



Гелеобразование в водных растворах оксиэтилированных нонилфенолов

В.И. Жолнеркевич✉, А.О. Шрубок

Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Целью исследования являлось установление условий образования гель-структуры для систем вода – оксиэтилированный нонилфенол и вода – оксиэтилированный нонилфенол – высаливатель. В ходе проведенной работы был выполнен анализ научно-технической литературы по проблемам применения поверхностно-активных веществ в экстракционных процессах. Показано, что перспективными экстракционными системами являются системы, содержащие неионогенные поверхностно-активные вещества. Изучено влияние концентрации неионогенных поверхностно-активных веществ и температуры на образование гель-структуры в водных растворах. Рассмотрена проблема применения оксиэтилированных нонилфенолов в гель-экстракции. Визуально-полимермическим методом получены фазовые диаграммы для систем вода – неонол АФ 9-6 и вода – неонол АФ 9-6 – сульфат натрия. Установлены условия гелеобразования для систем вода – неонол АФ 9-6 и вода – неонол АФ 9-6 – сульфат натрия. Показано, что для образования геля в системе вода – оксиэтилированный нонилфенол (неонол АФ 9-6) концентрация поверхностно-активного вещества должна превышать 25 масс.%. Установлено, что для образования гель-структуры при более низких концентрациях неанола АФ 9-6 необходимо вводить высаливатель – сульфат натрия. Получены фазовые диаграммы систем вода – оксиэтилированный нонилфенол – сульфат натрия в области температур 20–65 °С. Установлено, что гель-структура образуется при соотношении оксиэтилированного нонилфенола и сульфата натрия, равном 3:1 по массе. Показано, что минимальная концентрация неанола АФ 9-6 и сульфата натрия для гелеобразования составляет 15 и 5 масс.%, соответственно. Увеличение концентрации неанола АФ 9-6 и сульфата натрия до 24 и 8 масс.% соответственно приводит к снижению температуры гелеобразования до 46 °С.

Ключевые слова: поверхностно-активное вещество, высаливатель, фазовая диаграмма, оксиэтилированный нонилфенол, гелеобразование

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (грант ГБ 24-042 «Разработка способа переработки отработанных моторных масел с целью получения экологически безопасных масел-мягчителей для резинотехнической промышленности»).

Для цитирования: Жолнеркевич В.И., Шрубок А.О. Гелеобразование в водных растворах оксиэтилированных нонилфенолов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. N 1. DOI: 10.21285/achb.965. EDN: UTPISA.

CHEMICAL SCIENCES

Original article

Gelation in the aqueous solutions of oxyethylated nonylphenols

Veronika I. Zholnerkevich✉, Alexandra O. Shrubok

Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The study was aimed at ascertaining gelation conditions for the systems water – oxyethylated nonylphenol and water – oxyethylated nonylphenol – salting agent. The work involved analyzing scientific and technical literature

on the use of surfactants in extraction processes. Systems containing nonionic surfactants are shown to be promising extraction systems. The effect that the concentration of nonionic surfactants and temperature can have on gelation in aqueous solutions is examined. The problem of using oxyethylated nonylphenols in gel extraction is considered. The phase diagrams of the systems water – neonol AF 9-6 and water – neonol AF 9-6 – sodium sulfate were constructed using the visual polythermal method. Gelation conditions were ascertained for the systems water – neonol AF 9-6 and water – neonol AF 9-6 – sodium sulfate. For the gel to form in the system water – oxyethylated nonylphenol (neonol AF 9-6), the concentration of the surfactant must exceed 25 wt%. For achieving gelation at lower concentrations of neonol AF 9-6, it is necessary to introduce a salting agent (sodium sulfate). The phase diagrams of the systems water – oxyethylated nonylphenol – sodium sulfate were constructed within the temperature range of 20–65 °C. The gel structure was found to form at a 3:1 weight ratio of oxyethylated nonylphenol to sodium sulfate. It is shown that for gelation, the minimum concentrations of neonol AF 9-6 and sodium sulfate are 15 and 5 wt%, respectively. An increase in the concentrations of neonol AF 9-6 and sodium sulfate to 24 and 8 wt%, respectively, leads to a decrease in the gelation temperature to 46 °C.

Keywords: surfactant, salting agent, phase diagram, oxyethylated nonylphenol, gelation

Funding. The Ministry of Education of the Republic of Belarus financial supported the work (grant GB 24-042 “Development of a method for processing used motor oils in order to obtain environmentally friendly softening oils for the rubber industry”).

For citation: Zholnerkevich V.I., Shrubok A.O. Gelation in the aqueous solutions of oxyethylated nonylphenols. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(1). (In Russian). DOI: 10.21285/achb.965. EDN: UTPISA.

ВВЕДЕНИЕ

Экстракция является важным процессом концентрирования и выделения различных веществ, она находит широкое применение почти во всех областях промышленности. Известны следующие виды экстракционных систем: вода – органический растворитель, ионные жидкости, системы вода – полярные растворители – высаливатель, вода – водорастворимый полимер – высаливатель, вода – поверхностно-активное вещество (ПАВ) – высаливатель [1]. Среди указанных систем можно выделить экстракционные процессы с использованием в качестве одного из компонентов ПАВ. Наиболее перспективным направлением экстракции с точки зрения экологической безопасности является использование процесса гелеобразования в водных растворах за счет применения ПАВ, что позволяет снизить токсичность процесса и повысить безопасность производства. Этот процесс широко используется для удаления полициклических ароматических углеводородов [2, 3], фенолов [4], ионов металлов [5–8], для концентрирования реагентов и очистки сточных вод [9]. Известны два способа экстракции с помощью ПАВ [10–12]. Первый способ основан на выделении отдельных мицелл ПАВ в самостоятельную фазу при температуре выше температуры точки помутнения (мицеллярная экстракция), второй – на образовании геля в процессе высаливания ПАВ при введении неорганических солей (гель-экстракция).

В качестве компонентов экстракционной системы могут использоваться анионные, катионные и неионогенные ПАВ (НПАВ) [1, 13]. Особый интерес представляют экологически безопасные и биоразлагаемые НПАВ, которые являются более эффективными солюбилизаторами, чем ионогенные ПАВ [14].

В водных растворах оксиэтилированных ПАВ небольшое количество НПАВ находится в виде мономеров. При нагревании такой системы выше точки помутнения концентрация ПАВ превышает критическую концентрацию мицеллообразования и молекулы упорядочиваются для образования мицелл. В мицелле гидрофобные хвосты располагаются во внутренней части, чтобы свести к минимуму их контакт с водой,

в то время как гидрофильные головки обращены к молекуле воды на внешней поверхности [11, 12, 15]. В результате происходит разделение фаз за счет дегидратации полярных групп ПАВ при нагревании, что приводит к снижению отталкивания между молекулами мицелл и, соответственно, способствует их агрегации. Данный процесс сильно зависит от температуры, концентрации и типа используемого НПАВ. В экстракции широкое применение нашли оксиэтилированные ПАВ, в частности тритон, синтанолы и синатмиды, а также неонолы [1, 16]. Среди указанных НПАВ доступным и перспективным для экстракционных процессов является неонол. Эффективность экстракции будет обусловлена фазовым состоянием системы и условиями процесса. В связи с этим для оценки возможности использования НПАВ необходимо изучить фазовые состояния в водных растворах в зависимости от структуры НПАВ и условий. Например, в работе [17] изучалось фазовое состояние неонол АФ 9-6 в водных растворах. Показано, что область расслаивания системы неонол АФ 9-6 – вода наблюдается выше 80 °C, а с ростом концентрации ПАВ до 6 масс.% снижается до 25 °C. В случае использования неонол АФ 9-10 область расслаивания наблюдается выше 68 °C при концентрации ПАВ до 10 масс.% [18]. Дальнейшее увеличение концентрации введет к повышению температуры области расслаивания до 80 °C. Для системы неонол АФ 9-12 – вода область расслаивания наблюдается выше 84 °C, а двойная система вода – неонол АФ 9-25 гомогенна во всем интервале жидкостного состояния [19]. Известно, что с увеличением числа молей оксиэтилена критическая температура растворимости НПАВ уменьшается, однако полученные в работах [17–19] данные противоречат этому. Описанные в литературе данные о фазовых состояниях оксиэтилированных нонилфенолов не позволяют установить оптимальный состав и условия использования неонолов в экстракционных системах. Исследование системы вода – неонол показало, что нижняя критическая температура растворимости данного типа ПАВ слишком велика, поэтому для ее снижения необходимо использовать высаливатели, в качестве

которых применяют неорганические соли, такие как сульфаты, хлориды, фосфаты, нитраты натрия, калия или аммония [20–22]. В то же время в научных работах отсутствуют данные о гелеобразовании в системах вода – ПАВ – высаливатель, в связи с чем изучение условий образования геле-структуры в таких системах остается актуальной задачей.

В связи с вышесказанным целью настоящего исследования являлось установление условий образования геле-структуры для систем вода – оксиэтилированный нонилфенол и вода – оксиэтилированный нонилфенол – высаливатель.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве НПАВ использовали оксиэтилированный нонилфенол производства ОАО «Нижнекамскнефтехим». Был выбран неонол АФ 9-6 со структурной формулой $C_9H_{19}C_6H_4(OCH_2CH_2)_9OH$. Неонол АФ 9-6 характеризуется малой растворимостью в воде, увеличивающейся в присутствии органических соединений. Этот НПАВ широко используется в текстильной, добывающей, нефтеперерабатывающей и лесохимической промышленности, относится к третьему классу опасности, кроме этого он дешев, биоразлагаем.

Одной из важных составляющих практического применения экстракционных систем типа вода – НПАВ и вода – НПАВ – высаливатель является определение влияния типа высаливателя, то есть неорганической соли, на температуру точки помутнения системы. Многочисленные научные исследования позволили выявить некоторые закономерности влияния катиона и аниона на фазовое состояние системы [20]. Показано, что высаливающими свойствами обладают только катионы натрия, калия, рубидия, цезия, аммония вследствие комплексообразования с оксиэтиленовыми группами ПАВ, другими словами, катионы, радиус которых близок к радиусу витка спирали оксиэтиленовой цепи (0,133 нм), поэтому катионы лития и магния не могут участвовать в комплексообразовании. Наличие в системе ортофосфат-, сульфат-, фторид- и хлорид-анионов оказывает высаливающее действие, обусловленное конкурированием анионов с молекулами ПАВ за молекулу воды для создания гидратной оболочки. Согласно научно-технической информации установлено, что по высаливающей способности наиболее эффективными являются анионы сульфатов, а среди катионов – катионы натрия [1, 3, 21, 22]. В связи с вышеизложенным в качестве соли в данной работе использовали сульфат натрия марки х.ч.

Границы области расслаивания в системе вода – НПАВ – высаливатель определяли визуально-политермическим методом. Герметично закрытые пробирки с исследуемой смесью компонентов помещали на водяную баню и нагревали со скоростью 1 °С в минуту при перемешивании с последующей фиксацией температуры фазового перехода. Опыт повторяли не менее 3 раз. За результат принимали среднее значение температур. Расхождение между параллельными измерениями не превышало 0,5 °С.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При низких температурах НПАВ характеризуются ограниченной растворимостью в воде, что приводит к фазовому разделению системы даже при низких концентрациях ПАВ. Растворимость НПАВ увеличивается при нагревании, однако при значительном повышении температуры они теряют свои свойства, так как имеют верхний температурный предел растворимости – точку помутнения, выше которой в системе вода – НПАВ происходит дегидратация молекул ПАВ и выделение их в отдельную фазу [15]. Образовавшиеся фазы сильно отличаются по своим свойствам в зависимости от условий процесса. Наблюдаемое явление представляет интерес с практической точки зрения, потому как открывает возможности создания экстракционных систем, свойства которых зависят от температуры. В данной работе изучалось фазовое состояние систем вода – неонол АФ 9-6 и вода – неонол АФ 9-6 – сульфат натрия. Установлена зависимость фазообразования водного раствора неонولا АФ 9-6 различной концентрации в интервале температур (рис. 1).

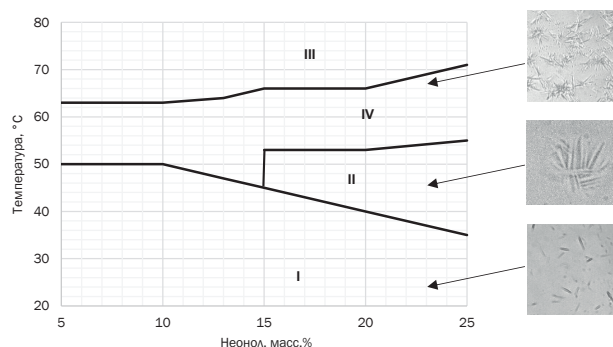


Рис. 1. Фазовая диаграмма системы вода – неонол АФ 9-6: I – область отдельных мицелл; II – область уплотнение мицелл; III – область расслаивания; IV – область разрушение мицелл

Fig. 1. Phase diagram of the water – neonol AF 9-6 system: I – the area of individual micelles; II – the area of micelle compaction; III – the area of delamination; IV – the area of micelle destruction

Определено, что в системе вода – неонол АФ 9-6, содержащей НПАВ от 5 до 25 масс.%, неонол находится в виде отдельных мицелл в интервале температур от 20 до 35–50 °С (см. рис. 1, область I), но с увеличением температуры и концентрации НПАВ до 15 масс.% поведение системы изменяется: наблюдается повышение вязкости системы – динамическая вязкость увеличивается с 25 до 225 мПа·с (см. рис. 1, область II), что свидетельствует об образовании более сложных объемных цилиндрических мицелл¹. Фазовое состояние системы оценивали с помощью микроскопии (см. рис. 1). При дальнейшем нагревании, например для системы с концентрацией неонولا АФ 9-6 больше 15 масс.%, свыше 53–55 °С наблюдается снижение вязкости и, соответственно, разрушение мицелл

¹ Холмберг К., Йёнссон Б., Кронберг Б., Линдман Б. / пер. с англ.; под. ред. Б.Д. Сумма. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах: учеб. пособие. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 530 с.

(см. рис. 1, область IV), а нагревание системы более 63–71 °С приводит к выделению ПАВ в отдельную фазу (см. рис. 1, область III). Установлено, что для образования гель-структуры концентрации НПАВ до 25 масс.% в водном растворе недостаточно, а дальнейшее введение НПАВ в систему свыше указанной концентрации нецелесообразно.

Известно, что формирование мицелл определяется взаимодействием гидрофильных и гидрофобных частей ПАВ [23]. Гидрофобная часть ПАВ благоприятствует росту мицелл, в то время как гидрофильная часть ПАВ способствует их отталкиванию между собой, препятствуя формированию мицелл. Добавление неорганической соли позволяет экранировать электростатическое отталкивание гидрофильных групп, в результате эти группы ближе подходят друг к другу, вследствие чего увеличивается плотность упаковки мицелл. Для инициации увеличения размера мицелл в водный раствор вводили высаливатель – сульфат натрия. При содержании соли свыше 8 масс.% в системе отсутствует область существования отдельных мицелл и наблюдается расслоение системы (рис. 2, область III).

С увеличением температуры в системе наблюдается сворачивание неонولا (см. рис. 2, область VI), что говорит об уплотнении мицелл. При температурах свыше 55–60 °С система разрушается и ПАВ выделяется в отдельную фазу. Стоит отметить, что только при концентрации 15 масс.% неонولا в присутствии 5 масс.% сульфата натрия образуется гель-структура (см. рис. 2, область V). В связи с этим дальнейшее исследование изменения фазового состояния системы осуществляли при соотношении НПАВ и высаливателя, равном 3:1 по массе (рис. 3).

Установлено, что минимальная концентрация в системе вода – оксиэтилированный нонилфенол – сульфат натрия, при которой образуется гель-структура, составляет 15 масс.% (рис. 3). В случае добавления соли в концентрации свыше 6 масс.% уже при 20 °С визуально наблюдается сворачиваемость ПАВ (см. рис. 3, область VI) за счет образования сложных структур

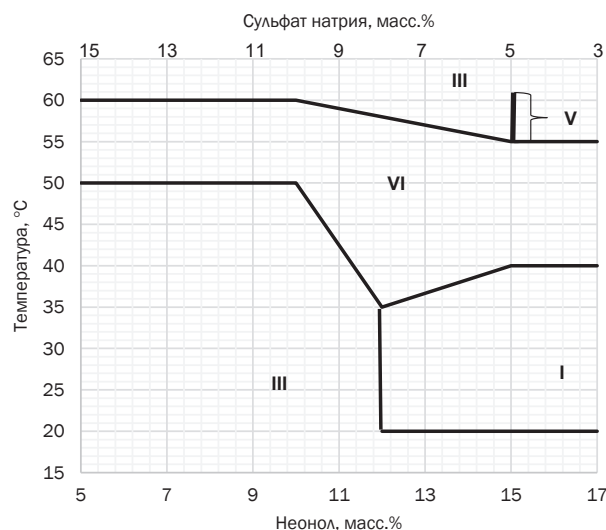


Рис. 2. Фазовая диаграмма системы вода – неонол АФ 9-6 – сульфат натрия: I – область отдельных мицелл; III – область расслаивания; V – область гель-структуры; VI – область сворачивание мицелл

Fig. 2. Phase diagram of the system water – neonol AF 9-6 – sodium sulfate: I – the area of individual micelles; III – the area of delamination; V – the area of the gel structure; VI – the area of micelle folding

мицелл, вследствие этого происходит расширение зоны гелеобразования (см. рис. 3, область V), а температура гелеобразования снижается с 55 до 46 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования установлено, что в интервале температур 20–65 °С в системе вода – неонол АФ 9-6 не наблюдается гелеобразования при содержании неонولا от 5 до 25 масс.%. В интервале температур 45–53 °С система вода – неонол АФ 9-6 характеризуется образованием области со сложными

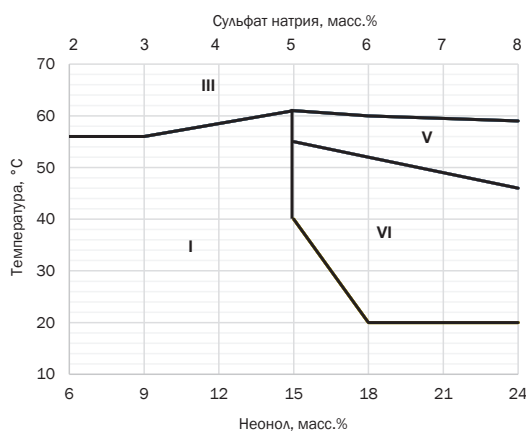
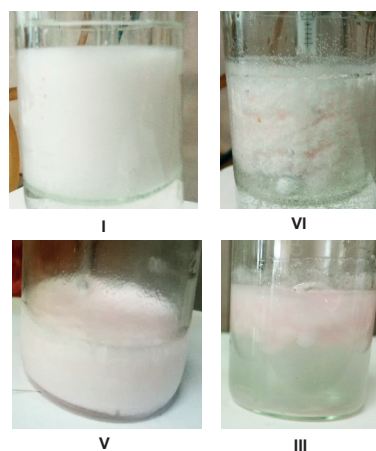


Рис. 3. Фазовая диаграмма системы вода – неонол АФ 9-6 – сульфат натрия при соотношении неонولا и сульфата натрия, равном 3:1: I – область отдельных мицелл; III – область расслаивания; V – область гель-структуры; VI – область сворачивание мицелл

Fig. 3. Phase diagram of the system water – neonol AF 9-6 – sodium sulfate at a ratio of neonol and sodium sulfate equal 3:1: I – the area of individual micelles; III – the area of delamination; V – the area of the gel structure; VI – the area of micelle folding



объемными цилиндрическими мицеллами при концентрации неонла от 15 до 25 масс.%. Для формирования гель-структуры в систему вода – неонла АФ 9-6 предложено добавлять высаливатель – сульфат натрия. Изучение фазовых диаграмм системы вода – неонла АФ 9-6 – сульфат натрия позволило определить состав системы и условия, при которых наблюдается гелеобразование (соотношение неонла и сульфата

натрия – 3:1 по массе, температура – 55–61 °С). Показано, что минимальная концентрация неонла АФ 9-6 и сульфата натрия для гелеобразования составляет 15 и 5 масс.% соответственно, а процесс гелеобразования протекает в интервале температур 55–61 °С. Увеличение концентрации неонла АФ 9-6 и сульфата натрия до 24 и 8 масс.% соответственно приводит к снижению температуры гелеобразования до 46 °С.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Леснов А.Е., Денисова С.А. Гель-экстракция поверхностно-активными веществами // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2014. N 1. С. 79–93. EDN: SPWJOL.
2. Mouronte N., Álvarez M.S., Deive F.J., Rodríguez A. Combining biodegradable surfactants and potassium inorganic salts for efficiently removing polycyclic aromatic hydrocarbons from aqueous effluents // Journal of Water Process Engineering. 2022. Vol. 47. P. 102796. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102796.
3. Hung K.-C., Chen B.-H., Yu L.E. Cloud-point extraction of selected polycyclic aromatic hydrocarbons by nonionic surfactants // Separation and Purification Technology. 2007. Vol. 57, no. 1. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.seppur.2007.03.004.
4. Silva W.P.N., do Nascimento A.E.G., de Alencar Moura M.C.P., de Oliveira H.N.M., de Barros Neto E.L. Study of phenol removal by cloud point extraction: a process optimization using experimental design // Separation and Purification Technology. 2015. Vol. 152. P. 133–139. DOI: 10.1016/j.seppur.2015.08.007.
5. Шилыковская Д.О., Елохов А.М., Денисова С.А., Леснов А.Е. Фазовые равновесия и экстракция ионов металлов в системах на основе смесей оксиэтилированных нонилфенолов // Известия Академии наук. Серия химическая. 2023. Т. 72. N 9. С. 2036–2040. EDN: JSUGRW.
6. Isaeva Yu.I., Elovkhov A.M., Denisova S.A., Kudryashova O.S. Phase equilibria and extraction of metal ions in systems based on mixtures of alkylbenzylidimethylammonium chloride and oxyethylated nonylphenols // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2020. Vol. 94, no. 7. P. 1346–1349. DOI: 10.1134/S0036024420070158.
7. Станкова А.В., Елохов А.М., Леснов А.Е. Фазовые и экстракционные равновесия в системе вода – оксиэтилированный нонилфенол – сульфат натрия // Известия Академии наук. Серия химическая. 2020. N 4. С. 671–674. EDN: KJWYYM.
8. Elovkhov A.M., Khomutova A.O., Denisova S.A. Phase equilibria and the extraction of metals in oxyethylated alkylamine – anionic surfactant – water systems // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2021. Vol. 95, no. 6. P. 1160–1164. DOI: 10.1134/S0036024421060108.
9. Лаптедильче Н.К., Гумеров Ф.М., Сергеева Е.С. Перспективы использования оксиэтилированных высших спиртов для очистки водных сред // Энергосбережение и водоподготовка. 2011. N 6. С. 16–18. EDN: ONRFCD.
10. Liu J.-L., Zhou X.-M., Sun M., Jia A.-Q., Shi H.-T., Zhang Q.-F. A resorcinarene based chelating agent for selective cloud point extraction of Pb²⁺ ions in water: synthesis, structural characterization and analytical applications // Arabian Journal of Chemistry. 2023. Vol. 16, no. 7. P. 104866. DOI: 10.1016/j.arabjc.2023.104866.
11. Kori S. Cloud point extraction coupled with back extraction: a green methodology in analytical chemistry // Forensic Sciences Research. 2021. Vol. 6, no. 1. P. 19–33. DOI: 10.1080/20961790.2019.1643567.
12. Kojro G., Wroczynski P. Cloud point extraction in the determination of drugs in biological matrices // Journal of Chromatographic Science. 2020. Vol. 58, no. 2. P. 151–162. DOI: 10.1093/chromsci/bmz064.
13. Елохов А.М., Кудряшова О.С., Леснов А.Е. Анионные поверхностно-активные вещества в экстракции // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2015. N 1. С. 30–43. EDN: SKSUJX.
14. Потешнова М.В., Задымова Н.М. Особенности солюбилизирующего действия оксиэтилированных неионогенных поверхностно-активных веществ по отношению к толуолу в водной среде // Вестник Московского университета. Серия 2 «Химия». 2002. Т. 43. N 3. С. 185–189.
15. Mortada W.I. Recent developments and applications of cloud point extraction: a critical review // Microchemical Journal. 2020. Vol. 157. P. 105055. DOI: 10.1016/j.microc.2020.105055.
16. Елохов А.М. Феномен точки помутнения в растворах неионных оксиэтилированных поверхностно-активных веществ и водорастворимых полимеров (обзор). I. Природа феномена // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2016. N 2. С. 79–91. EDN: WJZQAR.
17. Шилыковская Д.О., Денисова С.А., Елохов А.М. Изучение растворимости и экстракционной способности систем на основе смесей неонлов АФ 9-6 и АФ 9-12 // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. N 14. С. 30–35. DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-14-30-35. EDN: YDWNLS.
18. Шилыковская Д.О., Елохов А.М. Экстракционно-спектрофотометрическое определение никеля с 4-(2-пиридилазо)резорцином в системе неонла АФ 9-10 – вода // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2021. Т. 11. N 4. С. 223–233. DOI: 10.17072/2223-1838-2021-4-223-233.
19. Stankova A.V., Elovkhov A.M., Kudryashova O.S., Lesnov A.E. Temperature-induced transformation of phase diagrams for water – oxyethylated nonylphenol – MgCl₂ systems // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 2020. Vol. 65, no. 12. P. 1922–1927. DOI: 10.1134/S0036023620120177.
20. Елохов А.М. Феномен точки помутнения в растворах неионных оксиэтилированных поверхностно-активных веществ и водорастворимых полимеров (обзор). II. Влияние неорганических солей на точку помутнения // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2017. Т. 7. N 2. С. 167–186. DOI: 10.17072/2223-1838-2017-2-167-186. EDN: ZFLVPH.
21. Архипов В.П., Архипов Р.В., Идиятуллин З.Ш. Экстракционные свойства водных растворов оксиэтилированных изононилфенолов в присутствии солей натрия с одно- и двухзарядными анионами // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, N 19. С. 21–25. EDN: ZXFIQH.

22. Stankova A.V., Elokhov A.M., Denisova S.A., Kudryashova O.S., Lesnov A.E. Specific features of the salting-out of oxyethylated nonylphenols using inorganic salts at 25 °C // *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2017. Vol. 91, no. 5. P. 880–886. DOI: 10.1134/S0036024417050247.

23. Идрисов А.Р., Куряшов Д.А., Башкирцев Н.Ю., Исмагилов И.Ф., Найсырова А.М. Влияние низкомолекулярной соли на структуру мицеллярных растворов ПАВ // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. N 18. С. 40–43. EDN: RCCRBZ.

REFERENCES

1. Lesnov A.E., Denisova S.A. Surfactant gel extraction. *Bulletin of Perm University. Chemistry*. 2014;1:79-92. (In Russian). EDN: SPWJOL.

2. Mouronte N., Álvarez M.S., Deive F.J., Rodríguez A. Combining biodegradable surfactants and potassium inorganic salts for efficiently removing polycyclic aromatic hydrocarbons from aqueous effluents. *Journal of Water Process Engineering*. 2022;47:102796. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.102796.

3. Hung K.-C., Chen B.-H., Yu L.E. Cloud-point extraction of selected polycyclic aromatic hydrocarbons by nonionic surfactants. *Separation and Purification Technology*. 2007;57(1):1-10. DOI: 10.1016/j.seppur.2007.03.004.

4. Silva W.P.N., do Nascimento A.E.G., de Alencar Moura M.C.P., de Oliveira H.N.M., de Barros Neto E.L. Study of phenol removal by cloud point extraction: a process optimization using experimental design. *Separation and Purification Technology*. 2015;152:133-139. DOI: 10.1016/j.seppur.2015.08.007.

5. Shilykovskaya D.O., Elokhov A.M., Denisova S.A., Lesnov A.E. Phase equilibria and extraction of metal ions in systems based on mixtures of oxyethylated nonylphenols. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya khimicheskaya*. 2023;72(9):2036-2040. (In Russian). EDN: JSUGRW.

6. Isaeva Yu.I., Elokhov A.M., Denisova S.A., Kudryashova O.S. Phase equilibria and extraction of metal ions in systems based on mixtures of alkylbenzyltrimethylammonium chloride and oxyethylated nonylphenols. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2020;94(7):1346-1349. DOI: 10.1134/S0036024420070158.

7. Stankova A.V., Elokhov A.M., Lesnov A.E. Phase and extraction equilibria in the water – ethoxylated nonylphenol – sodium sulfate system. *Izvestiya Akademii nauk. Seriya khimicheskaya*. 2020;4:671-674. (In Russian). EDN: KJWYYM.

8. Elokhov A.M., Khomutova A.O., Denisova S.A. Phase equilibria and the extraction of metals in oxyethylated alkylamine – anionic surfactant – water systems. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2021;95(6):1160-1164. DOI: 10.1134/s0036024421060108.

9. Lapedulche N.K., Gumerov F.M., Sergeeva E.S. Prospects of the use of ethoxylated high spirits for the purification of water. *Energy saving and water treatment*. 2011;6:16-18. (In Russian). EDN: ONRFCD.

10. Liu J.-L., Zhou X.-M., Sun M., Jia A.-Q., Shi H.-T., Zhang Q.-F. A resorcinarene based chelating agent for selective cloud point extraction of Pb²⁺ ions in water: synthesis, structural characterization and analytical applications. *Arabian Journal of Chemistry*. 2023;16(7):104866. DOI: 10.1016/j.arabjc.2023.104866.

11. Kori S. Cloud point extraction coupled with back extraction: a green methodology in analytical chemistry. *Forensic Sciences Research*. 2021;6(1):19-33. DOI: 10.1080/20961790.2019.1643567.

12. Kojro G., Wroczynski P. Cloud point extraction in the determination of drugs in biological matrices.

Journal of Chromatographic Science. 2020;58(2):151-162. DOI: 10.1093/chromsci/bmz064.

13. Elokhov A.M., Kudryashova O.S., Lesnov A.E. Anionic surfactant in extraction. *Bulletin of Perm University. Chemistry*. 2015;1:30-43. (In Russian). EDN: SKSUJX.

14. Poteshnova M.V., Zadymova N.M. Features of the solubilizing effect of ethoxylated nonionic surfactants in relation to toluene in an aqueous environment. *Vestnik moskovskogo universiteta. Seriya 2. Khimiya*. 2002;43(3):185-189. (In Russian).

15. Mortada W.I. Recent developments and applications of cloud point extraction: a critical review. *Microchemical Journal*. 2020;157:105055. DOI: 10.1016/j.microc.2020.105055.

16. Elokhov A.M. Cloud point phenomenon in oxyethylated nonionic surfactants and water-soluble polymers solutions (review). I. Nature of phenomenon. *Bulletin of Perm University. Chemistry*. 2016;2:79-91. (In Russian). EDN: WJZQAR.

17. Shilykovskaya D.O., Denisova S.A., Elokhov A.M. Study of solubility and extraction ability of systems based on neonol mixtures AF 9-6 and AF 9-12. *Vse materialy. entsiklopedicheskii spravochnik*. 2022;14:30-35. (In Russian). DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-14-30-35. EDN: YDWNLS.

18. Shilykovskaya D.O., Elokhov A.M. Extraction-spectrophotometric determination of nickel with 4-(2-pyridylazo) resorcinol in the neonol AF 9-10 – water system. *Bulletin of Perm University. Chemistry*. 2021;11(4):223-233. (In Russian). DOI: 10.17072/2223-1838-2021-4-223-233.

19. Stankova A.V., Elokhov A.M., Kudryashova O.S., Lesnov A.E. Temperature-induced transformation of phase diagrams for water – oxyethylated nonylphenol – MgCl₂ systems. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2020;65(12):1922-1927. DOI: 10.1134/S0036023620120177.

20. Elokhov A.M. Phenomen of cloud point in oxyethylated nonionic surfactants and water-soluble polymers solutions (review). II. Inorganic salts influence on cloud point. *Bulletin of Perm University. Chemistry*. 2017;7(2):167-186. (In Russian). DOI: 10.17072/2223-1838-2017-2-167-186. EDN: ZFLVPH.

21. Arkhipov V.P., Arkhipov R.V., Idiyatullin Z.Sh. Extraction properties of aqueous solutions of ethoxylated isononylphenols in the presence of sodium salts with singly and doubly charged anions. *Herald of Technological University*. 2017;20(19):21-25. (In Russian). EDN: ZXFIQH.

22. Stankova A.V., Elokhov A.M., Denisova S.A., Kudryashova O.S., Lesnov A.E. Specific features of the salting-out of oxyethylated nonylphenols using inorganic salts at 25 °C. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2017;91(5):880-886. DOI: 10.1134/S0036024417050247.

23. Idrisov A.R., Kuryashov D.A., Bashkirtsev N.Yu., Ismagilov I.F., Naisyrova A.M. Effect of low molecular weight salt on the structure of micellar surfactant solutions. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2013;16(18):40-43. (In Russian). EDN: RCCRBZ.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жолнеркевич Вероника Игоревна,
аспирант,
Белорусский государственный
технологический университет,
220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а,
Республика Беларусь,
✉ zholnerkevichv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4525-9617>

Шрубок Александра Олеговна,
к.т.н., доцент,
Белорусский государственный
технологический университет,
220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а,
Республика Беларусь,
shrubok@belstu.by
<https://orcid.org/0000-0002-5950-2756>

Вклад авторов

В.И. Жолнеркевич – разработка методологии,
проведение исследований, написание
черновика рукописи.
А.О. Шрубок – разработка концепции,
курирование данных, научное руководство,
редактирование рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 10.10.2024.
Одобрена после рецензирования 20.12.2024.
Принята к публикации 28.02.2025.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Veronika I. Zholnerkevich,
Graduate Student,
Belarusian State Technological University,
13a, Sverdlov St., Minsk, 220006,
Republic of Belarus,
✉ zholnerkevichv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4525-9617>

Alexandra O. Shrubok,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Belarusian State Technological University,
13a, Sverdlov St., Minsk, 220006,
Republic of Belarus,
shrubok@belstu.by
<https://orcid.org/0000-0002-5950-2756>

Contribution of the authors

Veronika I. Zholnerkevich – methodology, investigation,
writing – original draft.
Alexandra O. Shrubok – conceptualization,
data curation, supervision, writing – editing.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests
regarding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

Information about the article

The article was submitted 10.10.2024.
Approved after reviewing 20.12.2024.
Accepted for publication 28.02.2025.