

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 547.288.4:541.124:541.123

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).374-382

ГРНТИ 31.21.18+31.15.27+31.15.28

Специальность ВАК 2.2.2

Научная статья

α-НУКЛЕОФИЛЫ – ОСНОВА СУПЕРНУКЛЕОФИЛЬНЫХ ОРГАНИЗОВАННЫХ МИКРОГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАЗЛОЖЕНИЯ ФОСФОРОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Туровская М. К., Прокопьева Т. М., Гайдаш Т. С., Михайлов В. А.

*Институт физико-органической химии и углехимии имени Л. М. Литвиненко
(Донецк, Россия)*

Аннотация Пероксигидролиз 4-нитрофениловых эфиров фосфорной и фосфоновой кислот изучен в организованных микрогетерогенных системах на основе димерных катионных имидазолсодержащих $(\text{AlkIm}^+-(\text{CH}_2)_m-\text{Im}^+\text{Alk} \cdot 2\text{Br}^-)$, $m = 2, 3, 4$, $\text{Alk} = \text{C}_{12}\text{H}_{25}, \text{C}_{14}\text{H}_{29}$ ПАВ. Мицеллярные эффекты ПАВ ($k_{\text{набл.}}^{\text{M}}/k_{\text{набл.}}^{\text{B}}$ при $\text{pH} = \text{const}$ и $[\text{ПАВ}]_0 = \text{const}$) достигают $\sim 10\text{--}10^2$ раз. Физико-химические параметры процесса пероксигидролиза (константа связывания субстрата, нуклеофильность гидропероксид-иона в мицеллярной псевдофазе) охарактеризованы в рамках псевдофазной распределительной модели. Основным фактором, ответственным за наблюдаемое увеличение скорости реакции, выступает эффект концентрирования реагентов, напрямую связанный с гидрофобными свойствами ПАВ и субстрата. Изменение нуклеофильности HOO^- -аниона при переносе пероксигидролиза из воды в мицеллы ПАВ также вносит свой вклад в величину мицеллярных эффектов. Сравнительный анализ закономерностей пероксигидролиза и щелочного гидролиза свидетельствует, что таковые для этих реакций в ОМС являются общими для процессов нуклеофильного замещения. При этом величина α-эффекта, оцененная как отношение констант скорости второго порядка пероксигидролиза ($k_{2,\text{HOO}^-}^{\text{M}}$) и щелочного гидролиза ($k_{2,\text{HO}^-}^{\text{M}}$) в мицеллярной псевдофазе $k_{2,\text{HOO}^-}^{\text{M}}/k_{2,\text{HO}^-}^{\text{M}}$ составляет $\sim 80\text{--}100$ раз. Следовательно, α-эффект реализуется не только в воде, но и в ОМС.

Ключевые слова: экотоксиканты, димерные катионные ПАВ, пероксигидролиз, эффект концентрирования, α-эффект

Для цитирования: Туровская М. К., Прокопьева Т. М., Гайдаш Т. С., Михайлов В. А. α-нуклеофилы – основа супернуклеофильных организованных микрогетерогенных систем для разложения фосфорорганических соединений // Вестник НовГУ. 2023. 3(132). 374-382. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).374-382

Research Article

α-NUCLEOPHILES AS THE BASIS OF ORGANIZED SUPERNUCLEOPHILIC MICROHETEROGENEOUS SYSTEMS FOR THE DESTRUCTION OF ORGANOPHOSPHORUS COMPOUNDS

Turovskaya M. K., Prokopyeva T. M., Gaidash T. S., Mikhailov V. A.

L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry (Donetsk, Russia)

Abstract Peroxyhydrolysis of 4-nitrophenyl esters of phosphoric and phosphonic acids has been studied in organized microheterogeneous systems based on dimeric cationic imidazole-containing surfactants $(\text{AlkIm}^+-(\text{CH}_2)_m-\text{Im}^+\text{Alk} \cdot 2\text{Br}^-)$, $m = 2, 3, 4$, $\text{Alk} = \text{C}_{12}\text{H}_{25}, \text{C}_{14}\text{H}_{29}$. Micellar effects of the surfactants (at $\text{pH} = \text{const}$ and $[\text{surfactant}]_0 = \text{const}$) reach $\sim 10\text{--}100$ times. Physicochemical parameters of the peroxyhydrolysis process (such as substrate binding constants, hydroperoxide anion nucleophilicity in

micellar pseudophase) are described in terms of the pseudophase distribution model. Observed rate enhancement mainly depends on reagent concentration increasing directly connected to hydrophobicity of the substrate and surfactant. Changes of HOO^- nucleophilicity under the displacement of the peroxyhydrolysis from water to surfactant micelles also contributed to the micellar effects. Comparative analysis of the regularities of peroxyhydrolysis and alkaline hydrolysis testifies for generality of such features in OMS for nucleophilic substitutions. In this regard, the α -effect as rate constants ratio of peroxyhydrolysis (k_{2,HOO^-}^m) to base hydrolysis (k_{2,HO^-}^m) in micellar pseudophase $k_{2,\text{HOO}^-}^m/k_{2,\text{HO}^-}^m$ reaches $\sim 80\text{--}100$ times.

Therefore, the α -effect appears not only in water, but in OMS, too.

Keywords: ecotoxicants, dimeric cationic surfactants, peroxyhydrolysis, the effect of increasing concentration, α -effect

For citation: Turovskaya M. K., Prokopyeva T. M., Gaidash T. S., Mikhailov V. A. α -nucleophiles as the basis of organized supernucleophilic microheterogeneous systems for the destruction of organophosphorus compounds // Vestnik NovSU. 2023. 3(132). 374-382. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).374-382

Введение

Современные подходы получения высокоэффективных реагентов базируются на применении организованных микрогетерогенных систем (ОМС), в том числе и для разложения фосфорорганических соединения (ФОС) в присутствии ПАВ [1–5]. Ключевыми факторами, определяющими функциональную активность катионных ПАВ (каталитическая активность, способность к комплексообразованию и солюбилизации), являются наличие неполярных фрагментов, ответственных за связывание гидрофобных растворенных веществ, и положительный поверхностный заряд, способствующий электростатическому взаимодействию с отрицательно заряженными частицами. ПАВ, содержащие в качестве гидрофильных головных групп фрагменты имидазолия. Следовательно, можно ожидать, что применение дикатионных ПАВ (Gemini Surfactant – GS) будет более эффективным, чем мономолекулярных детергентов. Среди новых классов GS имидазолиевые, отличающиеся целым рядом уникальных физико-химических характеристик: высокая термическая стабильность, более низкие критические концентрации мицеллообразования, высокая поверхностная активность и высокий положительный потенциал поверхности агрегатов и т. п., делают эти системы крайне привлекательными для изучения и использования [6–9]. При этом следует иметь в виду, что, во-первых, в мицеллярных растворах удастся достичь скоростей реакции в $\sim 10^2\text{--}10^3$ раз больше, чем в воде. Во-вторых, изменяя условия эксперимента, удастся регулировать скорость процесса. В-третьих, применение ОМС позволяет солюбилизировать труднорастворимые в воде ФОС. И, наконец, наблюдаемое увеличение скорости за счет реакции мицеллярного «катализа» имеет место при крайне низких концентрациях ПАВ ($10^{-4}\text{--}10^{-5}$, моль/л). Таким образом, системы подобного типа имеют ряд очевидных преимуществ и удовлетворяют требованиям «зеленой» химии. Цель настоящего исследования – установление характера влияния структурных факторов в молекулах димерных ПАВ, а также природы реагента и субстрата на скорости реакций и мицеллярные эффекты в процессах расщепления ацилсодержащих субстратов «нормальным» нуклеофилом –

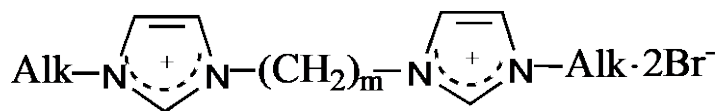
гидроксид-ионом и α -нуклеофилом – гидропероксид-анионом. Необходимо отметить, что изученные субстраты можно рассматривать как структурные аналоги экотоксикантов, это обстоятельство может иметь практическое значение при создании рецептур для их химического разложения [10].

Экспериментальная часть

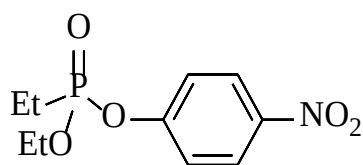
ПАВ – GS 2a, GS 2b получали, используя методики, аналогичные приведенным в работах [11]. Структура и чистота детергентов подтверждены данными ^1H ЯМР-спектроскопии и элементного анализа. 4-Нитрофениловый эфир диэтилфосфоновой кислоты (NPDEPN) очищали, как описано ранее [10]. 4-Нитрофениловый эфир диэтилфосфорной кислоты (NPDEP) – товарный препарат («Aldrich»), содержание основного вещества $\geq 95\%$. Концентрацию пероксида водорода в растворе определяли методом перманганатометрического титрования. Все растворы для кинетических измерений готовили на бидистиллированной воде. Растворы ПАВ и пероксида водорода смешивали непосредственно перед началом кинетических измерений. Необходимые значения pH устанавливали путем добавления концентрированного раствора гидроксида калия. Измерение pH растворов проводили на приборе pH-метр «Metrohm 744» (Швейцария). Контроль за ходом реакции осуществляли спектрофотометрически по накоплению 4-нитрофенолят-иона (вода, 25°C , 410 нм; спектрофотометр Genesys 10S UVVIS (Thermo Electron Corp.)). Методика определения констант скорости псевдопервого порядка описана в работе [10].

Результаты и их обсуждение

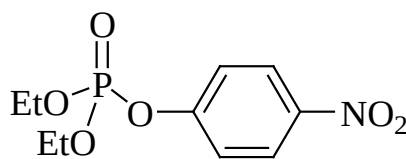
В работе представлены результаты изучения кинетических закономерностей реакций пероксигидролиза 4-нитрофениловых эфиров фосфоновой (NPDEPN) и фосфорной (NPDEP) кислот в ОМС на основе димерных катионных ПАВ; проанализированы факторы, ответственные за мицеллярный катализ в реакциях с α -нуклеофилом и «нормальным» нуклеофилом – гидроксид-анионом (рисунок 1).



$m = 2$ (1); 3 (2); 4 (3); Alk = $\text{C}_{12}\text{H}_{25}$ (a), Alk = $\text{C}_{14}\text{H}_{29}$ (b)



NPDEPN



NPDEP

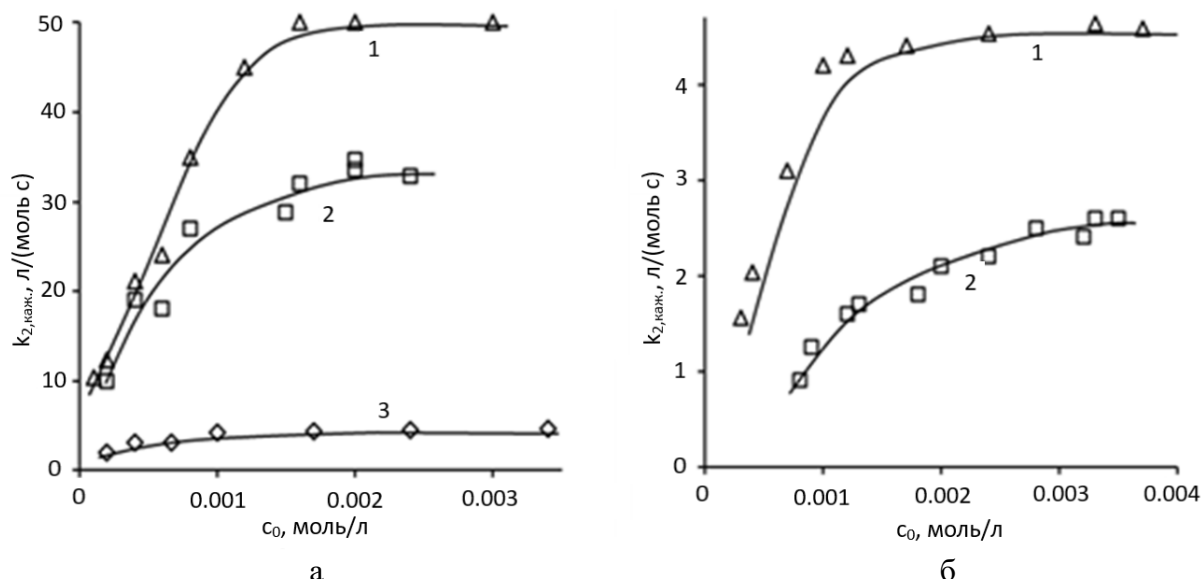
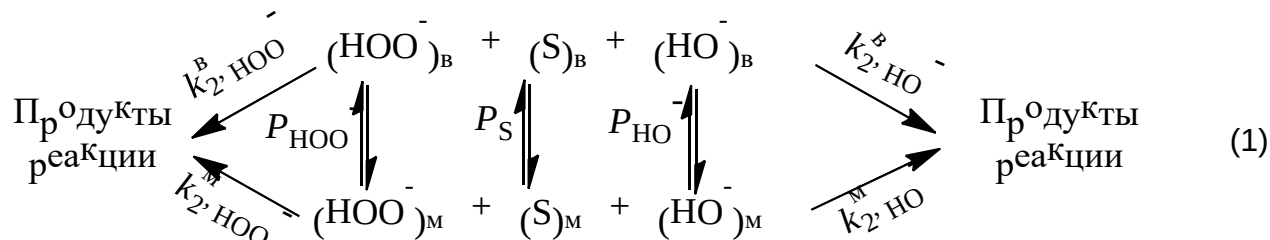


Рисунок 1. Зависимость величин $k_{2,app}$, л/(моль с) от концентрации ПАВ для реакции пероксигидролиза: а) NPDEPN (1), NPOTos (2) [12]), NPDEP (3) в присутствии **2b**; б) NPDEP в присутствии **2b** (1); **2a** (2); pH 11.0; вода; 25 °C

Кинетические закономерности пероксигидролиз ацилсодержащих субстратов в ОМС на основе димерных катионных ПАВ. В организованных микрогетерогенных системах (ОМС) на основе ПАВ в присутствии пероксида водорода субстрат (S) взаимодействует с анионами HO^- и HOO^- . Обе реакции протекают как в водной, так и в мицеллярной псевдофазах (1).



В схеме $k_{2,HOO}^v$, $k_{2,HO}^v$ и $k_{2,HOO}^m$, $k_{2,HO}^m$, л/(моль с) – константы скорости второго порядка, характеризующие нуклеофильность гидропероксид- и гидроксид-анионов в воде и мицеллах ПАВ, соответственно. Распределение субстрата и нуклеофила между водой и мицеллярной псевдофазой описывается соответствующими коэффициентами: $P_S = [S]_m/[S]_v$, $P_{HO} = [HO]_m/[HO]_v$ и $P_{HOO} = [HOO]_m/[HOO]_v$.

В ОМС реакция пероксида водорода с ацилсодержащими субстратами включает четыре параллельных маршрута (см. схему 1). Однако различия в наблюдаемых скоростях реакций пероксигидролиза и щелочного гидролиза достигают ~ 10 раз, и они сохраняются во всей исследованной области концентраций c_0 . Например, при $c_0 = \text{const} = 8 \cdot 10^{-4}$ моль/л, $[\text{H}_2\text{O}_2]_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ моль/л и pH = 11.0 отношение $k_{\text{набл., HOO}}^m/k_{\text{набл., HO}}^m$ в присутствии димерного GS **2a** для пероксигидролиза NPDEPN составляет ~ 8 раз. Поэтому вкладом

щелочного гидролиза можно пренебречь, и обработку кинетических данных проводить в рамках псевдофазной распределительной модели по уравнению, учитывающему только взаимодействие субстрата с HOO^- -анионом в мицеллярной и водной фазах [13, 14] (уравнение 2):

$$k_{\text{набл.}} = \frac{(k_{2,\text{HOO}^-}^{\text{M}}/V_{\text{M}})K_{\text{S}}K_{\text{HOO}^-}c + k_{2,\text{HOO}^-}^{\text{e}}}{(1 + K_{\text{S}}c)(1 + K_{\text{HOO}^-}c)}[\text{HOO}^-] \quad [\text{HOO}^-] = \frac{K_{\text{a, каж.}}}{K_{\text{a, каж.}} + \alpha_{\text{H}^+}}[\text{H}_2\text{O}_2]_0 \quad (2)$$

где $c = c_0 - \text{ККМ}$, моль/л (ККМ – критическая концентрация мицеллообразования);

c_0 – суммарная концентрация ПАВ;

V_{M} , л/моль – парциальный мольный объем ПАВ; величина V_{M} для ПАВ полагалась равной 0.597 л/моль [6, 7, 15];

$K_{\text{S}} \approx P_{\text{S}} \cdot V_{\text{M}}$ и $K_{\text{HOO}^-} \approx P_{\text{HOO}^-} \cdot V_{\text{M}}$, л/моль – константы связывания субстрата и нуклеофила;

k_2^{B} и k_2^{M} , л/(моль·с) – константы скорости второго порядка, характеризующие нуклеофильность HOO^- -иона в воде и мицеллярной псевдофазе;

$k_{\text{M}} = (k_2^{\text{M}}/V_{\text{M}})$, с^{-1} – приведенная константа скорости реакции в мицеллярной псевдофазе; $K_{\text{a, каж.}}$ – кажущаяся константа кислотной ионизации пероксида водорода.

Величина $K_{\text{a, каж.}}$ принималась равной константе K_{a} ионизации пероксида водорода в воде, $K_{\text{a}} = 3.16 \cdot 10^{-12}$ [10]. Во всем изученном интервале концентраций кинетические данные для изученных субстратов адекватно описываются уравнением (2). Физико-химические характеристики пероксигидролиза NPDEPN, NPDEP в ОМС представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические характеристики пероксигидролиза NPDEPN и NPDEP в ОМС на основе димерных катионных ПАВ; pH = 11.0; вода, 25 °C

ПАВ	Субстрат	K_{S} , л/моль	K_{HOO^-} , л/моль	$k_{2,\text{HOO}^-}^{\text{M}}$, л/(моль·с)	$k_{2,\text{HOO}^-}^{\text{B}}/k_{2,\text{HOO}^-}^{\text{M}}$	$k_{2,\text{HOO}^-}^{\text{M}}/k_{2,\text{HO}^-}^{\text{M}}$
2a	NPDEPN	230 ± 70	30	2.33	3.0	61
	NPDEP	160 ± 20	30	0.23	2.4	52
2b	NPDEPN	390 ± 90	30	2.05	3.4	17
	NPDEP	800 ± 150	30	0.13	4.2	–
1a	NPDEPN	350	50	3.80	1.9	64
	NPDEP	295	50	0.27	2.0	108
1b	NPDEPN	590	80	2.40	3.1	–
	NPDEP	550	80	0.16	3.4	70
3a	NPDEP	240	45	0.20	2.8	57
3b	NPDEPN	550	80	2.95	2.5	–
	NPDEP	290	60	0.24	2.2	58

Примечание. ^aКонстанты скорости второго порядка в ОМС для реакций щелочного гидролиза $k_{2,\text{HO}^-}^{\text{B}}$ и пергидролиза $k_{2,\text{HOO}^-}^{\text{B}}$ субстратов NPDEPN, NPDEP в воде соответственно равны 0.15 и 7.3; 0.0096 и 0.55; pH=11.0; 25 °C.

Природа ПАВ / субстрата – свойство – мицеллярные эффекты. Сравнительный анализ закономерностей кинетического поведения «нормального» нуклеофила (HO^- -ион) и α -нуклеофила (HOO^- -ион) в реакциях щелочного гидролиза

и пероксигидролиза свидетельствует о том, что они являются общими для этих реакций нуклеофильного замещения. Прежде всего, следует отметить, что, как и в случае гидролиза, димерные ПАВ заметно ускоряют пероксигидролиз субстратов. В случае пероксигидролиза эффективность катализа мицеллами димерных ПАВ возрастает в том же порядке, как и в реакции гидролиза: NPDEPN > NPDEP. Определяющую роль в мицеллярных эффектах играют гидрофобные свойства ПАВ/субстрата, а основным фактором, ответственным за мицеллярный катализ, выступают эффекты концентрирования реагентов. При этом α -эффект гидропероксид-иона, охарактеризованный отношением констант скорости второго порядка пероксигидролиза и щелочного гидролиза, сохраняется и в зависимости от природы ПАВ/субстрата может составлять ~ 100 раз.

Выводы

В рамках псевдофазной распределительной модели проведен сравнительный анализ физико-химических параметров, описывающих процессы щелочного гидролиза и пероксигидролиза 4-нитрофениловых эфиров фосфоновой и фосфорной кислот в организованных микрогетерогенных системах на основе димерных катионных имидазолиевых ПАВ. Во-первых, при переносе реакций пероксигидролиза из воды в мицеллярную псевдофазу α -эффект гидропероксид-иона сохраняется и достигает ~ 100 раз. Следовательно, в ОМС гидропероксид-ион проявляет аномально высокую реакционную способность в ряду анионных кислородсодержащих нуклеофилов. Во-вторых, максимальный каталитический эффект отмечается для ПАВ с более длинным алкильным «хвостом» ($C_{14}H_{29} > C_{12}H_{25}$).

Таким образом, величины мицеллярных эффектов зависят как от эффективности сольubilизации реагентов, так и от нуклеофильной реакционной способности гидроксид- и гидропероксид-анионов в воде и мицеллярной псевдофазе.

Список литературы

1. Samiey B., Cheng C.-H., Wu J. Effects of Surfactants on the Rate of Chemical Reactions // Journal of Chemistry. 2014. 1-4. DOI: 10.1155/2014/908476
2. Bedford C. T. Reactions of Carboxylic, Phosphoric, and Sulfonic Acids and their Derivatives // Organic Reaction Mechanisms 2014: An annual survey covering the literature dated January to December 2014. Ed. A. C. Knipe. John Wiley & Sons, 2018. P. 87-122. DOI: 10.1002/9781118941829.ch
3. Duirk S. E., Desetto L. M., Davis G. M. Transformation of Organophosphorus Pesticides in the Presence of Aqueous Chlorine: Kinetics, Pathways, and Structure-Activity Relationships Environ // Environmental Science and Technology. 2009. 43(7). 2335-2340. DOI: 10.1021/es802868y
4. Pavez P., Oliva G., Millán D. Green solvents as a Promising Approach to Degradation of Organophosphorate Pesticides // ACS Sustainable Chemistry and Engineering. 2016. 3(12). 7023-7031. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b01923

5. Kim K., Tsay O. G., Atwood D. A., Churchill D. G. Destruction, and detection of chemical warfare agents // *Chemical Reviews*. 2011. 111(9). 5345-5403. DOI: 10.1021/cr100193y
6. Wetting S. D., Verrall R. E. Thermodynamic Studies of Aqueous m-s-m Gemini Surfactants // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2001. 235(2). 310-316. DOI: 10.1006/jcis.2000.7348
7. Wetting S. D., Novak P., Verrall R. E. Thermodynamic and Aggregation Properties of Gemini Surfactants with Hydroxyl Substituted Spacers in Aqueous Solution // *Langmuir*. 2002. 18(14). 5354-5359. DOI: 10.1021/la011782s
8. Prokopyeva T. M., Mirgorodskaya A. B., Belousova I. A., Zubareva T. M., Turovskaya M. K., Panchenko B. V., Razumova N. G., Gaidash T. S., Mikhailov V. A. Modern approaches to the development of efficient organized microheterogeneous surfactant-based systems for decomposition of organophosphorus compounds: a review // *Chemical safety science*. 2021. 5(2). 8-48. DOI: 10.25514/CHS.2021.2.20001
9. Zubareva T. M., Belousova I. A., Prokopyeva T. M., Gaidash T. S. Reactivity of Inorganic α -Nucleophiles in Acyl Group Transfer Processes in Water and Surfactant Micelles: II. Alkaline Hydrolysis of Ethyl 4-Nitrophenyl Ethylphosphonate in Systems Based on Dimeric Cationic Surfactants // *Russian Journal of Organic Chemistry*. 2020. 56(1). 53-58. DOI: 10.1134/S1070428020010091
10. Зубарева Т. М., Белоусова И. А., Прокопьева Т. М., Гайдаш Т. С., Разумова Н. Г., Панченко Б. В., Михайлов В. А. Реакционная способность неорганических α -нуклеофилов в процессах переноса ацильной группы в воде и мицеллах ПАВ: II.¹ Системы на основе катионных димерных ПАВ в процессах щелочного гидролиза 4-нитрофенилдиэтилфосфоната // *Журнал органической химии*. 2020. 56(1). 70-77. DOI: 10.31857/S0514749220010097
11. Симаненко Ю. С., Попов А. Ф., Прокопьева Т. М., Карпичев Е. А., Савелова В. А., Супрун И. П., Бантон К. А. Неорганические анионные кислородсодержащие α -нуклеофилы – эффективные акцепторы ацильной группы. Гидроксиламин – «лидер» в ряду α -нуклеофилов // *Журнал органической химии*. 2002. 38(9). 1341-1353.
12. Simanenko Yu. S., Popov A. F., Prokopyeva T. M., Karpichev E. A. Inorganic Anionic Oxygen-Containing α -Nucleophiles-Effective Acyl Group Acceptors: Hydroxylamine Ranks First among the α -Nucleophile Series // *Russian Journal of Organic Chemistry*. 2002. 38(9). 1286-1298. DOI: 10.1023/A:1021699628721
13. Voloshina A. D., Gumerova S. K., Sapunova A. S., Kulik N. V., Mirgorodskaya A. B., Kotenko A. A., Prokopyeva T. M., Mikhailov V. A., Zakharova L. Y., Sinyashin O. G. The structure – Activity correlation in the family of dicationic imidazolium surfactants: Antimicrobial properties and cytotoxic effect // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) / General Subjects*. 2020. 1864. 12. 129728. DOI: 10.1016/j.bbagen.2020.12972
14. Капитанов И. В., Прокопьева Т. М., Садовский Ю. С., Соломойченко Т. Н. Мицеллярные эффекты димерных имидазолиевых ПАВ в процессах переноса ацильных групп на гидроксид- и гидропероксид-ионы // *Украинский химический журнал*. 2014. 80(1-2). 30-37.
15. Berezin I. V., Martinek K., Yatsimirskii A. K. Physicochemical Foundations of Micellar // *Russian Chemical Reviews*. 1973. 42(10). 787-802. DOI: 10.1070/rc1973v042n10abeh002744
16. Bunton C. A. The dependence of micellar rate effects upon reaction mechanism // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2006(16). 123-343. DOI: 10.1016/j.cis.2006.05.008

17. Bhattacharya S., Kumar V. P. Evidence of Enhanced Reactivity of DAAP Nucleophiles toward Dephosphorylation and Deacylation Reactions in Cationic Gemini Micellar Media // *The Journal of Organic Chemistry*. 2004. 69(2). 559-562. DOI: 10.1021/jo034745

References

1. Samiey B., Cheng C.-H., Wu J. Effects of Surfactants on the Rate of Chemical Reactions // *Journal of Chemistry*. 2014. 1-4. DOI: 10.1155/2014/908476
2. Bedford C. T. Reactions of Carboxylic, Phosphoric, and Sulfonic Acids and their Derivatives // *Organic Reaction Mechanisms 2014: An annual survey covering the literature dated January to December 2014*. Ed. A. C. Knipe. John Wiley & Sons, 2018. P. 87-122. DOI: 10.1002/9781118941829.ch2
3. Duirk S. E., Desetto L. M., Davis G. M. Transformation of Organophosphorus Pesticides in the Presence of Aqueous Chlorine: Kinetics, Pathways, and Structure-Activity Relationships *Environ // Environmental Science and Technology*. 2009. 43(7). 2335-2340. DOI: 10.1021/es802868y
4. Pavez P., Oliva G., Millán D. Green solvents as a Promising Approach to Degradation of Organophosphate Pesticides // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. 2016. 3(12). 7023-7031. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b01923
5. Kim K., Tsay O. G., Atwood D. A., Churchill D. G. Destruction, and detection of chemical warfare agents // *Chemical Reviews*. 2011. 111(9). 5345-5403. DOI: 10.1021/cr100193y
6. Wetting S. D., Verrall R. E. Thermodynamic Studies of Aqueous m-s-m Gemini Surfactants // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2001. 235(2). 310-316. DOI: 10.1006/jcis.2000.7348
7. Wetting S. D., Novak P., Verrall R. E. Thermodynamic and Aggregation Properties of Gemini Surfactants with Hydroxyl Substituted Spacers in Aqueous Solution // *Langmuir*. 2002. 18(14). 5354-5359. DOI: 10.1021/la011782s
8. Prokopyeva T. M., Mirgorodskaya A. B., Belousova I. A., Zubareva T. M., Turovskaya M. K., Panchenko B. V., Razumova N. G., Gaidash T. S., Mikhailov V. A. Modern approaches to the development of efficient organized microheterogeneous surfactant-based systems for decomposition of organophosphorus compounds: a review // *Chemical safety science*. 2021. 5(2). 8-48. DOI: 10.25514/CHS.2021.2.20001
9. Zubareva T. M., Belousova I. A., Prokopyeva T. M., Gaidach T. S. Reactivity of Inorganic α -Nucleophiles in Acyl Group Transfer Processes in Water and Surfactant Micelles: II. Alkaline Hydrolysis of Ethyl 4-Nitrophenyl Ethylphosphonate in Systems Based on Dimeric Cationic Surfactants // *Russian Journal of Organic Chemistry*. 2020. 56(1). 53-58. DOI: 10.1134/S1070428020010091
10. Zubareva T. M., Belousova I. A., Prokopyeva T. M., Gaidach T. S., Razumova N. G., Panchenko B. V., Mikhailov V. A. Reaktsionnaya sposobnost' neorganicheskikh α -nukleofilov v protsessakh perenosa atsil'noy gruppy v vode i mitsellakh PAV: II.1 Sistemy na osnove kationnykh dimernykh PAV v protsessakh shchelochnogo gidroliza 4-nitrofenildietilfosfonata [Reactivity of inorganic α -nucleophiles in the processes of acyl group transfer in water and surfactant micelles: II.1 Systems based on cationic dimeric surfactants in the processes of alkaline hydrolysis of 4-nitrophenyl diethylphosphonate] // *Russian Journal of Organic Chemistry*. 2020. 56(1). 70-77. DOI: 10.31857/S0514749220010097
11. Simanenko Yu. S., Popov A. F., Prokopyeva T. M., Karpichev E. A., Savelova V. A., Suprun I. P., Bunton K. A. Neorganicheskiye anionnyye

kislordsoderzhashchiye α -nukleofily – effektivnyye aktseptory atsil'noy gruppy. Gidroksilamin – "lider" v ryadu α -nukleofilov [Inorganic anionic oxygen-containing α -nucleophiles are effective acceptors of the acyl group. Hydroxylamine – "leader" in the series of α -nucleophiles] // Russian Journal of Organic Chemistry. 2002. 38(9). 1341-1353.

12. Simanenko Yu. S., Popov A. F., Prokopyeva T. M., Karpichev E. A. Inorganic Anionic Oxygen-Containing α -Nucleophiles-Effective Acyl Group Acceptors: Hydroxylamine Ranks First among the α -Nucleophile Series // Russian Journal of Organic Chemistry. 2002. 38(9). 1286-1298. DOI: 10.1023/A:1021699628721

13. Voloshina A. D., Gumerova S. K., Sapunova A. S., Kulik N. V., Mirgorodskaya A. B., Kotenko A. A., Prokopyeva T. M., Mikhailov V. A., Zakharova L. Y., Sinyashin O. G. The structure – Activity correlation in the family of dicationic imidazolium surfactants: Antimicrobial properties and cytotoxic effect // Biochimica et Biophysica Acta (BBA) / General Subjects. 2020. 1864. 12. 129728. DOI: 10.1016/j.bbagen.2020.12972

14. Kapitanov I. V., Prokopyeva T. M., Sadovsky Yu. S., Solomoychenko T. N. Mitsellyarnyye efekty dimernykh imidazoliyevykh PAV v protsesakh perenosa atsil'nykh grupp na gidroksid- i gidroperoksid-iony [Micellar effects of dimeric imidazolium surfactants in the transfer of acyl groups to hydroxide and hydroperoxide ions] // Ukrainian Chemical Journal. 2014. 80(1-2). 30-37.

15. Berezin I. V., Martinek K., Yatsimirskii A. K. Physicochemical Foundations of Micellar // Russian Chemical Reviews. 1973. 42(10). 787-802. DOI: 10.1070/rc1973v042n10abeh002744

16. Bunton C. A. The dependence of micellar rate effects upon reaction mechanism // Advances in Colloid and Interface Science. 2006(16). 123-343. DOI: 10.1016/j.cis.2006.05.008

17. Bhattacharya S., Kumar V. P. Evidence of Enhanced Reactivity of DAAP Nucleophiles toward Dephosphorylation and Deacylation Reactions in Cationic Gemini Micellar Media // The Journal of Organic Chemistry. 2004. 69(2). 559–562. DOI: 10.1021/jo034745

Информация об авторах

Туровская Мария Кендеховна – кандидат химических наук, научный сотрудник, Институт физико-органической химии и углехимии имени Л. М. Литвиненко (Донецк, Россия), ORCID: 0000-0003-4129-0270, na.turovskij@gmail.com

Прокопьева Татьяна Мефодиевна – кандидат химических наук, ставший научный сотрудник, Институт физико-органической химии и углехимии имени Л. М. Литвиненко (Донецк, Россия), ORCID: 0000-0003-0867-7449, hrustat@mail.ru

Гайдаш Татьяна Степановна – младший научный сотрудник, Институт физико-органической химии и углехимии имени Л. М. Литвиненко (Донецк, Россия), ORCID: 0000-0002-6430-2433

Михайлов Василий Александрович – кандидат химических наук, заведующий отделом, Институт физико-органической химии и углехимии имени Л. М. Литвиненко (Донецк, Россия), ORCID: 0000-0002-4184-1805, v_mikhailov@yahoo.com