

## 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].

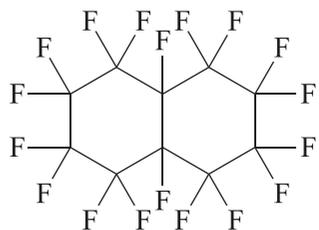
Реактор заполняли исходной перфторированной жидкостью, нагревали до начальной температуры, включали мешалку, подавали смесь фтора и азота при атмосферном давлении и отбирали пробы газа на выходе из реактора для газохроматографического анализа.

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,

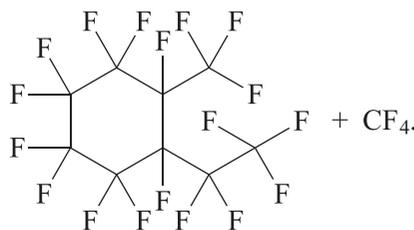
который использовали для изменения газодинамического сопротивления линии подачи. Расход рассчитывали по снижению давления в емкости со смесью газов. Такой способ поддержания расхода позволяет измерить средний расход за опыт, при этом изменение или корректировка расхода в течение опыта весьма затруднена.

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-



+ 2F<sub>2</sub>



(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:

$$\begin{aligned} W_{CF_4} &= W_{N_2}c_{CF_4}\rho_{CF_4}, \\ W_{C_2F_6} &= W_{N_2}c_{C_2F_6}\rho_{C_2F_6}, \end{aligned} \quad (1)$$

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<sub>4</sub> и C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>  $W_{F_2}$  рассчитывали в предположении, что при образовании одной молекулы тетрафторметана или гексафторэтана расходуются две молекулы фтора, например:

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.