

**ИНТЕРНАУКА**  
*internauka.org*

*На правах рукописи*

Лебедева Марина Владимировна,  
Яштулов Николай Андреевич

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
ФОРМИРОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ  
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Монография

Москва  
2020

УДК 544.6

ББК 24.5

Л33

Рецензенты:

*Смирнов С.Е.* – д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ»;

*Самойлов В.М.* – д-р техн. наук, начальник управления научно-технического развития, АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита «НИИГрафит».

ISBN 978-5-6044619-0-7

**Лебедева М.В., Яштулов Н.А.**

**Л33 «Физико-химические основы формирования наноматериалов для альтернативных источников энергии»: – Монография. – Москва, Изд. «Интернаука», 2020. – 94 с.**

В представленной монографии приводится обзор альтернативных источников энергии, в том числе, возобновляемых источников энергии, их классификация, особенности и характеристики. Уделено внимание роли развития и совершенствования технологии топливных элементов для эффективного энергосбережения. Рассмотрены типы конструкций топливных элементов, виды топлив для их функционирования, а также области применения. Описаны особенности наноэлектрокатализа, в частности, механизмов электрохимических реакций, протекающих в топливных элементах. Приведены физико-химические свойства и характеристики твердых полимерных электролитов на примере полимера Нафион, модифицирование мембраны наночастицами, механизм переноса протона.

Монография предназначена преподавателям, научным сотрудникам, студентам и аспирантам научно-исследовательских учреждений и ВУЗов с техническими и технологическими специальностями, занимающихся проблемами физической химии, наноэлектрокатализа и электроэнергетики.

ББК 24.5

ISBN 978-5-6044619-0-7

© Лебедева М.В., Яштулов Н.А., 2020

© ООО «Интернаука», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ:

<b>Введение .....</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. Введение в электроэнергетику .....</b>	<b>8</b>
1.1. Классификация возобновляемых источников энергии .	8
1.1.1. Биоэнергетика .....	11
1.1.2. Геотермальная энергия.....	11
1.1.3. Ветроэнергетика .....	12
1.1.4. Гидроэнергетика .....	12
1.1.5. Солнечная энергетика .....	13
1.2. Физико-химические основы функционирования химических источников тока .....	14
1.2.1. Классификация топливных элементов, принцип действия .....	14
1.2.2. Характеристика водородного и водородсодержащего топлива .....	18
1.2.3. Особенности конструкции топливных элементов .....	22
1.2.4. Области применения топливных элементов ....	25
<b>Глава 2. Нанозлектрокатализаторы для топливных элементов .....</b>	<b>28</b>
2.1. Механизмы реакций в топливных элементах .....	28
2.1.1. Механизм реакции окисления метанола и этанола .....	28

2.1.2. Механизм реакции восстановления кислорода	32
2.2. Нанoeлектрокатализаторы для ТЭ на основе платины и палладия	35
<b>Глава 3. Полимерные матрицы-носители для электродов в топливных элементах</b>	<b>40</b>
3.1. Общая характеристика и свойства твердых полимерных электролитов	40
3.2. Модифицирование твердых полимерных мембран функциональными наполнителями	43
3.3. Характеристика явлений переноса в топливных элементах с твердым полимерным электролитом	48
3.3.1. Механизм переноса протона. Комплексы Эйгена и Зунделя	50
3.3.2. Физико-химическое моделирование механизма транспортных явлений и переноса протона в полимерной мембране Нафион	53
<b>Заключение</b>	<b>65</b>
<b>Благодарности</b>	<b>68</b>
<b>Список сокращений</b>	<b>69</b>
<b>Список литературы</b>	<b>70</b>
<b>Сведения об авторах</b>	<b>81</b>
<b>Приложение</b>	<b>82</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Нанотехнологические подходы к разработкам функциональных материалов дают возможность конструировать альтернативные источники энергии (АИЭ) нового поколения и, в частности, топливные элементы (ТЭ) с высокими удельными характеристиками. Энергоустановки на базе АИЭ, в том числе, возобновляемые источники энергии (ВИЭ), которые интенсивно развиваются в последние десятилетия, вносят все больший вклад в генерацию электроэнергии с помощью водородсодержащих топлив и биомассы. К АИЭ, в первую очередь, относятся ВИЭ на основе биоэнергетики, геотермальной энергетики, ветроэнергетики, гидроэнергетики, солнечной энергетики. Составной частью АИЭ является водородная энергетика, в особенности, одно из ее самых перспективных направлений – топливные элементы.

Возобновляемые источники энергии заменяют традиционные виды топлива в четырех различных областях: производство электроэнергии, отопление помещений, топливо для транспорта и энергоустановки для сельского хозяйства [46, 84, 25, 59, 86, 5, 82, 44, 108, 51, 30, 2, 39]. Около 16 % мирового потребления энергии поступает из возобновляемых источников энергии, причем 10 % приходится на традиционную биомассу, что, главным образом, используется для отопления, и 3,3 процента от гидроэнергетики. На новые возобновляемые источники энергии, такие как малые гидроэлектростанции, ветроэнергетику, солнечные батареи и геотермальные источники приходится около 2,7 % [46, 84, 25, 59, 86, 5, 82].

К настоящему времени, благодаря современным разработкам в области нано- и микроэлектроники, вычислительной техники, медицины, приборостроении, наблюдается увеличение темпов спроса на автономные преобразователи энергии. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 года «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года» № 1715-р предусмотрена поддержка проектов по разработке новых эффективных источников энергии.

Одним из основных путей решения задач развития современной энергетики, экономии энергетических и сырьевых ресурсов, осуществления мер по защите окружающей среды является разработка и использование прямых методов преобразования химической энергии в электрическую [46, 86, 82, 44, 108, 51, 30, 2, 39, 131, 66, 126, 79, 111, 55, 34, 97, 47, 125, 72, 75, 54, 132, 74, 58, 95, 100, 114, 134, 6]. Электрохимический метод преобразования энергии лежит в основе электрохимической энергетики, охватывающей как генерацию, так и аккумулярование энергии. Электрохимическая энергетика охватывает процессы и устройства генерации и аккумулярования электрической энергии с помощью физико-химических и электрохимических методов.

Электрохимическим методом можно преобразовать электрическую энергию в химическую и таким образом накапливать, аккумулировать электрическую энергию в химической форме. Процессы преобразование химической энергии в электрическую осуществляются в автономных источниках энергии: гальванических элементах, топливных элементах, аккумуляторах, суперконденсаторах [44, 108, 51, 30, 2, 39, 131, 66, 126, 79, 111, 55, 34, 97, 47, 125, 72, 75, 54, 132, 74, 58, 95, 100, 114, 134]. В настоящее время основной долей энергии, используемой человечеством, является химическая энергия реакции горения природного топлива: топливо + кислород = продукты окисления топлива. Особенная роль в развитии автономных источников энергии принадлежит топливным элементам (ТЭ) и энергоустановкам на их основе – электрохимическим генераторам (ЭХГ).

В настоящее время к топливам, пригодным для использования в элементах, принадлежат низшие углеводороды и алифатические спирты, а также водород. Почти все они в ископаемой форме в чистом виде не встречаются и представляют собою искусственные виды топлива.

Работы по созданию эффективных энергоустройств ведутся различными научными и конструкторскими организациями во многих странах. Электрохимические установки находят применение как для электро- и теплоснабжения отдельных объектов (стационарные энергоустановки), привода транспортных устройств, так и энергообеспечения космических аппаратов и подводных объектов [46, 84, 25, 59, 86, 5, 82, 44, 108, 51, 30, 2, 39, 131, 66, 126, 79, 111, 55, 34, 97, 47, 125, 72, 75, 54, 132, 74, 58, 95, 100, 114, 134, 56].

Дальнейший прогресс в повышении эксплуатационных характеристик химических источников тока (ХИТ) заключается в разработке новых химических технологий создания высокоэффективных конструкционных материалов на основе совершенствования физико-химических подходов функционирования элементной базы мембранно-электродных блоков. В связи с этим стратегической задачей современной технологии является оптимизация физико-химических параметров источников тока, которые позволят обеспечить более эффективные и экономичные режимы эксплуатации АИЭ.

Развитие и разработка инженерных основ технологии формирования источников электропитания является принципиальной научной проблемой современной нано- и микроэлектроники, вычислительной техники и коммуникационных систем по обеспечению энергетической безопасности и энергоэффективности современного техногенного общества. Ведущими научными коллективами проводятся систематические исследования в смежных областях знаний (физика, материаловедение, энергетика, химия) с привлечением последних достижений в сфере

нанотехнологий. Принципиальная научная проблема, которая стоит перед исследователями, состоит в формировании материалов не только с малыми экономическими затратами, но и с повышенными удельными характеристиками для конструирования портативных источников тока. Благодаря комплексному анализу составов высокоэффективных материалов, оптимальном выборе конструкционной матрицы-подложки, совершенствованию методов формирования наноразмерных объектов будут предложены экологически чистые новые функциональные электродные материалы для создания микромощных мембранно-электродных блоков для элементов питания [44, 108, 51, 30, 2, 39, 131, 66, 126, 79, 111, 55, 34, 97, 47, 125, 72, 75, 54, 132, 74, 58, 95, 100, 114, 134, 56, 6, 102, 40, 90, 85, 81, 120, 135, 33, 36, 68, 4, 115, 52, 128, 92, 61, 38, 12, 89, 27, 3, 101, 105, 112, 42, 133, 118, 71, 103, 50, 106, 35, 53, 45, 124, 93, 117, 76, 64, 31, 116, 87, 88, 43, 123, 78, 26, 96, 24, 7, 17, 65, 107, 49, 13, 77, 14, 22, 1, 98, 104, 23, 129, 48, 57, 119, 99, 94, 11, 113, 15, 16, 91, 83, 62, 28, 110, 127, 21, 20, 19, 8, 130, 121, 60, 67, 109, 122, 80, 29, 73, 32, 18, 10, 9, 70, 69, 41, 63, 37].

Опыт, накопленный в ходе более чем десятилетнего непрерывного осуществления научно-исследовательских, опытно-конструкторских и демонстрационных проектов, подтверждает, что технологии возобновляемой энергетики, водородной энергетики и технологии топливных элементов имеют большой потенциал для того, чтобы играть значительную роль в новой энергетической системе, которая будет существовать в ближайшие годы. Эта энергетическая система должна обеспечивать адекватное и оперативное реагирование на угрозы, связанные с изменением климата и вопросами энергетической безопасности.

В данной монографии рассматриваются общие вопросы создания, конструкции, особенностей функционирования химических источников энергии – топливных элементов. Особое внимание уделено вопросам электрокатализа наночастиц на основе платиновых металлов – платины, палладия и рутения в водородно-воздушных топливных элементах, и элементах с прямым окислением спиртов и кислот. Так же приводятся основные характеристики твердых полимерных электролитов, способы их модификации, а также механизмы переноса протона в полимерных мембранах.

*Монография*

*Лебедева Марина Владимировна,  
Яштулов Николай Андреевич*

# **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Подписано в печать 18.05.2020. Формат бумаги 60x84/16.  
Бумага офсет №1. Гарнитура Times. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 5,875. Тираж 550 экз.

Издательство «Интернаука»  
125424, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 108, цокольный этаж,  
помещение VIII, комн. 4, офис 33  
E-mail: [mail@internauka.org](mailto:mail@internauka.org)

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного  
оригинал-макета в типографии Allprint  
630004, г. Новосибирск, Вокзальная магистраль, 3