

**Программа утверждена на заседании  
Ученого Совета химического факультета  
МГУ имени М.В.Ломоносова  
Протокол № 3 от 24 апреля 2015 г.**

### **Рабочая программа дисциплины (модуля)**

1. Наименование дисциплины (модуля): Материалы для электрохимической энергетики

Краткая аннотация:

Программа курса «Материалы для электрохимической энергетики» предназначена для аспирантов, специализирующихся в области химии неорганических веществ и материалов. Данный курс направлен на углубленное изучение современных материалов для различных электрохимических устройств – химических источников тока (ХИТ), включая аккумуляторы, суперконденсаторы, а также топливные элементы. Курс состоит из двух разделов: первый раздел посвящен вторичным источникам тока, а именно суперконденсаторам и аккумуляторам, второй раздел – топливным элементам.

В рамках первого раздела курса кратко рассматриваются физико-химические основы ХИТ, термодинамики и кинетики электродных процессов, протекающих в них. Рассмотрены основные виды ХИТ, а также основные области их применения. Раздел состоит из двух связанных частей. Первая часть посвящена современным материалам для суперконденсаторов, тогда как вторая - аккумуляторам. Во второй части подробно рассматриваются литий-ионные аккумуляторы, механизм литий-ионного транспорта в них, а также электролиты и электродные материалы. Далее рассмотрены материалы для альтернативных систем, включая литий-серные и литий-воздушные аккумуляторы. В заключении раздела рассматриваются материалы других металл-ионных систем (Na, Mg, Al).

Во втором разделе рассмотрены материалы топливных элементов. В первой части раздела приводится классификация топливных элементов, рассматриваются преимущества и недостатки различных типов топливных элементов. На примере щелочных и твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) кратко рассмотрены механизмы электродных процессов и основные источники падения потенциала на электродах. Основная часть данного раздела посвящена материалам ТОТЭ. Подробно рассматриваются современные материалы электролита, анода и коммутационного элемента ТОТЭ. Рассмотрен механизм реакции восстановления кислорода на катоде ТОТЭ. В заключительной части раздела обсуждаются катодные материалы высокотемпературного и среднетемпературного ТОТЭ, их основные характеристики. Рассмотрены способы воздействия на высокотемпературную электропроводность, термическое расширение и кислород-ионную проводимость различных катодных материалов на основе перовскитоподобных оксидов переходных металлов.

2. Уровень высшего образования – подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре

3. Направление подготовки: 04.06.01 Химические науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре ООП: вариативная часть ООП, блок 1 «Дисциплины (модули)», которую учащийся может освоить на выбор из списка предложенных в период обучения, отмеченный в базовом учебном плане, в течение 1 или 2 года обучения, во втором или четвертом семестре (по выбору аспиранта).

5. Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

<b>Формируемые компетенции (код компетенции)</b>	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)</b>
УК-1 способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	В1 (УК1) <b>Владеть</b> навыками анализа методологических проблем, возникающих при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях
	У2 (УК1) <b>Уметь</b> при решении исследовательских и практических задач генерировать новые идеи, поддающиеся операционализации исходя из наличных ресурсов и ограничений
УК-2 способность проектировать и осуществлять комплексные исследования, в том числе междисциплинарные, на основе целостного системного научного мировоззрения с использованием знаний в области истории и философии науки	З1 (УК-2) <b>Знать</b> методы научно-исследовательской деятельности
ОПК-1 способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных техно-	В2 (ОПК-1) <b>Владеть</b> навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов и формулировки выводов
	У1 (ОПК-1) <b>Уметь</b> выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические ме-

логий	годы исследования
ПК-1 Способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы и получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности (научной специальности) 02.00.01 Неорганическая химия	33 (ПК-1) <b>Знать</b> современное состояние науки в области материалов для электрохимических устройств
ПК-16 Способность к самостоятельному проведению научно-исследовательской работы и получению научных результатов, удовлетворяющих установленным требованиям к содержанию диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по направленности (научной специальности) 02.00.21 Химия твердого тела	38 (ПК-16) <b>Знать</b> фундаментальные подходы к созданию материалов с заданными физико-химическими свойствами, важными при использовании в различных электрохимических устройствах

6. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

*Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетные единицы, всего 108 часов, из которых 36 часов составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (24 часа занятия лекционного типа, 4 часа – занятия семинарского типа, 4 часа консультации, 4 часа мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 72 часа составляет самостоятельная работа учащегося.*

7. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия.

Знать: термины и понятия, известные из курсов неорганической, физической химии, электрохимии и кристаллохимии.

Уметь: анализировать данные литературы.

Владеть: основами математической обработки результатов экспериментов

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам.

<b>Наименование и краткое</b>	<b>Всего</b>	<b>В том числе</b>
-------------------------------	--------------	--------------------

содержание разделов и тем дисциплины (модуля),  форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	(часы)	Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них					Самостоятельная работа обучающегося, часы из них		
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Текущий контроль успеваемости, промежуточная аттестация	Всего	Выполнение домашних заданий	Работа с оригинальной литературой по подготовке рефератов и т.п.
Тема 1. <b>Электрохимические накопители энергии</b> Виды электрохимических накопителей и области их применения. Конструкции и основные характеристики суперконденсаторов. Первичные и вторичные ХИТ. Катодные, анодные материалы и электролиты в ХИТ. Устройство и принцип работы литий-ионных аккумуляторов (ЛИА). Материалы для ЛИА. Натрий-ионные аккумуляторы. ХИТ на основе мультивалентных ка-	56	16	2	2			2		34

тионов металлов.									
Тема 2 <b>Топливные элементы</b> Типы топливных элементов (ТЭ) и их классификация. Материалы компонентов различных типов ТЭ. Твердооксидный топливный элемент (ТОТЭ). Катодные материалы ТОТЭ. Катодные материалы для среднетемпературных ТОТЭ на основе Fe, Co, Ni и Cu-содержащих перовскитов.	48	8	2	2				2	34
Промежуточная аттестация <u>зачет</u>	4					4			
<b>Итого</b>	<b>108</b>	24	4	4		4	<b>36</b>	4	<b>72</b>

#### 8. Образовательные технологии

Преподавание дисциплин в форме авторских курсов по программам, составленным на основе результатов исследований научных школ МГУ.

#### 9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю):

Аспирантам предоставляется программа курса, план занятий и перечень домашних заданий. По теме каждой лекции указывается материал в источниках из списков основной и вспомогательной литературы.

#### 10. Ресурсное обеспечение:

- Перечень основной и вспомогательной учебной литературы ко всему курсу

### **Основная литература**

1. B. E. Conway. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications. Springer, 1999
2. Advanced batteries. Edited by R.Huggins. Springer, 2009
3. Lithium Batteries: Advanced Technologies and Applications. Edited by B. Scrosati, K.M. Abraham, W. Van Schalkwijk, J. Hassoun. JohnWiley&Sons, 2013
4. V.S. Bagotsky, A.M. Skundin, Y.M. Volfkovich. Electrochemical Power Sources: Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors. Wiley, 2015
5. A.J. Bard, L.R. Faulkner. Electrochemical methods: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons, 2000.
6. А.К. Иванов-Шиц, И.В. Мурин. Ионика твердого тела. Том I. Изд-во СПб университета, 2000.
7. J. C. Larminie, A. Dicks. Fuel Cell Systems Explained, John Wiley and Sons Ltd, New York, 2nd edn, 2003
8. Э. Юсти, А. Винзель. Топливные элементы. Мир, Москва, 1964
9. В.С. Багоцкий, А.М. Скундин. Химические источники тока. Энергоиздат, Москва, 1981
10. High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications. (Eds. S.C. Singhal, K. Kendall). Elsevier, Oxford, U.K., 2003.
11. T. Ishihara (Ed.), Perovskite Oxide For Solid Oxide Fuel Cells, Springer, 2009.

### **Дополнительная литература**

1. Linden's Handbook of Batteries, 4th Edition. Edited by T.B.Reddy. McGraw-Hill, 2010
2. С.Я. Истомин, Е.В. Антипов, Катодные материалы на основе перовскитоподобных оксидов переходных металлов для среднетемпературных твердооксидных топливных элементов, Успехи химии 82 (7) 686-700 (2013).

- Перечень используемых информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса, включая программное обеспечение, информационные справочные системы (при необходимости):

Нет

11. Язык преподавания – русский

12. Преподаватели:

доктор хим. наук, профессор Антипов Евгений Викторович, antipov@icr.chem.msu.ru, 8-495-939-33-75

канд. хим. наук, старший научный сотрудник Дрожжин Олег Андреевич, garuque@gmail.com, 8-495-939-34-90

канд. хим. наук, старший научный сотрудник Иткис Даниил Михайлович, daniil.itkis@gmail.com, 8-495-939-34-90

канд. хим. наук, доцент Истомин Сергей Яковлевич, istomin@icr.chem.msu.ru, 8-495-939-34-90

канд. хим. наук, ведущий научный сотрудник Хасанова Нелли Ракиповна, nelliemsu@gmail.com, 8-495-939-34-90

### **Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения**

1. Планируемые результаты обучения для формирования компетенций п.5 и соответствующие им критерии оценивания приведены в Приложении 1.

2. Образцы оценочных средств для текущего контроля усвоения материала и промежуточной аттестации

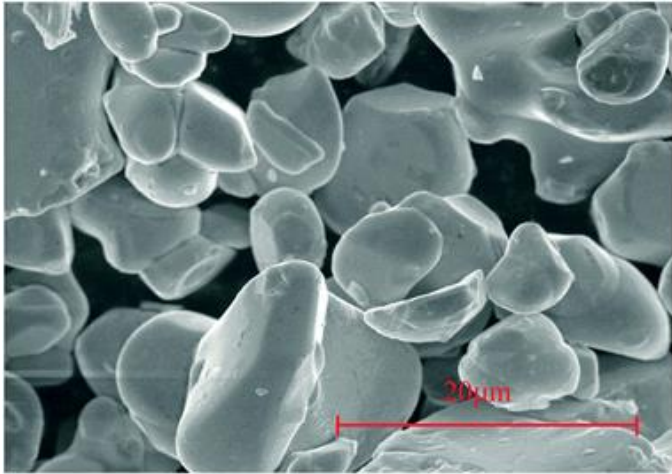
#### **1. Теоретические вопросы**

1. Принцип работы суперконденсатора, электролиты и электродные материалы для суперконденсаторов.
2. Механизм восстановления кислорода с участием перовскитов переходных металлов, содержащих Fe, Co, Ni и Cu. Требования к катодному материалу среднетемпературного ТОТЭ.
3. Равновесный потенциал и методы его определения. Связь электронной структуры электродных материалов и потенциала электрода. Примеры отрицательных и положительных электродных материалов для ЛИА.
4. Активационная и концентрационная поляризация. Влияние поляризации на характеристики ЛИА.
5. Щелочной топливный элемент. Выбор материалов компонентов ЩТЭ. Дескрипторы каталитической активности реакции восстановления кислорода в щелочной среде.
6. Электролиты ТОТЭ на основе оксидов со структурой флюорита. Требования к материалу электролита ТОТЭ.
7. Основные катодные материалы на основе перовскитоподобных оксидов, содержащих катионы кобальта, никеля и меди. Влияние кристаллической структуры сложных слоистых купратов  $R_2CuO_4$  на их высокотемпературную кислород-ионную проводимость.

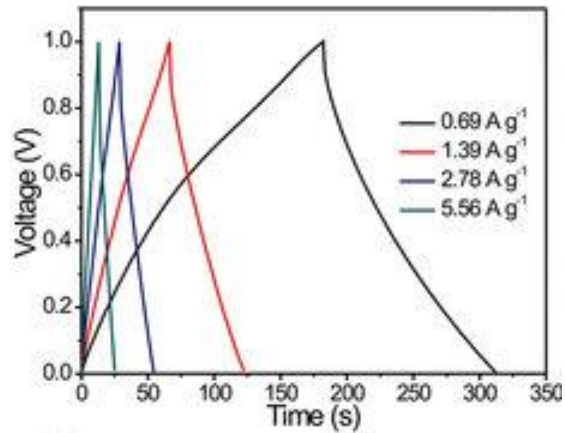
#### **2. Расчетные задачи или тесты (ПКЗ)**

1. На микрофотографии изображена микроструктура порошка  $LiCoO_2$ . Рассчитайте его теоретическую удельную емкость и максимальный ток, при котором возможно достижение такой емкости на практике, считая коэффициент диффузии  $Li^+$  равным  $10^{-9}$

см<sup>2</sup>/с.



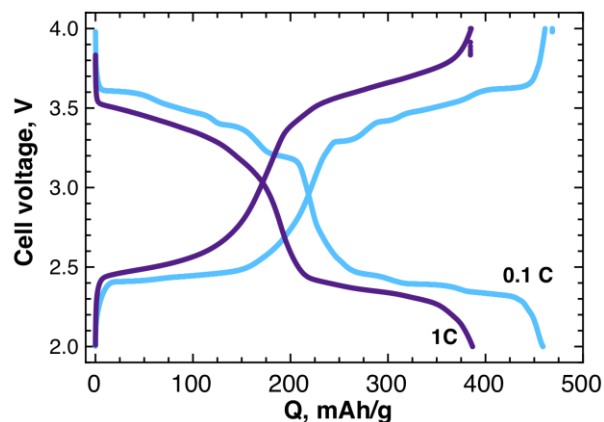
2. На рисунке изображены зарядно-разрядные кривые симметричного суперконденсатора на различных токах. Оцените емкость данного суперконденсатора и удельную емкость его электродного материала. Масса материала на каждом электроде составляла 4 мг.



3. Рассчитайте теоретическую удельную энергию аккумулятора с отрицательным электродом на основе графита и положительным электродом на основе LiFePO<sub>4</sub>. Оцените его практическую удельную энергию.



4. На рисунке изображены разрядные и зарядные кривые ячейки, состоящей из металлического литиевого отрицательного электрода и положительного электрода из оксидного материала, интеркалирующего литий. Объясните наблюдаемую разницу в кривых для различных токов. Изобразите участок фазовой диаграммы в координатах «температура – состав» для данного оксида в области комнатной температуры, при которой и были проведены измерения.



### Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения

Зачет проводится по билетам, каждый из которых включает теоретические вопросы и практическое контрольное задание (ПКЗ). Уровень знаний аспиранта оценивается на «зачтено», «незачтено». Оценка «зачтено» выставляется, если по шкале оценивания учащийся демонстрирует знания умения и владения, соответствующие категориям 3, 4 и 5. В ходе зачета, проводимого в форме индивидуального собеседования, оценивается степень сформированности «знаниевой» компоненты компетенций УК-1, УК-2, ПК-1 и ПК-16 (знание современного состояния науки в области материалов для электрохимических устройств). Частично сформированность умения выбирать и применять в профессиональной деятельности экспериментальные и расчетно-теоретические методы исследования (ОПК-1) проверяется при выполнении ПКЗ, их оценка учитывается как одна из составляющих при выставлении зачета.

**Оценочные средства для промежуточной аттестации по дисциплине Материалы для электрохимической энергетики  
на основе карт компетенций выпускников**

<b>РЕЗУЛЬТАТ ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю)</b>	<b>КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю) и ШКАЛА оценивания</b>					<b>ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНИВАНИЯ*</b>
	1	2	3	4	5	
<b>В1 (УК-1)</b>	Отсутствие знаний в области материалов для электрохимической энергетики	Фрагментарные знания в области материалов для электрохимической энергетики	Общие, но не структурированные знания в области материалов для электрохимической энергетики	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания в области материалов для электрохимической энергетики	Сформированные систематические знания в области материалов для электрохимической энергетики.	Зачет в форме индивидуального собеседования
<b>У2 (УК-1)</b>	Отсутствие умений в решении материаловедческих задач в области материалов для электрохимической энергетики	Частично освоенное умение в решении материаловедческих задач в области материалов для электрохимической энергетики	В целом успешно, но не систематически осуществляемые умения в решении материаловедческих задач в области материалов для электрохимической энергетики	В целом успешно, но содержащие отдельные пробелы в умении решать материаловедческие задачи в области материалов для электрохимической энергетики	Сформированное умение анализировать и решать материаловедческие задачи в области материалов для электрохимической энергетики	письменное решение задач на семинарских занятиях

	1	2	3	4	5	
31 (УК-2)	Отсутствие знаний в области различных электрохимических устройств	Фрагментарные знания в области различных электрохимических устройств	Неполные знания в области различных электрохимических устройств	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания в области различных электрохимических устройств	Сформированные и систематические знания в области различных электрохимических устройств	Зачет в форме индивидуального собеседования
В2 (ОПК-1)	Отсутствие умений	Частично освоенное умение в выборе и применении экспериментальных и расчетно-теоретических методов исследования материалов для электрохимической энергетики	В целом успешное, но не систематическое умение в выборе и применении экспериментальных и расчетно-теоретических методов исследования материалов для электрохимической энергетики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение в выборе и применении экспериментальных и расчетно-теоретических методов исследования материалов для электрохимической энергетики	Успешное и систематическое умение в выборе и применении экспериментальных и расчетно-теоретических методов исследования материалов для электрохимической энергетики	письменное решение задач
33 (ПК-1)	Отсутствие знаний о современном состоянии науки в области материалов для электрохимических устройств	Фрагментарные представления о современном состоянии науки в области материалов для электрохимических устройств	Неполные представления о современном состоянии науки в области материалов для электрохимических устройств	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы представления о современном состоянии науки в области материалов для электрохимических устройств.	Сформированные систематические представления о современном состоянии науки в области материалов для электрохимических устройств	Зачет в форме индивидуального собеседования

	1	2	3	4	5	
38 (ПК-16) <b>Знать</b> фундаментальные подходы к созданию материалов с заданными физико-химическими свойствами, важными при использовании в различных электрохимических устройства	Отсутствие знаний о фундаментальных подходах к созданию материалов с заданными физико-химическими свойствами, важными при использовании в различных электрохимических устройствах	Фрагментарные представления о фундаментальных подходах к созданию материалов с заданными физико-химическими свойствами, важными при использовании в различных электрохимических устройствах	Неполные представления о фундаментальных подходах к созданию материалов с заданными физико-химическими свойствами, важными при использовании в различных электрохимических устройствах	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания о фундаментальных подходах к созданию материалов с заданными физико-химическими свойствами, важными при использовании в различных электрохимических устройствах.	Сформированные систематические знания о фундаментальных подходах к созданию материалов с заданными физико-химическими свойствами, важными при использовании в различных электрохимических устройствах.	Зачет в форме индивидуального собеседования