МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
[Полное название вуза]

Химический факультет
Кафедра неорганической химии

ДОКЛАД

по дисциплине «Общая и неорганическая химия»

на тему: «Литий-ионные аккумуляторы: принцип работы, история создания и перспективы»

Доклад к семинарскому занятию

Выполнил(а): студент гр. ____
_____ / И. О. Фамилия

Проверил(а): _____
_____ / И. О. Фамилия

[Город] 2026

Пример работы, выполненной в Универ AI · univerai.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....3
1. Как работает литий-ионный аккумулятор.....3
1.1 Интеркаляция и принцип «кресла-качалки».....3
1.2 Ёмкость и энергия: расчёт по закону Фарадея.....5
2. История изобретения.....6
3. Современное состояние и перспективы.....8
3.1 Цена, применение и безопасность.....8
3.2 Направления развития.....9
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....10
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....11

ВВЕДЕНИЕ

В кармане почти у каждого человека лежит литий-ионный аккумулятор. Он же стоит в ноутбуке, беспроводных наушниках, электросамокате и электромобиле. Тридцать с небольшим лет назад этой технологии на рынке не было вовсе: первые серийные аккумуляторы такого типа выпустила компания Sony в 1991 году [8]. В 2019 году Нобелевскую премию по химии присудили Дж. Гуденафу, М. С. Уиттингему и А. Ёсино «за разработку литий-ионных аккумуляторов» [1].

Литий-ионный аккумулятор хорошо показывает, как фундаментальная химия твёрдого тела превращается в массовый продукт, и при этом в нём легко увидеть законы, знакомые из общего курса: закон Фарадея, связь энергии с напряжением и зарядом, зависимость свойств вещества от строения кристаллической решётки. Цена батарей за последние десятилетия упала в десятки раз [11], и от того, насколько дешевле и ёмче они станут дальше, во многом зависит переход транспорта на электричество.

Цель доклада — объяснить, как устроен и работает литий-ионный аккумулятор, проследить, как сложилась эта технология, и показать, какие задачи стоят перед ней сейчас. Для этого в первом разделе рассматривается принцип интеркаляции и проводится расчёт теоретической ёмкости электродных материалов, во втором — история изобретения от первых опытов Уиттингема до выпуска первых серийных элементов, в третьем — современные типы катодов, проблемы безопасности и направления развития.

1. Как работает литий-ионный аккумулятор

1.1 Интеркаляция и принцип «кресла-качалки»

Любой химический источник тока состоит из двух электродов, разделённых электролитом. На отрицательном электроде (аноде при разряде) идёт окисление, на положительном (катоде) — восстановление, электроны движутся по внешней цепи, а ионы — через электролит. Особенность литий-

ионного аккумулятора в том, что в нём нет металлического лития и электроды при работе не растворяются и не осаждаются. Ионы лития просто переходят из кристаллической решётки одного электрода в решётку другого и обратно.

Такой процесс называется интеркаляцией, то есть внедрением гостевых частиц между слоями или в каналы решётки «хозяина» без её разрушения. Ион Li^+ очень мал (ионный радиус около 0,076 нм), поэтому он сравнительно легко перемещается между слоями оксида кобальта или графита. Анод обычно делают из графита, в котором литий располагается между графеновыми слоями. Катод — из слоистого оксида металла, например $LiCoO_2$, или из фосфата $LiFePO_4$. Электролитом служит раствор соли $LiPF_6$ в смеси органических карбонатов, а между электродами помещают пористую полимерную плёнку-сепаратор, пропускающую ионы, но не допускающую короткого замыкания [5].

При заряде внешний источник «выталкивает» ионы лития из катода, и они внедряются в графит. При разряде всё идёт в обратном направлении. Для пары оксид кобальта — графит процессы можно записать так [4]:

на катоде: $LiCoO_2 \rightleftarrows Li_{1-x}CoO_2 + x\,Li^+ + x\,e^-$;

на аноде: $C_6 + x\,Li^+ + x\,e^- \rightleftarrows Li_xC_6$.

Прямое направление стрелок соответствует заряду, обратное — разряду. Ионы лития как бы раскачиваются между электродами, поэтому такие системы образно называют «кресло-качалка» (rocking chair) [5].

У этой схемы есть важная деталь, без которой аккумулятор не прожил бы и нескольких циклов. При первом заряде часть электролита разлагается на поверхности графита и образует тонкую плёнку, которую называют SEI (solid electrolyte interphase). Плёнка пропускает ионы лития, но не пропускает электроны и защищает электролит от дальнейшего разложения. На её образование уходит часть лития, поэтому новый аккумулятор после первого цикла теряет несколько процентов ёмкости, зато потом работает стабильно [5].

1.2 Ёмкость и энергия: расчёт по закону Фарадея

Сколько электричества может запасти электрод, определяется законом Фарадея. Если на одну формульную единицу вещества приходится n обратимо переносимых электронов, то теоретическая удельная ёмкость, выраженная в мА·ч/г, равна

$$Q = \frac{nF}{3{,}6\,M} \tag{1}$$

где Q — теоретическая удельная ёмкость, мА·ч/г; n — число электронов на формульную единицу; F = 96 485 Кл/моль — постоянная Фарадея; M — молярная масса, г/моль; 3,6 — коэффициент перевода кулонов в мА·ч.

Для $LiCoO_2$ с молярной массой 97,87 г/моль при n = 1 получаем Q = 96 485 / (3,6 · 97,87) ≈ 274 мА·ч/г. Для $LiFePO_4$ (157,76 г/моль) — около 170 мА·ч/г, для графита в форме LiC_6 (на 72,07 г углерода) — 372 мА·ч/г. Расчёт совпадает со справочными значениями [10]. Однако на практике из оксида кобальта можно обратимо извлечь лишь около половины лития: при большем извлечении слоистая структура становится неустойчивой. Поэтому реальная ёмкость $LiCoO_2$ составляет около 140–150 мА·ч/г, тогда как у $LiFePO_4$ она близка к теоретической [10].

Энергия, запасённая аккумулятором, равна произведению заряда на среднее напряжение разряда:

$$E = Q \cdot U \tag{2}$$

где E — энергия, Вт·ч; Q — ёмкость, А·ч; U — среднее напряжение разряда, В.

Например, аккумулятор смартфона ёмкостью 4000 мА·ч с номинальным напряжением 3,85 В запасает 4,0 · 3,85 = 15,4 Вт·ч. Отсюда видно, почему химики так ценят высокое напряжение: при той же ёмкости ячейка на 3,7 В запасает втрое больше энергии, чем никель-металлгидридная ячейка на 1,2 В. Напряжение определяется разностью электрохимических потенциалов лития в катоде и аноде. Оксиды переходных металлов дают

около 4 В относительно лития, а сульфид титана, с которого всё начиналось, — около 2 В [2; 3].

Таблица 1 – Характеристики основных катодных материалов литий-ионных аккумуляторов

Материал	Структура	Теоретическая ёмкость, мА·ч/г	Практическая ёмкость, мА·ч/г	Среднее напряжение, В	Основное применение
$LiCoO_2$ (LCO)	Слоистая	274	148	3,8	Смартфоны, ноутбуки
$LiNi_1/_3Mn_1/_3Co_1/_3O_2$ (NMC)	Слоистая	278	160	3,7	Электромобили
$LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05}O_2$ (NCA)	Слоистая	279	199	3,7	Электромобили
$LiMn_2O_4$ (LMO)	Шпинель	148	120	4,1	Электроинструмент
$LiFePO_4$ (LFP)	Оливин	170	165	3,4	Электробусы, накопители энергии

Источник: составлено автором по [10]; теоретическая ёмкость всех материалов рассчитана по формуле (1), практическая ёмкость и среднее напряжение — по [10].

Таблица 1 показывает главный компромисс современной электрохимии. Слоистые оксиды с никелем дают наибольшую ёмкость, но содержат дорогие и дефицитные кобальт и никель и менее устойчивы при нагреве. Фосфат железа уступает им по ёмкости и напряжению, зато дешёв, безопасен и выдерживает тысячи циклов. Поэтому разные производители и разные рынки выбирают разные материалы.

2. История изобретения

Литий привлекал электрохимиков давно. Это самый лёгкий металл и самый сильный восстановитель, а его теоретическая удельная ёмкость достигает 3861 мА·ч/г. Первичные, то есть одноразовые, литиевые элементы появились в 1970-е годы. С аккумуляторами дело обстояло сложнее: при

многократном заряде литий осаждается неравномерно, образует ветвистые дендриты, которые прорастают через сепаратор и замыкают электроды [4].

Первый шаг к решению сделал М. Стэнли Уиттингем, работавший в компании Exxon. В 1976 году он описал аккумулятор, в котором катодом служил дисульфид титана TiS_2, способный обратимо внедрять ионы лития между своими слоями [2]. Элемент давал напряжение чуть больше 2 В [1]. Анод, однако, оставался металлическим литием, и опытные образцы были склонны к возгоранию.

Второй шаг сделал Джон Гуденаф в Оксфордском университете. Он предположил, что оксид металла даст более высокое напряжение, чем сульфид, и в 1980 году вместе с К. Мидзусимой и соавторами показал, что из $LiCoO_2$ можно обратимо извлекать литий при напряжении около 4 В [3]. Это почти удвоило потенциальную энергию элемента. Важно и то, что катод изготавливался уже в «заряженном» литием виде, а значит, анод можно было делать из материала, вовсе не содержащего лития в начале работы.

Третий шаг сделал Акира Ёсино из японской компании Asahi Kasei. В 1985 году он собрал элемент с катодом Гуденафа и анодом из нефтяного кокса, углеродного материала, в который ионы лития внедряются при заряде [7]. В таком аккумуляторе вообще не было металлического лития, и он оказался гораздо безопаснее предшественников. Ёсино провёл и показательный опыт: на образец роняли стальной груз, и он не загорался, тогда как элемент с металлическим литием в таких условиях вспыхивал [7].

В 1991 году компания Sony начала серийный выпуск литий-ионных аккумуляторов [1; 8]. В последующие годы графит заменил кокс в качестве анода, а в 1997 году группа Гуденафа предложила фосфат лития-железа $LiFePO_4$ со структурой оливина [9]. Основные этапы сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Основные этапы создания литий-ионного аккумулятора

Год	Исследователь, организация	Результат
1976	М. С. Уиттингем, Exxon	Аккумулятор с катодом TiS_2 и литиевым анодом, около 2 В
1980	Дж. Гуденаф и соавт., Оксфордский университет	Катод $LiCoO_2$, напряжение около 4 В
1985	А. Ёсино, Asahi Kasei	Элемент без металлического лития: $LiCoO_2$ и углеродный анод
1991	Sony	Начало серийного выпуска
1997	А. Падхи, Дж. Гуденаф и соавт., Техасский университет	Катод $LiFePO_4$ со структурой оливина

Источник: составлено автором по [1–3; 7–9].

История примечательна тем, как распределились роли. Фундаментальные открытия сделали университетские и корпоративные лаборатории США и Великобритании, а довели технологию до массового продукта японские компании, которым нужен был лёгкий источник питания для портативной электроники. Гуденаф родился в 1922 году, так что на момент присуждения премии ему было 97 лет [1].

3. Современное состояние и перспективы

3.1 Цена, применение и безопасность

За три десятилетия литий-ионные аккумуляторы стали несравнимо дешевле. М. Циглер и Дж. Транчик собрали данные о ценах за 1991–2018 годы и показали, что реальная цена элемента в расчёте на единицу запасаемой энергии снизилась примерно на 97 % [11].

Падение цен сделало возможным массовый электротранспорт. По данным Международного энергетического агентства, в 2023 году мировые продажи электромобилей приблизились к 14 млн, или 18 % всех проданных легковых автомобилей (годом ранее — 14 %) [13]. Аккумуляторы для электромобилей уже потребляют большую часть производимого в мире

лития. Быстро растёт и спрос на стационарные накопители для солнечных и ветровых электростанций.

Обратная сторона высокой энергоёмкости — пожароопасность. Органический электролит горюч, а при перегреве, механическом повреждении или внутреннем коротком замыкании в элементе начинается цепочка экзотермических реакций: разлагается плёнка SEI, затем электролит, затем катод с выделением кислорода. Этот процесс называют тепловым разгоном. Температура элемента при этом стремительно растёт, и он может загореться. Широко известен, например, отзыв смартфонов Samsung Galaxy Note 7 в 2016 году. Поэтому каждый элемент снабжают системой управления, которая следит за напряжением, током и температурой и отключает его при выходе за безопасные пределы.

3.2 Направления развития

Первое направление — новые аноды. Кремний способен принять почти четыре атома лития на атом, образуя $Li_{15}Si_4$, и его теоретическая ёмкость, рассчитанная по формуле (1), составляет около 3580 мА·ч/г, почти в десять раз больше, чем у графита. Однако при этом объём кремния увеличивается в несколько раз, частицы растрескиваются, и электрод быстро деградирует [10]. Поэтому сейчас кремний добавляют к графиту в небольшом количестве, постепенно повышая его долю.

Второе направление — твердотельные аккумуляторы, в которых жидкий горючий электролит заменён твёрдым ионным проводником. Такой элемент безопаснее и в принципе позволяет вернуться к металлическому литиевому аноду, о котором мечтали ещё в 1970-е годы. Ещё Дж. Гуденаф в обзоре 2010 года называл поиск твёрдых электролитов одной из ключевых задач [4]. Массового производства таких аккумуляторов пока нет: твёрдые электролиты плохо контактируют с электродами, а дендриты лития способны прорастать и через них.

Третье направление — уход от дефицитных элементов. Значительная часть мировой добычи кобальта сосредоточена в Демократической Республике Конго, что создаёт и экономические, и этические риски. Отсюда рост доли бескобальтовых катодов $LiFePO_4$ и интерес к натрий-ионным аккумуляторам, работающим по тому же принципу «кресла-качалки», но с ионами натрия. Натрий тяжелее лития и даёт меньшее напряжение, зато он распространён повсеместно и дёшев. Наконец, всё большее значение приобретает переработка отработанных батарей, без которой рост производства упрётся в запасы сырья [5; 6; 12].

В России эти вопросы давно изучают: обзор А. М. Скундина, О. Н. Ефимова и О. В. Ярмоленко о состоянии и перспективах литиевых аккумуляторов вышел ещё в 2002 году [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Литий-ионный аккумулятор основан на простой идее: ионы лития переходят между двумя электродами-«хозяевами», не разрушая их структуру. Эту идею последовательно воплотили три исследователя. Уиттингем показал, что интеркаляция лития в слоистый сульфид может служить основой аккумулятора, Гуденаф заменил сульфид оксидом кобальта и поднял напряжение до 4 В, Ёсино отказался от металлического лития и сделал элемент безопасным.

Расчёт по закону Фарадея показывает, что теоретическая ёмкость катодных материалов составляет 150–280 мА·ч/г, графитового анода — 372 мА·ч/г, а кремния — около 3580 мА·ч/г. Разрыв между теоретической и практической ёмкостью, а также между ёмкостью и стабильностью определяет выбор материалов. Слоистые оксиды с никелем дают больше энергии, фосфат железа — больше безопасности и циклов.

За тридцать лет цена аккумуляторов снизилась примерно на 97 %, и это сделало возможным массовый электротранспорт. Следующие шаги связаны с кремниевыми и литий-металлическими анодами, твёрдыми электролитами,

отказом от кобальта и переработкой батарей. От того, насколько быстро удастся их сделать, зависит, как скоро электрическая энергия станет основной и на транспорте.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. The Nobel Prize in Chemistry 2019 : press release / The Royal Swedish Academy of Sciences. – Stockholm, 2019. – 9 October. – URL: https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/2019/press-release/ (дата обращения: 22.10.2026).

2. Whittingham, M. S. Electrical energy storage and intercalation chemistry / M. S. Whittingham // Science. – 1976. – Vol. 192, no. 4244. – P. 1126–1127. – DOI 10.1126/science.192.4244.1126.

3. Mizushima, K. LixCoO2 (0<x≤1): A new cathode material for batteries of high energy density / K. Mizushima, P. C. Jones, P. J. Wiseman, J. B. Goodenough // Materials Research Bulletin. – 1980. – Vol. 15, no. 6. – P. 783–789. – DOI 10.1016/0025-5408(80)90012-4.

4. Goodenough, J. B. Challenges for Rechargeable Li Batteries / J. B. Goodenough, Y. Kim // Chemistry of Materials. – 2010. – Vol. 22, no. 3. – P. 587–603. – DOI 10.1021/cm901452z.

5. Tarascon, J.-M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries / J.-M. Tarascon, M. Armand // Nature. – 2001. – Vol. 414, no. 6861. – P. 359–367. – DOI 10.1038/35104644.

6. Armand, M. Building better batteries / M. Armand, J.-M. Tarascon // Nature. – 2008. – Vol. 451, no. 7179. – P. 652–657. – DOI 10.1038/451652a.

7. Yoshino, A. The Birth of the Lithium-Ion Battery / A. Yoshino // Angewandte Chemie International Edition. – 2012. – Vol. 51, no. 24. – P. 5798–5800. – DOI 10.1002/anie.201105006.

8. Nishi, Y. Lithium ion secondary batteries; past 10 years and the future / Y. Nishi // Journal of Power Sources. – 2001. – Vol. 100, no. 1–2. – P. 101–106. – DOI 10.1016/S0378-7753(01)00887-4.

9. Padhi, A. K. Phospho-olivines as Positive-Electrode Materials for Rechargeable Lithium Batteries / A. K. Padhi, K. S. Nanjundaswamy, J. B. Goodenough // Journal of the Electrochemical Society. – 1997. – Vol. 144, no. 4. – P. 1188–1194. – DOI 10.1149/1.1837571.

10. Nitta, N. Li-ion battery materials: present and future / N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee, G. Yushin // Materials Today. – 2015. – Vol. 18, no. 5. – P. 252–264. – DOI 10.1016/j.mattod.2014.10.040.

11. Ziegler, M. S. Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline / M. S. Ziegler, J. E. Trancik // Energy & Environmental Science. – 2021. – Vol. 14, no. 4. – P. 1635–1651. – DOI 10.1039/D0EE02681F.

12. Skundin, A. M. The state-of-the-art and prospects for the development of rechargeable lithium batteries / A. M. Skundin, O. N. Efimov, O. V. Yarmolenko // Russian Chemical Reviews. – 2002. – Vol. 71, no. 4. – P. 329–346. – DOI 10.1070/RC2002v071n04ABEH000706.

13. Global EV Outlook 2024: Moving towards increased affordability / International Energy Agency. – Paris : IEA, 2024. – URL: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024 (дата обращения: 22.10.2026).