

ОБОГАЩЕНИЕ ЛИТИЯ ПО ИЗОТОПУ ${}^7\text{Li}$ ЭЛЕКТРОМЕМБРАННЫМ МЕТОДОМ*

*А.В. Габриелян¹, М.А. Казарян², А.Г. Мартоян¹,
В.И. Сачков³, Г.А. Мартоян¹*

¹ООО НПО «Экоатом»

д. 1, ул. Аданаи, Ереван, 0082, Республика Армения
тел.: +374 91 27-57-51; e-mail: martoian@yahoo.com

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
д. 53, Ленинский проспект, Москва, 119991, Россия
тел.: +7(499)135-42-64; e-mail: postmaster@lebedev.ru

³Сибирский физико-технический институт при Томском государственном университете

д. 1, пл. Новособорная, Томск, 634050, Россия
тел.: +7 (3822) 53-35-77; e-mail: itc@spti.tsu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.22-24.107-118

Заключение совета рецензентов: 18.04.18 Заключение совета экспертов: 15.05.18 Принято к публикации: 01.06.18

Потребность в изотопах в ядерной энергетике, медицине и в области контроля инженерных и строительных сооружений возрастает ежегодно, а существующие методы разделения изотопов не позволяют обеспечить спрос по значительному списку изотопов, а также чистоту изотопов лития. В настоящее время процесс амальгамирования является основной технологией обогащения ${}^7\text{Li}$. Другие методы имеют очень низкую эффективность разделения и непригодны для массового производства.

Эта работа посвящена новому методу обогащения изотопа ${}^7\text{Li}$, параллельно приведен модифицированный авторами данной статьи метод разделения изотопов лития амальгамированием. Исследование относится к физической химии, в частности, к электромиграционным процессам и методам разделения изотопов лития. Новым перспективным подходом для разделения изотопов Li является электродиализный процесс, использующий в качестве электролита ионную жидкость. Приведены данные об актуальности и областях применения изотопов ${}^7\text{Li}$, рассмотрены существующие методы и критерии разделения изотопов лития. Кратко описаны: принцип новой технологии, режимы экспериментов по обогащению и детали анализа полученных продуктов.

Новая технология демонстрирует хорошие экологические характеристики, поддается массовому производству и обладает очень низким энергопотреблением. Однако необходимо решить проблему чувствительности ионных жидкостей к примесям, которые неизбежно появляются в электролите в процессе разделения.

Одной из важнейших характеристик методов и технологий разделения изотопов является удельное энергопотребление, поэтому сейчас остро стоит вопрос снижения энергозатрат, для чего требуется создание новых способов разделения и очистки изотопных систем, а также модернизация уже внедренных в промышленности технологий. Предложенный в статье способ обогащения изотопа ${}^7\text{Li}$ осуществляется посредством управления процессом электромиграции ионов лития через ионообменные мембраны в отсеках электролитической установки. Работа в перспективе может обеспечить повышение эффективности процесса обогащения изотопа ${}^7\text{Li}$ и снижение удельных энергетических затрат.

Ключевые слова: электромиграция ионов; изотопы лития; разделение изотопов; ионообменные мембраны.

* Габриелян А.В., Казарян М.А., Мартоян А.Г., Сачков В.И., Мартоян Г.А. Обогащение лития по изотопу ${}^7\text{Li}$ электромембранным методом // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;22-24:107-118.



LITHIUM ENRICHING BY ISOTOPE ${}^7\text{Li}$ WITH ELECTROMEMBRANE METHOD

A. V. Gabrielyan¹, M. A. Kazaryan², A. G. Martoyan¹, V. I. Sachkov³, G. A. Martoyan¹

¹Sci.-Ind. ECOATOM LLC

1 Adanai St., Yerevan, 0082, Republic of Armenia

tel.: +374 91 275751, e-mail: martoian@yahoo.com

²Physical Institute. P.N. Lebedev of the Russian Academy of Sciences

53 Leninsky Av., Moscow, 119991, Russia

tel.: +7 (499) 135 42 64, e-mail: postmaster@lebedev.ru

³Siberian Physical-Technical Institute of Tomsk State University

1 Novosobornaya Sq., Tomsk, 634050, Russia

tel.: +7 (3822) 53 35 77, e-mail: itc@spti.tsu.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.22-24.107-118

Referred 18 April 2018 Received in revised form 15 May 2018 Accepted 1 June 2018

The need for using isotopes in the nuclear power engineering, medicine, as well as in the sphere of control of engineering and construction facilities is increasing annually. However, the isotope separation methods do not allow to meet the need for production of a significant list of isotopes, including the purity of lithium isotopes. The process of amalgamation to date is the main technology of enrichment of ${}^7\text{Li}$ in practical use. Other methods have very low separation efficiency and are not suitable for mass production.

The present work is devoted to a new method for enriching the isotope ${}^7\text{Li}$, in parallel, the work presents the method of separating lithium isotopes by amalgamation modified by authors. The study relates to physical chemistry, in particular to electromigration processes and methods for separating lithium isotopes. A new promising approach for separating Li isotopes is the electrodialysis process using an ionic liquid as an electrolyte. Data on the relevance and uses of ${}^7\text{Li}$ isotopes are given, the existing methods and criteria for the separation of lithium isotopes are considered. The article briefly describes the principle of the new technology, the regimes of enrichment experiments and the details of analysis of products obtained.

Moreover, the new technology demonstrates the good environmental characteristics, it is amenable to mass production and has very low power consumption. However, it should be also emphasized that ionic liquids are very sensitive to impurities which inevitably appear in the electrolyte during separation process. One of the most important characteristics of isotope separation methods and technologies is the specific energy consumption, so currently the problem of reducing energy consumption is acute, for which it is necessary to create new methods for separation and purification of isotope systems and modernization of technologies already introduced in industry.

The proposed method for enriching the ${}^7\text{Li}$ isotope is carried out by controlling the process of electromigration of lithium ions through ion-exchange membranes in the electrolytic cell compartments. The work in the long-term future can ensure an increase in the efficiency of enrichment process for the ${}^7\text{Li}$ isotope and a decrease in specific energy costs.

Keywords: electromigration; ion; lithium isotopes; isotope separation; ion-exchange membranes.



Армине Ванушовна Габриелян
Armine Gabrielyan

Сведения об авторе: аспирант ООО НПО «Экоатом», Армения.

Образование: Ереванский государственный университет, прикладная химия (2005 г.).

Область научных интересов: прикладная электрохимия; мембранное разделение изотопов.

Публикации: 7.

Information about the author: Ph.D. Student, Ecoatom LLC, Armenia

Education: Yerevan State University, Applied Chemistry, 2005.

Research interests: applied electrochemistry; membrane separation of isotopes.

Publications: 7.



Мишик Айразатович
Казарян
Mishik Kazaryan

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН.

Образование: Московский физико-технический институт (1970 г.).

Область научных интересов: физика лазеров и их применение; физическая оптика.

Публикации: 600.
h-index 9, Scopus 9, РИНЦ 10, WoS 9

Information about the author: D.Sc. in Physics and Mathematics, Leading Researcher, P.N. Lebedev Physical Institute of RAS.

Education: Moscow Institute of Physics and Technology, 1970.

Research interests: physics of lasers and applications; physical optics.

Publications: 600.



Айкануш Гагиковна
Мартоян
Aikanyush Martoyan

Сведения об авторе: магистрант, НПО «Экоатом», Армения.

Образование: Ереванский государственный университет, физический факультет (2017 г.).

Область научных интересов: прикладная электрохимия; мембранное разделение изотопов.

Публикации: 2.

Information about the author: M.Sc. Student, Ecoatom LLC, Armenia.

Education: Yerevan State University, Faculty of Physics, 2017.

Research interests: applied electrochemistry; membrane separation of isotopes.

Publications: 2.



Виктор Иванович Сачков
Victor Sachkov

Сведения об авторе: д-р хим. наук, заведующий лабораторией Сибирского физико-технического института при Томском государственном университете.

Образование: Томский политехнический университет (2001 г.).

Область научных интересов: химия редких и радиоактивных материалов; химический катализ; химическая термодинамика; нанотехнологии; химический синтез; разделение изотопов.

Публикации: 75.
ORCID 0000-0001-7866-274X

Information about the author: D.Sc. in Chemistry, Head of the Laboratory, Siberian Physical-Technical Institute of Tomsk State University.

Education: Tomsk Polytechnic University, 2001.

Research interests: chemistry of rare and radioactive materials; chemical catalysis; chemical thermodynamics; nanotechnology; chemical synthesis; isotope separation.

Публикации: 75.



Гагик Авоотович
Мартоян
Gagik Martoyan

Сведения об авторе: канд. хим. наук, НПО «Экоатом», Армения.

Образование: Ереванский государственный университет, физический факультет (1975 г.).

Область научных интересов: переработка жидких радиоактивных отходов; возобновляемая энергетика; экология.

Публикации: 157.

Information about the author: Ph.D. in Chemistry, Ecoatom LLC, Armenia.

Education: Yerevan State University, Physical Faculty, 1975.

Research interests: processing of liquid radioactive waste; renewable energy; ecology.

Publications: 157.

1. Введение

Литий довольно редкий элемент, и его добыча, переработка и очистка являются дорогостоящими процессами. Одним из основных первичных сырьевых источников считается карбонат лития (Li_2CO_3). Для промышленного получения $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ высокой чистоты (5N) из хлорида лития (LiCl) наиболее приемлемым является электродиализный метод.

В последние годы литий широко применяется не только в атомной энергетике для регулирования водно-химического режима, но и в литий-ионных аккумуляторах. Однако следует отметить, что почти все значимые применения лития связаны с его изотопами, причем требуется высокий уровень обогащения его изотопов вплоть до моноизотопной чистоты по одному из его стабильных изотопов. Природный литий состоит из двух стабильных изотопов ${}^6\text{Li}$ (7,52 %) и ${}^7\text{Li}$ (92,48 %).

Изотопы ${}^6\text{Li}$ используются:

- Для наработки и пополнения топливного трития ${}^3\text{H}$ в энергетических реакторах УТС (управляемого термоядерного синтеза).

- В промышленном производстве изотопов трития ${}^3\text{H}$ в ядерных реакторах. При облучении природной смеси изотопов лития нейтронами, ядра ${}^6\text{Li}$, захватывая тепловые нейтроны, распадаются на гелий и тритий (${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + 4,78 \text{ МэВ}$).

Изотопы ${}^7\text{Li}$ используются:

- В разработках широкого диапазона электрических перезаряжаемых аккумуляторных батарей, в том числе для портативных устройств, транспортируемых источников питания электромобилей, а также стационарных систем хранения электричества.

- В ядерной энергетике: добавление ${}^7\text{LiOH}_x\text{H}_2\text{O}$ позволяет корректировать водно-химический баланс теплоносителя (рН-фактор) в 1-м контуре ядерных реакторов – кипящих с водой под давлением.

- В оборудовании водоподготовки (в составе ионообменных мембран) теплоносителя 1-го контура реакторов PWR типа.

- В медицине: лекарственные фармпрепараты на основе карбоната лития (Li_2CO_3), обогащенные по

изотопу ${}^7\text{Li}$ (реже – по ${}^6\text{Li}$), используются как антидепрессанты/транквилизаторы.

Проблеме эффективного разделения изотопов лития посвящено много работ. Традиционный промышленный метод разделения изотопов лития основан на реакции обмена изотопов между растворами соединений лития и амальгамой лития [1–9]. При таком методе коэффициенты разделения обычно меняются в интервале (1,02 ÷ 1,06). Несмотря на высокие значения коэффициента, метод отличается серьезными недостатками: высокая токсичность ртути и большие энергетические затраты. Особый интерес для решения этой проблемы представляют электромембранные методы. Разработка электромембранных методов авторами данной статьи имела целью сначала свести к минимуму количество ртути, которое требуется в амальгамных методах, а затем фактически полностью отказаться от использования ртути в процессе разделения изотопов лития.

В задачи исследования входил анализ наиболее известных традиционных, а также относительно новых электромембранных методов по разделению изотопов лития. Представлен новый метод разделения изотопов лития.



Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
<i>n</i>	Концентрация изотопов до разделения
<i>n</i>	Концентрация изотопов после разделения
<i>r</i>	Коэффициент разделения
<i>Аббревиатуры</i>	
ЖРО	Жидкие радиоактивные отходы
МВИТ	Металло-воздушный источник тока
УТС	Управляемый термоядерный синтез

2. Теоретический анализ. Получение металлического лития

Для получения металлического лития применяют несколько способов. Природные минералы: 1) разлагают серной кислотой (серно-кислотный); 2) спекают с CaO или CaCO₃ (щелочной); 3) обрабатывают K₂SO₄ (солевой), а затем выщелачивают водой. В любом случае из полученного раствора выделяют плохо растворимый карбонат лития Li₂CO₃, который затем, для выделения металлического лития электролизным способом, переводят в хлорид LiCl. Электролиз расплава хлорида лития проводят в смеси с KCl или BaCl₂ (эти соли служат для понижения температуры плавления смеси). В дальнейшем полученный литий очищают методом вакуумной дистилляции [16].

2.1. Нетрадиционный электролитический способ получения металлического лития из водного раствора хлорида лития

Электролиз расплава хлорида лития с целью получения металлического лития является энергоемким процессом. Создать экологически чистое, безопасное

производство металлического лития с низкой энергоемкостью – актуальная проблема. Перспективным решением этой задачи на взгляд авторов данной статьи может служить электролитический способ получения металлов из водных растворов [13].

Преимущества предлагаемой технологии по сравнению с традиционной:

- Отсутствие необходимости обезвоживания хлорида лития, который используется в качестве сырья в традиционных технологиях электролиза.

- Отсутствие высокотемпературного процесса электролиза расплава хлорида лития.

- Непосредственное получение из водного раствора хлорида лития в результате электромембранного технологического процесса в виде порошкового металлического лития, являющегося конечным продуктом.

- Низкое энергопотребление.
- Высокая степень безопасности технологических процессов.

- Высокая экологичность процесса.

- Технология поддается автоматизации, что снижает субъективный фактор риска, связанный с обслуживающим персоналом.

• Производство осуществляется с использованием компактных модулей, что обеспечивает легкость и гибкость эксплуатации.

2.2. Основные методы разделения изотопов

К традиционно применяемым методам разделения изотопов относятся [15, 17, 21–25]:

- электромагнитное разделение;
- газовая диффузия;
- жидкостная термодиффузия;
- газовое центрифугирование;
- аэродинамическая сепарация;
- AVLIS (испарение с использованием лазера);
- химическое обогащение;
- дистилляция;
- амальгамирование;
- электролиз.

В табл. 1. приведены показатели эффективности перечисленных методов по обогащению изотопов лития.

Таблица 1

Коэффициенты разделения изотопов лития различными методами

Table 1

The coefficients of lithium isotopes separation by different methods

Метод разделения	${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$
Химический изотопный обмен	1,02 ÷ 1,06
Дистилляция	1,052 ÷ 1,064
Газовая диффузия	1,01 ÷ 1,1
Центрифугирование (250 м/с)	1,01
Центрифугирование (600 м/с)	1,1
Термодиффузия	1,0049±0,0002
Масс-диффузия (диффузия в потоке пара)	–
Электролиз	1,055±0,005
AVLIS	108
Амальгамирование	1,049 ÷ 1,064

2.3. Наиболее часто используемые технологии в производстве изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$

В основе широко распространенного метода промышленного разделения изотопов лития лежит реакция обмена изотопами между растворами соединений лития и ртутно-литиевой амальгамы. Метод имеет целый ряд недостатков, из которых основными являются следующие:

- токсичность и большие объемы ртути, участвующей в технологическом процессе;
- тенденция амальгамы к разложению в водных растворах;
- образование опасных ртутьсодержащих отходов;
- высокое потребление электроэнергии.

Технологиями крупномасштабного производства изотопов лития амальгамным методом располагают несколько стран. В России ${}^7\text{Li}$ (в составе гидроксида моногидрата ${}^7\text{Li}$) производит предприятие ОАО «НЗХК» корпорации ТВЭЛ с изотопной чистотой

≈ 99,95 %. Гидроксид моногидрат ${}^7\text{Li}$ получают электролизом водных растворов хлорида лития на ртутном растворе (амальгаме). Затем раствор гидроксида лития-7 моногидрата подвергают: очистке, кристаллизации, центрифугированию, сушке, рассеву и магнитной сепарации. Конечный продукт – кристаллы белого цвета. В 2011 г. НЗХК достиг объемов продаж, составивших более 70 % мирового потребления ${}^7\text{Li}$ (по изотопному составу).

Китай также располагает необходимым и достаточным количеством аналогичного оборудования, но его мощности точно неизвестны, поскольку производство изотопов лития связано с государственной ядерной программой страны.

В США долгое время использовался процесс COLEX (колонный обмен), при котором изотопы лития частично разделяются, переходя между водным раствором гидроксида лития и литиево-ртутной амальгамой (изотоп ${}^6\text{Li}$ имеет большее сродство к ртути, чем изотоп ${}^7\text{Li}$).

В данном случае сначала приготавливаются литиевая и ртутная амальгамы на основе природного лития. Затем амальгама перемешивается с раствором природной гидроксида лития. Более редкие изотопы ${}^6\text{Li}$ концентрируются в амальгаме, а изотопы ${}^7\text{Li}$ мигрируют к раствору гидроксида. Встречные потоки амальгамы и гидроксида проходят через каскад стадий, пока не будет достигнут необходимый уровень обогащения по ${}^6\text{Li}$. ${}^6\text{Li}$ может быть выделен из амальгамы, а хвостовая фракция ${}^7\text{Li}$ – отделена из водного раствора гидроксида лития электролизом. Ртуть извлекается и смешивается с новой порцией гидроксида лития для повторного использования.

Ввиду образования огромных количеств высокотоксичной металлической ртути при методе получения ${}^7\text{Li}$, производство, которое осуществлялось в Ок-Риджской национальной лаборатории, было закрыто. В настоящее время в США изотопы ${}^7\text{Li}$ и ${}^6\text{Li}$ не производятся, и существует угроза нехватки материала, необходимого для работы ядерных реакторов. Запасы изотопов лития, накопленные ранее, в настоящее время почти исчерпаны. Большая часть ${}^7\text{Li}$ для PWR импортируется из России и Китая. По оценке экспертов, для восстановления собственного производства, США потребуются минимум пять лет и десятки миллионов долларов.

Для разделения изотопов лития часто используют процессы ионного обмена, ректификации, электролиза и электромиграции. Однако эти методы не отличаются высокой эффективностью разделения, поэтому поиск и разработка новых, экологически менее опасных методов представляет большой практический интерес.

2.4. Оценка перспективности процесса разделения изотопов

Главными критериями для оценки перспективности процесса разделения изотопов являются следующие:



1. Коэффициент разделения (обогащения) – это отношение относительной концентрации выделяемого изотопа в конечном продукте (после обогащения) к его относительной концентрации в исходной (сырьевой) смеси изотопов:

$$r = \frac{n'_1 / n'_2}{n_1 / n_2}$$

где n_1 и n_2 – концентрации изотопов 1 и 2 с массами m_1 и m_2 до разделения, а n'_1 и n'_2 – соответствующие концентрации после разделения.

2. Производительность – скорость получения требуемого продукта.

3. Безопасность – уровень вредного воздействия на окружающую среду и здоровье человека.

4. Загрузка – исходное количество вещества, содержащегося в разделительной установке.

5. Эффективность – коэффициент полезного использования исходного количества сырья.

6. Пусковой период – время от момента запуска разделительной установки до достижения стационарных условий работы.

7. Себестоимость – финансовые затраты на получение массовой единицы продукта.

Как уже отмечалось, в настоящее время для производства изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ наиболее часто применяется метод, основанный на изотопном эффекте, который возникает при химическом обмене литием между литиевой амальгамой и водным раствором его соединений (амальгамный метод).

В связи с этим интересной представляется возможность повышения эффективности изотопного обмена [8] с сопутствующим (одновременным) замедлением скорости реакции разложения амальгамы, вызывающим необходимость её периодической регенерации. Это может быть реализовано, например, приложением разности электрических потенциалов между циркулирующими в противотоке контактирующими жидкими фазами амальгамы лития и гидроксида лития при условии поддержания высоких значений отношения скоростей межфазного химического обмена литием и разложения амальгамы. Отметим, что такой подход позволяет объединить процессы ионного и химического обмена, электролиза и электромиграции, усиливая их совместное действие.

3. Экспериментальная часть

3.1. Краткое описание процесса модифицированного амальгамного метода производства изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$

Гидроксид лития $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ в составе водного раствора предварительно подвергался тщательной электромембранной очистке от примесей (Na, Al, Mg и др.). Известно, что ионы лития в растворе характеризуются наивысшим электродным потенциалом: $-3,045$ В (из-за их малого размера и высокой степени

гидратации). Для сравнения электродные потенциалы ионов Mg и Na равны $(-2,37$ В) и $(-2,71$ В) соответственно. Это свойство ионов лития позволяет удалять из рабочего отсека электролизера практически все известные примесные катионы и анионы и получать литийсодержащий раствор очень высокой чистоты – до $4 \div 5(N)$. Затем очищенный раствор $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ направляется в блок получения амальгамы.

В блоке получения амальгамы очищенный раствор $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ подается в рабочий отсек 2 электролитической ячейки, показанной на рис. 1. Это известный эффективный электролитический способ получения амальгамы [10], ранее предложенный для извлечения металлов, присутствующих в составе амальгамы, из жидких радиоактивных отходов (ЖРО). Полученная амальгама направляется в блок разделения изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$.

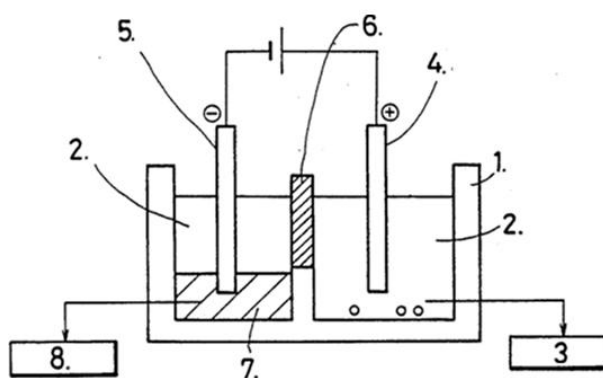


Рис. 1 – Электролитический способ получения амальгамы: 1 – электролитическая ячейка; 2 – раствор LiOH ; 3 – осадок; 4 – анод; 5 – катод; 6 – диафрагма; 7 – ртуть; 8 – амальгама

Fig. 1 – Electrolytic method of amalgam obtaining: 1 – electrolytic cell, 2 – LiOH solution, 3 – precipitate, 4 – anode, 5 – cathode, 6 – diaphragm, 7 – mercury, 8 – amalgam

Другой амальгамный метод был предложен в работах [11, 15]. Эксперименты проводились в блоке разделения, в качестве которого служила показанная на рис. 2 электролитическая ячейка, со следующими рабочими параметрами: $I = 150$ мА; $U = 10$ В; $S = 100$ см²; $V_{\text{ртути}} = 50$ см³; $V_{\text{раствора}} = 300$ см³ с содержанием лития 15 гр. Литийсодержащий раствор прокачивался в замкнутом контуре.

Под действием приложенного к электродам электрического напряжения, катионы изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ осуществляют электромиграцию в растворе с разными скоростями.

Пространственное разделение изотопов в объеме ячейки происходит следующим образом. Более подвижные и легкие ионы ${}^6\text{Li}^+$ быстрее мигрируют через мембраны и связываются в ртутной амальгаме, в то время как основная часть ионов ${}^7\text{Li}^+$ «отстает». Некоторая часть катионов изотопа ${}^7\text{Li}$, успевших мигрировать через мембрану, поднимается на верхнюю поверхность ртутного катода под действием вихревых токов, образующихся на боковой поверхности ртутной амальгамы.

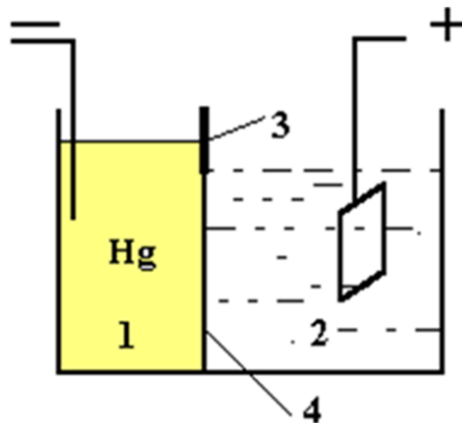


Рис. 2 – Схема электролитической ячейки разделения изотопов лития: 1 – ртуть; 2 – раствор LiOH; 3 – изолятор; 4 – катионообменная мембрана

Fig. 2 – Scheme of lithium isotope separation's electrolytic cell: 1 – mercury; 2 – LiOH solution; 3 – insulator; 4 – cation-exchange membrane

В этом случае процесс обогащения по изотопам лития контролируется (одновременно и взаимосвязано) тремя различными факторами: электромиграцией через ионообменную мембрану – вероятность прохождения изотопов ^6Li велика; связыванием изотопов в амальгаме – вероятность связывания изотопов ^6Li в ртутном катоде велика; вихревыми токами – с боковой поверхности ртутного катода на верхнюю

поверхность с наибольшей вероятностью выделяют-ся изотопы ^7Li .

Полагаем, что обогащение по изотопам ^6Li происходит в объеме ртутного катода, а ионы ^7Li накапливаются преимущественно на верхней поверхности ртутного катода и в рабочей камере.

После трехчасовой работы отбирались пробы из анодного (рабочего) отсека, из раствора над ртутным катодом и из раствора после разложения амальгамы.

3.2. Методика измерений отношения $^7\text{Li}/^6\text{Li}$

Анализы соотношения изотопов проводились на масс-спектрометре ИСП-МС ELAN 9000, который дает возможность определять редкие и рассеянные элементы и их изотопы в широком диапазоне с точностью до нанограмма/л.

В эксперименте использовались стандартные растворы ^6Li , ^7Li фирмы Perkin Elmer. В качестве матричного служил 2 % раствор бидистиллированной азотной кислоты в деионизированной воде, очищенной в установке Easyurge II (18,2 МОм·см). Для плазмообразования и распыления применялся аргон чистотой 99,998 %. Образцы вводились в систему перистальтическим насосом в распылитель поперечным потоком, где происходило их превращение в аэрозоль.

Масс-спектрометрические параметры приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры на масс-спектрометре ИСП-МС ELAN-9000

Table 2

Parameters of the mass spectrometer ICP-MS ELAN-9000

Параметр	Значение
Мощность разряда	1 400 Ватт
Расход плазмообразующего газа	15 л/мин
Расход распыляющего газа	0,86 л/мин
Режим сканирования	Определение по пикам
Репликации (число параллельных замеров)	6
Время интегрирования	5 000 мкс
Скорость подачи раствора	1,3 ÷ 1,4 мл/мин
Входные конусы	Никелевые

Анализы выполнялись в следующей последовательности: бланк – стандарт – образец соответственно. Для уменьшения эффекта «памяти» капилляры промывались 3 % раствором азотной кислоты в течение примерно 5 ÷ 7 минут. Результаты измерений отношения $^7\text{Li}/^6\text{Li}$ сравнивались с их отношениями в стандартных растворах и в исходном растворе гидроксида лития соответственно.

4. Предварительные результаты

Коэффициент разделения по изотопу ^7Li в вышеописанном режиме работы электролитической ячейки составляет $r = 1,178$, что подтверждает перспек-

тивность описанного подхода к обогащению изотопов лития.

Итак, предлагаемый электромембранный метод разделения изотопов:

- является модифицированным вариантом амальгамного метода обогащения по изотопам лития с широкими новыми возможностями регулирования параметров;

- позволяет ожидать получения обогащенных по изотопам лития или моноизотопных соединений в растворе (гидроксид);

- отличается высокой эффективностью и рентабельностью ввиду малого энергопотребления на разделение изотопов;

- обладает перспективой масштабирования до производства в промышленных объемах;
- более технологичен, экологически более привлекателен, чем другие методы разделения изотопов лития.

5. Новые подходы производства изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$

5.1. Электродиализный метод в сочетании с ионной жидкостью

Как отмечалось, процесс амальгирования, использующий ртуть, является сегодня единственной производственной технологией обогащения ${}^6\text{Li}$. Однако, по причине токсичности процесса обогащения, этот метод не нашел применения в ряде развитых стран. Ученные из Японии предложили новый и оригинальный процесс, использующий ионную жидкость в сочетании с электродиализом, таким образом, создав инновационную технологию разделения изотопов Li [9–12, 14, 18].

Новый подход экологически безопасен, поддается массовому производству и обладает очень низким энергопотреблением (рис. 3).

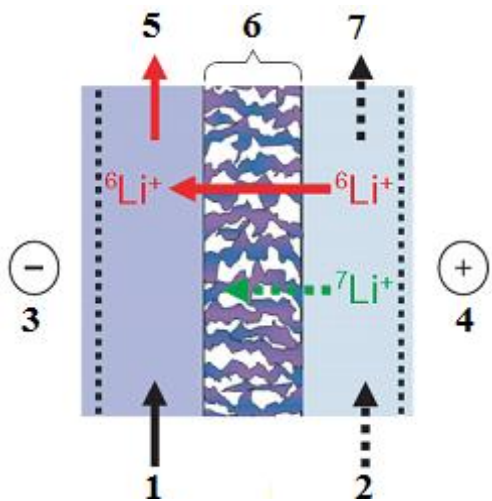


Рис. 3 – Схема нового метода разделения изотопов лития с использованием ионной жидкости:

- 1 – раствор без Li ; 2 – естественный раствор Li ; 3 – катод; 4 – анод; 5 – обогащенный ${}^6\text{Li}$; 6 – обедненный ${}^6\text{Li}$; 7 – ионная жидкость

Fig. 3 – Scheme of a new method for lithium isotopes separation by using an ionic liquid: 1 – solution without Li , 2 – natural solution Li , 3 – cathode, 4 – anode, 5 – enriched ${}^6\text{Li}$, 6 – depleted ${}^6\text{Li}$, 7 – Ionic liquid

Ионы лития движутся посредством электродиализа между катодом и анодом в литиевых растворах. Поскольку ионная подвижность ${}^6\text{Li}$ ионов выше, чем у ионов ${}^7\text{Li}$, ионы ${}^6\text{Li}$ обогащаются на катодной стороне ячейки.

В качестве ионной жидкости выступала PP13-TFSI ($\text{C}_{11}\text{H}_{20}\text{OF}_6\text{N}_2\text{O}_4\text{S}_2$).

${}^6\text{Li}$ имеет более высокую подвижность, чем ${}^7\text{Li}$ и обогащается на катодной стороне. Коэффициент разделения изотопов ${}^6\text{Li}$ в этом методе ($1,05 \div 1,15$) та-

кой же или лучше, чем у процесса амальгирования с использованием ртути (1,06). Однако задача обеспечения стабильности режимов разделения изотопов лития из-за чувствительности ионных жидкостей к примесям, которые неизбежно появляются в электролите в процессе разделения, пока не решена.

В настоящее время с помощью этого метода разрабатывается технология извлечения лития из морской воды и отработанных батарей [19–30], которая находится в центре повышенного внимания индустрии электрических транспортных средств, сильно зависящей от литий-ионных батарей.

5.2. Новая электромембранная технология получения изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$

Очищенный раствор $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$ направляется в блок разделения и обогащения изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$. При необходимости раствор может быть преобразован (в электролизере-концентраторе) в конечный продукт – порошок гидроксида моногидрата лития $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$.

В блоке разделения литийсодержащий раствор прокачивался в замкнутой петле. Под действием приложенного к электродам электрического напряжения, катионы изотопов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ осуществляли электромиграцию в растворе с разными скоростями. Более подвижные/легкие ионы ${}^6\text{Li}^+$ концентрируются у катодного электрода, а ионы ${}^7\text{Li}^+$ – «отстают», то есть происходит пространственное разделение/сегрегация изотопов в объеме ячейки.

Для повышения степени разделения используется ряд согласованных, взаимно дополняющих приемов:

- Усиление эффекта разделения (степени обогащения) путем разбиения рабочего объема на ряд отсеков ионообменными мембранами в качестве перегородок – мембраны, во-первых, увеличивают разность концентраций (контраст разделения) между менее и более подвижными изотопами; во-вторых, не дают смешиваться раствору, уже обогащенному более подвижными изотопами, с исходным (рис. 4).

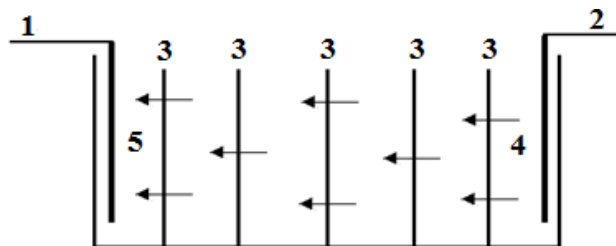


Рис. 4 – Упрощенная схема блока ячеек электромембранного разделения изотопов:

- 1 – катод; 2 – анод; 3 – катионообменная мембрана; 4 – естественный раствор Li ; 5 – обогащенный ${}^6\text{Li}$

Fig. 4 – A simplified scheme of a block of isotopes electromembrane separation:

- 1 – cathode; 2 – anode; 3 – cation-exchange membrane; 4 – a natural solution of Li ; 5 – enriched with ${}^6\text{Li}$

- Создание постоянного противотока ионов с зарядом, противоположным катионам разделяемых

изотопов. Для этого в прикатодную зону добавляют соответствующее количество кислоты с тем же анионом, что и у исходного литийсодержащего вещества.

- Последовательное повторение циклов разделения такое, что финишный раствор с предыдущего шага служит стартовым в следующем шаге. Показано, что за счет этого можно достичь фактора разделения (обогащения) на уровне десятков грамм.

- Применение разнообразных средств активного автоматизированного контроля и управления физическими характеристиками и гибкого программирования эксплуатационно-технических режимов процесса, таких как:

- реверс полярности или снятие напряжения с электродов в импульсно-периодическом режиме так, чтобы сквозь мембрану в соседний отсек быстро транспортировались преимущественно ионы более тяжелого (или легкого) изотопа;

- реверс направления прокачки рабочего раствора;

- варьирование скорости прокачки и концентрации раствора и др.

При этом важным средством повышения эффективности разделения изотопов лития является выбор мембран с оптимальными характеристиками, прежде всего: проницаемость, селективность и электрохимическая стабильность.

6. Результаты и их обсуждение

Эксперименты, моделирующие каскадирование процесса (раствор, обогащенный в первой ячейке по ${}^7\text{Li}$, использовался в качестве исходного), показали, что значения коэффициента разделения могут быть сохранены на достигнутом в первом каскаде уровне. Это позволило получить конечный раствор $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$, обогащенный по ${}^7\text{Li}$ до 99,95 %, с массовым количеством изотопов ${}^7\text{Li}$ около 9 грамм.

Оценки возможности масштабирования, сделанные на основе проведенных экспериментов, показали, что данный метод способен с одного модуля, работающего в непрерывном режиме, обеспечить наработку изотопов ${}^7\text{Li}$ с обогащением 99,95 % и выше на уровне 1 кг/сутки. Ориентировочные масс-габаритные параметры разделительного модуля и удельное энергопотребление составят 2 000 x x 2 000 x 1 500 мм и удельное энергопотребление – 50 кВт·час/кг. Суммарная рабочая площадь мембран в составе такого модуля составит ~500 м².

На рис. 5 приведена структура обратных связей и управляющих параметров технологическим процессом экспериментальной установки разделения изотопов. Новая технология сделает возможным авто-

матизацию процесса разделения по заранее заданной программе.

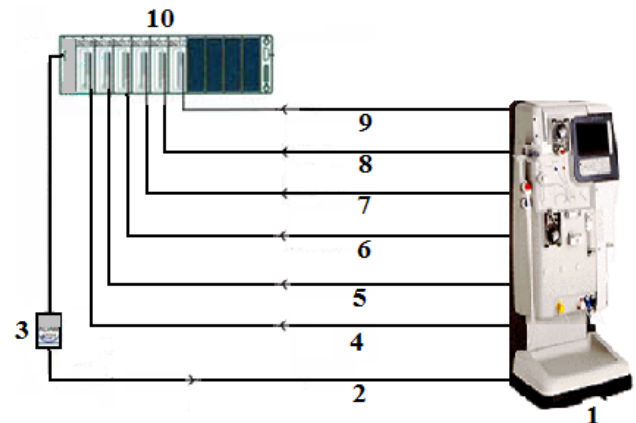


Рис. 5 – Система контроля и управления экспериментальной электромембранной установкой разделения изотопов: 1 – мембранная установка с программным обеспечением обогащения изотопами; 2 – сигналы управления; 3 – модуль согласования интерфейса; 4 – ширина импульсов; 5 – частота импульсов; 6 – напряжение; 7 – ток; 8 – давление; 9 – от групп датчиков температуры; 10 – контроллер-коммутатор

Fig. 5 – Monitoring and control system of an experimental electromembrane isotope separation equipment: 1 – membrane plant with software enrichment with isotopes; 2 – control signals; 3 – interface matching module; 4 – pulse widths; 5 – pulse frequency; 6 – voltage; 7 – current; 8 – pressure; 9 – from groups of temperature sensors; 10 – controller-commutator

7. Заключение

Предлагаемый электромембранный метод разделения изотопов:

- является модернизированным вариантом процесса электромиграции ионов в растворе (solute electromigration) с новыми широкими возможностями регулирования параметров;

- позволяет ожидать получения обогащенных по изотопам лития или моноизотопных соединений в растворе (гидроксид) или в порошковой форме (оксид лития) с производительностью на 1-ом этапе не менее десятков грамм в неделю со следующими показателями качества:

- а) химическая чистота – 99,95 % и выше;
- б) изотопное обогащение – не менее 99,5 % ;

- отличается высокой эффективностью и рентабельностью благодаря малому энергопотреблению на разделение изотопов;

- применим для разделения стабильных изотопов как легких (Li, Mg), так и средних (Nd, Ba) химических элементов (имеются положительные результаты выполненных тестов);

- обладает перспективой масштабирования до уровня производства промышленного масштаба;

- более привлекателен с точки зрения экологии, более технологичен, чем существующие методы раз-



деления изотопов лития (отсутствуют стадии центрифугирования, рассева и магнитной сепарации).

Список литературы

[1] Yoshinobu Y. Studies on Isotope Separation of lithium by Electromigration in Fused lithium Bromide and Potassium Bromide Mixture / Y. Yoshinobu // Enrichment of lithium-7. Journal of Nuclear Science and Technology. – 1969. – Vol. 6. – No. 12. – P. 698–702.

[2] Makoto, F. Isotope Effects in Electrolytic Formation of Lithium Amalgam / F. Makoto, F. Yasuhiko, N. Masao, O. Makoto // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1986. – Vol. 23. – No.4. – P. 330–337.

[3] Klemm, A. Molten Salt Chemistry / A. Klemm, M. Blamder (Ed.). – Interscience Publishers, Inc., New York, 1964. – 642 p.

[4] Сачков, В.И. Селекция легких изотопов в условиях формирования границы раздела фаз / В.И. Сачков [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). 2007. – Т. 6. – С. 60–68.

[5] Zenzai, K. Lithium Isotope Effect Accompanying Electrochemical Insertion of Lithium into Liquid Gallium / K. Zenzai [et al.] // Progress in Nuclear Energy. – 2008. – Vol 50. – P. 494–498.

[6] Kim, D. Lithium isotope separation on a monobenzo-15-crown-5 resin / D. Kim // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 1991. – Vol. 150. – No. 2. – P. 417–426.

[7] Mouri, M. Observation of lithium isotope effects accompanying electrochemical insertion of lithium into zinc/ M. Mouri, S.T. Yanase // J. Nucl. Sci. Technol. – 2008. – Vol. 45. – P. 384–389.

[8] Патент RU 2216391, Российская Федерация, МПК1 В01D 59/32, C01D 15/00 Способ и установка для обогащения изотопа лития-7 / Аброськин И. Е., Александров А. Б., Забелин Ю. В., Игнатьев П.П., Неустроев В.Н., Пашенко В.П., Степанов В. И.; заявители и патентообладатели Новосибирский завод химконцентратов – № 20011120122/12; заявл. 27.06.2003; опубл. 2003/11/23. –16 с: 9 фиг., 3 табл.

[9] Исупов, В. П. Коэффициенты разделения изотопов лития при химическом изотопном обмене / В.П. Исупов [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2001. – Т. 9. – С. 183–198.

[10] Patent 4931153 United States C25D 3/66, 204/39 Electrolytic Treatment of Radioactive Liquid Waste to Remove Sodium /Katsuyuki O., Yoshiharu T., Hideaki T., Fukuoka; assign. Doryokuro K.K.J. – No. 233,625; Filed 18.08.1988, publ. date 05/06/1990. – 3 p., 2 Fig.

[11] Patent 2004/005586 World Intellectual Property Organization C25C 1/100 G21F 9/06 C02F 1/46 Electrolytic Method of the Extraction of Metals / Martoyan G., Intsheyan S. Tonikyan S., Demirchyan M. and Guiragossian Z., applicants and inventors Martoyan G., Intsheyan S., Tonikyan S., Demirchyan M. and Guiragossian Z. – No. PCT/AM2003/000002, Filed 27.06.2003, publ. date 15/01/2004. – 5 p., 2 Fig, 3 table.

[12] Hoshino, T. Basic Technology for 6Li Enrichment Using an Ionic-Liquid Impregnated Organic Membrane / T. Hoshino // Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Vol. 417. – Iss. 1–3. – P. 696–699.

[13] Patent 20130233720 A1 United States, C25C 5/02 C25C 7/00, 205/341 Extraction of Metals / Martoyan G.A., applicant and inventor Martoyan G.A. – No. 2013/0233720 A1, Apl. No. 13/663,418, Filed 29.10.2012, publ. date 12/09/2013. – 11 p., 6 Fig., 3 table.

[14] Martoyan, G.A. Prospects of lithium enrichment on 7Li isotope by method of controlled ions electromigration/ G.A.Martoyan [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – No. 112; doi:10.1088/1757-899X/112/1/012035.

[15] Brozek, K. Lithium Isotope Enrichment: Feasible Domestic Enrichment Alternatives / K. Brozek. – Department of Nuclear Engineering University of California, Berkeley. – 2012-Report UCPTH-12-005.

[16] Двинских, Е.М. Перспективы производства лития и его соединений из сподуменового сырья России / Е.М. Двинских // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20. – С. 49–53.

[17] Guo, G.Z. Advance in Lithium Isotope Separation / G.Z. Guo, L. Zaijun, Y. Jie // Progress in Chemistry. – 2011. – Vol. 23. – Iss. 9.– P. 1892–1905.

[18] Sun, X.-L. Liquid-liquid extraction to lithium isotope separation based on room-temperature ionic liquids containing 2,2'-binaphthylidyl-17-crown-5/ S. Xiao-Li [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2015. – Vol. 52. – Iss. 3.– P. 332–341.

[19] Symons, E.A. Lithium Isotope Separation. A Review of Possible Techniques / E.A. Symons // Atomic Energy of Canada Limited, 1985. – P. 14–16.

[20] Дмитриев, С.Н. Электромиграционный метод в свободном электролите в радиохимических исследованиях/ С.Н. Дмитриев, М.В. Миланов, О. Д. Маслов // Радиохимия 2. – 2000. – Т. 42. –С. 97–105.

[21] Hagiwara, Z. Theoretical Treatment of Ion-Exchange Systems Used for Lithium Isotope Separation / Z. Hagiwara // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1969. – Vol. 6.– P. 508.

[22] Raizen, M.G. Magnetically activated and guided isotope separation / M.G. Raizen // New Journal of Physics. – 2012. – Vol. 14.– P. 12.

[23] Фам Тхи, Л.Н. Разделение катионов натрия и кальция электродиализом с ионообменными мембранами / Л.Н. Фам Тхи, В.А. Шапошник, М.А. Макарова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2010. – Т. 10. – Вып. 2. – С. 246–252.

[24] Ласкорин, Б.Н. Деминерализация методом электродиализа / Б.Н. Ласкорин // Госатомиздат, 1963. – 361 с.

[25] Шапошник, В.А. Деминерализация воды электродиализом с применением межмембранной засыпки ионообменниками / В.А. Шапошник // Журн. прикл. химии. – 1973. – Т. 46. – № 12. – С. 2659–2663.

[26] Zemany, P.D. Determination of microgram quantities of potassium by X-Ray emission spectrography of



ionexchange membranes / P.D. Zemaný // *Analyt. Chem.* – 1958. – Vol. 30. – No. 2. – P. 299–300.

[27] Ласкорин, Б.Н. Ионообменные мембраны и их применение / Б.Н. Ласкорин, Н.М. Смирнова, М.Н. Гантман. – Госатомиздат, 1967. – 161 с.

[28] Шапошник, В.А. Облегченная электрохимия биполярных ионов в растворах глицина через ионо-селективные мембраны / В.А. Шапошник [и др.] // *Электрохимия.* – 2001. – Т. 57. – № 2. – С. 195–201.

[29] Рожкова, М.В. Разделение катионов с разным зарядом при электродиализе с использованием комплексообразования / М.В. Рожкова [и др.] // *Электрохимия.* – 1996. – Т. 32. – № 2. – С. 261–264.

[30] Nishizawa, K. Extractive Separation of Lithium Isotopes Using Benzo-15-Crown-5. Effect of Salt Concentration / K. Nishizawa, T. Takano // *Separation Science and Technology.* – 1988. – Vol.23. – Iss. 6–7. – P. 751–757.

References

[1] Yoshinobu Y. Studies on Isotope Separation of lithium by Electromigration in Fused lithium Bromide and Potassium Bromide Mixture. *Enrichment of lithium-7. Journal of Nuclear Science and Technology*, 1969;6(12):698–702.

[2] Makoto F., Yasuhiko F., Masao N., Makoto O. Isotope Effects in Electrolytic Formation of Lithium Amalgam. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1986; 23(4):330–337

[3] Klemm, A. *Molten Salt Chemistry*; M. Blamder (Ed.). Interscience Publishers, Inc., New York, 1964; 642 p.

[4] Sachkov V.I., Andrienko O.S., Kazaryan M.A., Malinovskaya T.D., Kabaev S.T., Knyazev A.S., Mal'kov V.S. Selection of light isotopes in condition the formation in the phase boundary (Selektsiya legkikh izotopov v usloviyakh formirovaniya granitsy razdela faz). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2007;6(50):60–68 (in Russ.).

[5] Zenzai K., Yanase S., Zhang Y., Oi T. Lithium Isotope Effect Accompanying Electrochemical Insertion of Lithium into Liquid Gallium. *Progress in Nuclear Energy*, 2010;50:461–467.

[6] Kim D. Lithium isotope separation on a monobenzo-15-crown-5 resin. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1991;150(2):417–426.

[7] Mouri M., Yanase S.T. Observation of lithium isotope effects accompanying electrochemical insertion of lithium into zinc. *J. Nucl. Sci. Technol.*, 2008;45:384–389.

[8] Abroskin I.E. Patent RU 2216391: Method and installation for the enrichment of lithium-7 isotope (Sposob i ustanovka obogashcheniya izotopa litiya-7). 2001 (in Russ.).

[9] Icupov V.P., Mitrofanova R.P., Chupakhina L.E., Lyakhov N.Z., Aleksandrov A.B., Belozarov I.M., The separation coefficients of lithium isotopes in chemical isotope exchange. (Koeffitsienty razdeleniya izotopov litiya pri khimicheskom izotopnom obmene). *Khimiya v*

interesakh ustoichivogo razvitiya, 2001;9:183–198 (in Russ.).

[10] Katsuyuki O., Yoshiharu T., Hideaki T., Fukuoaka. Patent 4931153 United States IPC C25D 3/66, 204/39 no. 233,625: Electrolytic Treatment of Radioactive Liquid Waste to Remove Sodium, 1990.

[11] Martoyan G., Intsheyan S. Tonikyan S., Demirchyan M. and Guiragossian Z. Patent 2004/005586, no. PCT: World Intellectual Property Organization IPC C25C1/100, Electrolytic Method of the Extraction of Metals, 2004.

[12] Hoshino T. Basic Technology for ^6Li Enrichment Using an Ionic-Liquid Impregnated Organic Membrane. *Journal of Nuclear Materials*, 2011;417(1):696–699.

[13] Martoyan G.A. US Patent Application 20130233720 A1, IPC C25C5/02, no. 13/663,418.: Extraction of Metals, 2013.

[14] Martoyan G., Kalugin M., Gabrielyan A. and Martoyan A. Prospects of lithium enrichment on ^7Li isotope by method of controlled ions electromigration. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016;112:012035(1–5).

[15] Brozek K. Lithium Isotope Enrichment: Feasible Domestic Enrichment Alternatives Department of Nuclear Engineering University of California, Berkeley, 2012-Report UCBTH-12-005.

[16] Dvinskikh E.M. Prospects for the production of lithium and its compounds of Russian spodumene raw materials (Perspektivy proizvodstva litiya i ego soedinenii iz spodumenovogo syr'ya Rossii). *Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya*, 2012;20:49–53 (in Russ.).

[17] Guo G.Z., Zaijun L., Jie Y. Advance in Lithium Isotope Separation. *Progress in Chemistry*, 2011;23(9):1892–1905.

[18] Sun X.L., Zhou W., Gu L., Qiu D., Ren D.H., Gu Z.G. Liquid–liquid extraction to lithium isotope separation based on room-temperature ionic liquids containing 2,2'-binaphthyldiyl-17-crown-5/. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2015;52(3):332–341.

[19] Symons E.A. Lithium Isotope Separation. A Review of Possible Techniques. Atomic Energy of Canada Limited, 1985;14–16.

[20] Dmitriev S.N., Milanov M.V., Maslov O.D. Electromigration method in free electrolyte in radiochemical researches (Elektromigratsionnyi metod v svobodnom elektrolite v radiokhimicheskikh issledovaniyakh). *Radiokhimiya* 2, 2000;42:97–105 (in Russ.).

[21] Hagiwara Z. Theoretical Treatment of Ion-Exchange Systems Used for Lithium Isotope Separation. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1969;6(9):508–513.

[22] Raizen M., Klappauf B. Magnetically activated and guided isotope separation. *New Journal of Physics*, 2012;14:023059(12).

[23] Fam Tkhi L.N. Shaposhnik V., Makarova M. Separation of sodium and calcium cations by electrodiagnosis with ion-exchange membranes. *Sorption*



and chromatographic processes, 2010;10(2):246–252. (in Russ.)

[24] Laskorin B.N. Demineralization by Electrolysis Method (Demineralizatsiya metodom elektrodializa). Gosatomizdat Publ., 1963; 361 p. (in Russ.).

[25] Shaposhnik V.A. Water demineralization by electrolysis using intermembrane filling with ion exchangers (Demineralizatsiya vody elektrodializom s primeneniem mezhmembrannoi zasypki iono-obmennikami). *Zhurn. prikl. Khimii*, 1973;46(12):2659–2663 (in Russ.).

[26] Zeman P.D. Determination of microgram quantities of potassium by X-Ray emission spectrography of ionexchange membranes. *Analyt. Chem.*, 1958;30(2):299–300.

[27] Laskorin B.N., Smirnova N.M., Gantman M.N. Ion exchange membranes and their application

(Ionoobmennye membrany i ikh primeneniye). Gosatomizdat Publ., 1967; 161 p. (in Russ.).

[28] Shaposhnik V.A., Eliseeva T.V., Tekuchev A.Yu., Lushchik I.G. Lightweight bipolar ion electrochemistry in glycine solutions through ion-selective membranes (Oblegchennaya elektrokhiimiya bipolyarnykh ionov v rastvorakh glitsina cherez ionoselektivnyye membrany. *Elektrokhiimiya*, 2001;57(2):195–201(in Russ.).

[29] Rozhkova M.V., Shaposhnik V.A., Strygina I.P., Artemova L.V. Separation of cations with different charges during electrolysis using complexation (Razdelenie kationov s raznym zaryadom pri elektrodialize s ispol'zovaniem kompleksoobrazovaniya). *Elektrokhiimiya*, 1996;32(2):261–264 (in Russ.).

[30] Nishizawa K., Takano T. Extractive Separation of Lithium Isotopes Using Benzo-15-Crown-5. Effect of Salt Concentration. *Separation Science and Technology*, 1988;23(6–7):751–757.

Транслитерация по BSI



III Всероссийская научно-техническая конференция

(Посвящается 105-летию со дня рождения д.т.н., профессора Матвея Матвеевича Гудимова)

«Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения»

29.11.2018

ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ совместно с Технологической платформой «Новые полимерные композиционные материалы и технологии» проводит III Всероссийскую научно-техническую конференцию «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения», посвященную 105-летию со дня рождения д.т.н., профессора Матвея Матвеевича Гудимова.

Конференция состоится 29 ноября 2018 года во ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по адресу: г. Москва, ул. Радио, д. 17 (вход со стороны ул. Доброслободская).

Начало работы конференции – 10:00. Регистрация участников с 09:00 до 10:00.

Внимание участников будут предложены доклады ведущих ученых и специалистов ВИАМ, а также других предприятий и научных организаций отрасли по следующим тематическим направлениям:

- полимерные композиционные материалы (в том числе интеллектуальные);
- полимерные композиционные материалы на основе термопластичных матриц;
- высокотемпературные композиционные материалы;
- ударостойкость полимерных композиционных материалов;
- технологии получения и переработки полимерных композиционных материалов;
- 3D-печать изделий из полимерных композиционных материалов;
- утилизация полимерных композиционных материалов.

Приглашаем ученых, специалистов, аспирантов и студентов принять участие в конференции и выступить с докладами о результатах научных исследований по разработке материалов и технологий нового поколения, проблемах, достижениях и перспективах в области авиационной и космической техники.

По итогам конференции «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения» будет выпущен сборник докладов (в электронном виде).

Информация по телефонам:

(499) 263-88-84 Прохорова Лидия Вячеславовна;
(499) 263-89-55 Тимошков Павел Николаевич;

(499) 263-85-34 Гуляев Иван Николаевич.
E-mail: pkm@viam.ru

<https://conf.viam.ru/conf/277>