

УДК 621.35(075)  
ББК 31.251я7  
Х46

*Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Казанского национального исследовательского технологического университета*

*Рецензенты:  
д-р хим. наук, проф. РАН Д. Г. Яхваров  
д-р физ.-мат. наук, проф. В. В. Парфенов*

**Авторы: А. Ф. Дресвянников, М. Е. Колпаков,  
И. О. Григорьева, Ж. В. Межевич, М. К. Кадиоров,  
С. Ю. Ситников**

**Х46** Химические источники электрической энергии : учебное пособие /  
А. Ф. Дресвянников [и др.]; Минобрнауки России, Казан. нац. ис-  
след. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2020. – 300 с.

ISBN 978-5-7882-2836-5

Рассмотрены теоретические основы и технологии получения химических источников тока, принципы и особенности их эксплуатации, схемы наиболее распространенных классических и современных электрохимических устройств, их характеристики и сферы применения.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 18.03.01 «Химическая технология» и 27.03.01 «Стандартизация и метрология».

Подготовлено на кафедре технологии электрохимических производств.

**УДК 621.35(075)  
ББК 31.251я7**

ISBN 978-5-7882-2836-5

© Дресвянников А. Ф., Колпаков М. Е.,  
Григорьева И. О., Межевич Ж. В.,  
Кадиоров М. К., Ситников С. Ю., 2020

© Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1. ОСНОВЫ ТЕОРИИ, ТИПЫ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА И ИХ БАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	5
1.1. Основные понятия электрохимии.....	5
1.2. Термодинамика гальванического элемента .....	8
1.3. Разновидности и основные характеристики ХИТ .....	16
1.3.1. Электрические характеристики ХИТ .....	23
1.3.2. Эксплуатационные характеристики ХИТ .....	29
Глава 2. ПЕРВИЧНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА .....	33
2.1. Марганцево-цинковые элементы .....	34
2.2. Первичные ХИТ с цинковыми анодами .....	42
2.3. Первичные ХИТ с литиевыми анодами.....	44
2.4. Первичные ХИТ с воздушными электродами.....	55
2.4.1. Первичные воздушно-цинковые ХИТ.....	58
2.4.2. Механически перезаряжаемые ХИТ.....	61
2.4.3. Электрически перезаряжаемые ХИТ .....	64
Глава 3. ВТОРИЧНЫЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ.....	67
3.1. Материалы, используемые в аккумуляторах (батареях) .....	69
3.2. Виды аккумуляторов .....	70
3.3. Свинцово-кислотные аккумуляторные батареи .....	75
3.3.1. Механизм токообразующих процессов в свинцовом аккумуляторе.....	78
3.3.2. Современные типы свинцово-кислотных аккумуляторов .....	80

3.3.3. Характеристики свинцово-кислотных аккумуляторов .....	87
3.3.4. Современные технологии свинцово-кислотных аккумуляторов .....	89
3.4. Щелочные аккумуляторы .....	92
3.4.1. Никель-кадмиевые аккумуляторы (Ni–Cd) .....	94
3.4.2. Никель-металлгидридные аккумуляторы (Ni–MH) .....	104
3.4.3. Никель-железные (Ni–Fe) аккумуляторы .....	115
3.4.4. Никель-цинковые аккумуляторы (Ni–Zn) .....	123
3.4.5. Серебряно-цинковые аккумуляторы (Ag–Zn) .....	129
3.4.6. Никель-водородные аккумуляторы (Ni–H) .....	139
Глава 4. ЛИТИЙ-ИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ .....	147
4.1. Принцип работы литий-ионных аккумуляторов .....	149
4.1.1. Отрицательный электрод .....	151
4.1.2. Положительный электрод .....	153
4.1.3. Сепаратор .....	157
4.1.4. Электролит .....	160
4.2. Перспективные химические источники электрической энергии .....	165
4.3. Особенности эксплуатации литий-ионных аккумуляторов .....	176
4.4. Утилизация литий-ионных аккумуляторов .....	179
Глава 5. ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ .....	183
5.1. Основные типы топливных элементов .....	186
5.2. Полимерные электролиты .....	204
5.2.1. Структура перфторсульфонированных мембран .....	205

5.2.2. Механизмы деградации перфторсульфонированных мембран.....	208
5.3. Метод спиновых ловушек в исследовании ТЭ in situ .....	210
5.4. Некоторые результаты исследования ТЭ.....	214
Глава 6. ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА.....	219
6.1. Получение водорода.....	221
6.1.1. Электролиз воды и водных растворов .....	223
6.1.2. Щелочной электролизер .....	227
6.1.3. Электролизер с твердополимерным электролитом.....	233
6.1.4. Твердооксидный электролизер .....	237
6.1.5. Совершенствование методов электролиза воды .....	238
6.2. Хранение водорода .....	240
6.2.1. Классификация методов хранения водорода .....	241
6.2.2. Хранение газообразного водорода .....	242
6.2.3. Хранение жидкого водорода .....	244
6.2.4. Хранение и транспортирование водорода в химически связанном состоянии.....	245
6.2.5. Гидридная система хранения водорода .....	246
6.2.6. Криоадсорбционное хранение водорода .....	249
Глава 7. СУПЕРКОНДЕНСАТОРЫ .....	253
7.1. Классификация суперконденсаторов.....	256
7.1.1. Электрохимические двухслойные суперконденсаторы.....	257
7.1.2. Псевдосуперконденсаторы.....	259
7.1.3. Гибридные суперконденсаторы.....	260

7.2. Материалы для электродов ДСК .....	261
7.3. Технологии изготовления суперконденсаторов.....	266
Глава 8. СВЯЗЬ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ (ХИЭЭ) С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ И ЭНЕРГЕТИКОЙ В ЦЕЛОМ .....	271
8.1. Комбинированные системы электроснабжения на возобновляемых источниках энергии.....	275
8.2. Комбинированная энергетическая система на основе ДГУ, НЭ и ВИЭ.....	277
8.3. Солнечные батареи .....	280
8.4. Аккумуляторные батареи .....	282
8.5. Инверторы напряжения .....	285
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	288