных концентрациях ПАВ. На рисунке 3 представлены данные, отражающие изменение оптической плотности раствора красителя в максимуме поглощения (495 нм) в зависимости от концентрации ГПП-14 и ГПП-16.

Точка изменения наклона на полученных зависимостях соответствует значению СМС. Определенные этим методом величины СМС (табл. 2) хорошо со-

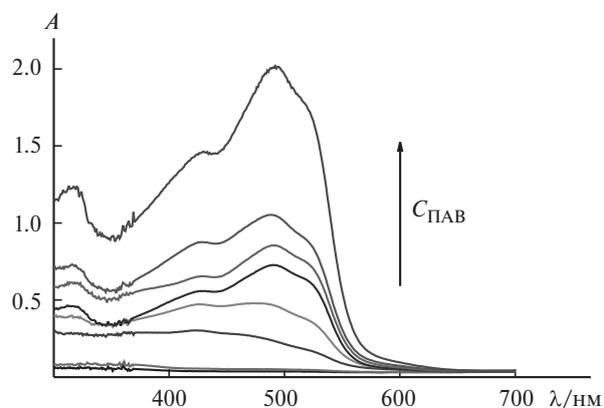


Рис. 2. Спектры поглощения мицеллярных растворов ГПП-18, насыщенных Оранж ОТ, которые зарегистрированы при изменении концентрации ПАВ от 0 до 2 ммоль·л⁻¹.

Таблица 1. Значения СМС*, максимальной адсорбции (Γ_{max}), минимальной поверхности в расчете на молекулу ПАВ (A_{min}), свободной энергии мицеллообразования (ΔG_m), стандартной свободной энергии адсорбции (ΔG_{ad}) и поверхностного натяжения (γ) для водных растворов 3-гидроксипиперидиновых ПАВ

ПАВ	СМС/ммоль·л ⁻¹	$A_{min}/\text{нм}^2$	$\Gamma_{max} \cdot 10^6/\text{моль} \cdot \text{м}^{-2}$	ΔG_m	ΔG_{ad}	$\gamma/\text{мН} \cdot \text{м}^{-1}$
				кДж·моль ⁻¹		
ГПП-12	10	0.816	2.04	-17.4	-32.1	42.1
ГПП-14	3.0	0.701	2.37	-22.0	-34.9	41.4
ГПП-16	1.0	0.888	1.87	-26.1	-43.1	40.2
ГПП-18	0.3	0.834	1.99	-30.7	-45.0	43.4

* Для незамещенных аналогов ПП-12, ПП-14 и ПП-16 значения СМС равны 11.8, 3.22 и 0.73 ммоль·л⁻¹ соответственно¹⁵.

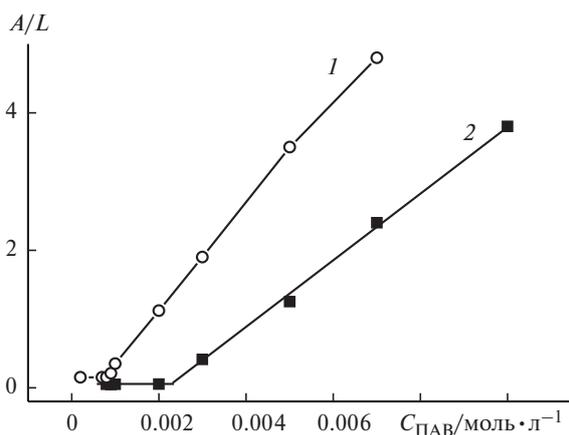


Рис. 3. Изменение оптической плотности растворов Оранж ОТ в максимуме поглощения (495 нм) в зависимости от концентрации ГПП-16 (1) и ГПП-14 (2).

гласуются с данными, полученными с помощью тензиометрии. Солюбилизационная емкость мицелл (S) вычислена на основании концентрационных зависимостей оптической плотности (A) по уравнению $S = b/\varepsilon$, где b — наклон зависимости $A/L = f(C)$, L — толщина кюветы, C — концентрация ПАВ, ε — коэффициент экстинкции. Для Оранж ОТ в растворах катионных ПАВ коэффициент экстинкции при $\lambda = 495$ нм равен $18720 \text{ л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Из полученных результатов (см. табл. 2) следует, что солюбилизационная емкость 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ увеличивается по мере роста длины гидрофобного радикала. Во всем исследуемом ряду ГПП- n значение S в 2—3 раза превышает аналогичный показатель соответствующих триметиламмониевых ПАВ, традиционно служащих в коллоидной химии в качестве референтных соединений¹⁷. Вероятно, наличие гидроксильного фрагмента, способного к водородному связыванию, наряду с гидрофобной и электростатической составляющими, вносит дополнительный вклад в механизм солюбилизации гидрофобного красителя.

Полезную информацию об агрегационном поведении ПАВ можно получить путем анализа данных по солюбилизации Оранж ОТ с использованием подхода Шотта¹⁹. С его помощью можно оценить числа агрегации и молекулярную массу мицеллы (МММ).

В основе этого подхода лежит допущение, что при $C < \text{СМС}$ краситель не растворяется, а при $C > \text{СМС}$ в мицелле солюбилизируется только одна молекула. Из данных, представленных в таблице 2, следует, что с увеличением длины углеродного радикала 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ числа агрегации и молекулярная масса мицелл уменьшаются и по мере роста концентрации ПАВ их числа агрегации возрастают. Отметим, что подход Шотта не является достаточно надежным хотя бы потому, что соотношение одна молекула красителя на одну мицеллу, вероятно, не всегда соблюдается. Однако полученный результат может нести полезную информацию при сравнении данных для ПАВ одного гомологического ряда или близкой структуры. Кроме того, в ряде случаев наблюдается хорошее согласие чисел агрегации, полученных при исследовании солюбилизации Оранж ОТ, с данными метода рассеяния нейтронов²⁰ или динамического рассеяния света.

На следующем этапе солюбилизационное действие ГПП-16 было испытано в отношении природного флавоноида кверцетина. Это — биологически активное вещество, обладающее антиоксидантным и противовоспалительным действием, оно практически нерастворимо в воде. Для определения содержания кверцетина в образцах водных и водно-мицеллярных растворов мы использовали спектрофотометрический метод. Известно, что на растворимость в воде этого вещества, способного принимать участие в многоступенчатых кислотно-основных равновесиях, существенно влияет рН среды. В водных растворах для кверцетина обычно определяют и указывают три значения рК: 6.62, 9.70, 11.56 (20 °С, вода)²¹, тогда как в действительности возможно существование семи ион-молекулярных форм этого соединения, находящихся в динамическом равновесии, положение которого зависит от кислотности среды. В работе²² определены и приписаны к соответствующим центрам диссоциации следующие значения рК: 6.4, 8.0, 9.0, 9.6, 11.3. Кроме того, катионные ПАВ оказывают существенное влияние на pK_a гидрофобных соединений, обуславливая изменение соотношения их незаряженных и ионных форм при заданном рН. В связи с этим на предварительной стадии мы, не вдаваясь в детализацию состояния равновесия, определяли положение максимумов поглощения и молекулярный

Таблица 2. Значения СМС, солюбилизационной емкости (S), молекулярной массы мицелл (МММ) и чисел агрегации (N) 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ, определенные с использованием красителя Оранж ОТ*

ПАВ	СМС/ммоль · л ⁻¹	S	МММ		N	
			$C/\text{СМС} = 3$	$C/\text{СМС} = 5$	$C/\text{СМС} = 3$	$C/\text{СМС} = 5$
ГПП-12	9.0	0.009	57770	66020	147	168
ГПП-14	2.3	0.025	12210	14250	30	35
ГПП-16	0.8	0.038	8420	9260	20	22
ГПП-18	0.3	0.055	5660	6520	13	16

* Для бромиды цетилтриметиламмония солюбилизационная емкость в отношении Оранж ОТ составляет¹⁷ 0.015, число агрегации при концентрации, в 5 раз превышающей СМС, равно¹⁸ 66.8.

Таблица 3. Спектральные характеристики и растворимость кверцетина в воде и в мицеллярных растворах ($C_{\text{ПАВ}} = 3 \text{ ммоль} \cdot \text{л}^{-1}$)

рН*	Вода		ГПП-16		ПП-16		Растворимость кверцетина/ $\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$		
	$\lambda/\text{нм}$	$\epsilon/\text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	$\lambda/\text{нм}$	$\epsilon/\text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	$\lambda/\text{нм}$	$\epsilon/\text{л} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	Вода	ГПП-16	ПП-16
4.90	376	15500	377	20150	376	20000	0.0021	0.187	0.136
6.86	383	15400	392	19900	393	19880	0.0042	0.103	0.015
9.20	399	15700	403	23100	403	22370	—	—	—

* Для создания рН использовали ацетатный, фосфатный и боратный буферные растворы (катион — натрий).

коэффициент экстинкции строго при тех значениях рН и при той концентрации ПАВ, при которых планировали проводить эксперимент. В качестве примера в таблице 3 представлены спектральные характеристики 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ, которые получены в воде и в мицеллярных растворах при $C_{\text{ПАВ}} = 3 \text{ ммоль} \cdot \text{л}^{-1}$. При увеличении рН среды, а следовательно, при росте доли и числа депротонированных центров кверцетина, наблюдается bathochromный сдвиг максимума полосы поглощения (рис. 4), однако интенсивность поглощения меняется незначительно. При переходе от воды к мицеллярным растворам при заданных рН наблюдается незначительное смещение максимума поглощения и некоторое увеличение его интенсивности.

Известно, что уже при рН >7 в водных растворах даже при комнатной температуре наблюдается окисление кверцетина, причем с увеличением рН его скорость возрастает⁷, тогда как в слабокислых и нейтральных средах указанный процесс практически не идет. В связи с этим мы изучали процессы солюбилизации кверцетина в мицеллярных растворах при рН 4.9 и 6.86. На основании данных, приведенных в таблице 3, можно сделать вывод, что в воде переход из нейтральной формы в анионную приводит к увеличению растворимости кверцетина, однако значительно больший эффект наблюдается при переходе к мицеллярным растворам катионных ПАВ. Так, при рН 6.86 при переходе в раствор ГПП-16 (при $C_{\text{ПАВ}} = 3 \text{ ммоль} \cdot \text{л}^{-1}$) можно достичь увеличения раство-

римости кверцетина почти в 20 раз, а при рН 4.9 эффект от действия ПАВ составляет почти два порядка. Сравнение солюбилизационного действия ГПП-16 и его нефункционализированного аналога ПП-16 позволило показать положительное влияние гидроксифрагмента, введенного в молекулу ПАВ. Вероятно, это обусловлено возможностью ГПП-16 связывать солюбилизат не только за счет гидрофобных и электростатических сил, но и за счет образования водородных связей.

Таким образом, высокое солюбилизационное действие исследованных 3-гидроксипиперидиниевых ПАВ может послужить основой для решения круга задач, связанных с улучшением растворимости разнообразных гидрофобных соединений, в том числе лекарственных препаратов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Республики Татарстан (проект № 18-43-160015).

Список литературы

1. К. Р. Ланге, *Поверхностно-активные вещества. Синтез, свойства, анализ, применение*, Профессия, Санкт-Петербург, 2005, 240 с. [K. R. Lange, *Surfactants: A Practical Handbook*, Hanser Publishers, Munich, 1999, 237 pp.].
2. Th. F. Tadros, *Applied Surfactants: Principles and Application*, Wiley-VCH, Weinheim, 2005, 634 pp.
3. D. Myers, *Surfactant Science and Technology*, John Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey 2006, 380 pp.
4. S. Abbott, *Surfactant Science. Principles and Practice*, DEStech Publishing Inc, Lancaster, Pennsylvania, 2017, 198 pp.
5. V. Pandey, S. Kohli, *Crit. Rev. Ther. Drug Carrier Syst.*, 2018, **35**, 99.
6. E. E. Badr, *Adv. Appl. Sci Res.*, 2017, **8**, 81.
7. Э. А. Васильева, С. С. Лукашенко, А. Д. Волошина, А. С. Стробыкина, Л. А. Васильева, Л. Я. Захарова, *Изв. АН. Сер. хим.*, 2018, 1280 [E. A. Vasilieva, S. S. Lukashenko, A. D. Voloshina, A. S. Strobikina, L. A. Vasileva, L. Y. Zakharova, *Russ. Chem. Bull. (Int. Ed.)*, 2018, **67**, 1280].
8. А. Б. Миргородская, С. С. Лукашенко, Е. И. Яцкевич, Н. В. Кулик, А. Д. Волошина, Д. Б. Кудрявцев, А. Р. Пантелеева, В. В. Зобов, Л. Я. Захарова, А. И. Коновалов, *Физикохимия поверхности и защита материалов*, 2014, **50**, 434 [A. B. Mirgorodskaya, S. S. Lukashenko, E. I. Yatskevich, N. V. Kulik, A. D. Voloshina, D. B. Kudryavtsev, A. R. Panteleeva, V. V. Zobov, L. Ya. Zakharova, A. I. Kononov, *Prot. Met. Phys. Chem. Surf. (Int. Ed.)*, 2014, **50**, 538].
9. Zh. Zhang, H. Wang, W. Shen, *J. Chem. Eng. Data*, 2013, **58**, 2326.

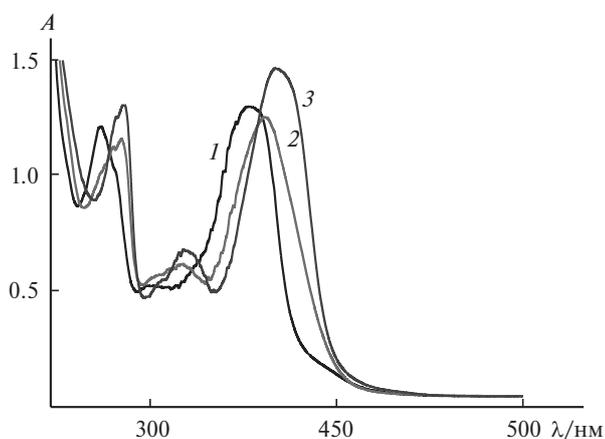


Рис. 4. Спектры поглощения кверцетина в растворе катионного ПАВ ГПП-16 ($0.3 \text{ ммоль} \cdot \text{л}^{-1}$) при рН 4.9 (1), 6.86 (2) и 9.2 (3).

10. W.-Sh. Liu, Ch.-H. Wang, J.-F. Sun, G.-G. Hou, Y.-P. Wang, R.-J. Qu, *Chem. Biol. Drug Des.*, 2015, **85**, 91.
11. Е. И. Яцкевич, А. Б. Миргородская, С. С. Лукашенко, Л. Я. Захарова, *Изв. АН. Сер. хим.*, 2014, 1801 [E. I. Yackevich, A. B. Mirgorodskaya, S. S. Lukashenko, L. Ya. Zakharova, *Russ. Chem. Bull. (Int. Ed.)*, 2014, **63**, 1801].
12. A. B. Mirgorodskaya, F. G. Valeeva, S. S. Lukashenko, T. M. Prokopieva, T. M. Zubareva, V. A. Mikhailov, L. Y. Zakharova, *J. Mol. Liq.*, 2018, **250**, 229.
13. O. Kaczerewska, B. Brycki, I. Ribosa, F. Comelles, M. T. Garcia, *J. Ind. Eng. Chem.*, 2018, **59**, 141.
14. В. Л. Климова, *Основные микрометоды анализа органических соединений*, Химия, Москва, 1974, 224 с.
15. Yu. Zhao, X. Yue, X. Wang, D. Huang, X. Chen, *Colloids Surf., A*, 2012, **412**, 90.
16. А. И. Русанов, *Мицеллообразование в растворах поверхностно-активных веществ*, Химия, Санкт-Петербург, 1992, 280 с.
17. L. Ya. Zakharova, R. R. Kashapov, T. N. Pashirova, A. B. Mirgorodskaya, O. G. Sinyashin, *Mendeleev Commun.*, 2016, **26**, 457.
18. M. Pisárčik, F. Devínsky, M. Pupák, *Open Chem.*, 2015, **13**, 922.
19. H. Schott, *J. Phys. Chem.*, 1966, **70**, 2966.
20. M. H. Alimohammadi, S. Javadian, H. Gharibi, A. R. Tehrani Bagha, M. R. Alavijeh, K. Kakaei, *J. Chem. Thermodyn.*, 2011, **43**, 1349.
21. А. Н. Чеботарев, Д. В. Снигур, *Журн. аналит. химии*, 2015, **70**, 53 [A. N. Chebotarev, D. V. Snigur, *J. Anal. Chem. (Int. Ed.)*, 2015, **70**, 55].
22. I. G. Zenkevich, A. Yu. Eshchenko, S. V. Makarova, A. G. Vitenberg, Yu. G. Dobryakov, V. A. Utsal, *Molecules*, 2007, **12**, 654.

Поступила в редакцию 19 ноября 2018;
принята к публикации 26 декабря 2018