

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ФТОРИРОВАНИЕ N-ЗАМЕЩЕННЫХ СОЛЕЙ ПИРИДИНА И МОРФОЛИНА

© Е. В. Литвиненко¹, Н. Б. Лесневская¹, А. А. Людикайнен¹, В. А. Маталин^{1,*},
В. А. Печилин¹, Н. В. Лебедев², Л. В. Осетрова², Н. В. Пеганова^{1,**}

¹ Российский научный центр «Прикладная химия (ГИПХ)»,
193232, г. Санкт-Петербург, ул. Крыленко, д. 26, лит. А

² Научно-исследовательский институт синтетического каучука им. С. В. Лебедева,
198035, г. Санкт-Петербург, ул. Гапсальская, д. 1
E-mail: * matalin.v@yandex.ru; ** chem_se@mail.ru

Поступила в Редакцию 29 марта 2024 г.

После доработки 3 октября 2024 г.

Принята к публикации 2 ноября 2024 г.

Представлены результаты изучения процессов электрохимического фторирования ряда N-замещенных четвертичных солей пиридина (бромиды N-этилпиридиния, бромиды N-бутилпиридиния, хлорида N-этанолпиридиния, бромиды метилового эфира N-пиридилуксусной кислоты) и третичных солей морфолина (бромиды N-бутилморфолина), установлен состав и строение жидких продуктов реакции фторирования методами газожидкостной хроматографии и ЯМР ¹⁹F спектроскопии. Получены с выходом по току от 19 до 54%, идентифицированы и описаны следующие перфторированные органические соединения: перфтор-N-бутилпиперидин, перфтор-N-этилпиперидин, перфтор-N-бутилморфолин, фторангидрид перфтор-N-пиперидинуксусной кислоты. Определены интервалы их температур кипения и плотность, а также основные технологические параметры процесса их получения.

Ключевые слова: электрохимическое фторирование; перфтор-N-бутилпиперидин; перфтор-N-этилпиперидин; перфтор-N-бутилморфолин; фторангидрид перфтор-N-пиперидинуксусной кислоты; перфторпиперидин-1-ил уксусной кислоты метиловый эфир; перфтор пиперидин-1-ил уксусная кислота, пиридин, морфолин

DOI: 10.31857/S0044461824050037; EDN: GYLVGK

Поиск новых методов синтеза поли- и перфторированных соединений, обладающих уникальными характеристиками и широкой областью применения, является актуальной задачей для данного этапа развития химии фторорганических соединений. К таким соединениям относятся перфторполиэфиры, фторангидриды перфторкарбоновых кислот, полностью фторированные третичные амины и другие перфторированные соединения, потребность в которых существует в медицине, технике и электронике.

Одним из методов получения перфторированных соединений, в том числе и перфторированных третичных аминов, с сохранением в них функциональных групп является метод электрохимического фторирования, или процесс Саймонса [1]. Промышленный интерес к полностью фторированным материалам,

получаемым методом электрохимического фторирования, обусловлен, во-первых, практической невозможностью получить их другими известными методами, а во-вторых, использованием относительно простого аппаратного оформления и более безопасного для транспортировки и хранения, чем газообразный фтор, сырья (HF).

Работы по электрохимическому фторированию целого ряда органических соединений были начаты и получили развитие в АО «Российский научный центр «Прикладная химия (ГИПХ)», в том числе с освоением данной технологии на опытно-промышленной установке [2]. Наиболее востребованным классом перфторсоединений являются перфторированные третичные амины (перфтортриэтил-, перфтортрипропил-, перфтортрибутиламины, продукт «Фожалин»),

углеводородные предшественники которых в настоящее время не производятся отечественной промышленностью. Следовательно, можно предположить, что подобные им другие фторированные третичные амины будут востребованы в технике и промышленности, в том числе и гетероциклические.

Цель исследования — разработка технологии промышленного получения производных третичных и гетероциклических перфторированных аминов, а именно четвертичных N-алкилпиридиниевых и третичных N-алкилморфолиниевых солей, электрохимическим фторированием в безводном HF.

Задача данного исследования — подбор режимов процесса и составов электролитов с оптимальной электропроводностью для электрохимического фторирования четвертичных и третичных аммониевых солей, пригодных для дальнейшего масштабирования. По результатам поиска по систематическим названиям согласно номенклатуре химических соединений в базе данных патентов Orbit Intelligence (Questel) и по структурным формулам и аналогам (синонимам) в базе данных химических соединений ChemSpider, часть полученных соединений не были описаны ранее. Использование четвертичных N-замещенных солей пиридина [3] и третичных N-замещенных солей морфолина в качестве исходных соединений и одновременно деполяризаторов для электрохимического синтеза позволит получить новые перфторированные органические соединения, перспективные для использования в высокотехнологичных электронной и энергетической областях.

Экспериментальная часть

В качестве исходных материалов для синтеза бромидов N-этилпиридиния, бромидов N-бутилпиридиния, хлоридов N-этанолпиридиния, бромидов метилового эфира N-пиридилуксусной кислоты и бромидов N-бутилморфолиния использовали пиридин (ч., АО «ЭКОС-1»), морфолин (ч., АО «ЭКОС-1»), бромэтан (х.ч., ООО «АО Реахим»), 1-бромбутан (ч., ЗАО «Вектон»), метилбромацетат (ч., ЗАО «Вектон») и 2-хлорэтанол (х.ч., АО «ЭКОС-1»). В качестве среды для проведения синтеза использовали диметилформамид (х.ч., АО «ЭКОС-1»).

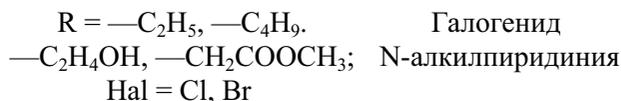
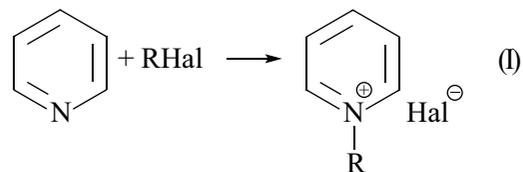
Для реакции метанолиза использовали метанол (х.ч., ЗАО «Вектон»). В процессах электрохимического фторирования бромидов N-этилпиридиния, бромидов N-бутилпиридиния, хлоридов N-этанолпиридиния, бромидов метилового эфира N-пиридилуксусной кислоты и бромидов N-бутилморфолиния исполь-

зовали безводный HF (99.95%, АО «ГалоПолимер Пермь»).

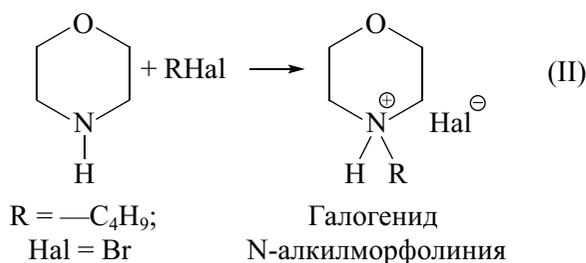
Для подготовки образцов для хроматографического и ЯМР-анализа после электрохимического фторирования использовали Na_2CO_3 (х.ч., АО «ЛенРеактив») и силикагель марки КСМГ (тех., АО «ЛенРеактив»). Все исходные материалы использовались без предварительной очистки.

Плотности перфтор-N-бутилморфолина, перфтор-N-бутилпиперидина и перфтор-N-этилпиперидина определяли ареометрическим методом.*

Синтез четвертичных солей пиридина (бромидов N-этилпиридиния, бромидов N-бутилпиридиния, хлоридов N-этанолпиридиния, бромидов метилового эфира N-пиридилуксусной кислоты) и третичной соли морфолина (бромидов N-бутилморфолиния) проводили в среде растворителя — диметилформамида (х.ч., АО «ЭКОС-1») по стандартной методике кватернизации пиридина (I) (ч., АО «ЭКОС-1») [4] или морфолина (II) (ч., АО «ЭКОС-1») соответствующим галогеналкилом — бромэтаном (х.ч., ООО «АО Реахим»), 1-бромбутаном (ч., ЗАО «Вектон»), метилбромацетатом (ч., ЗАО «Вектон») и 2-хлорэтанолом (х.ч., АО «ЭКОС-1»). Температуру реакции устанавливали в пределах от 30 до 115°C в зависимости от температуры кипения используемого галогеналкила. В некоторых случаях, например, в реакции кватернизации пиридина метиловым эфиром бромуксусной кислоты (ч., ЗАО «Вектон») постоянный нагрев не требовался, так как реакция имела экзотермический характер. Об окончании реакции судили по прекращению тепловыделения в реакционной колбе. Продукты реакции представляли собой кристаллические соли и отделялись от маточного раствора кристаллизацией: вымораживанием при температуре -30°C с последующей фильтрацией. Полученные соли пиридина имели следующие температуры плавления: бромид N-этилпиридиния — $T_{\text{пл}} = 120^\circ\text{C}$, бромид N-бутилпиридиния — $T_{\text{пл}} = 104^\circ\text{C}$, хлорид N-этанолпиридиния — $T_{\text{пл}} = 128\text{--}130^\circ\text{C}$.



* ГОСТ 3900–2022. Нефть и нефтепродукты. Методы определения плотности.



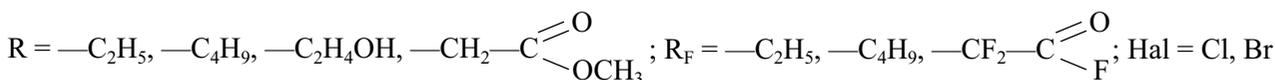
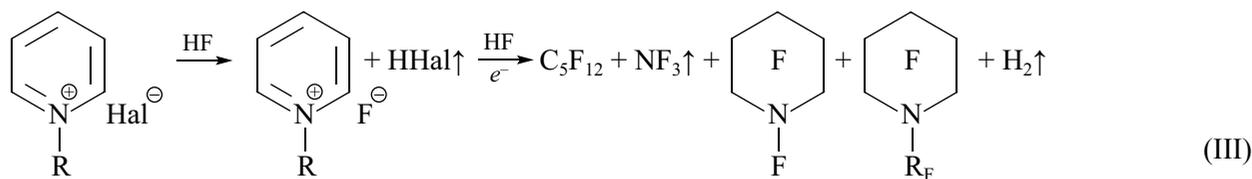
Структуру исходных соединений для электрохимического синтеза определяли по ИК-спектрам на инфракрасном спектрометре Shimadzu IRPrestige-21 (Shimadzu) с Фурье-преобразованием, разрешение — 3 см⁻¹, спектральный диапазон — 7800–350 см⁻¹, светодетектор — пластина KBr с германиевым покрытием.

Электрохимическое фторирование четвертичных N-алкилпиридиниевых и третичных N-алкилморфолиниевых солей проводили в электролитической ячейке [АО «РНЦ «Прикладная химия (ГИПХ)»] типа Саймонса из углеродистой стали с объемами 0.66 и 0.75 л с пакетом никелевых электродов, эффективная площадь анодов и катодов которого составляет 502 см². Ячейка снабжена рубашкой и стальным об-

ратным холодильником, охлаждаемым до температуры не выше –35°C.

Синтез перфторированных третичных аминов проводили по общей методике, разработанной в АО «РНЦ «Прикладная химия (ГИПХ)» [5]. Основные параметры электрохимического процесса приведены в табл. 1. Концентрацию фторируемого вещества в электролите в процессе электрохимического фторирования поддерживали путем периодической подачи растворенного в безводном HF органического вещества. Жидкие продукты фторирования скапливались на дне электролизера, газообразные продукты фторирования улавливались в ловушки с метанолом.

В настоящей работе провели серию электрохимических синтезов ряда перфторпродуктов, исходным соединением для которых выбраны соответствующие производные N-замещенного пиридиния (III). На первой стадии под действием безводного HF происходит замещение атома галогена на фтор, на второй стадии — электрохимическое фторирование с образованием ряда перфторпродуктов (перфторпентан, перфторпиперидин, соответствующий перфторамин) и электролизных газов (H₂, NF₃).



Электрохимическое фторирование бромидов N-этилпиридиния (IV) и N-бутилпиридиния (V) позволяет получить перфтор-N-этилпиперидин и перфтор-N-бутилпиперидин. Выход по току для данных синтезов составил 54 и 42%. Продолжительность

синтеза составила 199 и 89 ч (окончание процесса определено по росту напряжения, свидетельствующему о полимеризации полупродуктов синтеза в электродном пакете), удельный расход электричества 4474 и 1832 А·ч·л⁻¹ для получения перфтор-N-этилпипери-

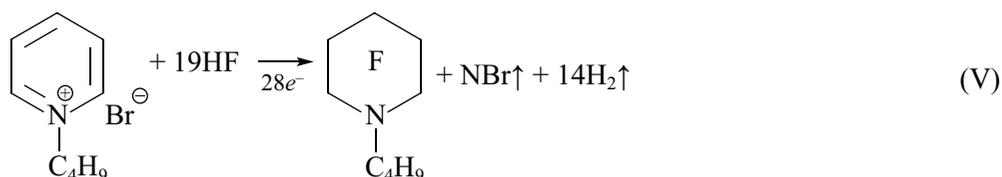
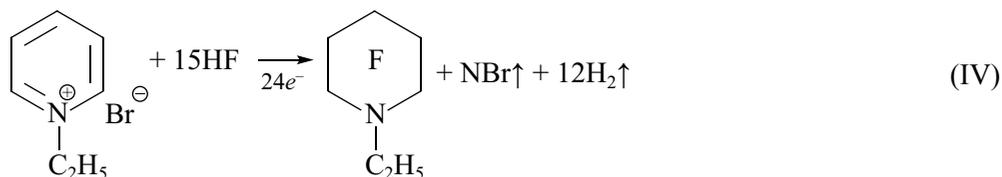
Таблица 1

Параметры процесса электрохимического фторирования N-замещенных солей пиридина и морфолина

Параметр	Значение
Объем электролизера	0.66–0.75 л
Площадь поверхности анодов S _{ан}	502 см ²
Постоянный ток	15 А
Плотность тока	0.03 А·см ⁻²
Начальная концентрация углеводородного реагента	15%
Напряжение	от 4.6 до 6.9 В
Температура обратного холодильника	от –35 до –37°C
Температура в электролизере	от 15 до 23°C

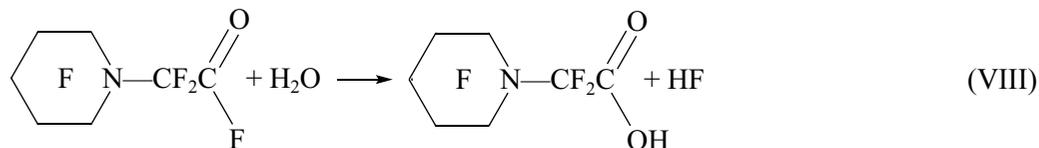
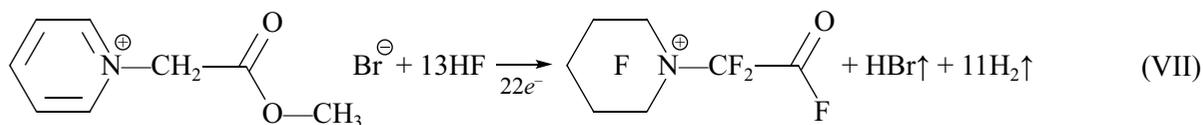
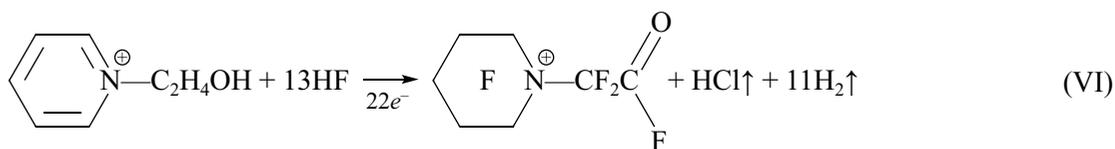
дина и перфтор-*N*-бутилпиперидина соответственно. Перфтор-*N*-этилпиперидин представляет собой прозрачную жидкость с плотностью $1.72 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ с интервалом температур кипения $85\text{--}87^\circ\text{C}$, перфтор-*N*-бутилпиперидин — прозрачная жидкость с плотностью

$1.83 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, интервал температур кипения $129\text{--}131^\circ\text{C}$. Испытания образцов перфтор-*N*-этилпиперидина и перфтор-*N*-бутилпиперидина на морозостойкость показали, что замерзания жидкостей не происходит даже при температуре -75°C .



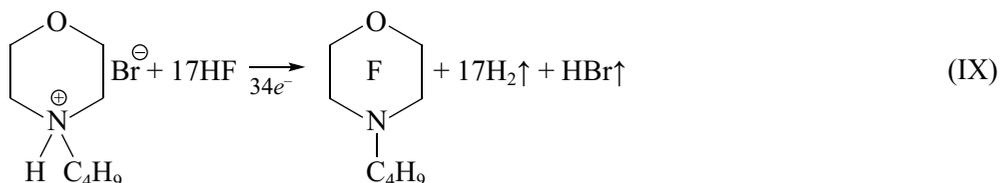
Электрохимическое фторирование хлорида *N*-этанолпиридиния (VI) и бромид метилового эфира *N*-пиридинуксусной кислоты позволяет получить фторангидрид перфтор-*N*-пиперидинуксусной кислоты (VII) — прозрачную жидкость с резким запахом, которая легко гидролизуется на воздухе до перфтор-*N*-пиперидинуксусной кислоты. Для удобства хранения и идентификации методом ЯМР ^{19}F данный фторангидрид был переведен в метиловый эфир перфтор-*N*-пиперидинуксусной кислоты посредством метанолиза. Часть сырья была переведена в перфтор-*N*-пиперидинуксусную кислоту посредством гидролиза (VIII).

Выход по току составил 34 и 19%, продолжительность синтеза — 172 и 93 ч, удельный расход электричества — 3136 и $1700 \text{ А} \cdot \text{ч} \cdot \text{л}^{-1}$ для электрохимического фторирования хлорида *N*-этанолпиридиния и бромид метилового эфира *N*-пиридинуксусной кислоты соответственно. Об окончании синтеза судили по росту напряжения выше 7.0 В . Установлено, что фторангидрид перфтор-*N*-пиперидинуксусной кислоты образуется с более высоким выходом по току (34%) при использовании в качестве исходного соединения для электрохимического фторирования хлорида *N*-этанолпиридиния.



Результатом электрохимического фторирования бромид *N*-бутилморфолина является перфтор-*N*-бутилморфолин (IX). Выход по току для данного электросинтеза составил 29%, продолжительность синтеза — 94.5 ч , удельный расход электриче-

ства — $1813 \text{ А} \cdot \text{ч} \cdot \text{л}^{-1}$. Перфтор-*N*-бутилморфолин представляет собой прозрачную жидкость с плотностью $1.77 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ с интервалом температур кипения $117\text{--}119^\circ\text{C}$.



Для удобства полной идентификации сырец после электрохимического фторирования бромидов N-этил-, N-бутилпиридиния и N-бутилморфолина был отмыт 2–5%-ным водным раствором Na_2CO_3 (х.ч., АО «Ленреактив») или дистиллированной H_2O . В случае электрохимического фторирования бромида метилового эфира N-пиридилуксусной кислоты и хлорида N-этанолпиридиния сырец был подвергнут метанолизу. Отмытые продукты после сушки над силикагелем марки КСМГ (тех., АО «ЛенРеактив») фракционировали с помощью ректификации.

Количественный состав сырцов и чистоту продуктов определяли на газовом хроматографе Кристалл 2000М (ЗАО «СКБ Хроматэк») с детектором

по теплопроводности на насадочной колонке [20% α, α, α -трис(бетацетианэтил)ацетофенон (ч.д.а., ЗАО «Вектон»)] на силохроме-80 (ООО «АО Реахим») длиной 2 м, в качестве газа-носителя использовали гелий (99.995%, ООО «ЦЕНТРГАЗ»).

Структуру продуктов определяли по спектрам ЯМР ^{19}F , записанным на спектрометре Bruker Spectrospin AM-500 (Bruker) с частотой 470.6 МГц. Спектры образцов перфтор-N-этилпиперидина и перфтор-N-бутилпиперидина записаны в растворах дейтерохлороформа (99.96%, Sigma-Aldrich, кат. номер 212-742-4) с добавлением гексафторбензола (99.9%, Sigma-Aldrich, кат. номер 30-285-6) в качестве внутреннего стандарта. Спектры образцов

Таблица 2

Спектры ЯМР ^{19}F и ^1H полученных методом электрохимического фторирования перфторированных соединений

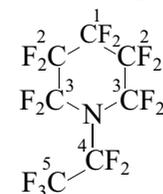
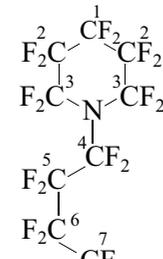
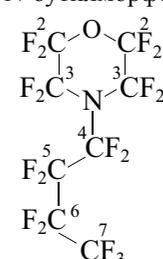
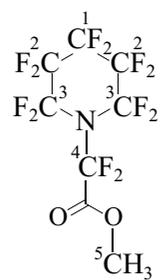
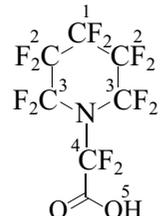
Структура соединения	№ группы	$\delta_{\text{CCl}_3\text{F}}, \delta_{\text{TMS}},$ м. д.	Интенсивность сигналов атомов фтора	Мультиплет	$J_{\text{F-F}^*},$ Гц
Перфтор-N-этилпиперидин 	1	-134.6	2	Ушир. синглет	
	2	-132.3	4	Ушир. синглет	
	3	-91.5	4	Ушир. синглет	
	4	-95.45	2	Триплет триплетов	J_{4-3} 19.6; 21.8
	5	-87.0	3	Квинтет	J_{5-3} 8.7
Перфтор-N-бутилпиперидин 	1	-134.1	2	Синглет	
	2	-131.7	4	Синглет	
	3	-90.45	4	Синглет	
	4	-88.7	2	Септет	$J_{4-6;4-3}$ 18.5
	5	-123.3	2	Синглет	
	6	-126.25	2	Триплет триплетов	$J_{6-4;6-3}$ 8; 6.5
	7	-81.1	3	Триплет	J_{7-5} 10
Перфтор-N-бутилморфолин 	2	-86.3	4	Синглет	
	3	-90.8	4	Ушир. синглет	
	4	-88.8	2	Септет	$J_{4-6;4-3}$ 17.5
	5	-122.5	2	Ушир. синглет	
	6	-125.3	2	Триплет дублетов триплетов*	$J_{6-4;6-3}$ 17.5; 8; 6.5
	7	-80.3	3	Триплет	J_{7-5} 10.35

Таблица 2 (продолжение)

Структура соединения	№ группы	$\delta_{\text{CCl}_3\text{F}}$, δ_{TMS} , м. д.	Интенсивность сигналов атомов фтора	Мультиплет	$J_{\text{F-F}}$ *, Гц
Перфтор-N-пиперидин-1-ил уксусной кислоты метиловый эфир 	1	-132.5÷-133.5	2	Ушир. синглет	J_{4-3} 17
	2	-130.5÷-131.0	4	Ушир. синглет	
	3	-90.2	4	Ушир. синглет	
	4	-82.1	2	Квинтет	
	5	4.1	3	Синглет	
Перфтор-N-пиперидин-1-ил уксусная кислота 	1	-132.7	2	Ушир. синглет	
	2	-130.55	4	Ушир. синглет	
	3	-90.45	4	Ушир. синглет	
	4	-88.7	2	Квинтет**	
	5	11.5	1	Ушир. синглет	

* Слабо разрешенный мультиплет. Приведены приблизительные константы спин-спинового взаимодействия.

** Расщепление сигнала должно быть аналогично сигналу —CF₂-группы (при атоме № 4) метилового эфира перфторпиперидин-1-ил уксусной кислоты, но расщепление подавлено — сигнал выглядит как синглет с признаками расщепления.

перфтор-N-бутилморфолина, метилового эфира перфтор-N-пиперидинуксусной кислоты и перфтор-N-пиперидинуксусной кислоты записаны в чистом виде без дейтерированного растворителя с добавлением гексафторбензола в качестве внутреннего стандарта.

Обсуждение результатов

Методом электрохимического фторирования четвертичных N-алкилпиридиниевых и третичных N-алкилморфолиниевых солей можно получать не только инертные соединения, такие как перфтор-N-этилпиперидин, перфтор-N-бутилпиперидин и перфтор-N-бутилморфолин, но и перфторированные соединения с функциональной группой — фторангидрид перфтор-N-пиперидинуксусной кислоты с выходами по току от 20 до 55%.

Структуры соединений не противоречат данным ЯМР ¹⁹F, согласно которым в ходе электрохимического фторирования алкилбромидов N-замещенного пиридиния преимущественно образуются перфтор-N-этилпиперидин, перфтор-N-бутилпиперидин, перфтор-N-бутилморфолин и фторангидрид перфтор-N-пиперидилуксусной кислоты. Химические сдвиги сигналов атомов фтора в группе —CF₂ пи-

перидинового кольца перфтор-N-этилпиперидина и перфтор-N-бутилпиперидина представлены синглетами в области от δ -90.45 до δ -134.6 м. д. на спектре ЯМР ¹⁹F. Сигнал атомов фтора в морфолиновом кольце перфтор-N-бутилморфолина соответствует синглету с химическим сдвигом δ -86.3 м. д. и неразрешенному мультиплету в области δ -90.8 м. д. (табл. 2). Химические сдвиги атомов фтора пиперидинового кольца в молекулах метилового эфира перфтор-N-пиперидинуксусной кислоты и перфтор-N-пиперидинуксусной кислоты находятся в области δ -90.2÷132.7 м. д. на спектре ЯМР ¹⁹F. Сигнал протонов метоксильной группы представлен синглетом в области δ 4.1 м. д., сигнал протона карбоксильной группы — уширенным синглетом в области δ 11.5 м. д. на ЯМР ¹H спектре, что не противоречит литературным данным.

Интересно отметить, что сигналы —CF₂ в пиперидиновом кольце метилового эфира перфтор-N-пиперидинуксусной кислоты и перфтор-N-пиперидинуксусной кислоты дублируются в соотношении, исключая возможность идентифицировать их как примеси. Вероятно, для этих соединений характерно наличие стабильных при комнатной температуре изомеров конформации кольца (кресло-ванна):

для образца метилового эфира перфтор-N-пиперидинуксусной кислоты соотношение около 65:35, для образца перфтор-N-пиперидинуксусной кислоты соотношение около 81:19.

Выводы

Использование предлагаемых в работе четвертичных аммонийных солей в качестве исходного соединения для электрохимического фторирования позволяет прогнозировать возможность длительного непрерывного технологического процесса электрохимического фторирования с получением перфторированных соединений различных классов.

Реакции кватернизации пиридина или морфолина различными алкилгалогенидами открывают возможность увеличения номенклатурного ряда востребованных промышленностью перфторированных третичных аминов, получаемых методом электрохимического фторирования в безводном HF с достаточно высокими выходами по току.

Конфликт интересов

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

Информация о вкладе авторов

Е. В. Литвиненко, Н. Б. Лесневская, А. А. Людикайнен провели электрохимическое фторирование бромида N-этилпиридиния, бромида N-бутилпиридиния, хлорида N-этанолпиридиния, бромида метилового эфира N-пиридилуксусной кислоты и бромида N-бутилморфолина; Е. В. Литвиненко и Н. Б. Лесневская провели хроматографический анализ образцов; Е. В. Литвиненко определила плотности перфтор-N-бутилморфолина, перфтор-N-бутилпиперидина и перфтор-N-этилпиперидина; А. А. Людикайнен и В. А. Печилин провели синтез бромида N-этилпиридиния, бромида N-бутилпиридиния, хлорида N-этанолпиридиния, бромида метилового эфира N-пиридилуксусной кислоты и бромида N-бутилморфолина; В. А. Маталин разработал методику синтеза перфторированных третичных аминов электрохимическим фторированием производных N-замещенного пиридина и морфолина; Н. В. Лебедев и Л. В. Осетрова провели анализ полученных перфторированных соединений методом ЯМР ^{19}F и ^{1}H спектроскопии; Н. В. Пеганова произвела подбор технологических параметров электрохимического синтеза (плотность тока, начальная кон-

центрация углеводородного реагента, температурный режим) и условий газохроматографического анализа перфторпродуктов.

Информация об авторах

Литвиненко Евгения Владимировна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6060-0642>

Лесневская Нина Болеславовна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8289-1771>

Людикайнен Александр Александрович

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2280-915X>

Маталин Виктор Александрович, к.х.н.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8814-8992>

Печилин Владимир Алексеевич

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4898-1205>

Лебедев Николай Валентинович, к.х.н.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2302-8386>

Осетрова Людмила Валентиновна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3564-357X>

Пеганова Наталья Владимировна, к.х.н.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0180-5698>

Список литературы

- [1] Андриенко О. С., Сачков В. И., Яновский В. А. Практические методы введения фтора в органические соединения. Томск: Изд-во НТЛ, 2010. С. 23.
- [2] Каурова Г. И. Электрохимическое фторирование органических соединений // Хим. пром-сть. 2017. Т. 94. № 4. С. 179–186. <https://www.elibrary.ru/zdphxv> <https://elibrary.ru/item.asp?id=29867432>
- [3] Плашкин В. С. О влиянии условий процесса на состав продуктов электрохимического фторирования гетероциклических N-изоалкиламинов // ЖПХ. 1975. Т.48. С. 706–709.
- [4] Кузьменок Н. М., Михалёнок С. Г., Орёл А. С., Безбородов В. С., Крахалёв М. Н., Сутормин В. С., Прищепина О. О., Зырянов В. Я. Синтез и исследование анизотропных солей аммония для создания жидкокристаллических материалов и устройств с варьруемым поверхностным сцеплением // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2018. Т. 18. Вып. 4. С. 35–36. <https://doi.org/10.18083/LCAppl.2018.4.27>
- [5] Литвиненко Е. В., Лесневская Н. Б., Людикайнен А. А., Маталин В. А., Михайлова Т. В. Электрохимическое фторирование малеинового ангидрида // Fluorine Notes (Фторные заметки). 2018. Т. 6. Вып. 121. С. 11–22 [Litvinenko E. V., Lesnevskaya N. B., Ludikainen A. A., Matalin V. A., Mikhailova T. V. Electrochemical fluorination of maleic anhydride // Fluorine Notes. 2018. V. 6 (121). P. 3–4. <https://doi.org/10.17677/fn20714807.2018.06.02>].