Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.И. ВЕТРОВ, А.В. БЕЛОГЛАЗОВ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2019

УДК 621.314(075.8)
В 393

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент *М.А. Купарев*,
канд. техн. наук, доцент *О.К. Григорьева*

Работа подготовлена кафедрой электрических станций
по дисциплине «Физические основы преобразования энергии»
для магистрантов ФЭН по направлению 13.04.02 –
Электроэнергетика и электротехника

Ветров В.И.

В 393 Преобразователи энергии: учебное пособие / В.И. Ветров, А.В. Белоглазов. – Новосибирск Изд-во НГТУ, 2019. – 128 с.

ISBN 978-5-7782-3867-1

Для развития всех сфер экономики необходимы электрическая энергия и тепловая энергия. Преобразователи энергии являются базовыми элементами в процессе производства определенного типа энергии или, другими словами, в процессе преобразования одного типа энергии в другой. В настоящем учебном пособии рассмотрены различные типы преобразователей энергии. Многообразие преобразователей связано с тем, что не всегда нужна энергия в том виде, в котором она есть в природе. Химическая энергия, запасенная в топливе, энергия падения воды, солнечная, ветровая, ядерная и другие виды энергии последовательно преобразовываются в тепловую, механическую и электрическую энергию. Описаны принципы действия как традиционных преобразователей энергии, так и наиболее перспективных.

Пособие предназначено для студентов и магистрантов при изучении дисциплины «Физические основы преобразования энергии», а также может быть полезно при выполнении научно-исследовательских работ.

УДК 621.314(075.8)

ISBN 978-5-7782-3867-1

© Ветров В.И., Белоглазов А.В., 2019
© Новосибирский государственный
технический университет, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Окружающий нас материальный мир существует в двух формах: в форме вещества и в форме физического поля сил. Материя характеризуется двумя основными величинами: массой и энергией. Масса служит мерой инерции и гравитации, а энергия – скалярной мерой движения материи.

В зависимости от видов движения различают энергию механическую, тепловую и т. д.

Энергией оценивают и «запас движения» системы, зависящий от ее положения в поле сил и взаимодействия с другими системами.

Соответствующие виды энергии – гравистатическую, химическую и другие – иногда называют потенциальными.

Теория относительности ввела новый вид энергии – *энергию массы покоя*. По соотношению

$$E = mc^2 \qquad \text{(В.1)}$$

количество освобожденной энергии E, эквивалентное массе m вещества в 1 г, равно примерно $2{,}5 \cdot 10^{10}$ ккал или 25 млн кВт · ч. c – скорость света.

Полное освобождение энергии, заключенной в веществе, происходит в процессе аннигиляции (процесс слияния обычного и антиобычного вещества), когда все количество вещества превращается в электромагнитное излучение. Обратное преобразование представляет собой процесс полного преобразования поля в вещество.

Указанные процессы не означают, что масса превращается в энергию или наоборот. Даже в случае аннигиляции этого не происходит, так как образующееся электромагнитное поле тоже обладает массой:

$$m = \frac{h\nu}{c^2}, \qquad \text{(В.2)}$$

где h – постоянная Планка; ν – частота.

Кроме массы, электромагнитное поле обладает и импульсом

$$\overline{p} = \frac{h\nu}{c}. \qquad \text{(В.3)}$$

Первый закон термодинамики называется законом сохранения энергии, в соответствии с которым количество освобожденной внутренней энергии системы U равно сумме количеств полученной энергии упорядоченного движения ω и энергии неупорядоченного q, т. е.

$$U = \omega + q. \qquad \text{(В.4)}$$

Соотношение между ω и q зависит от условия осуществления процесса превращения. К энергии упорядоченного движения относят тепловую энергию.

По второму закону термодинамики всякая изолированная система сама собой претерпевает такие изменения, которые приводят ее к наиболее вероятному состоянию. Энтропия S, связанная с вероятностью, увеличивается.

$$S = k \ln(aP), \qquad \text{(В.5)}$$

где S – энтропия; k – постоянная Больцмана; a – коэффициент пропорциональности; P – вероятность.

Это означает, что упорядоченное движение само собой превращается в неупорядоченное, а концентрированная энергия – в рассеянную.

$$S = k \ln D. \qquad \text{(В.6)}$$

Здесь D – количественная мера, например, атомной неупорядоченности в рассматриваемом теле.

Неупорядоченность, которую она выражает, состоит частично в тепловом движении, частично – в том, что атомы и молекулы разных видов смешиваются чисто случайно вместо того, чтобы быть полностью разделенными.

Всякий приток тепла увеличивает интенсивность теплового движения и таким образом повышает энтропию.

Если D есть мера неупорядоченности, то $1/D$ – это мера упорядоченности и тогда

$$-S = k \ln(1/D), \qquad \text{(В.7)}$$

т. е. энтропия, взятая с отрицательным знаком, есть мера упорядоченности сама по себе и называется неэнтропией.

Рассеяние энергии происходит главным образом путем превращения всех ее видов в тепло, последующее превращение которого в полезные виды энергии ограничено коэффициентом полезного действия (КПД) обратимого цикла Карно.

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \qquad \text{(В.8)}$$

где T_1 – температура нагревателя; T_2 – температура холодильника.

Максимальный выход энергии упорядоченного движения – это «максимальная работа», которую система может совершить, если процесс протекает обратимо.

Преобразование одного вида энергии в другой происходит как в природе, так в искусственно созданных человеком установках. Такие установки называются *преобразователями энергии*.

В настоящем учебном пособии будут рассмотрены различные типы преобразователей энергии. Многообразие преобразователей связано с тем, что нам не всегда нужна энергия в том виде, в котором она есть в природе. Для развития всех сфер экономики необходима электрическая и тепловая энергия.

Получение электрической энергии обеспечивается различными преобразователями. Химическая энергия, запасенная в топливе, энергия падения воды, солнечная, ветровая, ядерная и другие виды энергии последовательно преобразовываются в тепловую, механическую и в электрическую энергию. Тепловая энергия является промежуточным продуктом в этой последовательности преобразований.

1. ИСТОЧНИКИ И СПОСОБЫ ОСВОБОЖДЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Источником всех видов энергии на Земле является излучение Солнца. Последнее посылает на Землю лучи, концентрация энергии в которых невелика. Поэтому для ее использования требуется прибегать к специальным искусственным и естественным средствам.

Естественное средство концентрации солнечной энергии – это процесс превращения ее во внутреннюю энергию вещества, происходящий в растениях.

К искусственным способам следует отнести способ преобразования путем концентрации энергии посредством линз и зеркал с одновременным превращением ее в тепло или в электрическую энергию с помощью тепло- и фотоэлементов.

Носителями высококонцентрированной энергии являются сложные частицы вещества (молекулы, атомы и ядра). Внутренняя энергия этих частиц в процессе ее освобождения в подавляющем большинстве случаев проходит этап превращения во внутреннюю энергию тел (тепло или электричество), которая затем в двигателях превращается в механическую.

Известны следующие три способа освобождения энергии, заключенной в веществе:

1) за счет изменения электронных связей атомов в процессе химических реакций;

2) за счет разрушения и изменения связей между нуклонами тяжелых ядер при ядерных реакциях деления (ядерная энергия) или соединения нуклонов легких ядер при ядерных реакциях синтеза (термоядерная энергия);

3) за счет полного превращения вещества в поле при реакциях аннигиляции обычного и антиобычного вещества.

Первые два способа находят широкое применение в промышленности и военной технике, последний же находится на стадии первого

этапа исследования. Использование физического вакуума как источника неисчерпаемой энергии в настоящее время можно отнести к области фантастики. И хотя пока трудно предсказать, каким путем и когда будет решена проблема извлечения энергии из физического вакуума, она является самой захватывающей в энергетике.

Запасы различных источников энергии на Земле (без термоядерной и аннигиляционной) приведены в таблице [1].

Запасы различных источников энергии на Земле

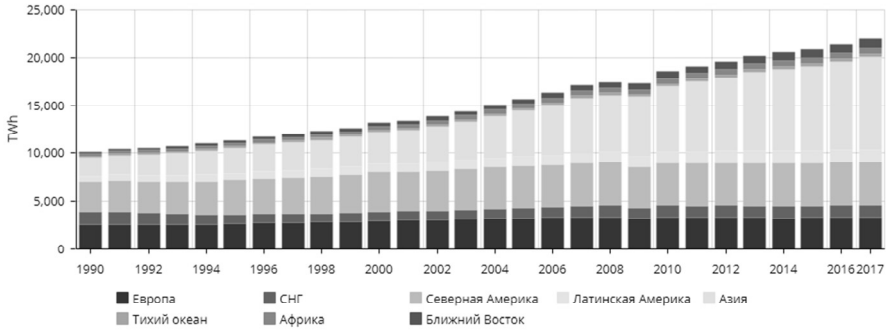
Источники энергии		Общие запасы, кВт · ч · 10^{12}
Невозобновляемые источники энергии	Ядерная энергия деления	547 000
	Химическая энергия горючих веществ	55 000
	Внутреннее тепло Земли	134
Ежегодно возобновляемые	Энергия солнечных лучей	580 000
	Энергия морских приливов	70 000
	Энергия ветра	1700
	Энергия рек	18

Из таблицы видно, что наиболее интересные источники энергии – это энергия солнечных лучей и ядерная энергия деления. Можно также выделить энергию морских приливов. Кроме того, энергия солнечных лучей и энергия морских приливов возобновляемы. Использование ядерной энергии и энергии возобновляемых источников в будущем будет только увеличиваться, поскольку запасы источников химической энергии с каждым годом сокращаются, а их применение загрязняет окружающую среду.

Увеличение использования ядерной энергии и возобновляемых источников энергии очень актуально, так как с каждым годом растет общее потребление электроэнергии в мире. Потребление электроэнергии в глобальном масштабе увеличивается быстрее, чем других энергоносителей, благодаря электрификации использования энергии (см. рисунок) [2]. Из рисунка видно, что основной рост электропотребления приходится на Азию, в первую очередь это связано с ростом экономики Китая, с переносом туда производственных мощностей из Европы и Северной Америки. Спрос на электроэнергию вырос также в Японии, в Индии, Индонезии и Южной Корее.

В то же время в США потребление электроэнергии, которое в связи с повышением энергоэффективности в целом оставалось стабильным

с 2011 года, сокращается второй год подряд, тогда как в Канаде оно растет. Поэтому в сумме по Северной Америке потребление почти не меняется.



Электропотребление в мире по годам

Электропотребление остается стабильным в Европейском Союзе.

Потребление электроэнергии за последние годы значительно выросло в Иране и Египте.

Все эти данные подтверждают необходимость развивать ядерную энергетику.

2. НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

Первые химические электрогенераторы (ХЭГ) были названы гальваническими элементами. В них происходит реакции по схеме металл-электролит-металл. Несколько позднее сделаны попытки использовать гальванический принцип для «электрохимического сжигания» топлива. В них реакции идут по схеме топливо – электролит – окислитель. Такие ХЭГ были названы топливными элементами. В гальванических элементах необходимо периодически заменять израсходованные материалы новыми, из-за чего в эксплуатации они дороги и неудобны. Поэтому были разработаны регенерируемые гальванические элементы, позволяющие восстанавливать израсходованные материалы при пропускании через элемент тока в обратном направлении. Эта разновидность гальванических элементов называется *аккумуляторами*.

Существует большое многообразие типов конструкций топливных ХЭГ, число которых продолжает расти [1, 3–11].

В настоящее время различают следующие виды топливных элементов (ТЭ).

1. В зависимости от того, протекает ли в ТЭ прямая реакция между топливом (горючим) и окислителем или топливо используется для получения продуктов, которые затем и окисляются в элементе, генерируя электрический ток, – прямые и непрямые (косвенные) или первичные и вторичные (уголь, нефть или водород и окись углерода).

2. В зависимости от агрегатного состояния топлива: твердые, жидкостные, газообразные. Окислитель, как правило, газообразный. В комбинированных ТЭ топливо бывает в двух агрегатных состояниях.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и условных обозначений 3
Введение 4
1. Источники и способы освобождения энергии 7
2. Непосредственное превращение химической энергии в электрическую 10
2.1. Классификация химических электрогенераторов 10
2.2. Принцип действия и термодинамический КПД топливных элементов 11
2.3. В поисках подходящего топлива 21
2.4. Конструкции топливных элементов 25
2.4.1. Водород-кислородный элемент 25
2.4.2. Угольный топливный элемент 29
2.5. Энергетические характеристики топливных элементов 30
3. Непосредственное превращение тепловой энергии в электрическую и механическую 36
3.1. Принцип действия преобразователей 36
3.2. Физические явления в ТЭГ 38
3.3. Термоэмиссионные преобразователи (ТЭП) 40
3.3.1. Принцип действия 40
3.3.2. Описание физики явления 41
3.3.3. Основная классификация ТЭП 44
3.4. Магнитогидродинамические электрогенераторы (МГДГ) 47
3.4.1. Общая характеристика МГДГ 47
3.4.2. Принцип действия основных МГДГ 53
3.4.3. Характеристики рабочего тела 54
3.4.4. МГДГ на продуктах сгорания 62
4. Непосредственное превращение солнечной энергии в электрическую 67
4.1. Общие сведения 67

4.2. Принцип действия и классификация преобразователей 67
4.2.1. Элементы зонной теории твердых тел 69
4.3. Солнечные электрогенераторы 75
4.4. Солнечные батареи (СБ) 77
4.5. Конструкция фотоэлементов 79
4.6. КПД преобразователей солнечной энергии 80
4.7. Преобразователи тепловой энергии солнечного излучения 83
4.7.1. Низкопотенциальные и высокопотенциальные концентраторы солнечного излучения 84
4.8. Каскадные солнечные элементы 89
5. Энергия ветра 92
5.1. Общие сведения 92
5.2. Определение мощности воздушного потока 95
6. Ядерная энергия 97
6.1. Общие сведения 97
6.2. Преобразование ядерной энергии в электрическую 100
6.2.1. Реакции, протекающие при работе ядерных преобразователей 100
6.2.2. Устройство ядерного преобразователя 102
6.2.3. Ядерный преобразователь в схеме атомной электростанции 104
6.3. Радиационная и ядерная безопасность 107
7. Термоядерная энергия 109
7.1. Общие сведения 109
7.2. Преобразование термоядерной энергии в электрическую 111
7.2.1. Физические основы управляемого термоядерного синтеза 111
7.2.2. Топливный цикл термоядерного реактора 113
7.2.3. Системы для удержания плазмы 115
7.2.4. Современные разработки в области термоядерного синтеза 117
7.3. Вопросы радиационной безопасности термоядерных реакторов 119
8. Немного о других преобразователях энергии 121
Библиографический список 124

Ветров Владимир Ильич
Белоглазов Алексей Владимирович

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ

Учебное пособие

Редактор *И.Л. Кескевич*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Корректор *И.Е. Семенова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Л.А. Веселовская*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 16.04.2019. Формат 60 × 90 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Уч.-изд. л. 7,44. Печ. л. 8,0. Изд. № 314/18. Заказ № 749. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20