

ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Алтайский государственный технический университет
им. И. И. Ползунова»

ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Учебное пособие

Под редакцией профессора, д.т.н. В. Я. Федянина

Рекомендовано Алтайским государственным техническим университетом им. И. И. Ползунова в качестве учебного пособия для студентов обучающихся по направлению 13.03.02, 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника; для аспирантов, обучающихся по направлениям 14.06.01 – Ядерная, тепловая и возобновляемая энергетика и сопутствующие технологии, 35.06.04 – Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве



ООО «МЦ ЭОР», Барнаул – 2018

УДК 620.97 (075.8)

Основы использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. Я. Федянин, С. О. Хомутов, В. М. Иванов, И. А. Бахтина, Т. Ю. Иванова; под ред. В. Я. Федянина. – Барнаул : ООО «МЦ ЭОР», 2018. – 146 стр. – Режим доступа: <http://mceor.ru/18007>. – (Дата обращения: 12.06.2018). **ISBN 978-5-6040354-2-9**

Изложены физические представления об основных явлениях, лежащих в основе использования для электро- теплоснабжения наиболее важных в континентальных районах страны возобновляемых источников энергии – энергии солнечного излучения, энергии ветра, энергии потоков воздуха и воды, низкопотенциального тепла поверхностных слоев Земли. Приведены примеры конструкций агрегатов нетрадиционной энергетики.

Учебное пособие подготовлено при финансовой поддержке Европейской Комиссии в рамках проекта Jean Monnet Module «Изучение и интеграция европейского опыта использования возобновляемых источников энергии» (565066-EPP-1-2015-1-RU-EPPJMO-MODULE). Содержание данного материала отражает мнение авторов, и Европейская Комиссия не несет ответственности за использование содержащейся в нем информации.

Рекомендовано Алтайским государственным техническим университетом им. И. И. Ползунова в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02, 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника; для аспирантов, обучающихся по направлениям 14.06.01 – Ядерная, тепловая и возобновляемая энергетика и сопутствующие технологии, 35.06.04 – Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве. Протокол № 7 от 23 мая 2018 г.

SAEPRE
Jean Monnet Module



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

Рецензент:

Н. М. Оскорбин – д.т.н., профессор АГУ.

ISBN 978-5-6040354-2-9



© Федянин В. Я., Хомутов С. О., Иванов В. М., 2018

© Бахтина И. А., Иванова Т. Ю., 2018

© ООО «МЦ ЭОР», 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение. Энергетическая проблема: ее корни и подходы к решению.	6
Глава 1. Основы использования возобновляемых источников энергии.	11
Солнечное излучение в космосе.	11
Солнечное излучение вблизи поверхности Земли.	11
Тепловой баланс планеты.	13
Задачи.	18
Глава 2. Использование энергии солнечного излучения.	20
Оценка энергетического потенциала солнечного излучения.	20
Солнечные водогрейные установки.	23
Типы коллекторов.	30
Устройство плоского солнечного коллектора.	32
Воздушные коллекторы.	48
Пассивные системы использования солнечной энергии.	55
Эффективность пассивных систем солнечного отопления	62
Задачи.	65
Глава 3. Использование тепловой энергии воздуха, воды, поверхностных слоев Земли.	67
Потенциал низкотемпературного тепла.	67
Тепловые двигатели и холодильные машины.	68
Парокомпрессионные тепловые насосы.	70
Термотрансформаторы.	73
Тепловые насосы абсорбционного типа.	76
Тепловые аккумуляторы.	80
Аккумуляторы с переменной температурой.	81
Латентные системы.	83
Термохимические аккумуляторы.	85
Потери тепловой энергии в тепловых накопителях.	87
Задачи.	89
Глава 4. Использование энергии ветра.	90
Ветроэнергетический потенциал.	90

Кинетическая энергия потоков воздуха вблизи поверхности Земли.	90
Зависимость скорости ветра от высоты.	92
Изменение скорости ветра во времени.	92
Классификация ветроустановок.	93
Основы теории ветроэнергетических установок.	98
Мощность и энергия, вырабатываемые ветроустановкой.	107
Задачи.	111
 Глава 5. Использование энергии водных потоков.	112
Гидроэнергетические установки. Терминология, объекты изучения.	112
Водные ресурсы и их использование.	113
Основные технические схемы использования водной энергии. . . .	117
Движение жидкости в закрытом канале без свободной поверхности.	119
Методика расчета валового гидроэнергетического потенциала естественных водотоков.	121
Преобразование энергии водного потока в электрическую энергию.	123
Основы теории рабочего процесса гидромашин. Взаимодействие течения со стенками канала, ограничивающего поток	125
Основное энергетическое уравнение турбомашины. Уравнение моментов.	126
Уравнение Эйлера для турбомашин.	128
Гидравлические машины. Классификация.	129
Подобные режимы работы гидромашин.	136
Приведенные параметры.	138
Коэффициент быстроходности.	138
Высота отсасывания. Коэффициент кавитации. Допустимая высота отсасывания.	139
Характеристики турбин.	143
Задачи.	145
 Литература	148

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разнообразие возобновляемых источников энергии и многообразие технологий их использования требуют рассмотрения широкого спектра вопросов из всех разделов физики и техники.

Настоящее учебное пособие рассматривает основные закономерности, определяющие процессы преобразования энергии солнечного излучения в атмосфере Земли; физические основы конструирования агрегатов нетрадиционной энергетики, которые могут быть использованы в системах энергоснабжения.

В первой главе кратко описываются основные закономерности, определяющие тепловой баланс планеты. Среди возобновляемых источников энергии наиболее перспективной по масштабам ресурсов, экологической чистоте и повсеместной распространенности по праву считается энергия солнечной радиации, в основном оптического диапазона – видимого света и примыкающих к нему инфракрасного излучения и ближнего ультрафиолетового излучения.

Во второй главе рассмотрены основные принципы конструирования солнечных коллекторов и установок теплоснабжения на их основе. Рассмотрены основные принципы использования пассивных систем солнечного отопления.

В третьей главе излагаются основные положения технической термодинамики применительно к теории холодильных машин и тепловых насосов. Рассмотрены принципы работы и основы расчета показателей энергетической эффективности тепловых насосов, даются основные принципы функционирования трансформаторов тепла в системах отопления, горячего водоснабжения и в других технологических процессах, основанных на тепло- и массопереносе, аккумулировании тепловой энергии.

В четвертой главе рассмотрены характеристики ветра как возобновляемого энергетического ресурса, его климатологические параметры. Приведены принципы классификации ветроэнергетических установок. Изложены основы теории ветроэнергетических установок, методики расчета вырабатываемой ими энергии.

В пятой главе рассмотрены вопросы энергетического использования водных ресурсов. Изложены методики оценки гидроэнергетического потенциала. Рассмотрены основы инженерных расчетов гидроэнергетических агрегатов. Приведены методы расчета параметров гидромашин.

Авторы учебного пособия:

Бахтина И. А. (главы 2, 5), Иванов В. М. и Иванова Т. Ю. (глава 5), Федянин В. Я. (введение, главы 1, 2, 3, 4), Хомутов С. О. (главы 2, 4).

ВВЕДЕНИЕ

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА: ЕЕ КОРНИ И ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ

Энергетика, или, как часто говорят, топливно-энергетический комплекс, является одной из основ существования и развития современного общества. Научно-технический прогресс, интенсификация общественного производства, улучшение условий труда и быта определяются и будут определяться в значительной степени энергетикой. В настоящее время вопросам функционирования топливно-энергетического комплекса уделяется первостепенное внимание. В современном мире энергетика—это не только основная научно-техническая проблема, но и важный социально-политический аспект, определяющий направление развития общества.

Долгое время люди знают о том, что энергетические ресурсы Земли ограничены и что быстрый рост численности населения и непрерывное увеличение потребности в этих ресурсах могут привести к серьезным коллизиям. Однако в течение длительного периода времени человечество продолжало благополучно существовать и развиваться благодаря сочетанию технической изобретательности и освоению природного потенциала Земли.

Разразившийся в начале 70-х годов двадцатого века в ведущих государствах энергетический кризис остро поставил перед человечеством вопрос об ограниченности запасов ископаемого топлива, и прежде всего нефти. Из-за быстрого перехода от длительного периода устойчивого снабжения дешевыми и легкодоступными нефтепродуктами к состоянию ненадежного и дорогостоящего снабжения ими проблема топливно-энергетических ресурсов привлекла большое внимание, и многие люди осознали, что энергетика образует основу для всей деятельности человека и играет важную роль в поддержании жизненного уровня, к которому привыкли жители развитых стран.

С точки зрения истории развития человечества подобная ситуация не является новой, развитию общества всегда сопутствовали изменения и ограничения. Такие бедствия, как голод, эпидемия чумы и войны, каждое из которых в какой-то степени было отражением нехватки ресурсов, сдерживали развитие общества и поддерживали численность населения Земли на сравнительно низком уровне. Еще семьдесят лет назад эти факторы значительно ограничивали рост населения в таких странах, как Индия и Китай. Мы часто не замечаем, сколь большие изменения произошли в образе жизни на протяжении последних тридцати-сорока лет. Можно предположить, что не менее глубокие изменения произойдут в течение предстоящих десятилетий.

Период широкомасштабного использования ископаемого топлива относительно не велик. Еще двести лет назад основными источниками энергии были мускульная сила людей и рабочего скота, а также энергия от сжигания древесного топлива и навоза, использовавшаяся для приготовления пищи и обогрева

домов. К концу XIX века уголь заменил древесное топливо в большинстве отраслей промышленного производства и стал применяться на транспорте. Однако доля дров и древесного угля оставалась заметной, а энергия мускульной силы человека и животных продолжала использоваться. Только в двадцатых годах двадцатого века благодаря использованию нефти и природного газа начала изменяться структура энергетического баланса. В течение этого периода, например, рабочий скот заменили тракторами, водяные и ветряные мельницы – электродвигателями, дровяные и угольные печи – печами, работающими на нефти и газе; в каждом случае нефть и природный газ вытесняли традиционные источники.

Однако с наступлением нефтегазовой эры специалисты начали осознавать, что пределом для потребления ископаемых органических топлив являются их запасы в недрах Земли, которые нельзя увеличить и которые должны служить всем людям во все времена.

Наблюдающиеся сейчас трудности вызваны высокими ценами на энергоресурсы, а не их дефицитом, поскольку размеры разведанных запасов нефти, природного газа, урана велики; можно с уверенностью утверждать, что эти энергоресурсы будут продолжать играть важную роль в течение длительного времени. Однако верно и то, что запасы нефти и природного газа не в состоянии будут удовлетворять потребности в коммерческих энергоресурсах¹. Мы приближаемся к такому периоду, когда по мере истощения наиболее крупных и доступных запасов невозобновляемых топливно-энергетических ресурсов будет сокращаться не только их удельный вес в общем потреблении энергии, но и объем их потребления. Маловероятно, что человечество останется совсем без угля, нефти и природного газа, однако в результате действия рыночных механизмов эти уменьшающиеся и все более дорогие ресурсы будут использоваться в качестве сырья для химической промышленности.

Уровень использования энергоресурсов – это основной фактор, обеспечивающий развитие современной цивилизации. В своем развитии от первобытного до современного технологического общества человек прошел несколько этапов, каждому из которых соответствовал вполне определенный уровень энергопотребления. Сегодня в развитых странах средняя мощность разнообразных источников составляет около 10 кВт на человека, что в 100 раз больше, чем средняя мускульная мощность одного человека. Поэтому основной функцией человека все больше и больше становится управление энергетическими потоками, как теперь принято говорить – нажимать кнопки. Это умственная задача, доля физического труда становится все меньше. Это привело к тому, что основными ценностями человека, которые нужны современной цивилизации, стали

¹ К коммерческим энергоресурсам относят уголь, нефть, газ, а также ядерную, гидравлическую и геотермальную энергию.

его духовные и умственные качества. Статистические данные свидетельствуют о том, что между валовым национальным продуктом и потреблением энергии в пределах естественной флуктуации существует простая линейная зависимость.

Если начать отнимать у людей энергетические ресурсы, то развитие остановится, человечество начнет терять ряд достижений современной цивилизации, и мы вернемся к уровню цивилизации средних веков. Поэтому те принудительные веерные отключения электроэнергии, недостаточное топливо- и теплоснабжение, свидетелями которых мы являемся в последнее время у нас в стране—признаки очень серьезных кризисных явлений; они заслуживают очень пристального внимания и объективного анализа.

Необходимо учитывать, что глубинная причина кризиса весьма проста, сейчас потребляется энергия, которая более чем на 90 процентов производится за счет тепла, получаемого от сгорания органического топлива — нефти, угля, газа. В настоящее время в год потребляется столько ископаемого топлива, сколько его образовывалось в течение 500 тысяч лет. Существуют различные оценки запасов топлива на земном шаре и распределения их по регионам. Однако все оценки свидетельствуют о том, что энергетика, основанная на этих видах топлива, исчезнет в течение одного-двух столетий. В разных странах этот кризис будет развиваться по-разному. Темпы преобразований будут зависеть от роста народонаселения, экономического развития, повышения эффективности использования энергии, внедрения более совершенных технологий и, конечно же, от скорости замещения ископаемого топлива другими энергоресурсами.

Очень перспективным выглядит использование возобновляемых источников энергии и, в частности, энергетических источников, связанных с преобразованием солнечного излучения, достигающего Земли. Их валовой потенциал на три-четыре порядка превосходит современное энергопотребление.

На рисунке1 представлено большинство из известных возобновляемых источников: геотермальное тепло; гидроэнергия рек, морских течений и волн; ветер; солнечное излучение; энергия морских приливов.

Потенциал этих возобновляемых источников достаточен для того, чтобы удовлетворить существующую и будущую потребность людей в энергии. Однако освоить этот потенциал не просто.

Наряду с общепризнанными преимуществами возобновляемых источников энергии—практически неисчерпаемостью и экологической безопасностью—они обладают двумя существенными недостатками, требующими решения комплекса научно-технических и социально-экономических проблем.

Первый из них—низкая плотность потоков возобновляемых источников энергии по сравнению с традиционными невозобновляемыми источниками.

Другой—это значительное сезонное и суточное колебание интенсивности солнечной радиации и отсутствие ее в течение части суток.

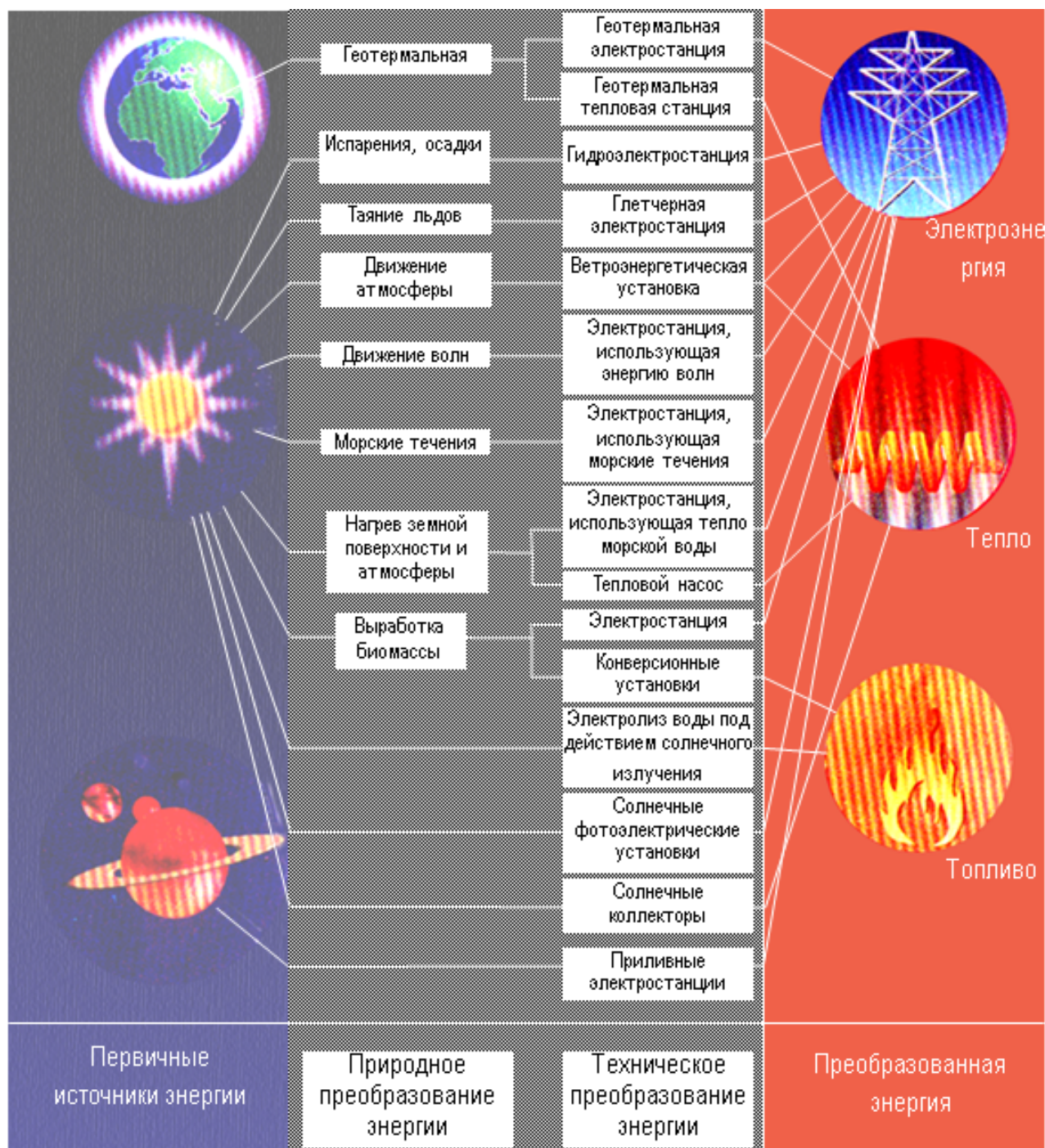


Рисунок 1 – Возобновляемые источники энергии

Выводы по вводной части.

Энергетический кризис 70-х годов двадцатого века показал, что мы должны пересмотреть свой подход к использованию природных ресурсов. Этот новый подход будет проявляться в увеличении внимания к ресурсосбережению, защите окружающей среды. Эксплуатация человеком природных ресурсов: лесов, земельных угодий, водоемов и земных недр до настоящего времени велась

безрассудно и расточительно. Пятьдесят лет назад даже в наиболее просвещенных кругах мало кто поддерживал концепцию ресурсосбережения. В настоящее время, к сожалению, у нас в стране немногие по-настоящему понимают губительные последствия сохранения традиций энергорасточительства.

Как показывает опыт, изменения в системах как производства, так и конечного потребления энергии, происходят длительное время. Влияние изменения в образе жизни потребителей на энергопотребление проявляется примерно через 10 лет. Для заметного повышения эффективности конечного использования энергии требуется 20 лет или более. Замена основного оборудования в системах энергоснабжения производится через 30–50 лет. Таким образом, 50-летняя перспектива как раз подходит для рассмотрения развития современных тенденций и решений в области энергетики. Это не означает, что необходимо заняться разработкой 50-летних планов. Как раз наоборот, с учетом текущего состояния нашей экономики достаточно бесперспективным выглядят попытки создания всеобъемлющих долговременных программ с жесткими сроками. Принимая любые решения в области развития энергетики, необходимо учитывать долговременные общегосударственные и мировые тенденции.

ГЛАВА 1

ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В КОСМОСЕ

Солнце – ближайшая к Земле звезда, центральное тело солнечной системы. Солнце, как звезда, является типичным желтым карликом, эффективная температура поверхности которого, определяемая по полному излучению, составляет 5762 К.

По современным представлениям, Солнце является непрерывно действующим термоядерным реактором, характеристики которого определяются в основном процессами превращения ядер водорода в ядра гелия. Энергия, выделяющаяся при этих процессах, нагревает вещество вблизи центра солнечной сферы (ядро Солнца) до температуры 20 млн. К. Перенос энергии из внутренних слоев Солнца наружу происходит, в основном, путем поглощения электромагнитного излучения, приходящего из более глубоко лежащих слоев, и его переизлучения, сопровождающегося постепенным увеличением длины волны излучения по мере понижения температуры при удалении от центра Солнца. Конвективный перенос во внутренних областях Солнца не играет заметной роли. Солнечное вещество удерживается силами гравитации, плотность вещества в центральных областях Солнца в 80÷100 раз превышает плотность воды. Этот термоядерный реактор – сферическое тело диаметром 1,39 млн. км. Масса Солнца составляет $2 \cdot 10^{27}$ т, что в 330 тыс. раз больше массы Земли. Солнце существует около пяти миллиардов лет. Каждую секунду 600 млн. т водорода в недрах Солнца превращается в гелий, однако масса Солнца так велика, что за миллиарды лет она уменьшилась лишь на доли процента. Суммарная мощность излучения Солнца по всем направлениям – $3,8 \cdot 10^{26}$ Вт.

СОЛНЕЧНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Земля движется вокруг Солнца по эллиптической орбите. Расстояние от Земли до Солнца меняется от $1,4710 \cdot 10^8$ км (январь) до $1,5210 \cdot 10^8$ км (июль). Средний угловой диаметр Солнца – 0,53 градуса.

Схематически изобразим взаимное расположение Земли и Солнца (не в масштабе, рисунок 1.1).

Количество энергии, которое приносится солнечными лучами за 1 с на площадку в 1 м², поставленную вне земной атмосферы перпендикулярно к солнечным лучам (интенсивность излучения), имеет сезонные изменения ($\pm 4\%$) вследствие эллиптичности орбиты Земли:

$$I = I_0 \cdot e_s, \quad (1.1)$$

где параметр

$$e_s = 1 - 0,034 \cdot \sin \Omega \quad (1.2)$$

называется коэффициентом эксцентricности орбиты; в предположении равномерности движения Земли по орбите, угол Ω равен:

$$\Omega = 2\pi n / 365; \quad (1.3)$$

здесь n – число дней, прошедших с момента весеннего равноденствия. Без учета поглощения и рассеяния излучения в атмосфере интенсивность излучения изменяется от 1,33 кВт/м² в июле, когда Земля наиболее удалена от Солнца, до 1,43 кВт/м² в январе, когда расстояние от Земли до Солнца минимально. Усредненная за год эта величина называется *солнечной постоянной*; она равна $I_0 = 1,36$ кВт/м². На самом деле плотность потока излучения, достигающего Земли, подвержена также хаотическим изменениям ($\pm 1,5\%$) вследствие флуктуаций потока энергии, излучаемого Солнцем.

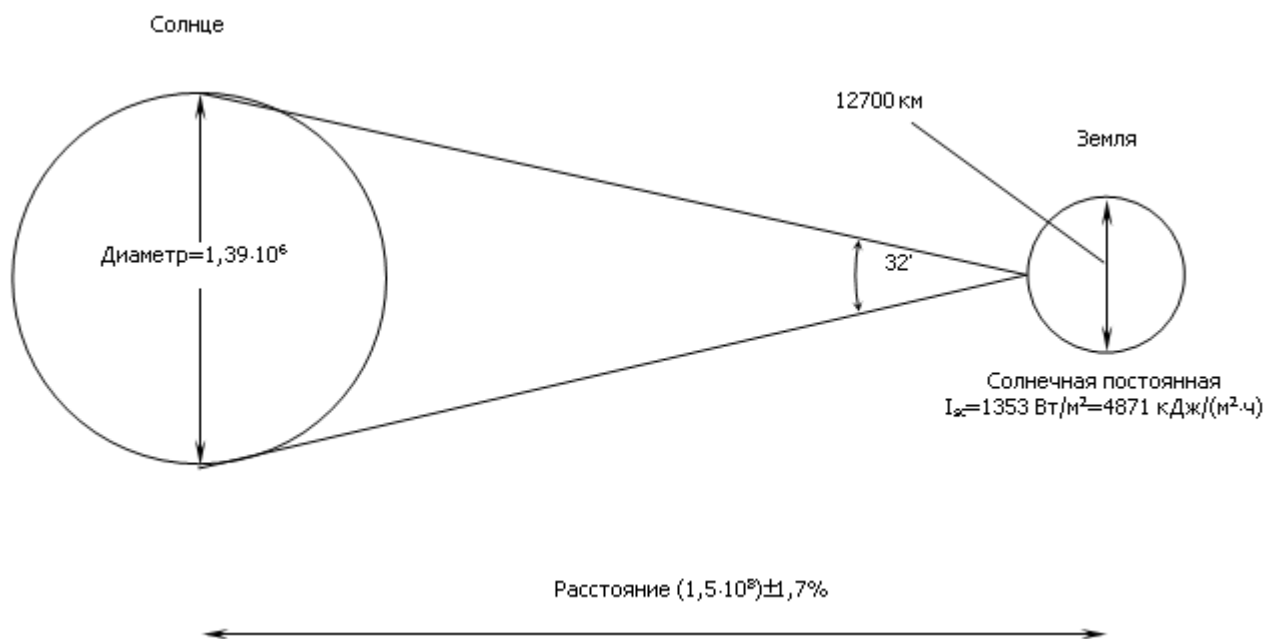


Рисунок 1.1 – Взаимоположение Земли и Солнца (не в масштабе)

Оценим поток энергии солнечной радиации, падающий на поверхность Земли.

Средняя мощность:

$$P = \pi \cdot R_s^2 \cdot I_0 \approx 17,2 \cdot 10^{13} \text{ кВт}, \quad (1.4)$$

где $R_s = 6,378 \cdot 10^6$ м – радиус Земли.

Энергия, поступающая за год: $Q = 8760 \cdot P \approx 1,5 \cdot 10^{18}$ кВт · ч./год.

Чтобы оценить масштаб этой величины, вспомним, что мировое потребление всех видов энергии в 2016 году составило 13500 М т н.э. = $1,57 \cdot 10^{14}$ кВт · ч.

Спектральное распределение излучения Солнца подобно распределению интенсивности излучения абсолютно черного тела, имеющего температуру

5762 К. Спектр солнечного излучения можно разделить на три основных области:

- ультрафиолетовое излучение ($\lambda < 0,4$ мкм) – 9% интенсивности;
- видимое излучение ($0,4 \text{ мкм} < \lambda < 0,7 \text{ мкм}$) – 45% интенсивности;
- инфракрасное излучение ($\lambda > 0,7 \text{ мкм}$) – 46% интенсивности.

Вклад в поток солнечной радиации излучения с длиной волны меньше 0,1 мкм и больше 2,5 мкм пренебрежимо мал (сумма не более 1%).

ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ПЛАНЕТЫ

Проходя через атмосферу Земли, солнечная радиация испытывает рассеяние и поглощение, вследствие чего величина потока солнечной радиации вблизи земной поверхности значительно меньше, чем на верхней границе атмосферы. Рассеяние происходит на молекулах воздуха, а также на различных частицах (пыль, капли воды и др.), содержащихся в атмосфере. Поглощение солнечной радиации обусловлено в основном водяным паром, озоном (в высоких слоях атмосферы) и пылью.

Справка: каменная оболочка – литосфера, водная оболочка – гидросфера, газовая оболочка – атмосфера.

В атмосфере выделяют тропосферу и стратосферу. Тропосфера простирается от поверхности Земли до высоты 16–17 км в тропических и экваториальных зонах, 8–12 км в умеренных и высоких широтах. Характерная особенность тропосферы – понижение температуры с высотой (в среднем 6 °С на каждый километр поднятия). В тропосфере находится почти весь водяной пар. Поэтому только в тропосфере возникают облака.

Стратосфера лежит (в зависимости от широты местности) между высотами 8–17 и 50–55 км. В стратосфере содержится озон. Поглощая ультрафиолетовую составляющую солнечной радиации, он нагревает воздух до температуры 0–10 °С. Поэтому температура в стратосфере повышается с высотой (инверсия).

Рассмотрим упрощенную схему потоков энергии вблизи поверхности Земли (рисунок 1.2). Будем считать, что все основные энергетические процессы усреднены, т.е. тепловые потоки равномерно распределены по поверхности Земли. Средняя плотность потока, падающего на Землю:

$$I = P/(4\pi \cdot R_s^2) = I_0/4 \approx 342 \text{ Вт/м}^2 \rightarrow \quad (1.5)$$

Солнечная радиация, попадающая в атмосферу Земли, частично отражается от ее поверхности и атмосферы, частично поглощается и переизлучается в окружающее Землю пространство в виде инфракрасного излучения атмосферы и поверхности. Убедимся, что числа, проставленные на схеме, свидетельствуют о том, что каждая из выделенных сфер оболочки Земли находится в энергетическом равновесии с окружающим пространством.

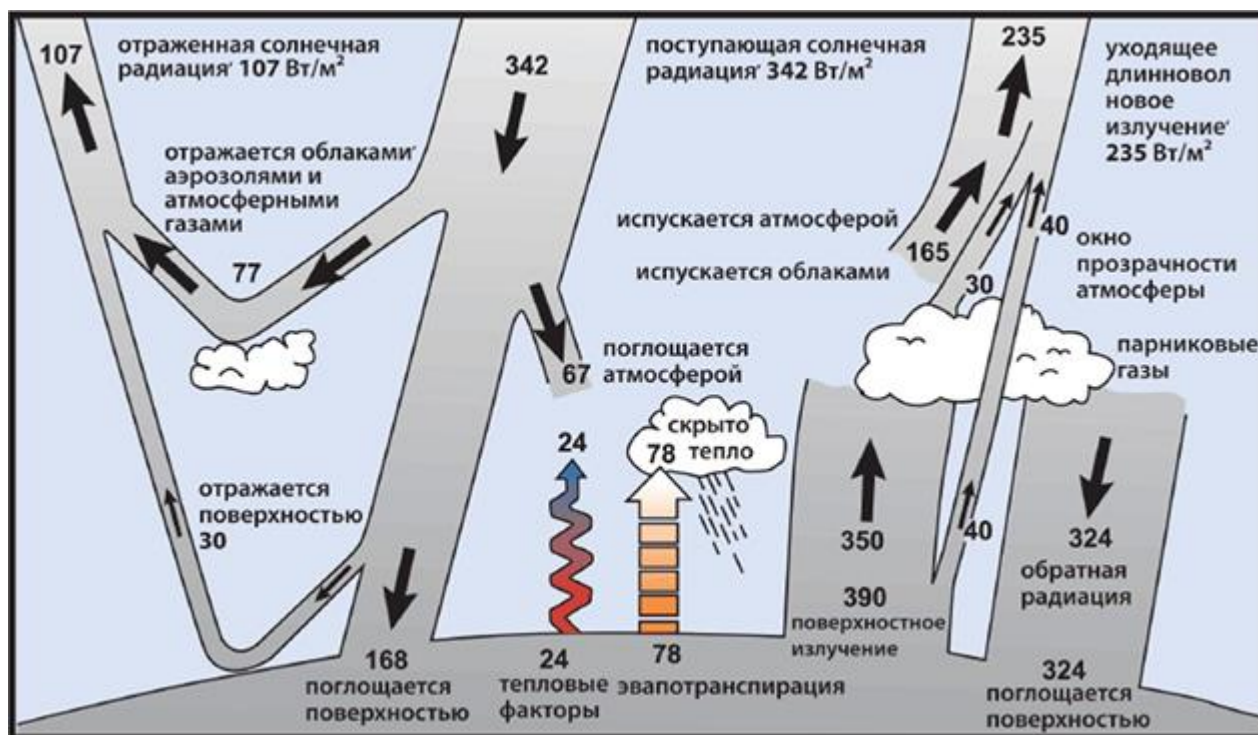


Рисунок 1.2 – Упрощенная схема энергетических потоков в атмосфере и поверхности Земли

Энергетический баланс (Вт/м^2):

I_i – поступающий поток энергии,

O – уходящий поток энергии.

Планета Земля:

$$I_i = 342$$

$$O = 107 + 235 = 342$$

Гидро- и литосфера

$$I_i = 168 + 324 = 492$$

$$O = 24 + 78 + 390 = 492$$

Полагаем, что в области инфракрасного спектра Земля испускает излучение как абсолютно черное тело, оценим среднюю температуру поверхности планеты.

Согласно закону Стефана – Больцмана энергия, испускаемая с единицы поверхности абсолютно черного тела в единицу времени (плотность потока энергии), равна:

$$\sigma \cdot T^4,$$

где $\sigma = 5,675 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/}(\text{м}^2\text{K}^4)$ – постоянная Стефана – Больцмана; T – температура поверхности.

Таким образом, подставив величину среднего потока инфракрасного излучения (390 Вт/м^2), получим:

$$T = 100 \times \left(\frac{390}{5,675} \right)^{\frac{1}{4}} = 289 \text{ K} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Средняя температура воздуха у поверхности Земли составляет по различным оценкам от 14,7 °С до 15,5 °С. Таким образом, простейшая модель дает оценку с удовлетворительной точностью.

Используя упрощенную модель, рассмотрим роль атмосферы в тепловом балансе планеты.

Перенос излучения в инфракрасной части спектра происходит в слое атмосферы высотой в несколько десятков километров, в котором сосредоточена практически вся ее масса. Измерениями установлено, что температура воздуха уменьшается с высотой. Учтем также, что длина свободного пробега инфракрасных фотонов мала по сравнению с высотой излучающего слоя атмосферы. Эти предположения позволяют выделить из реальной картины, изображенной на рисунке 1.2, наиболее важные элементы, определяющие тепловой баланс Земли (любой другой планеты). Эти основные элементы изобразим на рисунке 1.3.

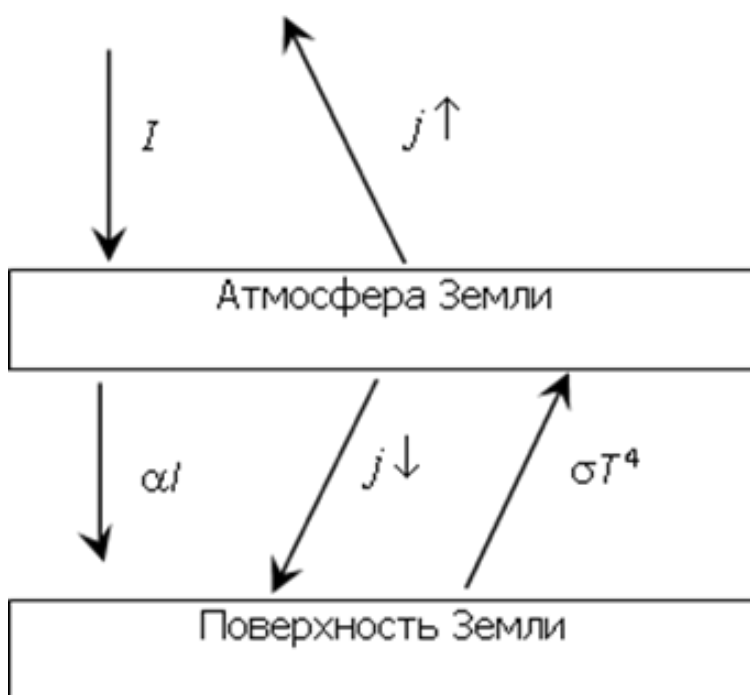


Рисунок 1.3 – Роль атмосферы в тепловом балансе планеты

Запишем уравнения баланса энергии для системы планета-атмосфера-окружающее пространство

$$\begin{aligned} j^{\uparrow} &= I, \\ \alpha \cdot I + j^{\downarrow} &= \sigma \cdot T^4, \end{aligned} \quad (1.6)$$

где I – плотность потока солнечной радиации, падающего на границу атмосферы Земли; $j^{\uparrow}, j^{\downarrow}$ – плотности потоков инфракрасного излучения атмосферы, посылаемых за пределы Земли и на ее поверхность соответственно; $\sigma \cdot T^4$ – плотность потока инфракрасного излучения, испускаемого поверхностью Земли; $\alpha \cdot I$ – плотность потока солнечной радиации, поглощаемого поверхностью Земли.

В связи с тем, что температура воздуха уменьшается с высотой

$$j^{\downarrow} > j^{\uparrow} = I,$$

имеет место неравенство

$$\sigma \cdot T^4 > (1 + \alpha) \cdot I, \quad (1.7)$$

так что температура поверхности Земли

$$T_s > (1 + \alpha)^{1/4} \cdot (I/\sigma)^{1/4}.$$

Теперь рассмотрим планету, лишенную атмосферы или имеющую атмосферу, прозрачную в инфракрасной области спектра. В этом случае закон сохранения энергии приводит к следующим соотношениям: $I = \sigma \cdot T^4$, т.е. $T = (I/\sigma)^{1/4}$.

Как видно, присутствие атмосферы, поглощающей (и излучающей) инфракрасное излучение, приводит к нагреванию поверхности планеты.

Явление повышения температуры внутренних слоев атмосферы и поверхности планет, обусловленное тем, что атмосфера более прозрачна для падающего солнечного излучения, чем для уходящего теплового излучения, называется *парниковым эффектом*.

По определению, парниковым эффектом называют разность между средней температурой поверхности планеты и её радиационной (эффективной) температурой теплового излучения, уходящего в космос.

Оценим величину парникового эффекта для Земли исходя из значений энергетических потоков, изображенных на рисунке 1.2.

Эффективная температура

$$T_3 = \left(\frac{(1-A) \cdot I}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = 100 \cdot \left(\frac{(1-0,31) \cdot 340}{5,675} \right)^{\frac{1}{4}} = 253 \text{ K} = -20^\circ \text{C},$$

где A – альбедо, или отражательная способность планеты ($A=107/342=0,31$).

Таким образом, парниковый эффект повышает температуру поверхности Земли на 35°C и играет первостепенную роль в формировании ее климата.

Используя упрощенную модель, оценим, при каких мощностях искусственных источников энергии влияние человека на климат Земли становится существенным. Будем считать, что заметное изменение климата соответствует изменению температуры поверхности планеты на 1 K .

Итак, наша задача – определить, какие мощности выделения дополнительной энергии (по сравнению с потоками, существующими за счет прихода