

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЕРФТОРИРОВАННЫХ ЖИДКОСТЕЙ С ФТОРОМ В ГАЗОЖИДКОСТНОМ РЕАКТОРЕ

© П. С. Камбур<sup>1</sup>, Д. С. Пашкевич<sup>2\*</sup>, Ю. И. Алексеев<sup>1</sup>,  
Ю. П. Ямпольский<sup>1,3</sup>, А. Ю. Алентьев<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Российский научный центр «Прикладная химия», Санкт-Петербург

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>3</sup> Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва

\* E-mail: pashkevich-ds@yandex.ru

Поступила в Редакцию 17 сентября 2018 г.

После доработки 28 февраля 2019 г.

Принята к публикации 7 марта 2019 г.

*Экспериментально исследован процесс фторирования перфтордекалина и перфтор-1,3-диметилциклогексана фтором в газожидкостном реакторе с высокооборотной мешалкой. Показано, что в процессе обработки фтором в течение 2 ч скорость реакции фторирования снижается и затем стабилизируется, составляя при 80°C 0.5 и 1.3 мкг·с<sup>-1</sup>·л<sup>-1</sup> для перфтор-1,3-диметилциклогексана и перфтордекалина соответственно. Сравнение скоростей фторирования перфтордекалина, перфтор-1,3-диметилциклогексана и фожалина (основное вещество — перфтортрипропиламин) позволило сформулировать рекомендации по выбору перфторированной жидкости в качестве среды для исследования фторирования органических соединений фтором в газожидкостном реакторе, для которых потери фтора при деструктивном фторировании жидкости составят величину порядка 10<sup>-1</sup>%.*

Ключевые слова: фтор; газожидкостной реактор; перфторированные жидкости

DOI: 10.1134/S0044461819050128

Фторсодержащие и перфторированные соединения (низкомолекулярные вещества и полимеры) находят применение в качестве инертных растворителей, медицинских препаратов, инертных теплоносителей (хладонов), реагентов для травления кремния в микроэлектронике и фотовольтаике, масел и смазок, покрытий с ценными поверхностными свойствами, материалов волоконной оптики, мембранных материалов и др. [1–4].

При производстве органических соединений фтора обычно в качестве фторирующих агентов применяют фторид водорода, трифторид кобальта, пентафторид сурьмы, тетрафторид серы и др. [1]. Использование в качестве фторирующего агента гексафторида урана

хотя и было подробно изучено [5], промышленного применения не нашло.

Элементный фтор применяют в промышленности в качестве фторирующего агента в основном для получения неорганических фторидов — трифторида азота, гексафторида серы, гексафторида урана, гексафторида вольфрама, трифторида бора и др. [2, 6, 7].

Фторирование органических соединений фтором до сих пор не нашло широкого промышленного применения. Это связано с высоким тепловыделением в реакциях водородзаместительного фторирования и возможностью перехода процессов из стационарного теплового режима в нестационарный (режим горения или теплового взрыва). Исследования в этой

области проводили как в газовой фазе [8–10] при низкой (около  $-80^{\circ}\text{C}$ ) температуре, высоком разбавлении компонентов инертным газом, так и в жидкой фазе, получая, например, моно- и дифторпроизводные ароматических углеводородов при температурах  $-70^{\circ}\text{C}$ – $-20^{\circ}\text{C}$  в среде трифторхлорметана и других растворителей [11].

Кроме того, разработаны способы фторирования органических соединений в газожидкостных микрореакторах [12]. Благодаря развитой межфазной поверхности, а также малым размерам каналов реакторов достигается «мягкое» прямое фторирование даже сложных органических соединений без их деструкции с получением монофторпроизводных. Однако микрореакторы существенно уступают по производительности процесса и себестоимости продукции традиционным емкостным реакторам с перемешивающими устройствами, и с их использованием невозможно реализовать фторирование твердых соединений, например, полимерных порошков.

Осуществить недеструктивное водородзаместительное фторирование органических соединений фтором в стационарном тепловом режиме можно в газожидкостном реакторе с высокооборотной мешалкой, где в качестве жидкой фазы используют перфторированные жидкости, например фожалин (смесь, состоящая в основном из перфтортрипропиламина, продукт электрохимического фторирования трипропиламина), обладающий высокой химической устойчивостью по отношению к фтору [13]. Известно, что в таком реакторе можно обеспечить высокую интенсивность процессов тепло- и массообмена — характерный размер газового пузыря порядка  $10^{-3}$  м, газонасыщение на уровне 20% и значение коэффициента теплоотдачи порядка  $10^2$ – $10^3$  Вт·м $^{-2}$ ·К $^{-1}$  [14].

В настоящее время в России производят несколько перфторированных жидкостей. ФГУП «РНЦ «Прикладная химия» производит фожалин ( $T_{\text{кип}} = 130^{\circ}\text{C}$ ) (основное вещество — перфтортрипропиламин), АО «ГалоПолимер Пермь» — перфтордекалин ( $T_{\text{кип}} = 142^{\circ}\text{C}$ ) и перфтор-1,3-диметилциклогексан ( $T_{\text{кип}} = 102^{\circ}\text{C}$ ). Перфтордекалин и перфтор-1,3-диметилциклогексан производят фторированием трифторидом кобальта декалина и 1,3-диметилциклогексана соответственно. Эти вещества могут быть использованы в качестве среды для проведения процессов газожидкостного фторирования, но для этого необходимо определить скорости взаимодействия перфторированных жидкостей со фтором, чтобы оценить потери фтора за счет этого взаимодействия и выбрать жидкость с минимальной скоростью фторирования, тем более что технические

продукты представляют собой смеси — в перфтордекалине содержание основного вещества 93%, а в перфтор-1,3-диметилциклогексане — 99%. Основными примесями являются продукты деструктивного фторирования циклических структур, в перфтордекалине — перфторированные алкилциклогексаны, в перфтор-1,3-диметилциклогексане — перфторалканы, а водородсодержащие вещества практически отсутствуют. Скорость фторирования примесей может существенно отличаться от скорости фторирования собственно перфтордекалина и перфтор-1,3-диметилциклогексана.

Стабилизация фожалина фтором описана в работе [13], где показано, что в ходе процесса образуются тетрафторметан и трифторид азота, причем скорости образования  $\text{CF}_4$  и  $\text{NF}_3$  снижаются в течение 2 ч от начала опыта и после этого стабилизируются, становясь пренебрежимо малыми.

В настоящей статье приведены результаты дальнейшего изучения фторирования технических перфторированных жидкостей с целью определить оптимальные условия получения более устойчивых к фтору перфторированных соединений, пригодных для реализации процесса водородзаместительного фторирования органических соединений в газожидкостном реакторе.

### Экспериментальная часть

Для исследования взаимодействия с фтором технических перфтордекалина и перфтор-1,3-диметилциклогексана использовали цилиндрический реактор объемом 1.3 л (отношение высоты к диаметру 5) из нержавеющей стали с высокооборотной мешалкой в циркуляционном контуре (осесимметричная труба диаметром 50 мм), конструкция которого подробно описана в работе [14]. Частоту вращения мешалки во всех опытах задавали на уровне 25–35 Гц, что соответствует максимальному газонасыщению порядка 20 об% [14].

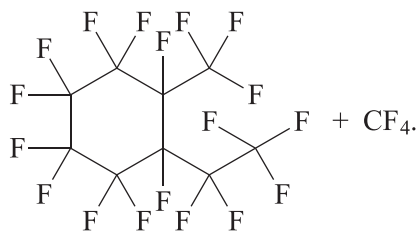
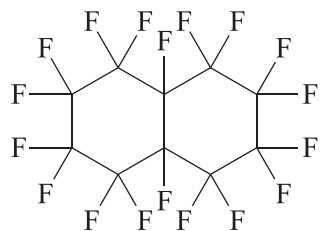
Реактор заполняли исходной перфторированной жидкостью, нагревали до начальной температуры, включали мешалку, подавали смесь фтора и азота при атмосферном давлении и отбирали пробы газа на выходе из реактора для газохроматографического анализа.

Смесь фтора и азота готовили, подавая в металлический отвакуумированный сосуд объемом 10 л последовательно азот и фтор из баллонов, концентрацию компонентов определяли с помощью измерения давления в емкости. Расход смеси газов задавали с помощью игольчатого вентиля тонкой регулировки,

который использовали для изменения газодинамического сопротивления линии подачи. Расход рассчитывали по снижению давления в емкости со смесью газов. Такой способ поддержания расхода позволяет измерить средний расход за опыт, при этом изменение или корректировка расхода в течение опыта весьма затруднена.

В газовом потоке на выходе из реактора определяли концентрацию газообразных фторсодержащих соединений методом газовой хроматографии. Использовали хроматограф Кристалл 2000М с программным комплексом Хроматэк Аналитик производства ЗАО СКБ «Хроматэк» (г. Йошкар-Ола), снабженный детектором по теплопроводности и насадочной колонкой, заполненной сорбентом PorapakQ, фракция 80/100 меш, длиной 3 м и диаметром 2 мм. Анализ проводили при следующих условиях: температура колонки 60°C, температура детектора 120°C, газ-носитель — гелий, расход газа-носителя — 30 см<sup>3</sup>·мин<sup>-1</sup>, объем пробы — 0.1 см<sup>3</sup>. Газовую пробу вводили в колонку с помощью крана-дозатора. Количественный расчет концентрации газообразных перфторуглеродов проводили методом внутренней нормализации с градуировочными коэффициентами, определенными с использованием государственных стандартных образцов газов.

Было установлено, что на выходе из реактора в газовой фазе при фторировании технических перфтордекалина и перфтор-1,3-диметилцикло-



(2)

Расчет вели по уравнению

$$W_{F_2} = 2W_{CF_4}M_{F_2}M_{CF_4}^{-1} + 2W_{C_2F_6}M_{F_2}M_{C_2F_6}^{-1}. \quad (3)$$

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, позволяет сделать следующие выводы.

При фторировании исходного перфтордекалина скорость образования тетрафторметана  $W_{CF_4}$  при температуре 50°C в течение 2 ч снижается более чем в 3 раза. При повышении температуры до 80°C скорость снижается еще в 3 раза и остается постоянной во времени, в том числе и при повышении температуры до 120°C. При фторировании перфтор-1,3-диметилциклогексана скорость образования тетрафторметана и гексафторэтана была существенно ниже, чем

гексана присутствуют тетрафторметан и гексафторэтан. Условия и результаты опытов приведены в табл. 1.

Расход фтора на входе в реактор  $W_{F_2\text{вх}}$  рассчитывали по снижению давления в емкости со смесью фтора и азота и по концентрации фтора в смеси. Время пребывания газа в реакторе определяли как отношение объемного расхода смеси фтора и азота к объему газовой фазы в реакторе, которая при работающей мешалке составляет 20% от всего объема реактора. Концентрации тетрафторметана  $c_{CF_4}$  и гексафторэтана  $c_{C_2F_6}$  в потоке азота на выходе из реактора определяли согласно описанной выше газохроматографической методике. Скорости образования тетрафторметана и гексафторэтана  $W_{CF_4}$  и  $W_{C_2F_6}$  в реакторе рассчитывали по их концентрациям  $c_{CF_4}$ ,  $c_{C_2F_6}$  в потоке азота на выходе из реактора:

$$W_{CF_4} = W_{N_2}c_{CF_4}\rho_{CF_4}, \quad (1)$$

$$W_{C_2F_6} = W_{N_2}c_{C_2F_6}\rho_{C_2F_6},$$

где  $W_{N_2}$  — расход азота (см<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>), который рассчитывали по снижению давления в емкости со смесью фтора и азота;  $\rho_{CF_4}$ ,  $\rho_{C_2F_6}$  — плотности тетрафторметана и гексафторэтана (мкг·см<sup>-3</sup>) соответственно.

Расход фтора на образование  $CF_4$  и  $C_2F_6$   $W_{F_2}$  рассчитывали в предположении, что при образовании одной молекулы тетрафторметана или гексафторэтана расходуются две молекулы фтора, например:

при фторировании перфтордекалина: например, при 80°C для  $CF_4$  более чем в 2 раза и для  $C_2F_6$  более чем в 4 раза.

Выше было отмечено, что промышленный перфтордекалин содержит в своем составе 93% основного вещества, а примесями являются перфтор-алкилциклогексаны. В то же время перфтор-1,3-диметилциклогексан содержит 99% основного вещества. В связи с этим можно предположить, что при контакте промышленного перфтордекалина и фтора фторированию в первую очередь подвергаются пер-

Таблица 1

Результаты экспериментов\* по фторированию технических перфтордекалина и перфтор-1,3-диметилциклогексана при концентрации фтора в исходной газовой смеси,  $c_{F_2} = 50$  об%

Температура процесса, °С	$W_{см}$ , см <sup>3</sup> ·с <sup>-1</sup>	$W_{F_{2вх}}$ , мкг·с <sup>-1</sup>	Время пребывания газа в реакторе, с	Время от начала опыта до отбора пробы, мин	$c_{CF_4}$	$c_{C_2F_6}$	$W_{CF_4}$	$W_{C_2F_6}$	$W_{F_2}$
					об%		2 мкг·с <sup>-1</sup>		
Перфтордекалин									
50	0.80	632	305	17	1.50	0.58	19.92	12.09	11.93
	1.25	990	195	30	0.94	0.51	19.51	16.62	13.00
	1.36	1077	179	67	0.49	0.38	11.04	13.44	8.47
	1.36	1077	179	88	0.27	0.31	6.10	11.00	5.66
	1.15	911	212	141	0.31	0.07	5.90	2.09	3.13
80	1.00	792	244	70	0.13	0.06	1.93	1.40	1.22
	1.25	990	195	83	0.11	0.06	2.03	1.74	1.38
120	1.15	911	212	96	0.12	0.04	1.91	1.00	1.10
	1.00	792	244	110	0.12	0.03	1.61	0.63	0.87
Перфтор-1,3-диметилциклогексан									
20	2.9	459	84	60	0.20	0.05	2.40	0.95	1.30
	1.6	253	153	195	0.15	0.05	1.05	0.55	0.60
50	1.9	301	128	29	0.30	0.05	1.35	0.35	0.70
	1.9	301	128	78	0.10	0.05	0.50	0.40	0.30
80	1.4	222	174	32	0.35	0.05	1.50	0.35	0.75
	1.4	222	174	99	0.25	0.05	1.05	0.35	0.55
	0.75	119	325	160	0.15	0.05	0.35	0.20	0.20

\*  $W_{см}$  — расход смеси фтора и азота,  $W_{F_{2вх}}$  — расход фтора,  $c_{F_2}$  — концентрация фтора в смеси с азотом на входе в реактор,  $c_{CF_4}$  и  $c_{C_2F_6}$  — концентрации  $CF_4$  и  $C_2F_6$  в газовом потоке на выходе из реактора,  $W_{CF_4}$  и  $W_{C_2F_6}$  — массовые расходы  $CF_4$  и  $C_2F_6$  на выходе из реактора,  $W_{F_2}$  — расход фтора на образование  $CF_4$  и  $C_2F_6$ .

фторалкильные фрагменты, присоединенные к перфторированному шестичленному кольцу, а не само кольцо и не собственно перфтордекалин. Именно поэтому скорость образования  $CF_4$  и  $C_2F_6$  при фторировании перфтордекалина существенно выше, чем при фторировании перфтор-1,3-диметилциклогексана.

Это хорошо согласуется с литературными данными по энергии углерод-углеродной связи в различных органических молекулах [15]. Так, энергия связи углерод-углерод в алифатических углеводородах составляет 297 кДж·моль<sup>-1</sup>, а в алифатических циклических — 401 кДж·моль<sup>-1</sup>, таким образом, скорость фторирования углерод-углеродной связи в линейных

насыщенных молекулах должна быть выше, чем в циклических насыщенных.

В дальнейшем обсуждении перфторированная жидкость, прошедшая обработку фтором в течение не менее 2 ч, будет называться стабилизированной.

Были рассчитаны скорости расходования фтора при образовании тетрафторметана и гексафторэтана по формуле (3) (табл. 1). Скорость расходования фтора при фторировании стабилизированных перфтордекалина и перфтор-1,3-диметилциклогексана при 80°С составляет около 1 и 0.5 мкг·с<sup>-1</sup>·л<sup>-1</sup>.

В литературе не были обнаружены данные по растворимости фтора в перфтордекалине. Поэтому для

Таблица 2

Скорость поглощения фтора, отнесенная к единице объема,  $W_{F_2}$  при фторировании стабилизированных перфторированных жидкостей при 80°C и ожидаемый расход фтора  $Q_{F_2}$  в промышленном реакторе объемом 1 м<sup>3</sup> (8000 ч работы)

Перфторированная жидкость	$W_{F_2}$ , мкг·с <sup>-1</sup> ·л <sup>-1</sup>	$Q_{F_2}$ , кг·год <sup>-1</sup> ·м <sup>-3</sup>
Перфтордекалин	1.3	37
Фожалин	6.1	176
Перфтор-1,3-диметилциклогексан	0.5	15

проведения оценок количества растворенного газа в газожидкостном реакторе были проведены измерения этой характеристики при различной температуре и давлении.

Ниже приведены значения растворимости фтора  $K$  в перфтордекалине в зависимости от температуры, например, при температуре 60°C растворимость фтора составляет 4 см<sup>3</sup>·см<sup>-3</sup>·МПа<sup>-1</sup>. Измерениями растворимости фтора при различных давлениях в интервале 0.1–0.5 МПа установлено, что его растворимость описывается законом Генри в указанном интервале:

$T, ^\circ\text{C}$	20	60	100	130
$K, \text{см}^3 \cdot \text{см}^{-3} \cdot \text{МПа}^{-1}$	4.2	4.0	3.2	2.7

Полученные данные по растворимости фтора в перфтордекалине по порядку значений совпадают с его растворимостью во фторхлоруглеродах и растворимостью кислорода в перфтордекалине [16, 17].

На основании приведенных данных можно заключить, что в использованном газожидкостном реакторе в процессе опыта может находиться порядка 0.2 г фтора в растворенном состоянии. Такое количество подается в реактор в среднем за 500 с, а выводится в химически связанном состоянии в составе образующихся в реакторе  $\text{CF}_4$  и  $\text{C}_2\text{F}_6$  в течение приблизительно 20 000 с.

Данные по значению коэффициента массоотдачи от потока фтора в поток перфторированных жидкостей в литературе обнаружены не были. Для процессов растворения кислорода в перфторированных жидкостях в аппаратах с мешалкой он составляет около 0.01 г·дм<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup> [18].

Тогда если полагать, что скорости растворения фтора и кислорода в перфторированных жидкостях сравнимы, то поток фтора в перфторированную жидкость в проведенных нами опытах может достигать 10 000 мкг·с<sup>-1</sup>. Таким образом, скорость расходования

фтора в жидкой фазе при образовании  $\text{CF}_4$  и  $\text{C}_2\text{F}_6$  (максимальные значения, полученные в опытах, 13.0 и 1.3 мкг·с<sup>-1</sup> для перфтордекалина и перфтор-1,3-диметилциклогексана соответственно) не менее чем в 10 раз ниже скорости подачи фтора в реактор (от 119 до 1077 мкг·с<sup>-1</sup>) и примерно на три порядка ниже скорости массопередачи фтора из газовой фазы в жидкую в исследуемой системе (порядка 104 мкг·с<sup>-1</sup>). Поэтому концентрация растворенного в перфторированной жидкости фтора оставалась постоянной в опытах, и влиянием расхода фтора в указанном диапазоне на скорость фторирования перфторированной жидкости можно пренебречь.

В табл. 2 приведены скорости расходования фтора при фторировании стабилизированных перфторированных жидкостей в газожидкостном реакторе и количества фтора, расходуемого в течение года в реакторе объемом 1 м<sup>3</sup>, рассчитанные на основе данных табл. 1. Данные для фожалина взяты из работы [13]. Для промышленного реактора полагали, что его газонасыщение соответствует газонасыщению лабораторного реактора, т. е. составляет 20%, а скорость подачи фтора составляет величину, равную скорости подачи фтора в лабораторных экспериментах, умноженной на отношение объемов реакторов.

Из данных табл. 2 следует, что скорость фторирования перфтор-1,3-диметилциклогексана в 2–3 раза ниже, чем у перфтордекалина, и на порядок ниже, чем у фожалина. При этом расход фтора при его фторировании в промышленном реакторе составит около 15 кг·год<sup>-1</sup>·м<sup>-3</sup>. Таким образом, предпочтительной средой для газожидкостного фторирования с точки зрения стабильности по отношению к фтору является перфтор-1,3-диметилциклогексан.

## Выводы

Скорость фторирования промышленного технического перфтордекалина фтором при температуре



50–120°C в газожидкостном реакторе снижается в течение нескольких часов после начала опыта в 5 раз и в дальнейшем стабилизируется. Скорость фторирования перфтор-1,3-диметилциклогексана снижается в течение нескольких часов от начала опыта в 2–3 раза и затем также стабилизируется. Скорость фторирования стабилизированного перфтордекалина примерно в 2–3 раза выше, чем стабилизированного перфтор-1,3-диметилциклогексана. С точки зрения стабильности по отношению ко фтору из трех исследованных жидкостей (перфтордекалин, перфтор-1,3-диметилциклогексан и фожалин) наиболее предпочтительным является перфтор-1,3-диметилциклогексан. Расходование фтора в реакции его фторирования в промышленном аппарате объемом 1 м<sup>3</sup> при 80°C составит величину порядка 15 кг в год.

#### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №18-19-00258).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

#### Информация об авторах

Камбур Павел Сергеевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4868-3758>

Пашкевич Дмитрий Станиславович, д.т.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3683-9492>.

Алексеев Юрий Иванович, к.т.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2838-5825>

Ямпольский Юрий Павлович, д.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4727-9208>

Алентьев Александр Юрьевич, д.х.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8034-9146>

#### Список литературы

- [1] Максимов Б. Н., Барабанов В. Г., Серушкин И. Л. Промышленные фторорганические продукты. СПб: Химия, 1996. 554 с.
- [2] Соединения фтора. Синтез и применение / Под ред. Н. Исикава. М.: Мир, 1990. 407 с.
- [3] Resnick P. R., Buck W. H. // *Modern Fluoropolymers: High Performance Polymers for Diverse Applications* / Ed. J. Scheirs. Chichester: John Wiley and Sons, 1997.
- [4] Ямпольский Ю. П. // *Рос. хим. журн.* 2008. Т. 52. № 3. С. 123–130.
- [5] ВНИИХТ – 50 лет. Юбилейный сборник трудов / Под ред. В. В. Шаталова. М.: ЦНИИатоминформ, 2001. С. 243–259.
- [6] Пашкевич Д. С., Барабанов В. Г., Максимов Б. Н. // Памяти Б. В. Гидаспова. Научные чтения. СПб: Теза, 2008. С. 169–177.
- [7] Тураев Н. С., Жерин И. И. Химия и технология урана. Л.: ЦНИИатоминформ, 2005. 407 с.
- [8] Теддер Д. М. // *Успехи химии фтора*. Т. I–II. М.; Л.: Химия, 1964. С. 380–423.
- [9] Maxwell A. F., Detoro F. E., Bigelow L. A. // *J. Am. Chem. Soc.* 1960. V. 82. N 22. P. 5827–5830.
- [10] Lagow R. J., Margrave J. L. // *Progr. Inorg. Chem.* 1979. V. 26. P. 162–210.
- [11] Conte L., Gambaretto G. P., Napoli M., Fraccaro C., Legnaro E. // *J. Fluorine Chem.* 1995. N 70. P. 175–179.
- [12] JaEhnisch K., Baernsa M., Hesselb V., Ehrfeldb W., Haverkamp V., LoEweb H., Willeb Ch., Guberc A. // *J. Fluorine Chem.* 2000. N 105. P. 117–128.
- [13] Камбур П. С., Пашкевич Д. С., Мухортов Д. А., Камбур М. П., Каурова Г. И., Барабанов В. Г. // *ЖПХ*. 2018. Т. 91. № 5. С. 651–655 [Kambur P. S., Pashkevich D. S., Mukhortov D. A., Kambur M. P., Kaurova G. I., Barabanov V. G. // *Russ. J. Appl. Chem.* 2018. V. 91. N 5. P. 746–749].
- [14] Пашкевич Д. С., Камбур П. С., Мухортов Д. А., Петров В. Б., Алексеев Ю. И. // *ЖПХ*. 2009. Т. 82. № 9. С. 1467–1471 [Pashkevich D. S., Kambur P. S., Mukhortov D. A., Petrov V. B., Alekseev Yu. I. // *Russ. J. Appl. Chem.* 2009. V. 82. N 9. P. 1565–1569].
- [15] Неницеску К. Д. *Органическая химия* / Под ред. М. И. Кабачника. Т. 1. М.: ИЛ, 1963. 863 с.
- [16] Gambaretto G. P., Conte L., Napoli M., Legnaro E. // *J. Fluorine Chem.* 1993. V. 60. P. 19–25.
- [17] Воробьев С. И. // *Хим.-фарм. журн.* 2009. Т. 43. № 4. С. 30–40 [Vorob'ev S. I. // *Pharm. Chem. J.* 2009. V. 43. N 4. P. 209–218].
- [18] Ataral P. F. F., Freire M. G., Rocha-Leao M. H. M., Marrucho I. M., Coutinho J. A. P., Coelho M. A. Z. // *Biotechnol. Bioeng.* 2008. V. 99. N 3. P. 588–598.