

ISSN 1561-8331 (Print)
ISSN 2524-2342 (Online)

КАЛОИДНАЯ ХИМИЯ
COLLOID CHEMISTRY

УДК 532.61.08
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-2-129-135>

Поступила в редакцию 27.06.2023
Received 27.06.2023

**С. В. Буча, Е. В. Воробьева, Ю. В. Липай, П. Д. Воробьев, Н. П. Крутько,
М. А. Астахова, Г. В. Бондарева**

*Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь*

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АМИНОВ
И (СО)ПОЛИМЕРОВ АКРИЛАМИДА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ
ЖИДКОСТЬ–ВОЗДУХ**

Аннотация. Изучены поверхностные свойства систем на основе аминов и (со)полимеров акриламида в зависимости от молекулярно-структурного строения компонентов в водных и солевых (хлорид натрия) растворах. Для систем аминов с анионным сополимером акриламида обнаружено изменение формы изотермы поверхностного натяжения. Тенденция к изменению поверхностных свойств усиливается в системах с анионным сополимером акриламида, алифатическим амином и в присутствии низкомолекулярного электролита.

Ключевые слова: поверхностно-активные вещества, амины, сополимеры акриламида, полиакриламид, поверхностное натяжение, адсорбционный слой, низкомолекулярный электролит

Для цитирования. Поверхностные свойства систем на основе аминов и (со)полимеров акриламида на границе раздела фаз жидкость–воздух / С. В. Буча [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2024. – Т. 60, № 2. – С. 129–135. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-2-129-135>

**S. V. Bucha, E. V. Vorobieva, Yu. V. Lipai, P. D. Vorobiev, N. P. Krutko,
M. A. Astakhova, H. V. Bondarava**

*Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**SURFACE PROPERTIES OF SYSTEMS BASED ON AMINES AND (CO)POLYMERS
OF ACRYLAMIDE AT THE LIQUID–AIR INTERFACE**

Abstract. Surface properties of the systems based on amines and acrylamide (co)polymers have been studied depending on the molecular structure of the components in aqueous and saline (sodium chloride) solutions. For the systems of amines with an anionic acrylamide copolymer, a change in the shape of the surface tension isotherm was found. The tendency to change the surface properties is enhanced in systems with an anionic acrylamide copolymer, aliphatic amine and in the presence of a low molecular weight electrolyte.

Keywords: surfactants, amines, acrylamide copolymers, polyacrylamide, surface tension, adsorption layer, low molecular weight electrolyte

For citation. Bucha S. V., Vorobieva E. V., Lipai Yu. V., Vorobiev P. D., Krutko N. P., Astakhova M. A., Bondarava H. V. Surface properties of systems based on amines and (co)polymers of acrylamide at the liquid–air interface. *Vesti Natsyynal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya khimichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2024, vol. 60, no. 2, pp. 129–135 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2024-60-2-129-135>

Введение. К поверхностным явлениям относятся процессы, происходящие в межфазном слое на границах раздела фаз. Поверхностные явления, такие как смачивание, адсорбция, седиментация, коагуляция, флокуляция, широко распространены в химической технологии для получения пенообразующих и эмульгирующих композиций, стабилизации дисперсных систем в биомедицине, биотехнологии, флотационном обогащении руд, а также в пищевой, текстильной промышленности и т. д. Как правило, эффективность гетерогенных процессов возрастает с увеличением

поверхности контакта фаз, в связи с чем системы переводят в состояние суспензий, порошков, эмульсий, аэрозолей. Ряд технологических процессов связан с пенообразованием и формированием пен как лиофобной дисперсии газа в жидкости в присутствии поверхностно-активных веществ (ПАВ) и определяется адсорбцией молекул ПАВ на поверхности раздела фаз жидкость–воздух [1–4].

В технологиях флотационного обогащения полезных ископаемых, в частности полиминеральных руд, наряду с катионными ПАВ (амины различного молекулярного строения) применяются высокомолекулярные (со)полимеры акриламида [5, 6]. При этом не учитывается возможность взаимодействия компонентов по типу комплексообразования, обнаруженного для ряда систем ПАВ–полимер [7], и не рассматривается влияние (со)полимеров акриламида на поверхностные свойства аминоксодержащих ПАВ на границе раздела фаз жидкость–воздух. Для решения проблемы повышения эффективности флотационного извлечения калиевых солей из руды важной является оценка возможности направленного регулирования поверхностных свойств аминоксодержащих ПАВ, которые зависят от условий формирования поверхностного слоя в присутствии полимеров различной природы и низкомолекулярного электролита.

Несмотря на значительное количество научных публикаций, в которых рассматриваются вопросы влияния полимеров на свойства ПАВ [7–9], и сведений о практическом использовании аминов в процессах обогащения минеральных руд, убедительных экспериментальных данных или теоретических расчетов, объясняющих процессы, происходящие при взаимодействии полимеров с ПАВ в водных и солевых растворах на границе раздела фаз жидкость–воздух, в литературе недостаточно.

В настоящей статье излагаются результаты исследования поверхностных свойств бинарных систем на основе аминов и (со)полимеров акриламида на границе раздела фаз жидкость–воздух в зависимости от молекулярно-структурного строения ПАВ и полимера и состава среды.

Экспериментальная часть. В качестве объектов исследования использовали амины с различным молекулярно-структурным строением: алифатический (хлорид алкиламмония, ААл); циклический (алкилморфолин, АЦ) и ароматический (бензетония хлорид, ААр) с углеводородным радикалом, содержащим 14–20 атомов углерода, которые применяются в процессах флотации [6].

В работе использовали сополимеры акриламида – анионный (А), катионный (К) и неионогенный полиакриламид (Н) с молекулярной массой $(12–14) \cdot 10^6$ («Дегусса», РФ). Анионный А представляет собой сополимер акриламида с акрилатом натрия, К – сополимер акриламида с метилхлоридом диметиламинопропилакриламида. Содержание ионогенных групп в сополимерах акриламида составляет около 30 % от общего числа функциональных групп.

В качестве систем использовались водный и солевой (хлорид натрия, 4М) растворы с концентрацией ПАВ в диапазоне $2,38 \cdot 10^{-7} – 2$ (%) в присутствии сополимера акриламида с постоянной концентрацией 0,1 %.

Поверхностное натяжение растворов определяли полустатическим методом отрыва кольца (метод Дю Нуи) на процессорном тензиометре Kruss (Германия) в автоматическом режиме с точностью $\pm 0,3$ мН/м. Расчет данных осуществлялся с использованием программного обеспечения LabDesk™ (Kruss, Германия). Полученные экспериментальные данные применяли для построения изотерм поверхностного натяжения σ ($\ln C$) и расчета предельной адсорбции (Γ), критической концентрации мицеллообразования (ККМ), критической концентрации ассоциации, свободной энергии мицеллообразования (ΔF_m), плотности упаковки молекул в поверхностном слое (S_m) на границе раздела фаз жидкость–воздух.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены изотермы поверхностного натяжения водных растворов, содержащих анионный сополимер (концентрация 0,1 %) и амин (алифатический или циклический). В системе на основе полимера и ААр поверхностное натяжение растворов не исследовали, поскольку как в водной, так и в солевой среде происходит образование нерастворимых ассоциатов анионного полиэлектролита с амином.

На изотермах (см. рис. 1) можно выделить участки плато и области понижения поверхностного натяжения. При некоторой концентрации, которую принято называть критической концентрацией ассоциации (агрегации) [10, 11], вследствие взаимодействия молекул ПАВ и поли-

мера, поверхностная активность ПАВ не увеличивается, и поверхностное натяжение остается постоянным. При насыщении полимерной цепи молекулами ПАВ и увеличении концентрации ПАВ поверхностное натяжение уменьшается до достижения ККМ, после чего в растворе начинают формироваться мицеллы ПАВ. Для таких систем ККМ определяется интенсивностью образования не только мицелл ПАВ, но и мицеллярных ассоциатов «ПАВ – полимер».

Мицеллообразование ПАВ в присутствии полимера характеризуется рядом особенностей. Подобно адсорбции процесс мицеллообразования протекает самопроизвольно, то есть с уменьшением энергии Гиббса. Силы когезии между полярными молекулами воды значительно выше, чем силы взаимодействия между углеводородными цепями ПАВ и водой. В связи с этим процессы, связанные с переходом углеводородных радикалов из воды в близкую по полярности фазу, энергетически выгодны [1]. В растворах с концентрацией ПАВ ниже ККМ стремление системы к убыли свободной энергии удовлетворяется за счет перехода молекул ПАВ в поверхностный слой и перехода углеводородных радикалов из воды в неполярную фазу. При полном насыщении адсорбционного слоя такая возможность исчерпывается. С дальнейшим повышением концентрации ПАВ минимизация энергии Гиббса может быть реализована лишь за счет структурных изменений в объеме раствора, то есть путем образования мицелл ПАВ и ассоциатов «ПАВ – полимер» [12, 13].

Наличие на изотермах области понижения поверхностного натяжения после перегиба, соответствующего критической концентрации ассоциации (агрегации), и плато (см. рис. 1) определяется тем, что на поверхности раздела фаз жидкость–воздух адсорбируются не только молекулы ПАВ, но и ассоциаты «ПАВ–полимер», гидрофобность которых возрастает вследствие нейтрализации заряженных групп ионогенных компонентов. В этом случае на межфазной границе образуется смешанный адсорбционный слой из ассоциатов и молекул ПАВ [9, 14].

Как следует из табл. 1, формирование смешанного адсорбционного слоя и поверхностные характеристики водных систем зависят от молекулярно-структурного строения аминов. ККА для системы «полимер–АЦ» выше в 1,2 раза, поверхностная активность и предельная адсорбция – в 1,4 и 1,8 раза соответственно по сравнению с системой «полимер–ААл», что способствует увеличению плотности упаковки в поверхностном слое. Исходя из полученных данных можно предположить, что ассоциаты анионного сополимера с АЦ в большей степени формируются на границе раздела фаз, тогда как с ААл – в объеме раствора.

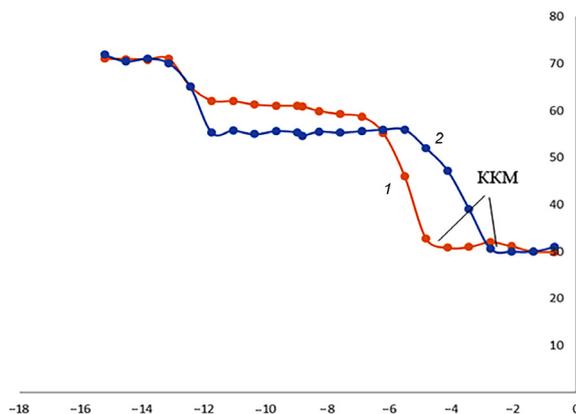


Рис. 1. Изотермы поверхностного натяжения водного раствора системы на основе анионного сополимера и аминов: АЦ (1) и ААл (2)

Fig. 1. Surface tension isotherms of an aqueous solution system based on anionic copolymer and amines: CA (1) and AIA (2)

Таблица 1. Поверхностные характеристики систем на основе аминов и анионного сополимера в водном и солевом (NaCl) растворах

Table 1. Surface characteristics of systems based on amines and anionic copolymer in aqueous and saline (NaCl) solutions

| Параметры системы | Система «ПАВ–А» | | | |
|--|-----------------|------|--------------|------|
| | Водный раствор | | Раствор NaCl | |
| | Вид амина | | | |
| | АЦ | ААл | АЦ | ААл |
| ККА · 10 ⁵ , % | 1,55 | 1,31 | 0,76 | 0,72 |
| ККМ · 10 ³ , % | 2,9 | 10,1 | 15,1 | 62,5 |
| Поверхностная активность G · 10 ⁷ , Дж·м/моль | 1,9 | 1,4 | 5,4 | 3,9 |
| Предельная адсорбция Г · 10 ⁴ , моль/м ² | 5,86 | 3,21 | 9,47 | 5,24 |
| Плотность упаковки, Sm · 10 ²¹ , м ² | 5,16 | 6,84 | 3,17 | 3,75 |

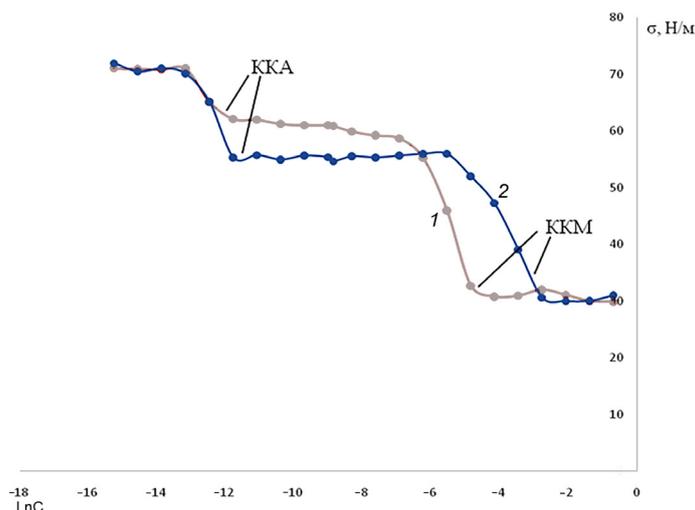


Рис. 2. Изотермы поверхностного натяжения солевого раствора системы на основе анионного сополимера и аминов: АЦ (1) и ААл (2)

Fig. 2. Surface tension isotherms of a salt solution of a system based on an anionic copolymer and amines: CA (1) and A1A (2)

Форма изотерм поверхностного натяжения системы на основе аминов и анионного сополимера в растворе хлорида натрия (рис. 2) в целом аналогична форме кривых, полученных в водном растворе. Это свидетельствует о том, что в солевом растворе ПАВ и полимер образуют ассоциаты, как и в водном растворе. Вследствие экранирования заряженных групп ионами электролита и компактизации полимерных цепей вероятность электростатического притяжения катионного ПАВ и анионного полиэлектролита уменьшается, однако вклад дисперсионных сил и гидрофобных связей между углеводородными группами ПАВ и неполярными сегментами полимера остается высоким.

Существует модель структуры адсорбционного слоя на межфазной границе, состоящего из монослоя ПАВ со связанными растянутыми, а в солевом растворе – «скрученными» цепями полиэлектролита [14, 15]. Учитывая обнаруженное сходство формы изотерм в водном и солевом растворах, можно предположить, что образование ассоциатов между катионным ПАВ и анионным полиэлектролитом происходит как в объеме раствора, так и на поверхности раздела фаз, при этом поверхностное натяжение мало зависит от конформационных изменений в поверхностном слое.

В солевом растворе по сравнению с водным ККА уменьшается в 1,8–2,0 раза (табл. 1), то есть образование ассоциатов «ПАВ–полимер» начинается при более низкой концентрации ПАВ. Присутствие неорганического электролита приводит к повышению поверхностной активности ассоциатов в среднем в 2,8 раза, предельной адсорбции – в 1,6 раза. ККМ солевого раствора увеличивается в 5–6 раз по сравнению с водным.

Изменение параметров адсорбционного слоя можно объяснить тем, что в солевом растворе возрастает тенденция образования ассоциатов «ПАВ–полимер» в поверхностном слое. Уменьшение плотности упаковки ассоциатов в поверхностном слое в среднем в 1,6 раза в солевом растворе по сравнению с водным обусловлено изменением структуры ассоциатов. Повышение поверхностной активности для системы, содержащей полимер и АЦ, по сравнению с АЛ указывает на рост концентрации ассоциатов на межфазной границе или на увеличение их размеров.

В отличие от системы с анионным сополимером изотермы поверхностного натяжения смеси аминов с неионогенным или катионным полимером по форме близки к изотермам ПАВ. Рассчитанные поверхностные характеристики водных растворов ПАВ и систем на основе ПАВ и полимеров (табл. 2) свидетельствуют о том, что поверхностная активность ПАВ уменьшается в ряду ААр → АЦ → ААл при переходе от ААр к АЦ в 1,8 раза, от АЦ к ААл – в 4,4 раза. Для бинарных систем G мало зависит от природы полимера и уменьшается в том же ряду при переходе от систем «ПАВ–полимер» с ААр к АЦ в среднем в 3 раза и к ААл – в 2,4 раза.

Пределная адсорбция в водных растворах ПАВ уменьшается в ряду аминов ААр → АЦ → ААл при переходе от ААр к АЦ в 1,1 раза, от АЦ к ААл – в 1,3 раза. В системе с сополимером адсорбция мало зависит от природы полимера и уменьшается при переходе от ААр к АЦ и ААл в 1,1–1,2 раза.

Значения ККМ, ΔF_m и S_m водных растворов ПАВ увеличиваются при переходе от ААр к АЦ и ААл.

По сравнению с аминами поверхностная активность бинарных систем уменьшается в среднем в 2,8 раза для водных и в 3,1 раза для солевых растворов. Адсорбция бинарных систем снижается в 1,2–1,6 раза. Уменьшение ККМ бинарных систем в 1,6–2 раза по сравнению с аминами может быть обусловлено образованием молекулами ПАВ мицеллоподобных кластеров вдоль полимерной цепи за счет гидрофобных взаимодействий алкильных цепей с неполярными группами полимера [7, 13].

Таблица 2. Поверхностные характеристики водных растворов ПАВ и систем на основе ПАВ и полимеров
Table 2. Surface characteristics of aqueous solutions of surfactants and systems based on surfactants and polymers

| Исследуемая система | ПАВ | ККМ · 10 ⁵ , % | G · 10 ⁵ Дж · м/моль | Г · 10 ⁴ моль/м ² | $\Delta F_m \cdot 10^4$ | $S_m \cdot 10^{21}$, м ² |
|---------------------|-----|---------------------------|---------------------------------|---|-------------------------|--------------------------------------|
| ПАВ без полимера | АР | 4,15 | 9,39 | 9,03 | -2,29 | 1,84 |
| | АЦ | 7,47 | 4,84 | 8,27 | -2,16 | 2,0 |
| | АЛ | 32,8 | 1,09 | 6,24 | -1,82 | 2,17 |
| ПАВ-Н | АР | 3,89 | 2,34 | 7,04 | -2,47 | 2,35 |
| | АЦ | 4,99 | 1,90 | 6,78 | -2,06 | 2,45 |
| | АЛ | 12,40 | 1,27 | 5,89 | -2,04 | 2,82 |
| ПАВ-К | АР | 2,92 | 2,36 | 6,96 | -2,47 | 2,39 |
| | АЦ | 6,42 | 1,91 | 6,12 | -2,32 | 2,71 |
| | АЛ | 14,50 | 1,32 | 5,72 | -2,01 | 2,91 |

Отсутствие ККА на изотермах поверхностного натяжения систем на основе аминов и неионогенного или катионного полимеров в отличие от анионного сополимера, с одной стороны, может свидетельствовать о том, что в системе не образуются ассоциаты. С другой стороны, изменение поверхностных свойств бинарной системы по сравнению с ПАВ (уменьшение поверхностной активности, адсорбции ПАВ, ККМ) показывает возможность взаимодействия молекул ПАВ и полимера, а также формирования смешанного адсорбционного слоя из молекул ПАВ и полимера на поверхности раздела фаз.

Как видно из табл. 3, в присутствии неорганического электролита поверхностная активность и адсорбция бинарных систем «ПАВ-Н» и «ПАВ-К» возрастают, следовательно, увеличивается плотность упаковки молекул в поверхностном слое S_m .

Таблица 3. Поверхностные характеристики солевых (NaCl) растворов ПАВ и систем на основе ПАВ и полимеров

Table 3. Surface characteristics of salt (NaCl) solutions of surfactants and systems based on surfactants and polymers

| Исследуемая система | ПАВ | ККМ · 10 ⁵ % | G · 10 ⁵ Дж · м/моль | Г · 10 ⁴ моль/м ² | $\Delta F_m \cdot 10^4$ | $S_m \cdot 10^{21}$, м ² |
|---------------------|-----|-------------------------|---------------------------------|---|-------------------------|--------------------------------------|
| ПАВ без полимера | АР | 3,63 | 12,65 | 14,31 | -2,32 | 1,16 |
| | АЦ | 4,53 | 5,17 | 13,22 | -2,27 | 1,25 |
| | АЛ | 15,30 | 1,19 | 10,39 | -1,99 | 1,59 |
| ПАВ-Н | АР | 2,82 | 2,47 | 10,32 | -2,21 | 3,01 |
| | АЦ | 3,09 | 2,08 | 8,95 | -1,92 | 3,17 |
| | АЛ | 9,41 | 1,64 | 7,51 | -1,84 | 4,65 |
| ПАВ-КС | АР | 1,95 | 2,59 | 8,32 | -2,16 | 4,72 |
| | АЦ | 3,89 | 1,99 | 7,05 | -1,88 | 5,14 |
| | АЛ | 8,91 | 1,52 | 6,51 | -1,79 | 9,29 |

В солевой среде значения ККМ, $\Delta\Phi_m$ уменьшаются, то есть влияние неорганического электролита равноценно повышению олеофильности молекул ПАВ и их ассоциатов с полимером. Изменение поверхностных характеристик больше выражено для систем с алифатическим амином, что может быть связано с большей степенью его взаимодействия с полимером вследствие линейного строения молекул алифатического амина.

Заключение. В растворах аминоксодержащих ПАВ на границе раздела жидкость–воздух поверхностная активность и адсорбция уменьшаются, а значения ККМ, $\Delta\Phi_m$ и S_m увеличиваются при переходе от ароматического (бензотония хлорид) к циклическому (алкилморфолин) и алифатическому (хлорид алкиламмония) ПАВ и в солевых растворах (NaCl) по сравнению с водными.

Для систем аминов с анионным сополимером акриламида обнаружено изменение формы изотермы поверхностного натяжения и появление на ней излома и участка плато, что свидетельствует о взаимодействии ПАВ и полиэлектролита и образовании на межфазной границе смешанного адсорбционного слоя из молекул ПАВ и ассоциатов ПАВ с полимером.

Уменьшение поверхностной активности, адсорбции и ККМ бинарных систем аминоксодержащих ПАВ с неионогенным полиакриламидом и катионным сополимером акриламида по сравнению с ПАВ в 1,2–2,8 раза для водных и 1,6–3,1 раза для солевых растворов одновременно с увеличением плотности упаковки в поверхностном слое указывает на взаимодействие ПАВ с полимером и образование ассоциатов на межфазной границе.

Список использованных источников

1. Шукин, Е. Д. Коллоидная химия: учеб. для вузов / Е. Д. Шукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2023. – 444 с.
2. Можейко, Ф. Ф. Регулирование пенообразования поверхностно-активных веществ в растворах неорганических электролитов / Ф. Ф. Можейко [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 37–45.
3. Ramos, J. Cationic polymer nanoparticles and nanogels: From synthesis to biotechnological applications / J. Ramos, J. Forcada, R. Hidalgo-Alvarez // Chem. Rev. – 2014. – Vol. 114. – P. 367–428.
4. Нанотехнология молекулярного наслаивания при антиадгезионной модификации волокон тканей / В. А. Волков [и др.] // Хим. волокна. – 2008. – № 2. – С. 34–40.
5. Авдохин, В. М. Основы обогащения полезных ископаемых: в 2 т. / В. М. Авдохин – М.: Изд-во Моск. гос. горного ун-та: Горная кн., 2008. – Т. 1: Обогачительные процессы. – 417 с.
6. Титков, С. Н. Технология и физико-химические особенности флотации водорастворимых минералов / С. Н. Титков // Обогащение руд. – 2002. – № 1. – С. 10–15.
7. Kronberg, B. Surface Chemistry of Surfactants and Polymers / B. Kronberg, K. Holmberg, B. Lindman. – Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Inc., 2014. – 496 p.
8. Ritacco, H. Properties of Aqueous Solutions of Polyelectrolytes and Surfactants of Opposite Charge: Surface Tension, Surface Rheology, and Electrical Birefringence Studies / H. Ritacco, D. Kurlat, D. Langevin // J. Phys. Chem. B. – 2003. – Vol. 107, № 34. – P. 9146–9158.
9. Taylor, D. J. F. Polymer/surfactant interactions at the air/water interface / D. J. F. Taylor, R. K. Thomas, J. Penfold // Adv. Colloid Interface Sci. – 2007. – Vol. 132, № 2. – P. 69–110.
10. Critical Aggregation Concentration in Mixed Solutions of Anionic Polyelectrolytes and Cationic Surfactants / N. Jain [et al.] // Langmuir. – 2004. – Vol. 20. – P. 8496–8503.
11. Polymer-surfactant systems in bulk and at fluid interfaces / E. Guzmán [et al.] // Adv. Colloid Interface Sci. – 2016. – Vol. 233. – P. 38–64.
12. Noskov, B. A., Kinetics of adsorption from micellar solutions / B. A. Noskov // Adv. Colloid Interface Sci. – 2002. – Vol. 95, № 1. – P. 237–293.
13. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах / К. Холмберг [и др.]. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 528 с.
14. Jain, N. J. Study of Adsorbed Monolayers of a Cationic Surfactant and an Anionic Polyelectrolyte at the Air-Water Interface / N. J. Jain, P.-A. Albouy, D. Langevin // Langmuir. – 2003. – Vol. 19, № 14. – P. 5680–5690.
15. Pojżak, K. Effect of salt on the equilibrium and nonequilibrium features of polyelectrolyte/surfactant association / K. Pojżak, E. Bertalanits, R. Meższażros // Langmuir. – 2011. – Vol. 27, № 15. – P. 9139–9147.

References

1. Schukin E. D., Pertsov A. V., Amelina E. A. *Colloid chemistry: a textbook for universities*. 7th ed., rev. and exp. Moscow, Yurayt Publ., 2023. 444 p. (in Russian).
2. Mozheyko F. F., Dikhtievskaya L. V., Gancharik I. I., Shevchuk V. V. Regulation of surfactant foaming in solutions of inorganic electrolytes. *Vestsi Natsyional'най akademii navuk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 37–45 (in Russian).
3. Ramos J., Forcada J., Hidalgo-Alvarez R. Cationic polymer nanoparticles and nanogels: From synthesis to biotechnological applications. *Chemical Reviews*, 2014, vol. 114, pp. 367–428.

4. Volkov V. A., Schukina E. L., Amarlui A., Ageev A. A., Kukleva K. K., Eleev A. F. Molecular stratification nanotechnology in antiadhesive modification of fabric fibers. *Himicheskie volokna = FibRE Chemistry*, 2008, no. 2, pp. 34–40. (in Russian)
5. Avdokhin V. M. *Fundamentals of mineral processing*: in 2 volumes. Moscow: Publishing house of the Moscow State Mining University, publishing house “Gornaya kniga”, 2008, vol. 1: Enrichment processes. 417 p. (in Russian)
6. Titkov S. N. Technology and physical and chemical features of flotation of water-soluble minerals. *Obogashhenie rud = Enrichment of ores*, 2002, no. 1, pp. 10–15 (in Russian)
7. Kronberg B., Holmberg K., Lindman B. *Surface Chemistry of Surfactants and Polymers*. Chichester, West Sussex : John Wiley & Sons, Inc., 2014. 496 p.
8. Ritacco H., Kurlat D., Langevin D. Properties of Aqueous Solutions of Polyelectrolytes and Surfactants of Opposite Charge: Surface Tension, Surface Rheology, and Electrical Birefringence Studies. *Journal of Physical Chemistry B*, 2003, vol. 107, no. 34, pp. 9146–9158.
9. Taylor D. J. F., Thomas R. K., Penfold J. Polymer/surfactant interactions at the air/water interface. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2007, vol. 132, no. 2, pp. 69–110.
10. Jain N., Trabelsi S., Guillot S., McLoughlin D., Langevin D., Letellier P., Turmine M. Critical Aggregation Concentration in Mixed Solutions of Anionic Polyelectrolytes and Cationic Surfactants. *Langmuir*, 2004, vol. 20, pp. 8496–8503.
11. Guzmán E., Llamas S., Maestro A., Fernández-Peña L., Akanno A., Miller R., Ortega F., Rubio R. G. Polymer–surfactant systems in bulk and at fluid interfaces. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2016, vol. 233, pp. 38–64.
12. Noskov B. A., Kinetics of adsorption from micellar solutions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2002, vol. 95, no. 1, pp. 237–293.
13. Holmberg K., Kronberg B., Jönsson B., Lindman B. *Surfactants and polymers in aqueous solutions*. Moscow, BINOM. Knowledge Laboratory, 2007. 28 p. (in Russian)
14. Jain N. J., Albouy P.-A., Langevin D. Study of Adsorbed Monolayers of a Cationic Surfactant and an Anionic Polyelectrolyte at the Air–Water Interface. *Langmuir*, 2003, vol. 19, no. 14, pp. 5680–5690.
15. Pojżak K., Bertalanits E., Meższażros R. Effect of salt on the equilibrium and nonequilibrium features of polyelectrolyte/surfactant association. *Langmuir*, 2011, vol. 27, no. 15, pp. 9139–9147.

Информация об авторах

Буча Светлана Васильевна – научный сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: buchala1003@gmail.com

Воробьева Елена Викторовна – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (220072, Минск, ул. Сурганова, 9/1, Республика Беларусь). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

Липай Юлия Владимировна – кандидат химических наук, доцент, старший научный сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (220072, Минск, ул. Сурганова, 9/1, Республика Беларусь). E-mail: Yuliya.M@tut.by

Воробьев Павел Дмитриевич – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pdvc@tut.by

Крутько Николай Павлович – академик, доктор химических наук, профессор, генеральный директор. ГНПО «Химические продукты и технологии» (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: krutko@igic.bas-net.by

Астахова Марина Александровна – научный сотрудник. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 9/1, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: marina88ama@gmail.com

Бондарева Галина Валерьевна – кандидат химических наук, ученый секретарь. Институт общей и неорганической химии НАН Беларуси (220072, г. Минск, ул. Сурганова 9/1, Республика Беларусь). E-mail: secretar@igic.bas-net.by

Information about the authors

Bucha Sviatlana V. – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: buchala1003@gmail.com

Vorobieva Elena V. – D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Laboratory. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: evorobieva@igic.bas-net.by

Lipai Yuliya V. – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Senior Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Yuliya.M@tut.by

Vorobiev Pavel D. – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pdvc@tut.by

Krutko Nikolay P. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director General. State Research and Production Association «Chemical Products and Technologies» (9/1, Sarganov str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: krutko@igic.bas-net.by

Astakhova Marina A. – Researcher. Institute of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: marina88ama@gmail.com

Bondarava Halina V. – Ph. D. (Chemistry), Scientific Secretary. Institute of General and of General and Inorganic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (9/1, Sarganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: secretar@igic.bas-net.by