

DOI: 10.18721/JEST.27104  
УДК 546.32

*А.Г. Морачевский, А.А. Попович*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

## **ПРОГРЕСС В ИССЛЕДОВАНИЯХ КАЛИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ**

Число исследований перезаряжаемых источников тока с участием калия и его соединений: калий-ионные аккумуляторы, аккумуляторы на основе систем калий-халькоген (сера, селен) и калий-кислород (воздух) начало расти с 2015 г. и к середине 2020 г. превысило в сумме 350 работ. Данный небольшой обзор (Mini review) продолжает серию наших публикаций о развитии исследований перезаряжаемых систем на основе щелочных металлов и магния, он базируется исключительно на работах, опубликованных в 2020 г. Как и раньше, ввиду обилия экспериментальных исследований, нами рассматриваются преимущественно обзоры и лишь некоторые оригинальные публикации. Создание литий-ионных аккумуляторов, их массовый выпуск (в 2021 г. исполняется тридцать лет с начала их производства) явились крупнейшим успехом современной прикладной электрохимии, авторы первых основополагающих работ в этой области в 2019 г. удостоены Нобелевской премии. Тем не менее, из-за самых разнообразных требований к автономным источникам электрической энергии (электрохимические показатели, доступность и цена материалов для их изготовления, безопасность эксплуатации и др.) продолжают интенсивные исследования по созданию новых электродных материалов и электролитов для литий-ионных аккумуляторов, поиск новых электрохимических систем, которые могли бы конкурировать с литиевыми аккумуляторами. На современных конференциях по источникам тока принято выделять отдельную секцию «Beyond Li-ion».

*Ключевые слова:* перезаряжаемые источники тока, калий-ионные аккумуляторы, система калий-сера, система калий-селен, аккумуляторы с участием калия.

*Ссылка при цитировании:*

Морачевский А.Г., Попович А.А. Прогресс в исследованиях калий-ионных аккумуляторов // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 1. С. 41–50. DOI: 10.18721/JEST.27104

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*A.G. Morachevskiy, A.A. Popovich*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

## **PROGRESS IN RESEARCHING BATTERIES WITH POTASSIUM**

The number of studies of rechargeable current sources with potassium and its compounds, such as potassium-ion batteries, potassium-chalcogen (sulfur, selenium) and potassium-oxygen (air) based batteries, has been growing since 2015 and in 2020, it exceeded 350 papers in total. This mini review continues a series of our publications about the development of the studies in the field of rechargeable systems based on alkaline metals and magnesium and considers only the papers published in 2020. As before, due to abundant experimental researches, we primarily considered the reviews and only a few of original works. Creation of lithium-ion batteries, their mass production (in 2021, it is the 30<sup>th</sup> anniversary since the launch of their production) became one of the greatest successes of the modern applied electrochemistry. In 2019, the authors of the

pioneering works in this field were awarded the Nobel prize. Nonetheless, because of various requirements to autonomous electric sources (electrochemical parameters, accessibility and cost of materials for their manufacturing, operational safety, etc.), there is a never ending and intent search for new electrode materials and electrolytes for Li-ion batteries, and new electrochemical systems which could compete with the lithium batteries. Modern conferences on current sources provide a separate section: “Beyond Li-ion”.

*Keywords:* rechargeable power supplies, potassium-ion batteries, potassium-sulfur system, potassium-selenium system, potassium batteries.

*Citation:*

A.G. Morachevskiy, A.A. Popovich, Progress in researching batteries with potassium, Materials Science. Power Engineering, 27 (01) (2021) 41–50, DOI: 10.18721/JEST.27104

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

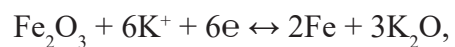
В нашем предыдущем сообщении [1] уже упоминался тогда еще только принятый к печати обстоятельный обзор японских авторов [2], посвященный состоянию исследований калий-ионных батарей. В настоящее время этот обзор опубликован в журнале, и мы остановимся на нем несколько подробнее. Авторы довольно широко рассматривают проблемы интеркаляции ионов щелочных металлов в различные материалы. По нашей оценке из имеющихся в обзоре 477 ссылок на оригинальные исследования непосредственно касаются К-ионных аккумуляторов (КИА) 188 работ, опубликованных в период с 2015 по 2019 гг. включительно. По годам они распределяются так: в 2015 г. 6 работ, в 2016 – 10, в 2017 – 51, в 2018 – 72, в первой половине 2019 г. – 49. Обзор [2], занимающий 106 страниц, включает 6 разделов: введение, возможности применения калия в источниках энергии, материалы для положительного электрода калий-ионных аккумуляторов, материалы для отрицательного электрода, электролиты и связующие материалы, заключение и перспективы применения КИА.

В первых двух разделах обзора сопоставлены свойства ионов щелочных металлов и других кандидатов на создание перезаряжаемых батарей, основанных на принципе интеркаляции ионов ( $Mg^{2+}$ ,  $Al^{3+}$ ,  $Ca^{2+}$ ). Мы ограничимся щелочными металлами и сопоставим теоретическую емкость их при образовании соединения  $ACoO_2$  (A-Li, Na, K). Теоретическая гравиметрическая емкость ( $mA \cdot ч \cdot г^{-1}$ ): для Li 274, для Na 235, для K 206. Теоретическая волюмометрическая емкость ( $mA \cdot ч \cdot см^{-3}$ ) соответственно равна: 1378, 1193 и 906. Важным показателем являются радиусы ионов (радиусы Стокса) в различных растворителях. По данным [2] радиусы ионов щелочных металлов в воде (Å) равны: для Li 2,38, для Na 1,84, для K 1,25. В органическом растворителе – пропилен-карбонате – соответственно такие цифры: 4,8, 4,4 и 3,6. Ионы калия имеют наименьший радиус. В калий-ионных аккумуляторах реализуется большее разрядное напряжение по сравнению с литий-ионными (на 0,1 В) и натрий-ионными (на 0,4 В) аккумуляторами.

В третьем разделе обзора суммировано описание различных типов материалов для положительного электрода (анода) К-ионных аккумуляторов: слоистые оксиды различных типов, аналоги «Prussian blue» (приведены свойства 16 аналогов, содержащих ферроцианидные группировки), полианионные соединения (преимущественно различные фосфаты, фтор-сульфаты), органические соединения.

Четвертый раздел посвящен материалам для отрицательных электродов (анодов). Основное внимание уделено углеродным материалам, интеркаляции ионов калия в них. Обсуждаются графит, «твердый», «мягкий» и пористый углерод. Авторы приводят электрохимические характеристики для графита различных марок с указанием ссылок на экспериментальные исследования. В процессе интеркаляции ионов калия выделяются четыре последовательных стадии:  $KC_{48}$ ,  $KC_{36}$ ,  $KC_{24}$ ,  $KC_8$ . К числу других обсуждаемых в обзоре [2] анодных материалов относятся кремний,

германий, фосфор, металлы (Al, Sn, Pb, Sb, Bi), композиты с участием указанных элементов, оксиды переходных металлов (оксиды Ti, Mn, Nb). Рассмотрены конверсионные процессы типа:



Обсуждаются также работы, в которых изучалось применение в качестве анодных материалов халькогенидов переходных металлов ( $\text{TiS}_2$ ,  $\text{VS}_2$ ,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{MoSe}_2$ ,  $\text{WS}_2$ ), полианионных соединений, органических материалов. В пятом разделе рассмотрено применение ряда электролитов преимущественно на основе соединения  $\text{KPF}_6$ . Кратко описаны исследования с применением твердых и полимерных электролитов. В обзоре [2] подробно изложены достижения и трудности в изучении K-ионных аккумуляторов по состоянию на конец 2019 г.

Мы столь подробно попытались изложить содержание обзора, поскольку он по своему объему и полноте охвата всех проблем, связанных с изучением K-ионных аккумуляторов, может рассматриваться как первая небольшая монография в области K-ионных аккумуляторов. Весьма важно, что на протяжении всего обзора авторы обсуждают конкурентные возможности K-ионных батарей по сравнению с Li-ионными и Na-ионными аккумуляторами.

В очень информативном обзоре китайских авторов [3], опубликованном в начале 2020 г. (принят к печати в ноябре 2019 г., кратко упоминается нами в работе [1]) отмечаются большие успехи в изучении K-ионных аккумуляторов, достигнутые в 2017 – 2019 гг. Из 213 ссылок на оригинальные работы, содержащихся в обзоре [3], 133 относятся непосредственно к КИА и опубликованы в указанные три года. Ниже приводится диаграмма, иллюстрирующая рост общего числа публикаций, в которых изучались КИА (по данным *Web of Science*) [3] (рис. 1).

В обзоре [3] очень подробно описаны возможные катодные и анодные материалы, для каждой группы материалов после описания их структуры, свойств, методов синтеза излагаются задачи и проблемы, связанные с их применением (подразделы «*Major challenges*»).

При описании катодных материалов первое место отводится гексацианометаллатам (аналогам *Prussian blue*), затем следуют слоистые оксиды, полианионные соединения, органические соединения. Описание анодных материалов начинается с углеродсодержащих материалов, за ними следуют сплавообразующие, конверсионные, интеркаляционные и органические материалы. В заключительной части обзора [3] в табличной форме приводятся сведения о 23 катодных и 34 анодных материалах, указываются их исходная обратимая емкость ( $\text{mA}\cdot\text{g}^{-1}$ ), средняя величина напряжения (В), емкость при определенной плотности тока ( $\text{mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$ ), потеря исходной емкости после указанного числа циклов. Таблица составлена на основании экспериментальных данных последних лет, приводятся ссылки на соответствующие исследования.

Обзоры [2] и [3] по существу дают полное представление о состоянии исследований калий-ионных аккумуляторов до середины 2020 г.

В работе [4] (Индия) содержатся ссылки на 114 работ, из них 68 непосредственно относятся к K-ионным аккумуляторам, опубликованы в период с 2015 по 2020 гг. По годам распределение такое: на работы 2015 г. – 8 ссылок, 2016 г. – 15, 2017 г. – 23, 2018 г. – 6, 2019 г. – 6, 2020 г. (первая половина) – 10. Авторами [4] также приводится диаграмма (рис. 2), иллюстрирующая рост числа исследований КИА, но составленная иным образом: с помощью подсчета в статьях ключевых слов «*Potassium ion batteries*».

Структура обзора [4] в целом аналогична обзорам [2, 3]: вводная часть с сопоставлением основных показателей разрабатываемых аккумуляторов, основанных на процессах интеркаляции, катодные и анодные материалы, электролиты и связывающие вещества для K-ионных аккумуляторов. Во вводной части отмечается, что содержание лития в земной коре только 0,0017 % (по

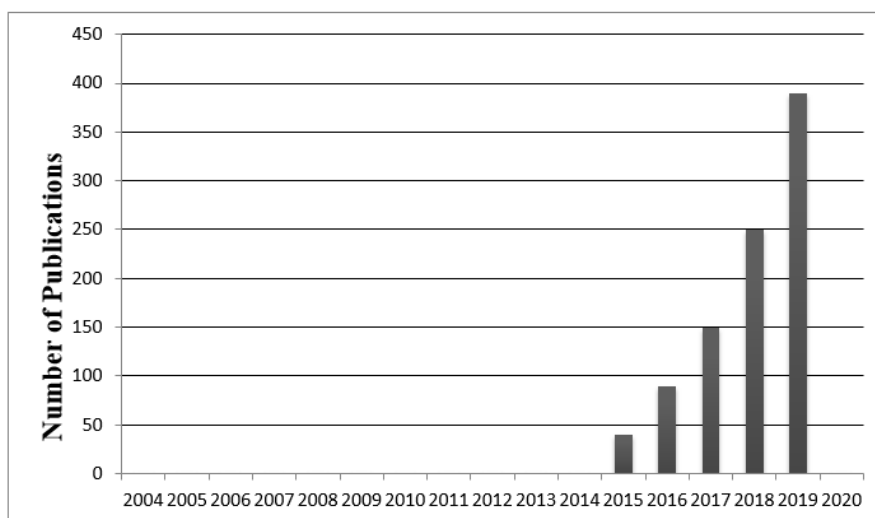


Рис. 1. Рост числа публикаций, относящихся к К-ионным аккумуляторам по данным [3]

Fig. 1. Growth in the number of publications related to K-ion batteries according to [3]

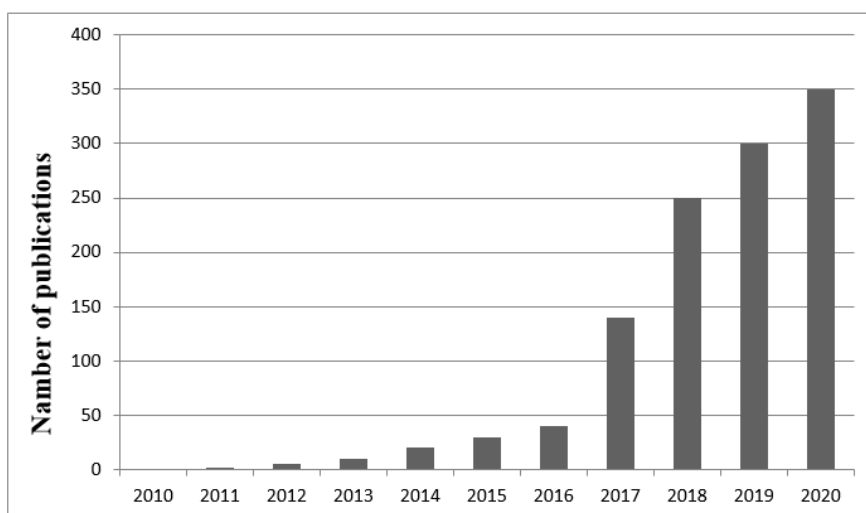


Рис. 2. Рост общего числа публикаций, относящихся к К-ионным аккумуляторам по данным [4]

Fig. 2. Growth in the total number of publications related to K-ion batteries according to [4]

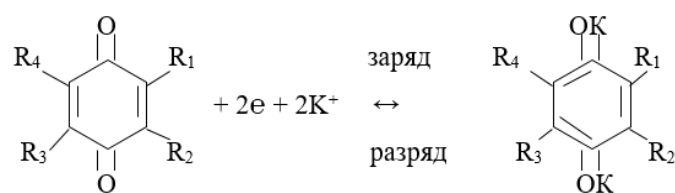
другим данным: Свойства элементов Справочник. Т. 1. М.: Металлургия, 1997, содержание лития в земной коре 0,0065 мас. %) и в будущем возможен «*Lithium crisis*».

Месторождения литийсодержащих руд в зарубежном мире преимущественно находятся в Южной Америке (свыше 70%).

Из числа катодных материалов для КИА в работе [4] описаны: аналоги *Prussian blue* (ферроцианиды с участием различных металлов), слоистые металлические оксиды, другие катодные материалы. Среди анодных материалов на первом месте, как и в других обзорах, углерод и некоторые углеродсодержащие материалы, обсуждаются также олово, его соединение с фосфором, органические анодные материалы. Все это рассмотрено в гораздо меньшем объеме по сравнению с обзорами [2, 3], однако использованы десять оригинальных исследований катодных материалов,

опубликованные уже в 2020 г. В заключительной части обзора [4] авторы весьма положительно оценивают перспективы использования КИА в качестве перезаряжаемых источников тока.

Обзор Капаева и Трошина (Россия, Сколково, Черноголовка) [5] уже не охватывает всей проблемы К-ионных аккумуляторов, он посвящен частному вопросу – электродным материалам для калиевых батарей, создаваемым на органической основе. В работе содержится 176 ссылок на оригинальные источники, причем активно используются публикации самых последних лет: 22 работы, опубликованные в 2017 г., 28 в 2018 г., 69 в 2019 г. и 12 в 2020 г. К сожалению, в обзоре не указываются названия цитируемых работ. Основные разделы работы: краткое введение, катодные материалы, анодные материалы, очень краткое заключение, в качестве примера зарядно-разрядной реакции с участием органического материала приводится такая:



Авторы отмечают, что многие материалы на органической основе показывают обнадеживающие результаты, обладают хорошей циклируемостью.

Применению органических соединений в качестве катодных и анодных материалов, электролитов для К-ионных аккумуляторов посвящен также обзор китайских авторов [6]. К сожалению, в нем также литературные источники приводятся без указания названий статей. Авторы базируются на работах самых последних лет. Из 203 ссылок 142 относятся к работам, опубликованным в 2016 – 2020 гг. Из этого числа 10 статей опубликовано в 2016 г., 26 в 2017 г., 36 в 2018 г., 51 в 2019 г. и 19 в 2020 г. Структура обзора стандартная. Вслед за кратким введением рассматриваются катодные материалы, затем анодные и электролиты (жидкие органические, водные, твердые и квази-твердые). В табличной форме суммированы сведения более чем о пятидесяти различных электродных материалах органического происхождения для КИА. В таблицах приводятся: формула соединения, включая структурное изображение, разрядное напряжение («разрядное плато», В), применяемый электролит, емкость ( $\text{mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$ ) при указанной плотности тока ( $\text{mA}\cdot\text{г}^{-1}$ ), сохраняемая емкость (в %) после указанного числа циклов при соответствующей плотности тока ( $\text{mA}\cdot\text{г}^{-1}$ ), приводятся ссылки на экспериментальные исследования.

Представляет несомненный интерес в заключительной части обзора схема, иллюстрирующая стратегию повышения характеристик КИА с органическими материалами, оптимизации электродов и электролитов. Имеются в виду такие фундаментальные характеристики, как емкость, напряжение, циклируемость, надежность.

В обзоре Федотова с соавторами (Россия, Москва, Сколково) [7] рассмотрен частный вопрос – применение электродных материалов типа  $\text{KTiOPO}_4$  (КТР) в металл-ионных батареях. Обсуждено большое число других соединений, родственных по структуре КТР. В работе содержится 139 ссылок на оригинальные исследования структуры, свойств и возможных областей применения преимущественно катодных материалов в литий-ионных, натрий-ионных и калий-ионных аккумуляторах. Структура обзора такова: введение, общее описание кристаллической структуры КТР, катодные материалы ( $\text{KFeSO}_4\text{F}$ ,  $\text{KVPO}_4\text{F}$ ,  $\text{KVPO}_4$ ,  $\text{KTiPO}_4\text{F}$ ), анодные материалы, обсуждение и перспективы. Работа в значительной степени имеет кристаллографическую направленность. Просмотр текста и названий цитируемых работ позволяет заключить, что вопросам, связанным с калий-ионными аккумуляторами, из общего числа ссылок посвящены 22 – 24 работы, опубликованные в 2016 – 2020 гг. Это вполне естественно, если учесть, что исследования К-ионных ба-



тарей начались с 2015 г. Применение обсуждаемых в работе [7] материалов может способствовать повышению общего разрядного напряжения металл-ионных батарей.

Обзор, представленный авторами из Австралии [8], посвящен применению аналогов «*Prussian blue*» в качестве эффективных катодных материалов для К-ионных батарей. Авторы подчеркивают, что к настоящему времени именно эти катодные материалы являются основными кандидатами для применения их в КИА как с водными, так и с неводными электролитами в случае коммерциализации батарей. Обзор [8] содержит 126 ссылок на оригинальные исследования, причем 84 ссылки из них относятся к работам последних лет: 2016 г. – 9 ссылок, 2017 г. – 23, 2018 г. – 32, 2019 г. – 16, 2020 г. – 4.

В обзоре китайских исследователей [9], вероятно, впервые используется термин «*Post-potassium-ion batteries*». Под ним понимаются калийсодержащие электрохимические системы, разработка которых началась вслед за КИА. В первую очередь сюда относятся аккумуляторы с анодом из калия или калийсодержащего материала и с катодом на основе серы или селена. В предельном случае это система калий-сера или калий-селен. Электролиты могут быть твердыми, органическими (неводными) или водными. К категории пост-КИА относятся и некоторые другие электрохимические системы.

Обзор [9] имеет такую структуру: введение, батареи на основе системы калий-сера, батареи на основе системы калий-селен, полные твердые К-ионные батареи, металлические калиевые аноды, КИА с водным электролитом, достижения и перспективы применения различных видов батарей. В обзоре в табличной форме приведены сведения об электрохимических характеристиках катодных материалов для батарей на основе систем К – S и К – Se, сравнительные данные об электропроводимости и стабильности различных твердых электролитов, сведения о циклируемости ряда систем электрод-электролит.

Обзор [9] содержит 157 ссылок на оригинальные работы, причем 79,6 % из них (125 ссылок) на статьи, опубликованные в 2016 – 2020 гг. По годам распределение такое: на работы 2016 г. 7 ссылок, 2017 г. – 14, 2018 г. – 35, 2019 г. – 44, 2020 г. – 25 (имеется в виду год не полностью).

Обзор [10] продолжает серию ранее опубликованных в «Журнале прикладной химии» (*Russ. J. Appl. Chem.*) обзоров термодинамической направленности, содержащих сведения о термодинамических свойствах двойных систем, включающих литий или натрий, применяемых в той или иной степени в литий-ионных, натрий-ионных или других электрохимических преобразователях энергии. В 2015 – 2020 гг. (указаны год и номер журнала) описаны системы Li – Si (2015, № 4), Li – Sn (2015, №7), Li – Sb (2015, № 11), Li – Se и Na – Se (2016, № 7), Li – Ge (2016, № 10), Na – S (2017, № 5), Na – Te (2017, № 10), Na – Sn (2018, № 11), Na – Sb (2019, № 3); Li – Te (2020, № 3). В обзоре [10] после краткого введения обсуждаются фазовая диаграмма системы К – S, термодинамические свойства сульфидов калия в твердом состоянии, термодинамические свойства жидких сплавов системы К – S, катодные процессы в полисульфидных расплавах, применение системы К – S в перезаряжаемых источниках тока при комнатной температуре. Сведения для последнего раздела основываются на работах, опубликованных в 2014 – 2020 гг. При этом не преследуется цели полноты их охвата, главным в обзоре является термодинамическое описание системы К – S. Однако все опубликованные наиболее крупные работы, относящиеся к применению системы К – S в перезаряжаемых источниках тока, учтены. Всего в работе 65 ссылок.

Обзор [11] (авторы из Австралии, подписан к печати 5 мая 2020 г.) посвящен активно разрабатываемой проблеме – применению сурьмы и содержащих ее материалов для анодов К-ионных батарей. Высокая химическая активность калия вызывает определенные трудности в выборе устойчивых анодных материалов. Содержащие сурьму наноматериалы (сурьма, ее сплавы, композиты, халькогениды) благодаря высокой удельной емкости, приемлемой величине потенциала выделения калия, относительно невысокой стоимости относятся к числу перспективных

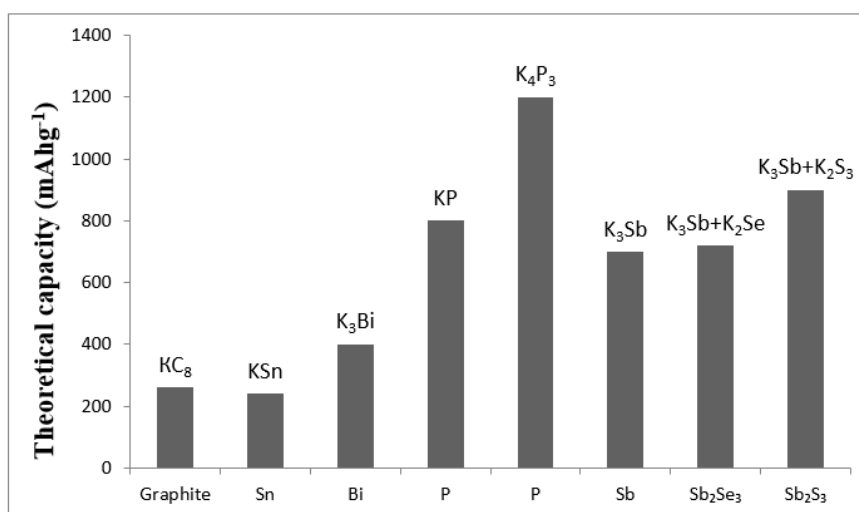


Рис. 3. Теоретические значения разрядной емкости для различных анодных материалов по данным [11]

Fig. 3. Theoretical values of the discharge capacity for various anode materials according to the data [11]

анодных материалов. На представленной ниже диаграмме (рис. 3) сопоставлены теоретические значения удельной разрядной емкости для ряда анодных материалов из категории сплавообразующих. Наиболее высокое значение удельной емкости у соединений с фосфором (KP и  $K_4P_3$ ), но там имеются специфические трудности, хотя система калий – фосфор продолжает быть объектом исследований.

В обзоре [11] имеется 105 ссылок на различные экспериментальные исследования, преимущественно на работы, опубликованные в 2017 – 2020 гг. (90 ссылок, 85,7 %). Распределение по годам такое: на работы 2017 г. 18 ссылок, 2018 г. – 27, 2019 г. – 29, 2020 г. – 16.

Далее очень кратко упомянем о некоторых экспериментальных исследованиях, опубликованных в 2020 г., не претендуя на полноту их охвата.

В работе [12] впервые применена для КИА в качестве электролита *ionic liquid*. Под ионной жидкостью понимают смесь органических соединений, обладающую чисто ионной проводимостью и имеющую низкую температуру плавления. Батарея состояла из графитового анода и соединения  $K_2Mn[Fe(CN)_6]$  – катода. В течение длительного циклирования (200 циклов) при комнатной температуре были получены стабильные зарядные и разрядные характеристики. Исследование выполнено в Японии. Также японскими авторами [13] изучены электролиты, компонентами которых являются соединения  $KPF_6$  и  $KN(SO_2F)_2$ . Оптимизация электролита достигается варьированием соотношения между этими двумя веществами и подбором для них соответствующего органического растворителя (этиленкарбонат, диэтилкарбонат и др.). Сам элемент состоит из графитового анода и катода на основе соединения  $K_2Mn[Fe(CN)_6]$ . В работе приводится обширный экспериментальный материал. Выбору жидкого электролита с ионной проводимостью для аналогичного типа КИА посвящена работа [14] (Великобритания, Италия). Анодом также служил графит, а катодом соединение  $K_2Mn[Fe(CN)_6]$ , электролит жидкий, с ионной проводимостью получены устойчивые результаты при продолжительном циклировании (100 циклов). Исходная емкость батареи после оптимизации электролита  $119 \text{ mA} \cdot \text{ч} \cdot \text{г}^{-1}$ , сохранение емкости после циклирования 87,4%, авторы отмечают перспективность КИА с указанными электродными материалами и электролитом.

В работе [15] (Франция) обсуждается проблема выбора электролита для батареи с анодом из металлического калия.

Большое экспериментальное исследование [16], выполненное целой группой авторов из Австралии и России, посвящено изучению электрохимического поведения анода, представляющего композит из наноструктурированного  $Sb_2S_3$  и восстановленного оксида графена (*reduced grapheme oxide, rGO*):  $Sb_2S_3 - rGO$ . Содержание в композите компонента с высокой емкостью —  $Sb_2S_3 - 80$  мас. %. Максимальная емкость при полном отсутствии калия (*depotassiation capacity*)  $633 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$  при разряде образуются  $K_3Sb$  и  $K_2S_3$ .

В работе [17] (Китай) изучается новый анодный материал — сульфид олова в виде нанокompозита с углеродом, азотом и серой. Теоретическая удельная емкость  $SnS_2 - 733 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$ , он имеет уникальную слоистую структуру. В работе описан метод приготовления нанокompозита. Его испытания показали, что при плотности тока  $0,1 \text{ A}\cdot\text{г}^{-1}$ , обратимая емкость составляет  $614,8 \text{ mA}\cdot\text{ч}\cdot\text{г}^{-1}$ . Как отмечено в работе [17] эта величина в течение 50 циклов хорошо сохраняется.

Современному состоянию и перспективам развития перезаряжаемых источников тока на основе калия посвящена работа [18] (Китай, Сингапур, Австралия), имеющая характер обзора.

Изучению калий-ионных батарей и других перезаряжаемых источников тока с участием калия уделяется огромное внимание. По нашим оценкам с учетом опубликованных в 2020 г. работ общее число публикаций превысит 400. В апреле 2020 г. опубликован большой сборник (можно назвать коллективная монография): «Potassium-Ion Batteries: Materials and Applications». Inamuddin Inamuddin (Editor), Rajender Bodulla (Editor), Abdullah M. Asiri (Editor). John Wiley & Sons, 21 April 2020. Всего страниц 432. Полный текст пока не доступен.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Морачевский А.Г., Попович А.А. Перезаряжаемые источники тока на основе калия и его соединений // *Материаловедение. Энергетика*. 2020. Т. 36, № 3. С. 70–79. DOI: 10.18721/JEST.26305
- [2] Hosaka T., Kubota K., Hameed A.S., Komaba S. Research development on K-ion batteries. *Chem. Rev*, 2020, Vol. 120. 6358–6466.
- [3] Rajagopalan R., Tang Y., Ji X., Jia C., Wang H. Advancements and challenges in potassium ion batteries: a comprehensive review. *Adv. Funct. Mater*, 2020, № 1909486. [1 of 35]
- [4] Anoopkumar V., Bibin J., Mercy T.D. Potassium ion batteries: Key to future large scale energy storage?. *ACS Applied Energy Materials*, 2020, Vol. 3. № 10, 9478–9492.
- [5] Караев R.R., Troshin P.A. Organic-based active electrode materials for potassium batteries: status and perspectives. *J. Mater. Chem. A.*, 2020, Vol. 8 (34), 17296–17325.
- [6] Xu S., Chen Y., Wang C. Emerging organic potassium-ion batteries: electrodes and electrolytes. *J. Mater. Chem. A*, 2020, Vol. 8 (31), 15547–15574.
- [7] Fedotov S.S., Samarin A.S., Antipov E.V.  $KTiOPO_4$  – structured electrode materials for metal-ion batteries: A review *J. Power Sources*, 2020, Vol. 480. 228840 (1 of 17).
- [8] Zhao S., Guo Z., Yan K., Guo X., Wan S., He F., Sun B., Wang G. The rise of prussian blue analogs: challenges and opportunities for high-performance cathode materials in potassium-ion batteries. *Small Struct*, 2020, 200004 (1 of 17).
- [9] Yao Q., Zhu C. Advanced post-potassium-ion batteries as emerging potassium-based alternatives for energy storage. *Adv. Funct. Mater*, 2020, 2005209 (1 of 27).
- [10] Морачевский А.Г. Система калий – сера: термодинамические свойства, электрохимические исследования и перспективы применения в химических источниках тока // *Ж. прикл. Химии*. 2020. Т. 93. № 8. С. 1067–1078.
- [11] Gao H., Guo X., Wang S., Zhang F., Liu H. Antimony-based nanomaterials for high-performance potassium-ion batteries, DOI : 10.1002/eom.2.12027 (*EkoMat*. 2020. 1–19).
- [12] Onuma H., Kubota K., Muratsubaki S., Hosaka T., Tatara R., Yamamoto T., Matsumoto K., Nochi-  
ra T., Hagiwara R., Oji H., Yas S., Komaba S. Application of ionic liquid as K-ion electrolyte of graphite –  $K_2Mn[Fe(CN)_6]$  cell. *ACS Energy Lett*, 2020, Vol. 5, 2849–2857.



[13] Hosaka T., Matsuyama T., Kubota K., Yasuno S., Komaba S. Development of  $KPF_6$  и  $KN(SO_2F)_2$  binary-soft solutions for long-life and high-voltage K-ion batteries. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2020, Vol. 12 (31), 34873–34881.

[14] Fiore M., Wheeler S., Hurlbutt K., Capon I., Fawdon J., Ruffo R., Pasta M. Paving the way toward efficient, high-energy potassium-ion batteries with ionic liquid electrolytes. Chem. Mater, 2020, Vol. 32, 7653–7661.

[15] Touja J., Nam Le Pham P., Louvain N., Monconduit L., Stievano L. Effect of the electrolyte on K-metal batteries, DOI: 10.1039/d0cc05024e.12027 (Chem. Comm. 2020).

[16] Lakshmi V., Mikhaylov A.A., Medvedev A.G., Zhang C., Ramireddy T., Rahman M.M., Cizek P., Golberg D., Chen Y., Lev O., Prihodchenko P.V., Glushenkov A.M. Probing electrochemical reactivity in an  $Sb_2S_3$  – containing potassium-ion battery anode: observation of an increased capacity. J. Mater. Chem. A, 2020, Vol. 8, № 22, 11424–11434.

[17] Gao K., Wang S., Jia Y., Xu D., Liu H., Huang K.-J., Jing Q.-S., Jiao L. Promoting K-ion storage property of SnS2 anode by structure engineering. Chem. Eng. J, 2021, Vol. 406. 126902.

[18] Xu J., Dou S., Cui X., Liu w., Zhang z., Deng Y., Hu W., Chen Y. Potassium-based electrochemical energy storage devices: Development status and future prospect. Energy Storage Mater, 2021, Vol. 34, 85–106.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**МОРАЧЕВСКИЙ Андрей Георгиевич** – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.  
E-mail: morachevski@mail.ru

**ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич** – директор Института машиностроения, материалов и транспорта, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.  
E-mail: popovicha@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 08.02.2021

### REFERENCES

[1] A.G. Morachevskiy, A.A. Popovich, Perezaryazhayemyye istochniki toka na osnove kaliya i yego soyedineniy // Materialovedeniye. Energetika. 2020. T. 36, № 3. S. 70–79.

[2] T. Hosaka, K. Kubota, A.S. Hameed, S. Komaba, Research development on K-ion batteries // Chem. Rev. 2020/ V. 120. P. 6358–6466.

[3] R. Rajagopalan, Y. Tang, X. Ji, C. Jia, H. Wang, Advancements and hallenges in potassium ion batteries: a comprehensive review // Adv. Funct. Mater. 2020. № 1909486. [1 of 35]

[4] V. Anoopkumar, J. Bibin, T.D. Mercy, Potassium ion batteries: Key to future large scale energy storage? // ACS Applied Energy Materials. 2020. V. 3. № 10. P. 9478–9492.

[5] R.R. Kapayev, P.A. Troshin, Organic-based active electrode materials for potassium batteries: status and perspectives // J. Mater. Chem. A. 2020. V. 8 (34). P. 17296–17325.

[6] S. Xu, Y. Chen, C. Wang, Emerging organic potassium-ion batteries: electrodes and electrolytes // J. Mater. Chem. A. 2020. V. 8 (31). P. 15547–15574.

[7] S.S. Fedotov, A.S. Samarin, E.V. Antipov,  $KTiOPO_4$  – structured electrode materials for metal-ion batteries: A review J. Power Sources. 2020. V. 480. 228840 (1 of 17).

[8] S. Zhao, Z. Guo, K. Yan, X. Guo, S. Wan, F. He, B. Sun, G. Wang, The rise of prussian blue analogs: challenges and opportunities for high-performance cathode materials in potassium-ion batteries // Small Struct. 2020. 200004 (1 of 17).

- [9] **Q. Yao, C. Zhu**, Advanced post-potassium-ion batteries as emerging potassium-based alternatives for energy storage // *Adv. Funct. Mater.* 2020. 2005209 (1 of 27).
- [10] **A.G. Morachevskii**, Potassium-sulfur system: thermodynamic properties, electrochemical studies and prospects for use in chemical current sources. *Russ. J. Appl. Chem.* 2020. V. 93. № 8. P. 1103–1114.
- [11] **H. Gao, X. Guo, S. Wang, F. Zhang, H. Liu**, Antimony-based nanomaterials for high-performance potassium-ion batteries // DOI: 10.1002/eom.2.12027 (*EkoMat.* 2020. 1 – 19).
- [12] **H. Onuma, K. Kubota, S. Muratsubaki, T. Hosaka, R. Tatara, T. Yamamoto, K. Matsumoto, T. Nochira, R. Hagiwara, H. Oji, S. Yas, S. Komaba**, Application of ionic liquid as K-ion electrolyte of graphite –  $K_2Mn[Fe(CN)_6]$  cell // *ACS Energy Lett.* 2020. V. 5. P. 2849–2857.
- [13] **T. Hosaka, T. Matsuyama, K. Kubota, S. Yasuno, S. Komaba**, Development of  $KRF_6$  i  $KN(SO_2F)_2$  binary-soft solutions for long-life and high-voltage K-ion batteries // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2020. V. 12 (31). P. 34873–34881.
- [14] **M. Fiore, S. Wheeler, K. Hurlbutt, I. Capon, J. Fawdon, R. Ruffo, M. Pasta**, Paving the way toward efficient, high-energy potassium-ion batteries with ionic liquid electrolytes // *Chem. Mater.* 2020. V. 32. P. 7653–7661.
- [15] **J. Touja, P. Nam Le Pham, N. Louvain, L. Monconduit, L. Stievano**, Effect of the electrolyte on K-metal batteries // DOI: 10.1039/d0cc05024e.12027 (*Chem. Comm.* 2020).
- [16] **V. Lakshmi, A.A. Mikhaylov, A.G. Medvedev, C. Zhang, T. Ramireddy, M.M. Rahman, P. Cizek, D. Golberg, Y. Chen, O. Lev, P.V. Prikhodchenko, A.M. Glushenkov**, Probing electrochemical reactivity in an  $Sb_2S_3$  – containing potassium-ion battery anode: observation of an increased capacity // *J. Mater. Chem. A.* 2020. V. 8. № 22. P. 11424–11434.
- [17] **K. Gao, S. Wang, Y. Jia, D. Xu, H. Liu, K.-J. Huang, Q.-S. Jing, L. Jiao**, Promoting K-ion storage property of  $SnS_2$  anode by structure engineering // *Chem. Eng. J.* 2021. V. 406. 126902.
- [18] **J. Xu, S. Dou, X. Cui, w. Liu, z. Zhang, Y. Deng, W. Hu, Y. Chen**, Potassium-based electrochemical energy storage devices: Development status and future prospect // *Energy Storage Mater.* 2021. V. 34. P. 85–106.

## THE AUTHORS

**MORACHEVSKIY Andrey G.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: morachevski@mail.ru

**POPOVICH Anatoliy A.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*  
E-mail: popovicha@mail.ru

Received: 08.02.2021