

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИнЭО

С.И. Качин

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

## **НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

Методические указания и индивидуальные задания  
для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению  
140100 «Теплоэнергетика и теплотехника»,  
профили «Промышленная теплоэнергетика»,  
«Тепловые электрические станции»

*Составитель А.А. Матвеева*

<b>Семестр</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
Кредиты		4
Лекции, часов	2	10
Практические занятия, часов		10
Лабораторные занятия, часов		8
Индивидуальные задания		№ 1
Самостоятельная работа, часов		96
Формы контроля		экзамен

Издательство  
Томского политехнического университета  
2015

УДК 620.9 (075.8)

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: метод. указ. и индивид. задания для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника» / сост. А.А. Матвеева. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 46 с.

Методические указания и индивидуальные задания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры атомных и тепловых электрических станций энергетического института 30 июня 2015 г., протокол № 59.

Зав. кафедрой АТЭС,  
доцент, кандидат техн. наук \_\_\_\_\_ А.С. Матвеев

#### **Аннотация**

Методические указания и индивидуальные задания по дисциплине «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» предназначены для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника». Данная дисциплина изучается в одном семестре.

Приведено содержание основных тем дисциплины, указаны темы практических занятий и лабораторных работ. Приведены варианты индивидуального домашнего задания. Даны методические указания по выполнению индивидуального домашнего задания.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ.....	4
2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ДИСЦИПЛИНЫ .....	6
3. СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛА ДИСЦИПЛИНЫ .....	14
3.1. Тематика практических занятий .....	14
3.2. Перечень лабораторных работ для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме .....	15
4. ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ .....	16
4.1. Общие методические указания.....	16
4.2. Варианты ИДЗ и методические указания .....	16
4.2.1. Задача № 1 .....	16
4.2.2. Задача № 2 .....	26
4.2.3. Задача № 3 .....	32
5. ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ .....	40
5.1. Вопросы для подготовки к экзамену .....	40
5.2. Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме .....	42
6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ .....	43
6.1. Литература обязательная .....	43
6.2. Литература дополнительная .....	43
6.3. Internet-ресурсы.....	43

## 1. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ОСНОВНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

В результате освоения данной дисциплины студент приобретает знания, умения и навыки, обеспечивающие достижение целей основной образовательной программы 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Дисциплина нацелена на подготовку студентов:

- к расчетно-проектной и проектно-конструкторской деятельности в области создания оборудования с использованием современных технологий высокоэффективного преобразования энергии возобновляемых источников в другие виды;
- производственно-технологической деятельности в области эксплуатации современного высокоэффективного оборудования на нетрадиционных и возобновляемых энергоисточниках с соблюдением требований защиты окружающей среды и безопасности производства;
- научно-исследовательской деятельности, связанной с выбором, оптимизацией и разработкой высокоэффективных методов и оборудования для преобразования энергии возобновляемых источников в другие виды энергии.

Дисциплина «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» относится к базовым дисциплинам профессионального цикла в Федеральном государственном образовательном стандарте по направлению 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Данная дисциплина основывается на дисциплинах профессионального цикла (*пререквизиты*), таких как: «Гидрогазодинамика», «Техническая термодинамика», «Тепломассообмен», «Котельные установки и парогенераторы», «Тепловые и атомные электрические станции».

*Кореквизитами* для дисциплины «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» являются дисциплины, «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях» и «Турбины тепловых и атомных электростанций» для профиля «Тепловые энергетические станции».

При изучении дисциплины студенты должны научиться самостоятельно принимать решения в области основных возобновляемых энергоресурсов, основных принципов их использования, конструкций и режимов работы соответствующих энергоустановок, мирового и отечественного опыта их эксплуатации, перспектив развития энергетики на нетрадиционных и возобновляемых энергоисточниках.

Ограниченные запасы жидкого и газового топлива в ближайшие десятилетия будут истощаться, топливная составляющая себестоимости

электрической и тепловой энергии будет возрастать. Себестоимость энергии, получаемой на возобновляемых и нетрадиционных энергоисточниках, наоборот, снижается с накоплением опыта и совершенствованием новых установок. Уже сейчас возможно приближение ее к себестоимости энергии традиционных ТЭС и АЭС.

После изучения данной дисциплины бакалавры приобретают знания, умения и опыт, соответствующие результатам основной образовательной программы: **P5, P9, P12, P15**.

Соответствие результатов освоения дисциплины «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» формируемым компетенциям ООП представлено в табл. 1.

Формируемые компетенции в соответствии с ООП*	Результаты освоения дисциплины
35.1, 39.1, 39.2, 312.1, 315.1, 315.2	<i>В результате освоения дисциплины бакалавр должен <b>знать:</b></i> основные альтернативные источники энергии принципы процессов получения конечных видов энергии из нетрадиционных и возобновляемых источников энергии методы преобразования природной энергии и энергии вторичных источников в тепловую и электрическую энергию
У5.1, У9.1, У9.2, У12.1, У15.1, У15.2	<i>В результате освоения дисциплины бакалавр должен <b>уметь:</b></i> производить расчеты по оценке параметров энергетических источников энергии, плотности потоков энергии составлять принципиальные схемы установок использования возобновляемых источников энергии
В5.1, В9.2, В12.1, В15.1, В16.1	<i>В результате освоения дисциплины бакалавр должен <b>владеть:</b></i> опытом формулирования и постановки задач расчетов ВИЭ и их схем в целом, с учетом их экологического воздействия на окружающую среду; опытом использования информационного и технического обеспечения всех стадий эксплуатации ВИЭ

## **2. СОДЕРЖАНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **Тема 1. Введение**

Топливо-энергетический баланс РФ в начале 21 века. Оценки запасов ископаемого топлива. Перспективы развития атомной энергетики. Вредные воздействия традиционной энергетики на окружающую среду. Традиционные и нетрадиционные источники энергии.

Место нетрадиционных источников в удовлетворении энергетических потребностей человека. Классификация возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Потенциал ВИЭ, эффективность использования различных их видов, их достоинства и недостатки. Сравнение характеристик ВИЭ и невозобновляемых источников энергии.

Научные принципы использования ВИЭ: анализ, временные характеристики, качество. Технические, социально-экономические и экологические проблемы использования ВИЭ.

**Рекомендуемая литература:** [1, 2, 3].

### **Методические указания**

Найти и прочитать в литературе указанные темы. Составить конспект по теме. Знать основные термины и определения. Знать признаки ВИЭ. Ответить на вопросы и задания для самоконтроля, приведенные ниже.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Дайте понятие нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.
2. Назовите типы традиционных источников энергии.
3. Перечислите достоинства и недостатки различных типов традиционных источников.
4. Дайте классификацию тепловых электрических станций.
5. Дайте классификацию гидроэлектростанций.
6. Назовите типы ядерных реакторов.
7. Каковы перспективы использования возобновляемых источников энергии?
8. Дайте понятие невозобновляемых источников энергии.
9. Дайте классификацию возобновляемых источников энергии, укажите достоинства и недостатки.

10. Какие виды возобновляемых источников энергии актуальны применительно к условиям России?

## **Тема 2. Возможности использования энергии Солнца**

Солнечное излучение и его характеристики. Области солнечного спектра. Прямые лучи и рассеянное излучение. Облученность. Приборы для измерения лучистых потоков. Перспективы использования энергии Солнца, достоинства и недостатки.

Нагревание воды солнечным излучением. Типы солнечных нагревателей. Открытые нагреватели. Черные резервуары. Проточные нагреватели. Селективные поверхности. Вакууммированные приемники.

Подогреватели воздуха, использующие солнечную энергию. Сушильные камеры. Солнечные пруды. Опреснение воды.

Солнечные отопительные системы (пассивные и активные).

Концентраторы солнечной энергии. Параболический вогнутый концентратор. Солнечные системы для получения электроэнергии.

Фотоэлектрическая генерация. Фотоэлементы (ФЭ) и их характеристики. Теоретический КПД кремниевой батареи. Способы повышения эффективности ФЭ.

Термоэлектрические преобразователи, принцип действия, эффективность, достоинства и недостатки.

Схема, принцип действия, достоинства и недостатки паротурбинной солнечной электростанции (СЭС). Технико-экономические проблемы создания СЭС различных типов. Их сравнение с ТЭС. Экологические последствия создания СЭС.

**Рекомендуемая литература:** [1, 2, 3].

### **Методические указания**

Найти и прочитать в литературе указанные темы. Составить конспект по теме. Знать основные термины и определения. Уметь классифицировать установки. Уметь определять эффективность установок на солнечной энергии. Ответить на вопросы и задания для самоконтроля, приведенные ниже.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Приведите классификацию солнечных энергетических установок.
2. Объясните принцип действия, эффективность, достоинства и недостатки термоэлектрических преобразователей.

3. Приведите примеры систем солнечного теплоснабжения, дайте их классификацию, объясните принцип действия, достоинства и недостатки.
4. Каковы перспективы развития транспортных средств, использующих солнечную энергию?
5. Дайте понятие фотоэлектрическим преобразователям, объясните их принцип действия, поясните эффективность, достоинства и недостатки.
6. Как концентрирующие гелиоприемники используются в схемах теплоснабжения?
7. Приведите схему, принцип действия, достоинства и недостатки паротурбинной СЭС.
8. Опишите систему отопления с солнечными коллекторами.
9. Приведите примеры использования солнечной энергии в РФ.
10. Каковы перспективы использования энергии Солнца?

### **Тема 3. Использование энергии ветра**

Ресурсы энергии ветра в регионах России. Мировой опыт в области ветроэнергетики. Ветер и его характеристики. Перспективы использования энергии ветра, достоинства и недостатки.

Классификация ветроэнергетических установок (ВЭУ) по классам ветродвигателей, достоинства и недостатки классов. Конструкции ветродвигателей и ветровых электростанций (ВЭС), зависимость мощности ВЭС от скорости ветра и диаметра ветроколеса. Основы теории ВЭУ. Располагаемая мощность ветроколеса. Коэффициент использования энергии ветра. Режимы работы ветроколеса. Экологические проблемы ветроэнергетики.

Режимы работы ветроэлектростанций. Работа ВЭС в энергосистеме. Перспективы развития ветроэнергетики в России.

**Рекомендуемая литература:** [1, 2, 3].

#### **Методические указания**

Найти и прочитать в литературе указанные темы. Составить конспект по теме. Знать основные термины и определения. Уметь классифицировать установки. Уметь определять эффективность установок на ветровой энергии. Ответить на вопросы и задания для самоконтроля, приведенные ниже.



## **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Объясните природу возникновения ветров. Приведите основные характеристики ветров.
2. Каков опыт зарубежных стран в использовании энергии ветра?
3. Каковы перспективы применения ветроустановок в условиях России?
4. Приведите классификацию ветроустановок по классам ветродвигателей, поясните достоинства и недостатки классов.
5. Приведите схему ветроэлектрической установки, поясните особенности и принцип работы.
6. Дайте классификацию ветроэнергетических установок для производства электроэнергии.
7. Приведите примеры использования ветра для производства механической работы.
8. Каковы режимы работы ветроустановок?
9. Каковы перспективы использования энергии ветра?
10. Назовите отрицательные явления при работе ветроустановок.

## **Тема 4. Геотермальная энергия**

Геотермальная энергия и ее свойства. Строение Земли. Классификация геотермальных районов. Перспективы использования геотермальной энергии, достоинства и недостатки. Методы и способы использования геотермального тепла.

Использование геотермального тепла в системах теплоснабжения. Принципиальная схема геотермального теплоснабжения с теплообменниками Принципиальная схема геотермального теплоснабжения с параллельной подачей геотермальной воды на отопление и горячее водоснабжение и пиковым догревом воды на отопление.

Схема и принцип действия простейшей геотермальной электростанции (ГеоТЭС). Схема геотермальной электростанции с низкокипящим рабочим веществом. Одноконтурные ГеоТЭС (схема, принцип действия, достоинства и недостатки). Двухконтурные ГеоТЭС (схема, принцип действия, достоинства и недостатки).

Комбинированная выработка электроэнергии, тепла, пресной воды и минеральных веществ. Оценка мощности ГеоТЭС.

**Рекомендуемая литература:** [1, 2, 3].

## Методические указания

Найти и прочитать в литературе указанные темы. Составить конспект по теме. Знать основные термины и определения. Уметь классифицировать установки. Уметь определять эффективность геотермальных установок. Ответить на вопросы и задания для самоконтроля, приведенные ниже.

### Вопросы и задания для самоконтроля

1. Перечислите виды геотермальных источников энергии.
2. Приведите классификацию геотермальных районов.
3. Каковы перспективы использования геотермальной энергии, достоинства и недостатки?
4. Какие существуют методы и способы использования геотермального тепла?
5. Как можно использовать геотермальное тепло в системах теплоснабжения?
6. Приведите принципиальную схему геотермального теплоснабжения с теплообменниками.
7. Приведите принципиальную схему геотермального теплоснабжения с параллельной подачей геотермальной воды на отопление и горячее водоснабжение и пиковым догревом воды на отопление.
8. Приведите схему и объясните принцип действия простейшей ГеоТЭС.
9. Приведите схему геотермальной электростанции с низкокипящим рабочим веществом.
10. Приведите схему одноконтурной ГеоТЭС, поясните принцип действия, достоинства и недостатки.
11. Приведите схему двухконтурной ГеоТЭС поясните принцип действия, достоинства и недостатки.
12. Каково состояние геотермальной энергетики в России?

### Тема 5. Использование энергии океана

Энергетические ресурсы океана. Принципиальные схемы установок по использованию энергии океана. Практическая невозможность ее освоения в паротурбинных и термоэлектрических установках.

Энергия волн. Характеристики волнового движения. Амплитуда. Мощность волнового движения. Скорость перемещения волны. Преобразователи энергии волн (схемы, принцип действия, эффективность, достоинства и недостатки). Экология.

Энергия приливов. Периоды колебаний уровня воды. Причины возникновения приливов. Лунные и солнечные приливы. Технико-экономические и экологические проблемы приливных электростанций. Использование энергии приливов и морских течений (схемы, принцип действия, эффективность, достоинства и недостатки).

Преобразование тепловой энергии океана. Океанская тепловая электростанция (ОТЭС) замкнутого цикла. Мощность ОТЭС. Экологические и техникоэкономические проблемы ОТЭС. Выбор рабочих тел.

ОТЭС открытого цикла. Комбинированная выработка электроэнергии и пресной воды. Технические трудности создания ОТЭС открытого цикла. Арктические ОТЭС. Определение мощности. Экологические проблемы.

**Рекомендуемая литература:** [1, 2, 3].

### **Методические указания**

Найти и прочитать в литературе указанные темы. Составить конспект по теме. Знать основные термины и определения. Уметь классифицировать установки. Уметь определять эффективность установок на энергии приливов, течений. Ответить на вопросы и задания для самоконтроля, приведенные ниже.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Какова история создания гидроэлектростанций?
2. Поясните принцип работы гидроэлектростанции, приведите ее схему, запишите выражение для мощности и выработки электроэнергии.
3. Дайте классификацию гидроузлов и основных типов зданий ГЭС.
4. Объясните преимущества и недостатки гидроэлектростанций.
5. Приведите схему электростанции на приливном течении.
6. Каково современное состояние гидроэнергетики в России?
7. Как можно использовать тепловую энергию океана? Приведите схемы, объясните принцип действия, эффективность, достоинства и недостатки.
8. Какие существуют преобразователи энергии волн? Приведите схемы, поясните принцип действия, эффективность, достоинства и недостатки.
9. Как можно использовать энергию приливов и морских течений? Приведите схемы, объясните принцип действия, эффективность, достоинства и недостатки.
10. Каковы перспективы использования энергии воды в России?

11. Какие основные сложности при сооружении установок для использования энергии воды?

### **Тема 6. Биотопливо**

Фотосинтез как естественный аккумулятор солнечной энергии. Топливная древесина, полевые культуры, отходы лесоперерабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности как энергоносители.

Биомасса. Биотопливо. Классификация биотоплива и его энергетические характеристики. Влагосодержание, плотность, теплота сгорания. Основные процессы переработки биомассы: термохимические, биохимические, агрохимические.

Производство биомассы для энергетических целей. Энергетические фермы. Кругооборот энергии и вещества.

Технико-экономические и экологические показатели процессов переработки биомассы. Сжигание. Пиролиз. Газификация. Спиртовая ферментация. Анаэробное сбраживание. Биогазогенераторы.

Котельные установки для сжигания биотоплива.

**Рекомендуемая литература:** [1, 2, 3].

### **Методические указания**

Найти и прочитать в литературе указанные темы. Составить конспект по теме. Знать основные термины и определения. Уметь классифицировать установки. Уметь определять эффективность установок на биотопливе. Ответить на вопросы и задания для самоконтроля, приведенные ниже.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Дайте понятие биотоплива.
2. Какие существуют виды биотоплива?
3. Перечислите достоинства и недостатки биотоплива.
4. Каков принцип работы установок на биотопливе?
5. Что такое энергетические фермы?
6. Перечислите достоинства и недостатки развития энергетики за счет использования сельскохозяйственных культур в виде топлива.
7. Перечислите процессы пиролиза и газификации.
8. Как реализуется процесс сжигания древесных отходов?
9. Назовите способы получения биогаза.
10. Перечислите агрохимические способы получения топлива.

## **Тема 7. Вторичные энергетические ресурсы и энергосбережение**

Совершенствование процессов потребления и передачи энергии. Развитие систем аккумулирования энергии. Роль нормативно-правовых документов для энергосбережения. Закон РФ об энергосбережении.

Понятие вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Способы использования и преобразования ВЭР. Отходы производства и сельскохозяйственные отходы, способы и возможности их использования для получения электрической и тепловой энергии.

Использование вторичных энергоресурсов в промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве. Тепловые насосы.

**Рекомендуемая литература:** [1, 2, 3].

### **Методические указания**

Найти и прочитать в литературе указанные темы. Составить конспект по теме. Знать основные термины и определения. Знать признаки ВИЭ. Ответить на вопросы и задания для самоконтроля, приведенные ниже.

### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Перечислите способы использования и преобразования ВЭР.
2. Дайте классификацию вторичных энергетических ресурсов.
3. Приведите примеры установок для использования теплоты отработавших газов.
4. Как можно использовать теплоту испарительного охлаждения и теплоту низкого потенциала?
5. Приведите схему установки, использующую теплоту испарительного охлаждения.
6. Приведите схему установки, использующую теплоту низкого потенциала.
7. Поясните принцип действия теплового насоса.
8. Приведите принципиальную схему теплового насоса.
9. Приведите примеры установок для сжигания твердых отходов.
10. Перечислите способы и возможности использования сельскохозяйственных отходов в качестве первичных источников энергии.

### **3. СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОГО РАЗДЕЛА ДИСЦИПЛИНЫ**

#### **3.1. Тематика практических занятий**

Практические занятия посвящены приобретению умений и навыков решения задач по основным разделам курса, а также умения анализировать полученные результаты.

В тематике практических занятий возможны изменения. Окончательный список тем приведен в Календаре обучения студента на сайте ИнЭО.

#### **Тема 1. Расчет системы солнечного теплоснабжения здания (2 часа)**

**Рекомендуемая литература: [2–5].**

#### **Тема 2. Расчет скорости воздушного потока на высоте башни ветроэнергетической установки (2 часа)**

**Рекомендуемая литература: [2–5].**

#### **Тема 3. Основные энергетические параметры ВЭС и способы размещения ВЭУ на поверхности земли (2 часа)**

**Рекомендуемая литература: [2–5].**

#### **Тема 4. Расчет схемы ГеоЭС (2 часа)**

**Рекомендуемая литература: [2–5].**

#### **Тема 5. Энергия водоносного пласта (2 часа)**

**Рекомендуемая литература: [2–5].**

### **3.2. Перечень лабораторных работ для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме**

Лабораторные работы посвящены приобретению умений и навыков решения задач по основным разделам курса, а также умения анализировать полученные результаты.

Лабораторный практикум является составной частью учебного процесса по данной дисциплине. Лабораторные работы призваны закрепить теоретические знания по изучаемому курсу.

В данном разделе приведен перечень лабораторных работ для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме (КЗФ).

Студенты классической формы обучения выполняют лабораторные работы во время сессии.

В тематике лабораторных работ возможны изменения. Окончательный список тем приведен в Календаре обучения на сайте ИнЭО.

#### **Лабораторная работа № 1.**

**Исследование характеристик солнечного элемента (4 часа)**

#### **Лабораторная работа № 2.**

**Исследование режимов работы теплонасосной установки (2 часа)**

#### **Лабораторная работа № 3.**

**Исследование характеристик ветроустановки (2 часа)**

## 4. ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

### 4.1. Общие методические указания

Индивидуальное домашнее задание состоит из трех задач:

1. Расчет солнечной электростанции башенного типа.
2. Расчёт характеристик ветроустановок.
3. Расчет тепловой схемы геотермальной электростанции бинарного типа.

Работа выполняется в отдельной тетради. На обложке необходимо указать название дисциплины, специальность, курс, фамилию и инициалы студента.

При решении задач необходимо строго придерживаться своего варианта, номер которого выдается преподавателем на установочной лекции. В случае отсутствия студента на установочной лекции номер варианта студент определяет по файлу с номерами вариантов, расположенному на персональной странице преподавателя по адресу <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/n/NASA/Education/NiVIE/Tab1>.

При выполнении контрольной работы условия задач приводятся в работе полностью. Решения задач, требующие привлечения диаграмм, схем, графиков, должны быть проиллюстрированы соответствующими рисунками с пояснениями для всех изображенных на них элементов.

Формулы должны быть снабжены ссылками на использованную литературу и пояснениями всех используемых в них обозначений. В решениях задач необходимо придерживаться международной системы единиц (СИ).

### 4.2. Варианты ИДЗ и методические указания

#### 4.2.1. Задача № 1

##### **Тема: Расчет солнечной электростанции башенного типа**

На солнечной электростанции башенного типа установлено  $n$  гелиостатов, каждый из которых имеет поверхность  $F_{\Gamma}$  м<sup>2</sup>. Коэффициент отражения гелиостата  $R_{\text{отр}}$ . Максимальная облученность зеркала гелиостата  $E_{\Gamma}$ .



Гелиостаты отражают солнечные лучи на приемник, на поверхности которого зарегистрирована максимальная энергетическая освещенность  $E_{\text{пр}}$ . Коэффициент поглощения приемника  $A_{\text{погл}}$ . Степень черноты приемника  $\varepsilon_{\text{пр}}$ .

В приемнике нагревается рабочее тело до температуры  $t_0$ . Давление рабочего тела составляет  $p_0$ . Полученный водяной пар направляется в турбину мощностью  $N_{\text{Э}}$ , работающую по циклу Ренкина. Давление пара за турбиной составляет  $p_k$ . Температура окружающей среды  $t_{\text{ос}}$ . Относительный внутренний КПД турбины  $\eta_{oi}$ . Механический КПД  $\eta_{\text{м}} = 0,975$ . КПД электрогенератора  $\eta_{\text{э}} = 0,985$ . Работой насоса, потерями тепла при его транспортировке, собственными нуждами – пренебречь.

**Определить:**

1. Расход пара на турбину,  $D_0$ , кг/с.
2. Площадь поверхности приемника  $F_{\text{пр}}$  и тепловые потери в нем  $Q_{\text{пот}}$  (конвективные потери вдвое меньше потерь от излучения).
3. Энергию, полученную приемником от солнца через гелиостаты (кВт).
4. Количество гелиостатов –  $n$ .
5. Как изменится мощность станции, если вместо паротурбинной установки применить кремниевые преобразователи с КПД  $\eta_{\text{фэ}}$ , занимающие ту же площадь, что и зеркала гелиостатов?

Исходные данные взять из табл. 1 по вариантам.

## Исходные данные для задачи № 1

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поверхность гелиостата, $F_{\Gamma}$ , м <sup>2</sup>	64	61	58	55	52	49	46	43	40	37
Коэффициент отражения гелиостата, $R_{отр}$	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78
Максимальная облучен- ность зеркала гелиостата $E_{\Gamma}$ , Вт/м <sup>2</sup>	550	575	580	585	590	600	610	620	615	605
Максимальная энергетиче- ская освещенность приемника, $E_{пр}$ , МВт/м <sup>2</sup>	2,5	2,1	2,2	2,3	2,6	2,5	2,0	1,9	2,1	1,9
Коэффициент поглощения приемника, $A_{погл}$	0,95	0,96	0,94	0,94	0,93	0,95	0,96	0,97	0,95	0,95
Степень черноты приемника $\epsilon_{пр}$	0,96	0,95	0,94	0,95	0,97	0,94	0,945	0,93	0,95	0,94
Начальная температура пара, $t_0$ , °С	580	585	575	600	540	550	560	535	570	580
Начальное давление пара, $p_0$ , МПа	10	11	12	13	14	13	13,5	12,5	11,5	10,5
Мощность СЭС, $N_{Э}$ , МВт	1,2	3,2	1,5	5,2	2	1,6	4,0	1,0	5,5	4,0
Конечное давление пара, $p_k$ , кПа	4,5	5	5,5	6	6,5	3	3,5	4,2	4,3	4,4
Относительный внутренний КПД турбины, $\eta_{oi}$	0,85	0,84	0,83	0,88	0,84	0,86	0,87	0,82	0,83	0,84
Температура окружаю- щей среды, $t_{oc}$ , °С	8	9	4	10	26	43	44	48	24	34
КПД фотопреобразователя, $\eta_{фэ}$	0,14	0,13	0,15	0,16	0,17	0,123	0,13	0,12	0,14	0,15

Продолжение таблицы 1

Величина	Номер варианта									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Поверхность гелиостата, $F_{Г}$ , м <sup>2</sup>	54	51	68	65	62	69	66	63	60	67
Коэффициент отражения гелиостата, $R_{отр}$	0,79	0,78	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78	0,8	0,81	0,82
Максимальная облученность зеркала гелиостата $E_{Г}$ , Вт/м <sup>2</sup>	595	580	605	600	610	595	580	605	600	610
Максимальная энергетическая освещенность приемника, $E_{пр}$ , МВт/м <sup>2</sup>	2,44	2,14	2,24	2,34	2,64	2,54	2,04	1,94	2,14	1,94
Коэффициент поглощения приемника, $A_{погл}$	0,95	0,96	0,94	0,94	0,93	0,93	0,95	0,96	0,94	0,95
Степень черноты приемника $\epsilon_{пр}$	0,96	0,95	0,94	0,95	0,96	0,93	0,94	0,95	0,95	0,94
Начальная температура пара, $t_0$ , °С	430	440	450	460	470	480	490	500	510	520
Начальное давление пара, $p_0$ , МПа	9	10	9,5	11	12	13,0	14	15	10,5	11,5
Мощность СЭС, $N_{Э}$ , МВт	2,0	3,0	4,5	5,0	6,0	1,4	3,4	2,5	5,5	3,5
Конечное давление пара, $p_k$ , кПа	6	3,5	3	4,5	4,2	6	6,5	3	3,5	4,2
Относительный внутренний КПД турбины, $\eta_{oi}$	0,85	0,84	0,83	0,88	0,84	0,86	0,87	0,82	0,83	0,84
Температура окружающей среды, $t_{oc}$ , °С	18	21	17	28	29	39	37	36	41	11
КПД фотопреобразователя, $\eta_{фэ}$	0,145	0,135	0,152	0,161	0,172	0,12	0,132	0,2	0,134	0,11

Продолжение таблицы 1

Величина	Номер варианта									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Поверхность гелиостата, $F_{\Gamma}$ , м <sup>2</sup>	64	61	58	55	52	49	46	43	40	37
Коэффициент отражения гелиостата, $R_{отр}$	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78
Максимальная облученность зеркала гелиостата $E_{\Gamma}$ , Вт/м <sup>2</sup>	550	575	580	585	590	600	610	620	615	605
Максимальная энергетическая освещенность приемника, $E_{пр}$ , МВт/м <sup>2</sup>	2,5	2,1	2,2	2,3	2,6	2,54	2,0	1,9	2,15	1,95
Коэффициент поглощения приемника, $A_{погл}$	0,95	0,96	0,94	0,94	0,93	0,93	0,95	0,96	0,94	0,95
Степень черноты приемника $\epsilon_{пр}$	0,96	0,95	0,94	0,95	0,96	0,93	0,94	0,95	0,95	0,94
Начальная температура пара, $t_0$ , °С	575	585	570	620	545	550	555	535	565	590
Начальное давление пара, $p_0$ , МПа	9	12,5	11,5	13,5	14,5	12,7	11,7	14,5	16,2	12,6
Мощность СЭС, $N_{Э}$ , МВт	4,3	1,7	1,9	1,8	4,2	1,6	2,3	1,2	4,2	1,3
Конечное давление пара, $p_k$ , кПа	3,6	5	5,5	6	6,5	3	3,5	4,2	4,3	4,4
Относительный внутренний КПД турбины, $\eta_{oi}$	0,85	0,84	0,83	0,88	0,84	0,86	0,87	0,82	0,83	0,84
Температура окружающей среды, $t_{oc}$ , °С	0	5	12	13	23	33	43	53	22	32
КПД фотопреобразователя, $\eta_{фэ}$	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,145

Продолжение таблицы 1

Величина	Номер варианта									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Поверхность гелиостата, $F_{Г}$ , м <sup>2</sup>	64	61	58	55	52	49	46	43	40	37
Коэффициент отражения гелиостата, $R_{отр}$	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78
Максимальная облученность зеркала гелиостата $E_{Г}$ , Вт/м <sup>2</sup>	550	575	580	585	590	600	610	620	615	605
Максимальная энергетическая освещенность приемника, $E_{пр}$ , МВт/м <sup>2</sup>	2,5	2,1	2,2	2,3	2,6	2,5	2,0	1,9	2,1	1,9
Коэффициент поглощения приемника, $A_{погл}$	0,95	0,96	0,94	0,94	0,93	0,95	0,96	0,97	0,95	0,95
Степень черноты приемника $\epsilon_{пр}$	0,96	0,95	0,94	0,95	0,97	0,94	0,945	0,93	0,95	0,94
Начальная температура пара, $t_0$ , °С	580	585	575	600	540	550	560	535	570	580
Начальное давление пара, $p_0$ , МПа	9	10	11	12	13	14	13	12	11	10
Мощность СЭС, $N_{Э}$ , МВт	8	7	6	5	4	3	2	8	7	6
Конечное давление пара, $p_k$ , кПа	3	4	5	6	3,5	4,5	5,3	5,5	6,5	3,3
Относительный внутренний КПД турбины, $\eta_{oi}$	0,85	0,84	0,83	0,88	0,84	0,86	0,87	0,82	0,83	0,84
Температура окружающей среды, $t_{oc}$ , °С	10	20	30	40	50	55	45	35	25	15
КПД фотопреобразователя, $\eta_{фэ}$	0,13	0,14	0,15	0,16	0,165	0,144	0,134	0,162	0,149	0,115

## Окончание таблицы 1

Величина	Номер варианта									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Поверхность гелиостата, $F_{Г}$ , м <sup>2</sup>	54	51	68	65	62	69	66	63	60	67
Коэффициент отражения гелиостата, $R_{отр}$	0,79	0,78	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78	0,8	0,81	0,82
Максимальная облученность зеркала гелиостата $E_{Г}$ , Вт/м <sup>2</sup>	595	580	605	600	610	595	580	605	600	610
Максимальная энергетическая освещенность приемника, $E_{пр}$ , МВт/м <sup>2</sup>	2,44	2,14	2,24	2,34	2,64	2,54	2,04	1,94	2,14	1,94
Коэффициент поглощения приемника, $A_{погл}$	0,95	0,96	0,94	0,94	0,93	0,93	0,95	0,96	0,94	0,95
Степень черноты приемника $\epsilon_{пр}$	0,96	0,95	0,94	0,95	0,96	0,93	0,94	0,95	0,95	0,94
Начальная температура пара, $t_0$ , °С	560	540	550	530	520	510	500	490	480	470
Начальное давление пара, $p_0$ , МПа	9	10	9,5	11	12	13,0	14	15	10,5	11,5
Мощность СЭС, $N_{Э}$ , МВт	2,0	3,0	4,5	5,0	6,0	1,4	3,4	2,5	5,5	3,5
Конечное давление пара, $p_k$ , кПа	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9
Относительный внутренний КПД турбины, $\eta_{oi}$	0,85	0,84	0,83	0,88	0,84	0,86	0,87	0,82	0,83	0,84
Температура окружающей среды, $t_{oc}$ , °С	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
КПД фотопреобразователя, $\eta_{фэ}$	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2

## Методические указания к задаче № 1

Привести в условии задачи таблицу исходных данных по форме:

Величина	Вариант
Поверхность гелиостата, $F_{\Gamma}$ , м <sup>2</sup>	
Коэффициент отражения гелиостата, $R_{\text{отр}}$	
Максимальная облученность зеркала гелиостата $E_{\Gamma}$ , Вт/м <sup>2</sup>	
Максимальная энергетическая освещенность приемника, $E_{\text{пр}}$ , МВт/м <sup>2</sup>	
Коэффициент поглощения приемника, $A_{\text{погл}}$	
Степень черноты приемника, $\varepsilon_{\text{пр}}$	
Начальная температура пара, $t_0$ , °С	
Начальное давление пара, $p_0$ , МПа	
Мощность СЭС, $N_{\text{Э}}$ , МВт	
Конечное давление пара, $p_{\text{к}}$ , кПа	
Относительный внутренний КПД турбины, $\eta_{oi}$	
Температура окружающей среды, $t_{\text{ос}}$ , °С	
КПД фотопреобразователя, $\eta_{\text{фэ}}$	

1. Изобразим схематично солнечную электростанцию башенного типа (рис. 1).

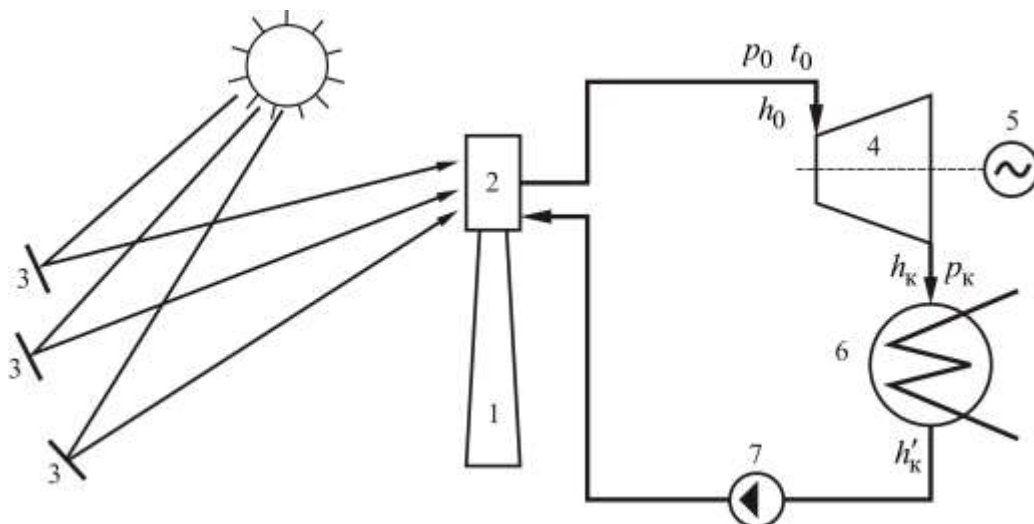


Рис. 1. Схема солнечной электростанции башенного типа:  
 1 – солнечная башня; 2 – приемник; 3 – гелиостаты;  
 4 – паровая турбина; 5 – электрогенератор; 6 – конденсатор; 7 – насос

2. Построим процесс расширения пара в турбине в  $h-s$ -диаграмме (рис. 2).

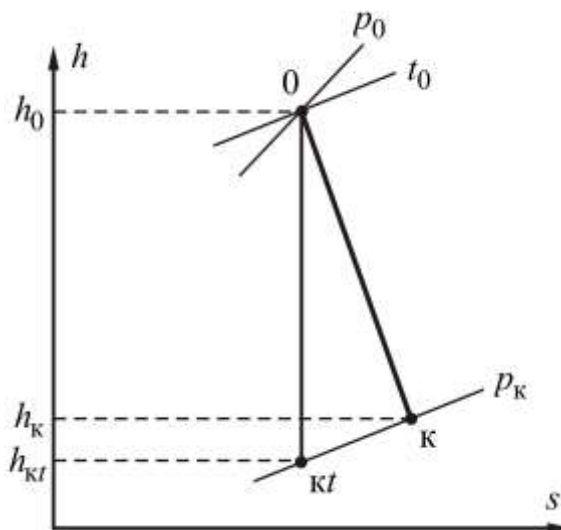


Рис. 2. Процесс расширения пара в турбине в  $h-s$ -диаграмме:  
 $0-kt$  – теоретический процесс;  $0-k$  – действительный

3. Теоретический (располагаемый) теплоперепад турбины:

$$H_0 = h_0 - h_{kt}, \text{ кДж/кг},$$

где  $h_0$  – энтальпия пара на входе в турбину – точка 0 (рис. 2). Определяется из таблиц свойств воды и водяного пара по  $p_0$  и  $t_0$ .

$h_{kt}$  – энтальпия пара на выходе из турбины в теоретическом процессе – точка  $kt$ . Определяется из таблиц свойств воды и водяного пара по  $p_k$  и  $s_0$  (т.к. процесс  $0-kt$  происходит при  $s = \text{const}$ ).

4. Действительный теплоперепад турбины:

$$H_i = H_0 \cdot \eta_{oi}, \text{ кДж/кг}.$$

где  $\eta_{oi}$  – относительный внутренний КПД турбины, известен по заданию.

5. По давлению  $p_k$  из таблиц свойств воды и водяного пара находим значение энтальпии конденсата  $h'_k = f(p_k)$ , кДж/кг.

6. Расход пара на турбину определяется из основного энергетического уравнения турбины:

$$D_0 = \frac{N_{\text{э}}}{H_i \cdot \eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{э}}}, \text{ кг/с}.$$

Значение мощности в формулу подставлять в кВт.



7. Расход тепла на турбоустановку:

$$Q_{\text{ТУ}} = D_0(h_0 - h'_k), \text{ кВт}.$$

8. Удельные потери тепла с поверхности приемника солнечной энергии за счет излучения:

$$q_{\text{изл}} = c_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \left[ \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{ос}}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2,$$

где  $c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$  – степень излучения абсолютно черного тела (постоянная Стефана – Больцмана).

$T_0$  и  $T_{\text{ос}}$  подставлять в формулу в Кельвинах, К.

9. Из условия известно, что:

$$q_{\text{конв}} = 0,5 \cdot q_{\text{изл}}.$$

Тогда

$$\Delta q_{\text{пот}} = q_{\text{изл}} + q_{\text{конв}} = 1,5 \cdot q_{\text{изл}}.$$

10. Полная величина тепловых потерь приемника определяется по формуле:

$$\Delta Q_{\text{пот}} = \Delta q_{\text{пот}} \cdot F_{\text{пр}},$$

где  $F_{\text{пр}}$  – площадь поверхности приемника. Задаемся этой величиной в диапазоне  $1 \div 7 \text{ м}^2$ .

11. Количество тепла, полученное приемником от солнца через гелиостаты, определяется по формуле:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{ТУ}} + \Delta Q_{\text{пот}},$$

12. Площадь поверхности приемника:

$$F'_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{пр}}}{E_{\text{пр}}}, \text{ м}^2,$$

где  $E_{\text{пр}}$  – максимальная энергетическая освещенность приемника, известна по заданию.

13. Погрешность вычислений:

$$\varepsilon = \left| \frac{F'_{\text{пр}} - F_{\text{пр}}}{F'_{\text{пр}}} \right| \cdot 100 \leq 1 \%.$$

Если расхождение между заданной и полученной величиной площади находится в допустимых пределах, то расчет считаем законченным. Если нет, то возвращаемся к п. 10, приняв  $F_{\text{пр}} = F'_{\text{пр}}$ .

14. Количество тепла, получаемое приемником от солнца через гелиостаты, можно рассчитать по формуле:

$$Q_{\text{пр}} = E_{\text{Г}} \cdot n \cdot F_{\text{Г}} \cdot R_{\text{отр}} \cdot A_{\text{погл}}.$$

Тогда, количество гелиостатов:

$$n = \frac{Q_{\text{пр}}}{E_{\text{Г}} \cdot F_{\text{Г}} \cdot R_{\text{отр}} \cdot A_{\text{погл}}}.$$

Количество гелиостатов округлить до целого числа.

15. Мощность солнечной электростанции в случае, если вместо ПТУ применить кремниевые фотоэлементы, занимающие ту же площадь, что и зеркала гелиостатов:

$$N_{\text{Э}}^{\Phi} = E_{\text{Г}} \cdot n \cdot F_{\text{Г}} \cdot \eta_{\text{фЭ}}.$$

16. Выводы по задаче.

#### 4.2.2. Задача № 2

##### Тема: Расчёт характеристик ветроустановок

Ветровая электростанция состоит из  $n$  однотипных ветроэнергетических установок (ВЭУ). Длина лопасти ветроколеса  $L$ , м. Скорость ветра  $V$ , м/с. КПД ветродвигателя  $\eta_{\text{В}}$ . Электрический КПД установки (генератора и преобразователя)  $\eta_{\text{Э}}$ . Температура окружающего воздуха и атмосферное давление соответственно  $t$ , °С и  $p$ , кПа.

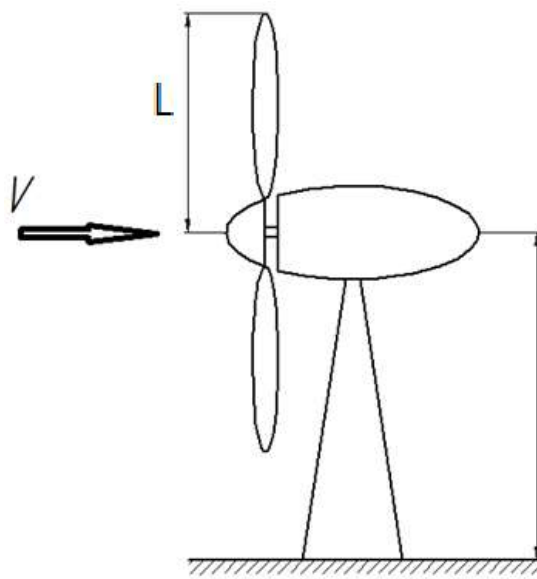


Рис. 3. Принципиальная схема ветроэнергетической установки

**Определить:**

1. Определить мощность ветровой электростанции.
  2. Построить график зависимости мощности ветроустановки от скорости ветра (диапазон изменения скорости ветра принять от 0 до  $V$  (6 точек)).
  3. Как изменится мощность ВЭУ при снижении температуры воздуха на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
  4. Построить графики зависимостей частоты вращения двухлопастного ( $z = 2$ ) и трехлопастного ( $z = 3$ ) колеса ветроустановки от скорости ветра (диапазон изменения скорости ветра принять от 0 до  $V$ : (6 точек)).
- Исходные данные принять по табл. 2.

Таблица 2

## Исходные данные для задачи № 2

Вариант	$n$ , шт.	$L$ , м	$V$ , м/с	$\eta_B$ , %	$\eta_{\Theta}$ , %	$t$ , °С	$p$ , кПа
1	8	55	12	31	73	0	100
2	9	57	11	32	74	-5	101
3	10	59	10	33	75	-10	102
4	11	45	9	34	76	-3	101
5	12	63	12	33	78	0	100
6	11	66	14	32	77	5	99
7	100	69	16	33	76	10	98
8	9	72	18	34	77	15	97
9	8	75	20	33	78	20	99
10	37	56	18	34	79	25	101
11	6	58	10	31	73	-13	100
12	5	60	9	32	74	-17	101
13	15	62	11	33	75	0	102
14	66	64	12	34	76	-8	101
15	27	66	14	33	78	2	100
16	18	68	16	32	77	6	99
17	29	70	13	33	76	-7	98
18	20	72	14	34	77	10	97
19	26	74	17	33	78	42	99
20	86	50	10	32	78	3	98
21	8	70	12	34	79	15	101
22	200	66	13	33	78	12	100
23	60	68	14	32	77	-16	99
24	80	70	15	33	76	18	98
25	27	72	16	34	77	25	97
26	12	40	12	33	78	0	99
27	28	76	10	34	79	21	101
28	30	69	8	33	76	30	98
29	10	70	12	34	79	15	101
30	20	66	13	33	78	-12	100
31	30	68	14	32	77	16	99
32	25	70	15	33	76	48	98
33	40	72	16	34	77	35	97
34	120	74	12	33	78	28	99

Вариант	$n$ , шт.	$L$ , м	$V$ , м/с	$\eta_B$ , %	$\eta_{\Theta}$ , %	$t$ , °С	$p$ , кПа
35	28	76	10	34	79	21	101
36	30	55	9	35	76	30	98
37	8	70	12	34	79	15	101
38	21	30	13	33	78	-12	100
39	70	68	14	32	77	46	99
30	25	70	15	33	76	18	98
41	27	72	16	34	77	25	97
42	90	74	12	33	78	28	99
43	88	30	8	38	77	-10	100
44	67	64	7	40	79	-5	101
45	60	52	9	39	76	-0	99
46	30	56	14	32	77	16	99
47	40	70	5	33	76	18	98
48	37	72	16	34	77	25	97
49	52	74	12	33	78	28	99
50	28	76	14	34	79	2	101

### Методические указания к задаче № 2

1. Расход воздуха, проходящий через ометаемую площадь (рис. 4) из уравнения неразрывности:

$$m = F \cdot V \cdot \rho, \text{ кг/с,}$$

где  $F = \pi L^2$  – площадь, ометаемая лопастями ветроустановки (рис. 4);

$\rho = P/RT$  – плотность воздуха, определяется из уравнения Менделеева – Клапейрона, кг/м<sup>3</sup>;

$$R = \frac{8.314}{29} \text{ – газовая постоянная для воздуха, кДж/кгК;}$$

$T$  – температура воздуха, Кельвин;

$p$  – давление воздуха, кПа.

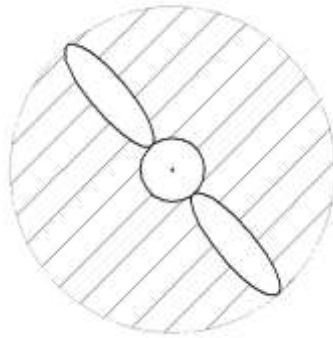


Рис. 4. Схема ветроколеса

2. Мощность идеальной ветроэнергетической установки при скорости ветра  $V$ :

$$N_0 = \frac{mV^2}{2}, \text{Вт} \rightarrow \text{перевести в МВт.}$$

3. Мощность реальной ВЭУ:

$$N_{\text{ВЭУ}} = N_0 \cdot \eta_{\text{В}} \cdot \eta_{\text{Э}}, \text{ МВт.}$$

4. Мощность ветровой электростанции ВЭС:

$$N_{\text{ВЭС}} = n \cdot N_{\text{ВЭУ}}, \text{ МВт.}$$

5. Построить график зависимости мощности ВЭУ от скорости ветра.

В соответствии с вышеприведенным расчетом произвести аналогичное вычисление мощности ВЭУ для диапазона скоростей ветра от 0 до  $V$  м/с при температуре  $t$  градусов (6 точек).

Результаты вычислений значений мощности ВЭУ привести в таблице результатов (табл. 3).

6. Повторить расчет для уменьшившейся на 10 градусов температуры окружающего воздуха (см п. 3 задания).

Результаты вычислений значений мощности ВЭУ привести в таблице результатов (табл. 3).

По данным табл. 3 построить зависимость мощности ветроустановки от скорости ветра  $V$  ( $N_{\text{ВЭУ}} = f(V)$ ) на одном графике для двух значений температуры воздуха.

Ось скорости ветра принять за горизонтальную.

Таблица 3

### Результаты вычислений мощностей ВЭУ

$t, ^\circ\text{C}$			$t - 10^\circ, ^\circ\text{C}$		
$V, \text{ м/с}$	$m, \text{ кг/с}$	$N_{\text{ВЭУ}}, \text{ МВт}$	$V, \text{ м/с}$	$m, \text{ кг/с}$	$N_{\text{ВЭУ}}, \text{ МВт}$
0			0		
$V$			$V$		

7. Построение графика зависимости частоты вращения от скорости ветра (п. 4 задания).

Оптимальная частота вращения:

$$\omega = \frac{4 \cdot \pi \cdot V}{z \cdot R}, 1/\text{с},$$

где  $V$  – скорость ветра, м/с;  $z$  – число лопастей;  $R=L$  – длина лопасти ветроколеса, м.

Частота вращения (оборотов в секунду):

$$f = \frac{\omega}{2\pi}, \text{ об/с}.$$

Подставляя исходные данные в указанные формулы, рассчитать частоты вращения двух- и трехлопастного колеса ВЭУ для диапазона скоростей ветра от  $0$  до  $V$  м/с. Результаты вычислений представить в табл. 4.

Таблица 4

### Результаты вычислений частот

$V, \text{ м/с}$	$f$ ( $z=2$ )	$f$ ( $z=3$ )
0	0	0
$V$		

На основании табл. 4 построить графики зависимости частоты вращения от скорости ветра при разном числе лопастей  $z=2$  и  $z=3$ . За горизонтальную ось принять ось скоростей.

8. Привести выводы по пп. 5, 6 и 7.

### 4.2.3. Задача № 3

#### Тема: Расчет тепловой схемы геотермальной электростанции бинарного типа

Геотермальная электростанция (ГеоЭС) состоит из двух турбин:

- первая – работает на насыщенном водяном паре, полученном в расширителе. Электрическая мощность –  $N_3^{пт}$ ;
- вторая – работает на насыщенном паре хладона – R11, который испаряется за счёт тепла воды, отводимой из расширителя.

Вода из геотермальных скважин с давлением  $p_{гв}$  температурой  $t_{гв}$  поступает в расширитель. В расширителе образуется сухой насыщенный пар с давлением  $p_p$ . Этот пар направляется в паровую турбину. Оставшаяся вода из расширителя идёт в испаритель, где охлаждается на  $\Delta t_{в}^и$  и закачивается обратно в скважину. Температурный напор в испарительной установке  $\delta t_{и} = 20$  °С. Рабочие тела расширяются в турбинах и поступают в конденсаторы, где охлаждаются водой из реки с температурой  $t_{хв}$ . Нагрев воды в конденсаторе  $\Delta t_{в} = 10$  °С, а недогрев до температуры насыщения  $\delta t_{к} = 5$  °С.

Относительные внутренние КПД турбин  $\eta_{oi}^{пт} = \eta_{oi}^{хт} = 0,8$ . Электро-механический КПД турбогенераторов  $\eta_{эм} = 0,95$ .

#### Определить:

- электрическую мощность турбины, работающей на хладоне –  $N_3^{хт}$  и суммарную мощность ГеоЭС с учетом затрат энергии на насос, закачивающий геотермальную воду в скважину;
- расходы рабочих тел на обе турбины;
- расход геотермальной воды из скважины;
- КПД ГеоЭС.
- по температуре паров хладона на входе в турбину подобрать из списка хладонов (фреонов), (см. сайт преподавателя <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/n/NASA/Education/NiVIE/Tab1>) другой



низкокипящий теплоноситель (например, R113, R12, R22, R600a и т.д.).  
 Выполнить расчет показателей работы ГеоЭС на новом рабочем теле.  
 Исходные данные взять из табл. 5 по вариантам.

Таблица 5

**Исходные данные для задачи № 3**

Вариант	$N_{\text{Э}}^{\text{ПТ}}$ , МВт	$p_{\text{ГВ}}$ , МПа	$t_{\text{ГВ}}$ , °С	$p_{\text{р}}$ , МПа	$\Delta t_{\text{Б}}^{\text{И}}$ , °С	$t_{\text{ХВ}}$ , °С
1	1	15	160	0,25	40	2
2	2	16	165	0,26	50	3
3	2,5	17	170	0,27	60	4
4	3	18	165	0,28	45	5
5	3,5	19	160	0,29	55	6
6	3,0	20	155	0,30	65	7
7	2,5	21	150	0,20	42	8
8	2	22	155	0,21	43	9
9	1,5	23	170	0,22	45	8
10	3,0	24	160	0,23	48	7
11	2,5	25	170	0,31	47	6
12	2	26	160	0,24	49	5
13	1,5	27	155	0,26	59	4
14	2	28	150	0,28	60	3
15	2,5	29	155	0,22	54	2
16	3	30	170	0,21	56	1
17	2,5	20	150	0,23	58	2
18	3	19	170	0,27	57	3
19	3,5	18	140	0,22	52	4
20	3,0	17	165	0,23	58	4
21	2,5	16	150	0,31	55	5
22	2	15	160	0,24	65	6
23	1,5	14	155	0,26	42	7
24	2	13	150	0,28	43	8
25	2,5	12	155	0,22	45	9
26	3	11	145	0,21	48	8
27	2,5	10	150	0,23	47	7
28	3	15	145	0,27	57	6
29	3,5	18	150	0,22	47	5
30	3,0	17	165	0,23	49	4
31	4	19	140	0,31	59	3
32	4,5	12	145	0,24	60	2
33	5	14	150	0,26	54	1
34	5,5	15	155	0,28	56	2

Вариант	$N_3^{ПТ}$ , МВт	$p_{ГВ}$ , МПа	$t_{ГВ}$ , °C	$p_p$ , МПа	$\Delta t_B^И$ , °C	$t_{XB}$ , °C
35	6	21	160	0,32	58	3
36	6,5	23	165	0,21	57	4
37	7	15	170	0,33	52	5
38	7,5	17	155	0,27	58	6
39	8	20	160	0,32	60	7
40	3	10	130	0,21	51	8
41	4	11	135	0,22	50	7
42	5	12	140	0,23	42	6
43	6	13	145	0,24	43	5
44	7	14	150	0,25	44	4
45	8	15	155	0,26	45	3
46	1	16	130	0,27	46	2
47	2	17	135	0,30	47	1
48	3	18	140	0,20	48	5
49	4	19	150	0,25	45	4
50	5	20	145	0,24	47	6

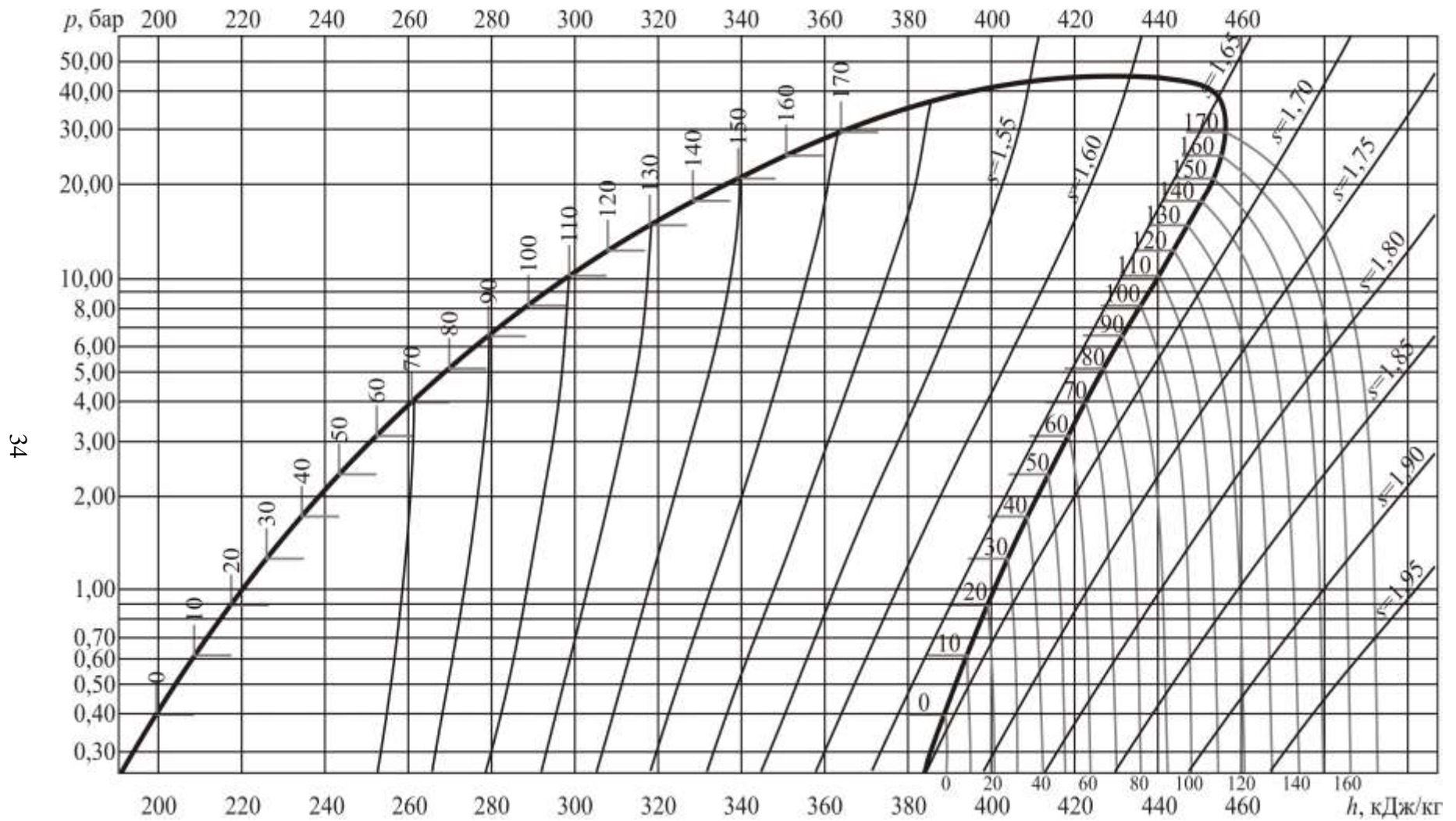


Рис. 5.  $\lg p - h$ -диаграмма хладона R11



## 2. Расчет схемы паровой турбины, работающей на сухом насыщенном водяном паре

### 2.1. Температура пара на входе в конденсатор турбины:

$$t_{\text{к}}^{\text{пт}} = t_{\text{хв}} + \Delta t_{\text{в}} + \delta t_{\text{к}}, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где  $t_{\text{хв}}$  – температура охлаждающей воды на входе в конденсатор;

$\Delta t_{\text{в}}$  – нагрев воды в конденсаторе;

$\delta t_{\text{к}}$  – температурный напор в конденсаторе.

2.2. Давление пара в конденсаторе турбины определяется по таблицам свойств воды и водяного пара:

$$p_{\text{к}} = f(t_{\text{к}}^{\text{пт}}), \text{ МПа.}$$

### 2.3. Располагаемый теплоперепад на турбину:

$$H_0^{\text{пт}} = h_0^{\text{пт}} - h_{\text{кт}}^{\text{пт}}, \text{ кДж/кг},$$

где  $h_0^{\text{пт}}$  – энтальпия сухого насыщенного пара на входе в турбину. Определяется по таблицам свойств воды и водяного пара как энтальпия сухого насыщенного пара:  $h_0^{\text{пт}} = f(p_{\text{п}})$ ;

$h_{\text{кт}}^{\text{пт}}$  – энтальпия в конце теоретического процесса расширения пара в турбине. Определяется по  $h-s$ -диаграмме воды и водяного пара:  $h_{\text{кт}}^{\text{пт}} = f(p_{\text{к}}, s_0)$ . Здесь  $p_{\text{к}}$  – давление пара в конденсаторе,  $s_0$  – энтропия в начальной точке процесса расширения;

### 2.4. Расход пара из расширителя на паровую турбину:

$$D_0^{\text{пт}} = \frac{N_{\text{э}}^{\text{пт}}}{H_0^{\text{пт}} \cdot \eta_{oi}^{\text{пт}} \cdot \eta_{\text{эм}}}, \text{ кг/с},$$

где  $\eta_{oi}^{\text{пт}}$  – относительный внутренний КПД паровой турбины;

$\eta_{\text{эм}}$  – электромеханический КПД турбогенераторов.

## 3. Расчет расширителя геотермальной воды

### 3.1. Уравнение теплового баланса расширителя (рис. 6):

$$G_{\text{гв}} \cdot h_{\text{гв}} = D_0^{\text{пт}} \cdot h_0^{\text{пт}} + G_{\text{и}} \cdot h_{\text{гв}}^{\text{вых.р}},$$

где  $G_{\text{гв}}$  – расход геотермальной воды из скважины;

$h_{\text{гв}}$  – энтальпия геотермальной воды из скважины:  $h_{\text{гв}} = f(p_{\text{гв}}, t_{\text{гв}})$ ;

$G_{\text{и}}$  – расход воды из расширителя в испаритель;

$h_{\text{ГВ}}^{\text{ВЫХ.Р}}$  – энтальпия геотермальной воды на выходе из расширителя.

Определяется по таблицам свойств воды и водяного пара как энтальпия кипящей воды:  $h_{\text{ГВ}}^{\text{ВЫХ.Р}} = f(p_{\text{р}})$ .

3.2. Уравнение материального баланса расширителя (рис. 6):

$$G_{\text{ГВ}} = D_0^{\text{ПТ}} + G_{\text{и}}.$$

Решая совместно эти два уравнения необходимо определить  $G_{\text{ГВ}}$  и  $G_{\text{и}}$ .

3.3. Температура геотермальной воды на выходе из расширителя определяется по таблицам свойств воды и водяного пара как температура насыщения при давлении в расширителе:

$$t_{\text{ГВ}}^{\text{ВЫХ.Р}} = f(p_{\text{р}}).$$

4. Определение параметров в характерных точках тепловой схемы турбины, работающей на хладоне

4.1. Температура паров хладона на входе в турбину:

$$t_0^{\text{ХТ}} = t_{\text{ГВ}}^{\text{ВЫХ.Р}} - \delta t_{\text{и}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.2. Температура паров хладона на выходе из турбины:

$$t_{\text{к}}^{\text{ХТ}} = t_{\text{ХВ}} + \Delta t_{\text{в}} + \delta t_{\text{к}}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.3. Энтальпия паров хладона на входе в турбину определяется по  $p-h$  диаграмме для хладона (рис. 4) на линии насыщения при  $t_0^{\text{ХТ}}$ :

$$h_0^{\text{ХТ}} = f(t_0^{\text{ХТ}}), \text{ кДж/кг}.$$

4.4. Энтальпия паров хладона на выходе из турбины определяется по  $p-h$  диаграмме для хладона (рис. 5) на пересечении линий  $s_0^{\text{ХТ}} = \text{const}$  и линии температуры  $t_{\text{к}}^{\text{ХТ}}$ :

$$h_{\text{кт}}^{\text{ХТ}} = f(t_{\text{к}}^{\text{ХТ}}, s_0^{\text{ХТ}}), \text{ кДж/кг}.$$

4.5. Энтальпия кипящего хладона на выходе из конденсатора определяется по  $p-h$ -диаграмме для хладона (рис. 5) на кривой для кипящей жидкости по температуре  $t_{\text{к}}^{\text{ХТ}}$ :

$$h'_k{}^{xT} = f(t_k^{xT}), \text{ кДж/кг.}$$

## 5. Расчет испарителя.

### 5.1. Температура геотермальной воды на выходе из испарителя:

$$t_{ГВ}^{\text{ВЫХ.И}} = t_{ГВ}^{\text{ВЫХ.Р}} - \Delta t_{В}^{\text{И}}, \text{ } ^\circ\text{C.}$$

### 5.2. Уравнение теплового баланса испарителя:

$$G_{\text{И}} \cdot c_p \cdot (t_{ГВ}^{\text{ВЫХ.Р}} - t_{ГВ}^{\text{ВЫХ.И}}) = D_0^{xT} \cdot (h_0^{xT} - h'_k{}^{xT}),$$

где  $c_p$  – теплоемкость воды. Принять  $c_p = 4,2$  кДж/кг.

Из этого уравнения необходимо определить  $D_0^{xT}$ .

### 6. Расчет мощности турбины, работающей на хладоне:

$$N_9^{xT} = D_0^{xT} \cdot (h_0^{xT} - h_{kt}^{xT}) \cdot \eta_{oi}^{xT} \cdot \eta_{ЭМ}, \text{ МВт,}$$

где  $\eta_{oi}^{xT}$  – относительный внутренний КПД хладоновой турбины;

$\eta_{ЭМ}$  – электромеханический КПД турбогенераторов.

### 7. Определение мощности насоса для закачки геотермальной воды в скважину:

$$N_9^H = G_{ГВ} \cdot \Delta h_H = G_{ГВ} \cdot \frac{(1,1 \cdot p_{ГВ} - p_p)}{\eta_H} \cdot v_{ГВ}, \text{ МВт,}$$

где  $\eta_H$  – КПД насоса, принимается  $\eta_H = 0,8$ ;

$v_{ГВ}$  – средний удельный объем геотермальной воды. Определяется по таблицам свойств воды и водяного пара как объем кипящей воды при давлении в расширителе  $v_{ГВ} = f(p_p)$ .

### 8. Электрическая мощность ГеоТЭС:

$$N_9^{\text{ГеоТЭС}} = N_9^{xT} + N_9^{\text{ПТ}} - N_9^H, \text{ МВт.}$$

### 9. КПД ГеоЭС:

$$\eta_{\text{ГеоТЭС}} = \frac{N_9^{\text{ГеоТЭС}}}{Q_{ГВ}} = \frac{N_9^{\text{ГеоТЭС}}}{G_{ГВ} \cdot c_p \cdot (t_{ГВ} - t_{ГВ}^{\text{ВЫХ.И}})}$$

10. По температуре паров хладона на входе в турбину подобрать из списка хладонов (фреонов), (см. сайт преподавателя <http://portal.tpu.ru:7777/SHARED/n/NASA/Education/NiVIE/Tab1>) другой

низкокипящий теплоноситель (например, R113, R12, R22, R600a и т.д.).  
Выполнить расчет показателей работы ГеоЭС на новом рабочем теле.



## 5. ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ КОНТРОЛЬ

После завершения изучения дисциплины студенты сдают экзамен.

При определении результата экзамена учитываются результаты выполненной контрольной работы. Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме, приведен в разделе 5.2.

### 5.1. Вопросы для подготовки к экзамену

1. Классификация возобновляемых источников энергии. Потенциал ВИЭ, эффективность использования различных их видов, их достоинства и недостатки. Сравнение характеристик ВИЭ и НИЭ.

2. Научные принципы использования ВИЭ: анализ, временные характеристики, качество. Технические, социально-экономические и экологические проблемы использования ВИЭ.

3. Солнечное излучение и его характеристики. Области солнечного спектра. Прямые лучи и рассеянное излучение. Облученность. Приборы для измерения лучистых потоков. Перспективы использования энергии Солнца, достоинства и недостатки.

4. Нагревание воды солнечным излучением. Типы солнечных нагревателей. Открытые нагреватели. Черные резервуары. Проточные нагреватели. Селективные поверхности. Вакууммированные приемники.

5. Подогреватели воздуха, использующие солнечную энергию. Сушильные камеры. Солнечные пруды. Опреснение воды.

6. Солнечные отопительные системы (пассивные и активные).

7. Концентраторы солнечной энергии. Параболический вогнутый концентратор. Солнечные системы для получения электроэнергии.

8. Фотоэлектрическая генерация. Фотоэлементы и их характеристики. Теоретический КПД кремниевой батареи. Способы повышения эффективности ФЭ.

9. Термоэлектрические преобразователи, принцип действия, эффективность, достоинства и недостатки

10. Схема, принцип действия, достоинства и недостатки паротурбинной СЭС. Техно-экономические проблемы создания СЭС различных типов. Их сравнение с ТЭС. Экологические последствия создания СЭС.

11. Ветроэнергетика. Ветер и его характеристики. Перспективы использования энергии ветра, достоинства и недостатки.

12. Сила ветра. Определение средней скорости ветра. Классификация ветроустановок по классам ветродвигателей, достоинства и недостатки классов

13. Основы теории ВЭУ. Располагаемая мощность ветроколеса. Коэффициент использования энергии ветра.

14. Режимы работы ветроколеса. Классификация ВЭУ. Экологические проблемы ветроэнергетики.

15. Энергия волн. Характеристики волнового движения. Амплитуда. Мощность волнового движения. Скорость перемещения волны. Преобразователи энергии волн (схемы, принцип действия, эффективность, достоинства и недостатки). Экология.

16. Энергия приливов. Периоды колебаний уровня воды. Причины возникновения приливов. Лунные и солнечные приливы. Технико-экономические и экологические проблемы ПЭС. Использование энергии приливов и морских течений (схемы, принцип действия, эффективность, достоинства и недостатки).

17. Преобразование тепловой энергии океана. ОТЭС замкнутого цикла. Мощность ОТЭС. Экологические и техникоэкономические проблемы ОТЭС. Выбор рабочих тел.

18. ОТЭС открытого цикла. Комбинированная выработка электроэнергии и пресной воды. Технические трудности создания ОТЭС открытого цикла. Арктические ОТЭС. Определение мощности. Экологические проблемы.

19. Геотермальная энергия и ее свойства. Строение Земли. Классификация геотермальных районов. ГеоТЭС. Экологические проблемы строительства ГеоТЭС. Перспективы использования геотермальной энергии, достоинства и недостатки. Методы и способы использования геотермального тепла.

20. Использование геотермального тепла в системах теплоснабжения. Принципиальная схема геотермального теплоснабжения с теплообменниками. Принципиальная схема геотермального теплоснабжения с параллельной подачей геотермальной воды на отопление и горячее водоснабжение и пиковым догревом воды на отопление.

21. Схема и принцип действия простейшей ГеоТЭС. Схема геотермальной электростанции с низкокипящим рабочим веществом. Одноконтурные ГеоТЭС (схема, принцип действия, достоинства и недостатки). Двухконтурные ГеоТЭС (схема, принцип действия, достоинства и недостатки).

22. Комбинированная выработка электроэнергии, тепла, пресной воды и минеральных веществ. Оценка мощности ГеоТЭС.

23. Биомасса. Биотопливо. Классификация биотоплива и его энергетические характеристики. Влагосодержание, плотность, теплота сгорания. Основные процессы переработки биомассы: термохимические, биохимические, агрохимические.

24. Производство биомассы для энергетических целей. Энергетические фермы. Кругооборот энергии и вещества.

25. Техничко-экономические и экологические показатели процессов переработки биомассы. Сжигание. Пиролиз. Газификация. Спиртовая ферментация. Анаэробное сбраживание. Биогазогенераторы.

### **5.2. Образец экзаменационного билета для студентов, изучающих дисциплину по классической заочной форме**

В данном разделе приведен образец билета для студентов, сдающих экзамен очно во время сессии в Томске. Экзаменационный билет включает 4 вопроса.

#### **Билет № X**

1. Классификация геотермальных районов.
2. Характеристики волнового движения.
3. Солнечные отопительные системы (пассивные и активные).
4. Классификация биотоплива и его энергетические характеристики.

## **6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **6.1. Литература обязательная**

1. Городов Р.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие. / Р.В. Городов, В.Е. Губин, А.С. Матвеев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 294 с.

2. Губин В.Е. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / В.Е. Губин, А.А. Матвеева, А.С. Матвеев; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 216 с.

3. Лукутин Б.В. Нетрадиционные способы производства электроэнергии учеб. пособие / Б.В. Лукутин, М.А. Сурков; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lib.tpu.ru/fulltext2/m/2013/m105.pdf>, свободный.

### **6.2. Литература дополнительная**

4. Сибикин Ю.Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. – М.: КноРус, 2010. – 228 с.

5. Баранов Н.Н. Нетрадиционные возобновляемые источники и методы преобразования их энергии / Н.Н. Баранов. – М.: Изд-во МЭИ, 2011. – 216 с.

6. Алхасов А.Б. Возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / А.Б. Алхасов. – М.: Изд-во МЭИ, 2011. – 271 с.

7. Удалов С.Н. Возобновляемые источники энергии: учебник / С.Н. Удалов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 432 с.

### **6.3. Internet-ресурсы**

8. Сайт специальности «Тепловые электрические станции» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.03-ts.ru/>, свободный.

9. WebСТ – Тепловые электрические станции [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://e-le.lcg.tpu.ru/webct/public/home.pl>, свободный.

10. Крупнейшая бесплатная электронная интернет библиотека для «технически умных» людей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tehlit.ru/>, свободный.

11. Электронная энциклопедия энергетики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/trenager/trenager.htm>, свободный.

12. Сайт кафедры ТЭС Новосибирского государственного технического университета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tes.power.nstu.ru/>, свободный.

Учебное издание

# НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Методические указания и индивидуальные задания

*Составители*

МАТВЕЕВА Анастасия Александровна

Рецензент

*кандидат технических наук,  
доцент кафедры АТЭС ЭНИН*

*А.В. Воробьев*


Компьютерная верстка *О.А. Гончарук*



Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)